

中国可持续能源项目

大卫与露茜尔·派克德基金会
威廉与佛罗拉·休利特基金会
能源基金会
项目资助号: G-0811-10565



不同交通方式能耗与排放因子及其可比性研究

**Energy Consumption, Emissions and their Comparison
among Different Transport Modes**

研究报告

北京交通大学中国综合交通研究中心

2009年12月

Integrated Transport Research Center of China
Beijing Jiaotong University December, 2009

前 言

交通运输是国民经济的一个重要组成部分，对国民经济发展起着基础性、支撑性和服务性的作用，其特点决定了交通运输企业在提供客货位移的运输生产服务时，必然伴随着大量的能源消耗，也会带来生态环境的负面影响。我国经济正在经历高速增长期。经济的增长、城市化进程的加快及机动车保有量的迅猛增加，导致了交通运输需求和服务的迅速增加，使交通部门的能源消耗，尤其是石油产品消耗也在迅速增加。

在我国经济快速发展的过程中，交通运输能力扩张与能源约束的矛盾已经十分突出。交通方式运行的能源消耗是决定其适用性的重要依据，也是国家制订其发展策略的基础。发展综合交通体系已经成为各界都十分关注的焦点，而实现这一目标的基本前提，一是要准确了解交通运输能耗在国家整个能耗中的比例及发展趋势，二是要在可比的前提下准确把握不同交通方式的能耗因子。

目前，已有的针对交通运输能耗的相关研究，从宏观角度和定性角度的分析居多，另外各种数据来源繁杂，有时互相矛盾，缺乏可比性。很少从综合交通的角度，对不同交通方式的能耗因子及可比性进行研究。2008年12月，能源基金会批准了本项目（不同交通方式能耗与排放因子及其可比性研究）的资助申请（G-0811-10565）。在国家发展与改革委员会基础产业司等部门的支持下，北京交通大学中国综合交通研究中心组织人力对项目内容展开了研究。经过近1年的研究，我们提出了这份研究报告。

本报告的主要内容包括七部分：一是综述了目前交通领域能耗与排放的研究成果；二是关于中国交通能耗总量数据的统计与测算；三是中国铁路行业分客货运以及不同牵引方式能耗水平的详细测算分析；四是测算了公路交通未统计部分的车辆能耗以及营业性公路运输的能耗效率；五是分析比较了不同交通方式的能耗因子；六是对不同交通方式的排放因子进行了初步研究；七是总结了研究的主要结论并根据定量研究结果提出了促进我国交通行业节能减排的政策建议。

由于问题的复杂性，各部分的展开程度可能存在一定差异，这些需要在后续工作中不断深化和完善。

参加本项目研究的主要人员包括：

毛保华 北京交通大学教授

贾顺平 北京交通大学教授

孙启鹏 北京交通大学博士后研究人员，长安大学副教授

贾元华 北京交通大学教授

陈绍宽 北京交通大学讲师
刘智丽 北京交通大学讲师
刘 爽 北京交通大学博士后研究人员
郭谨一 北京交通大学博士生
柏 赟 北京交通大学博士生
周方明 北京交通大学博士生
马超云 北京交通大学硕士生
李 泉 北京交通大学硕士生
张笑杰 北京交通大学博士生
张铁映 北京交通大学硕士生
李 昂 北京交通大学硕士生
马 琳 北京交通大学硕士生
王冬博 北京交通大学硕士生

在研究过程中，得到了国家发展与改革委员会基础产业司的大力支持；同时，国家物资储备局局长（原国家发改委基础产业司司长）王庆云教授、国务院参事（原国家科技部秘书长）石定寰教授、国家发展与改革委员会基础产业司司长黄民教授、北京交通大学张国伍教授、综合运输研究所吴文化研究员、国家能源研究所周伏秋研究员与姜克隽研究员、北京市发展与改革委员会王玉明副处长、北京交通发展研究中心郭继孚教授级高级工程师、铁道部经济规划院李建新高级工程师、交通运输部交通规划院方然教授级高级工程师、建设部中国城市规划研究院马林教授级高级工程师、北京城市规划设计院郭春安教授级高级工程师、铁道部科学研究院李群仁研究员、中国地铁工程咨询公司刘迁教授级高级工程师、清华大学陆化普教授、中南大学李夏苗教授、交通运输部交通科学院江玉林研究员、英国利兹大学交通研究所陈海波主任研究员、香港理工大学电机工程系何天健副教授、日本广岛大学张峻屹副教授以及日本铁道综合研究所厉国权研究员等专家为本课题研究提供了大力支持。能源基金会的龚慧明先生、辛焰女士为本课题工作的开展也提供了许多帮助；课题组在此一并表示衷心感谢。

最后，课题组要感谢本报告中引用的全部文献的作者，正是他们的研究成果使得我们在该领域的认识能够得以深化。

课题组
2009年12月于北京交通大学
中国综合交通研究中心

目 录

1 交通能耗相关研究综述	1
1.1 交通能耗与社会经济关系研究.....	2
1.2 交通能耗统计指标与数据研究.....	4
1.3 交通能耗影响因素研究.....	7
1.4 交通能源需求量预测研究.....	8
1.5 不同交通方式能耗测算与比较研究.....	11
1.6 进一步研究的方向及框架.....	15
2 交通能耗总量数据统计与测算	19
2.1 交通发展统计指标分析.....	19
2.2 国内外交通能耗统计口径及差异分析.....	23
2.3 依国际口径对我国交通能耗数据的修正.....	35
2.4 国内外同口径交通能耗数据比较.....	44
2.5 主要结论.....	46
3 铁路能耗数据统计与测算	49
3.1 铁路能耗统计数据分析.....	49
3.2 影响铁路能耗的微观因素分析.....	52
3.3 铁路机车单耗测算模型.....	57
3.4 铁路运输能源效率及客货换算系数分析.....	68
3.5 主要结论.....	70
4 公路能耗数据统计与测算	73
4.1 公路能耗统计指标分析.....	73
4.2 影响汽车能耗的微观因素分析.....	78
4.3 公路能耗测算及数据分析.....	83
4.4 营业性公路运输能源效率及客货换算系数分析.....	90
4.5 主要结论.....	91
5 不同交通方式能耗因子比较研究	93
5.1 交通能耗因子指标定义.....	93
5.2 不同交通方式综合能耗因子比较.....	94

5.3 铁路与公路客货交通能耗因子比较.....	98
5.4 国内外不同交通方式能耗结构比较.....	99
5.5 主要结论.....	103
6 不同交通方式排放因子初步研究	105
6.1 温室气体与交通排放.....	105
6.2 世界交通运输排放现状.....	106
6.3 我国交通运输排放现状.....	108
6.4 不同交通方式排放构成分析与比较.....	111
6.5 不同交通方式排放因子确定方法与参考值.....	120
6.6 国外节能环保运输发展及对我国的启示.....	123
7 主要结论及政策建议	127
7.1 主要结论.....	127
7.2 政策建议.....	131
参考文献.....	134

1 交通能耗相关研究综述

交通运输是国民经济的一个重要组成部分，对国民经济发展起着基础性、支撑性和服务性的作用，其特点决定了交通运输企业在提供客货位移的运输生产服务时，必然伴随着大量的能源消耗，也会带来生态环境的负面影响。我国经济正在经历高速增长期。经济的增长、城市化进程的加快及机动车保有量的迅猛增加，导致了交通运输需求和服务的迅速增加，使交通部门的能源消耗，尤其是石油产品消耗也在迅速增加。IEA 能源统计显示，从 1971 年到 2001 年，交通部门的能源消费以每年 9.3% 的速度增长^[1]。从世界范围来看，交通运输作为能源消耗性行业，尤其是一次性石油能源消耗大户备受社会各界关注。

我国政府早在“六五”期间就开始注重节能工作，专门制定了节能五年计划和十年规划。1980 年后，提出“开发与节约并重，把节约放在优先地位”的方针，建立了能源三级管理网和能源统计指标体系。之后又制定了相关的标准，如《综合能耗计算通则（GB2589-90）》、《企业能耗计量与测试导则（GB6422-86）》等，并颁布实施了《节约能源法》。

在此背景下，交通运输行业于 2007 年颁布了《公路、水路交通实施〈中华人民共和国节约能源法〉办法》。2008 年制定了《交通行业节能中长期规划》确定了 2015 年和 2020 年的总体目标和主要任务，发布了《营运客车燃料消耗量限值及测量方法》（JT711-2008）和《营运货车燃料消耗量限值及测量方法》（JT719-2008）两个强制标准，开展了《交通运输行业能源消耗状况分析及能源标准体系建设研究》（分为三个子课题：公路运输行业能源消耗统计及分析方法研究、船舶运输行业能源消耗统计及分析方法研究和港口能源消耗统计与分析方法研究）。并在全中国范围内推出了若干个节能减排示范项目。

除此之外，各省交通行业也展开了许多能源消耗方面的研究。如 2008 年广东省交通厅开展了《广东交通行业节能减排统计、监测和考核体系的建立研究》等。

以上成果为研究不同交通方式能耗因子与比选奠定了良好基础。具体体现在：

- 第一，从政府和法律法规层面，确定了开展此项研究的重大意义和价值；
- 第二，为更好的把握我国不同交通方式的能耗水平提供了基础；
- 第三，为筛选不同交通方式能耗比选指标，构建其比选方法提供了参考。

不过，上述研究也存在一定局限，这些局限主要有：

- 第一，更多从宏观管理角度展开研究；
- 第二，受管理体制影响，重点关注每种交通方式自身；

第三，主要考虑了某个要素，缺乏系统性和整体性。

在我国经济快速发展的过程中，交通运输能力扩张与能源约束的矛盾已经十分突出。交通方式运行的能源消耗是决定其适用性的重要依据，也是国家制订其发展策略的基础。发展综合交通体系已经成为各界都十分关注的焦点，而实现这一目标的基本前提是寻求不同交通方式的能耗因子并建立比较平台，即建立不同交通方式能耗比较的指标体系和比选标准。因此需要重点对不同交通方式能源消耗的研究成果进行系统梳理，以提出不同交通方式能耗因子及其可比性研究应解决的科学问题。

1.1 交通能耗与社会经济关系研究

资源占用型和能源消耗型的交通系统，是国民经济的基础产业部门之一，为国民经济和社会发展提供了强有力的支持。鉴于能源越来越稀缺和其需求量越来越大的现实，以及随着经济的发展，交通能源消耗占总能源消耗的比例越来越大的状况，分析交通能源消耗和社会经济发展的互动影响关系就显得格外有意义。

夏晶等^[2]从交通能耗占全社会总能耗的比例、交通产值占全社会 GDP 的比例及其两者之间的比值等三个方面，整体分析交通能源消耗和经济发展的协调性。从交通能耗占总能耗的比例与交通产值占总 GDP 的比例之间的比值，中国的该比值小于芬兰、加拿大和美国，说明产生同比例的 GDP，中国交通业所消耗的能源最少；交通能源消费弹性系数是交通能源消费增长速度与国民经济增长速度之比，中国的全社会交通能源消费弹性系数处于较高位，说明中国的经济增长对交通能源的需求依赖于交通能源量的投入。

Orit Mindali 等^[3]针对交通出行和土地利用相互作用进行研究，一般观点认为城市密度和能源消耗之间呈强负相关性，密度增长将导致能源消耗的减少，而通过 Co-Plot 统计法，对城市密度和能源消耗关系进行实证分析，得到整个城市密度没有直接影响的结论。James Cooper 等^[4]考虑了环境可持续发展、交通运输和空间规划之间的关系，以及能源的合理利用，将常规交通模型、住房供应和能源评估方法结合在一起，提供了一个评价能源利用的公共平台。陆化普等^[5]分析了我国近年来交通能耗占能源消耗比例的变化情况，以及城市各种交通方式的能源消耗情况，指出城市交通结构体系的优化必须将能源消耗纳入模型体系中进行分析，建立了能源消耗约束下的城市交通结构体系优化模型。李夏苗等^[6]分析了煤炭、石油等能源生产量与运输量的关系，阐述了能源布局对交通运输布局的影响。吴宗鑫等^[7]概述了美国和日本的能源消费情况，通过比较我国和美国、日本在交通运输、工业、居民和服务业等领域用能的差异，指出未来交通运输用能将对我国整体能源消费产生重大影响，调整产业结构是我国建设节约型社会、降低能耗的主要途径之一。

交通运输的发展会为整个社会带来比自身收益大得多的社会效益，但交通运输采用

何种方式发展所产生的社会效益是不同的，同时不同发展模式的社会总成本也不同。由于交通运输的外部性特征，除了运输本身的成本之外，还存在外部成本，即交通运输导致的负的外部效应。

潘自强^[8]针对不同能源链外部成本进行了比较研究。所谓能源链的外部成本是指在能源生产和消费过程中没有考虑的对社会和环境的影响而产生的代价，这种损害在市场价格中没有反映出来，在市场过程中也没有得到补偿。外部成本可以用伤害评价方法估算，一般用“顶端向下”和“底部向上”的方法。在顶端向下的分析中采用高度综合的数据，这种方法对数据的要求相对较低，可以给出平均伤害代价的合理估算值。“底部向上”方法是从微观入手，采用污染扩散模式、受体分布的详细资料和响应函数，以推算相应的经济损失。

吕正昱等^[9]认为交通运输政策应关注能源安全问题，并将能源、环境、安全等外部成本纳入到交通运输的定价体系，从而在社会总成本的概念下建立更科学的综合运输系统构成方案的评价指标体系。他们在不同交通运输方式社会总成本的数学描述中，包括了能源成本，能源成本具体应由耗能指标、能源的可替代性、能源的生成和转化方式、能源的发展前景等因素构成，并重点分析了加入能源成本后不同运输方式中的运距—成本变化关系，如图 1-1 所示。

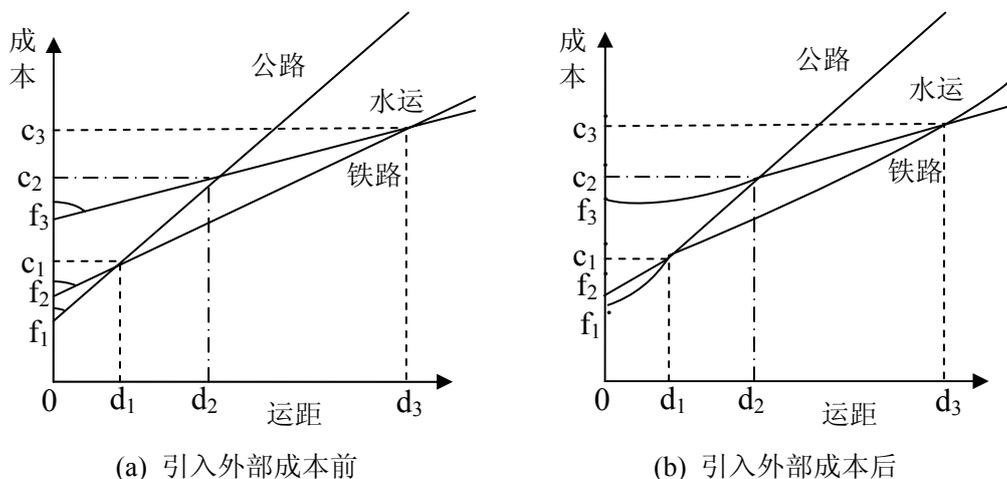


图 1-1 不同运输方式的运距成本关系图

将能源外部成本内部化之后，公路运输由于主要以石油等矿物燃料为动力，能源初期成本大大高于铁路运输，水路运输则介于两者之间；随着运输距离的增加，耗费的能源不断增多，由于能源本身的有限性和不可再生而必须付出额外的费用，使单位能源成本呈递增趋势。因此，加入能源成本使总成本与运距之间不再是原来的线性函数关系，不但初期总成本变大，而且单位成本出现曲线变化趋势。

1.2 交通能耗统计指标与数据研究

交通能源数据已经成为国内、国际高度关注的重要信息。准确、客观的交通能源数据可以为政府能源管理以及政策法规和规划的制订、实施提供信息支持；为能源生产者和消费者制订计划和投资决策提供依据；为学术界、公众研究和了解能源问题提供信息；对于交通能源统计数据指标的研究涉及面广，专业性、系统性和综合性强，是与能源技术经济、能源管理、交通运输相交叉的研究领域。

李连成等^[10]分析了历年来我国交通运输业（包括仓储和邮政）综合能耗占总体经济能源消耗的比例，以及其中不同能源形式（煤炭、电力、汽油、煤油、柴油、天然气）的比例，同时，分铁路、公路、水运、航空方式，研究了相关的运输周转量与能源消耗的关系。徐创军等^[11]通过对运输系统生态经济指标分析，将各种运输方式对土地占用、能源消耗、客运和货运周转量、污染物排放、环境危害、安全、便捷性等方面的影响进行比较，并应用灰色关联分析方法对不同运输方式进行了综合评价。

宋敏华^[12]认为城市轨道交通的能耗只相当于小汽车的 1/9，公交车的 1/2。因此，轨道交通本身就具有重要的节能减排意义。但轨道交通总耗电量仍有节能潜力。列车牵引供电系统和通风空调系统是轨道交通中最主要的用电大户，分别占到轨道交通系统总能耗的 1/2 和 1/3，节能潜力也相对最大。石静雅等^[13]在分析轨道交通能耗影响因素的基础上，按照轨道交通能耗指标的要求，建立了轨道交通能耗指标体系，以及指标体系的结构框架。

李显生等^[14]认为道路运输能源消耗统计指标中，由于周转量很难统计到准确的数据，百车公里应该作为统计总油耗量的重要指标；客车应按车辆长度、货车应按载重质量来分别建立能源消耗统计模型。同时李显生等^[15]运用统计学中的假设检验方法，对道路运输企业公营车辆与私营车辆的燃料消耗水平进行检验，结果表明，道路运输企业中公营车辆的燃料消耗水平与私营车辆的燃料消耗水平没有差异。刘莉等^[16]研究了公路运输能源消耗统计指标，主要包括两大类指标，即能源消耗总量指标和能源利用效率指标。其中能源消耗总量指标可以是分运输工具的能源消耗总量指标，也可以是分能源品种的能源消耗总量指标；能源利用效率指标则包含了能源效率指标（如百车公里油耗）和能源强度指标（如单位产量能耗和单位产值能耗等），同时对我国与部分发达国家的交通能耗统计指标进行了对比，如表 1-1 所示。

终端能耗数据是节能政策分析、预测、规划的重要依据。终端消耗定义为终端耗能设备入口得到的能源量，它等于一次能源扣除加工、转换、贮运损失和能源工业所用能源后的能源量。国际能源机构(IEA)能源平衡表的终端能源消耗部门划分为工业部门、运

输部门、其他部门和非能源产品消耗四大类^[1]，其中其他部门包括农业、商业和公共服务、居民和其他。中国能源平衡表与国际通行的能源平衡定义、统计口径、指标设置和计算存在较大差异。主要表现为：热电当量法终端能源消费量未扣除能源工业自用能源；公路运输用油只统计交通部门运营车辆用油，未统计其他部门和行业以及私人车辆用油；部门统计相互交叉，交通运输仓储及邮电通讯业包含了部分公共建筑能耗。

表 1-1 部分发达国家与我国的能耗统计指标比较

国别	美国	英国	日本	我国（现有）
调查指标	车辆数	车辆数	车辆数	车辆数
	车·英里	车·英里	车·公里	
	燃料消耗量 (百万加仑)	燃油消耗量	燃油消耗量	燃油消耗量
	人·英里	人·英里	人·公里	旅客周转量
推算指标	吨·英里	吨·英里	吨·公里	货物周转量
	平均每车行驶英里	平均每车 行驶英里	平均每车 行驶公里	
	平均每加仑行驶英里	平均每加仑 行驶英里		百车公里 燃料消耗量
	平均每车燃料消耗量			
	能源强度(Btu/人·英里)			百吨（千人）公里燃料 消耗量

王庆一^[17]在广泛收集国内外信息的基础上，按照国际通行的能源统计指标体系、定义、方法和规则，对于我国交通运输用油计算方法进行了修正，即除交通运输部门运营用油外，工业、建筑业、服务业消费的 95%的汽油、35%的柴油用于交通工具；居民生活和农业消费的全部汽油，居民生活消费的 95%的柴油用于交通工具。经过数据加工整理和综合集成，可以进行国内外的比较分析。研究表明，在分部门终端能源消费结构中，中国在交通运输行业的能源消耗比例与其他国家和地区相比处于较低的水平，参见表 1-2。分品类的能源消耗部门结构参见表 1-3、表 1-4、表 1-5、表 1-6。

表 1-2 世界分地区、分部门终端能源消费结构（2006 年） 单位：百万吨油当量(Mtoe)

	总消费量	分部门消费量			
		工业	运输	民用/商业/农业	非能源用途
中国	978	526(53.8)	126(12.9)	225(23.0)	99.5(10.2)
美国	1572	281(17.9)	649(41.3)	482(30.7)	161(10.2)
欧盟(25)	1282	309(24.1)	372(29.0)	489(38.1)	112(8.7)
日本	352	102(29.0)	91.1(25.9)	120(34.1)	38.3(10.9)
OECD	3824	866(22.6)	1300(34.0)	1272(33.3)	386(10.1)
世界总计	7007	2062(29.40)	2037(29.1)	2169(31.0)	740(10.5)

注：括弧内为所占比重(%) 来源：王庆一，中国可持续能源项目参考资料-2009 能源数据，2009 年 10 月

表 1-3 中国分品种交通运输能源消耗量

	1990	1995	2000	2005	2006	2007
成品油/Mt	32.39	52.85	84.08	141.36	147.19	158.92
其中：汽油	18.43	25.25	34.15	50.73	51.44	51.16
柴油	10.95	19.82	36.07	64.43	72.93	82.56
煤油	0.93	2.5	5.36	8.82	10.01	11.3
燃料油	2.08	2.28	8.5	16.11	12.81	13.9
电力/TWh	10.48	14.99	19.6	43.03	46.74	53.19
天然气/Mm ³	190	160	580	1643	1724	1689
煤炭/Mt	10.58	9.77	8.15	8.15	7.25	6.88
总计/Mtce	56.51	86.41	132.11	212.72	244.06	273.2

注：1、交通运输用油计算方法：除交通运输部门营业用油外，工业、建筑业、服务业消费的 95%的汽油、35%的柴油用于交通工具；居民生活和农业消费的全部汽油、居民生活消费 95%的柴油用于交通工具。2、农用三轮车和低速的货场用油未计在内。2007 年，这类汽车耗用柴油 9.09Mt。3、消费总量中，电力按热功当量计算。4、交通运输用电中，2007 年电气化铁路 248 亿 kWh，管道 32 亿 kWh，城市公共交通 27.5kWh、煤炭主要用于铁路车站等建筑采暖以及辅助生产供热。铁路牵引已不用煤。

来源：同表 1-2

表 1-4 中国分部门终端用电量

单位：10 亿千瓦时

	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008
全社会终端用电量	514.76	841.03	1158.49	2448.61	2448.61	2818.33	2985.94
农业	41.53	61.02	70.89	83.16	83.16	86.34	87.93
工业	326.88	604.19	791.35	1759.24	1759.24	2052.69	2139.98
交通运输	10.48	18.17	26.14	46.74	46.74	53.17	57.02
民用	46.14	100.46	167.18	323.99	323.99	360.83	408.21
商业	7.7	19.01	40.17	84.73	84.73	93.43	101.68
其他	19.85	37.77	62.74	134.09	150.75	171.86	191.11

注：1、终端用电量=发电量—（厂用电量+线路损失量）

2、工业包括地质勘探和建筑业；交通运输包括邮电通信业，2005 年起包括邮政业

来源：同表 1-2

表 1-5 中国煤炭消费量及结构

	1990		2000		2005		2006		2007	
	Mt	%	Mt	%	Mt	%	Mt	%	Mt	%
发电	272.0	26.8	558.1	42.3	1031.0	48.8	1187.6	46.9	1305.5	50.5
电厂供热	30.0	3.0	87.9	6.7	135.4	6.4	145.6	6.1	153.9	5.9
炼焦	107.0	10.5	165.0	12.8	316.7	15.0	374.5	15.7	415.6	16.1
制气	3.6	0.3	9.6	0.7	12.8	0.6	12.6	0.5	14.7	0.6
工业	362	35.7	377.7	28.6	480.4	22.8	541.0	22.6	586.6	22.0
交通运输	21.6	2.1	11.3	0.9	8.2	0.4	7.2	0.3	6.9	0.3
农业	21.0	2.1	16.5	1.2	23.2	1.1	23.1	1.0	23.4	0.9
民用	167.0	16.5	79.1	6.0	87.4	4.1	83.9	3.5	81.0	3.1
商业和其他	30.4	3.0	14.8	1.1	164.	0.8	16.7	0.7	16.8	0.6
总计	1014.7	100.0	1320.0	100	2111.	100.0	2392.0	100.0	2586.4	100.0

来源：同表 1-2

表 1-6 中国天然气消费量及结构

	1990		2000		2005		2007		2008	
	亿 m ³	%								
化工	48.5	31.8	90.3	36.8	154.4	32.2	223.4	32.1	172	22.1
发电	2.8	1.8	8.2	3.3	18.8	3.9	70.8	10.2	143	18.3
工业	79.5	52.1	104.3	42.6	182.1	38.0	217.5	31.3	206	26.4
交通运输	1.9	1.3	5.8	2.4	16.4	3.4	16.9	2.4	258	33.2
民用和商业	19.8	13.0	36.4	14.9	107.4	22.4	166.6	24.0		
总计	152.5	100.0	245.0	100.0	479.1	100.0	695.2	100.0	779	100.0

来源：同表 1-2

彭家惠等^[18]以重庆市为例，通过国际通行的能源平衡准则和重庆市能源统计的具体情况建立模型，分析了重庆市终端能源消耗结构，计算了终端能源消耗量。吴文化^[19]通过列举中国、美国、日本近三十年交通运输业能耗情况，对比分析得出结论，同为发达国家的美国与日本，目前交通运输能源消费量占本国能源消费总量的比重大体为 1/4 以上（美国略高一些），其中道路交通工具能耗占运输总能耗的比重均在 80%以上（日本略高一些）。2005 年中国各类交通运输工具能源消费占全部能源消费总量的 16.3%，比美国低 11 个百分点，比日本低 8 个百分点，并分析了由于中国相关统计原因造成的能耗数据的差异。

1.3 交通能耗影响因素研究

由于人类的任何经济活动都要从自然界中获取自然资源，所以都会对地球自然生态系统产生影响，并受其制约。生态足迹是一种资源利用分析工具，它用生态生产性土地来表示人类对自然资源的消费，从而对人类活动的可持续性做出评价。生态足迹是指生产一定人口所消费的资源 and 吸纳这些人口产生的废弃物所需要的生态生产性土地的总面积，将其与该地区的生态能力相比较，可以判断该地区的发展是否处于生态承载力的安全范围之内^[20]。交通运输是人类的一种重要经济活动，它通过占用与消耗土地、能源等自然资源，为人类提供货物与旅客的空间位移等产品和服务。交通生态足迹(transportation ecological footprint)是定量测度和评价交通对各类自然资源消耗及其可持续发展程度的有效指标。依据生态足迹的概念，交通生态足迹可大概界定为：支持某区域内一定量的交通运输活动所需的生态生产性土地面积。李艳梅等^[21]根据生态足迹方法，计算和分析了中国 1985 年-2001 年的交通生态足迹。结果表明：交通生态足迹的构成中以化石能源地生态足迹为主，而且两者均呈现出不断提高的变化趋势。化石能源消耗及其燃烧所排放的温室气体将成为交通可持续发展的重要制约因素。曹淑艳等^[22]采用生态足迹模型与分解分析模型，定量核算了 1990-2005 年北京市能源消费的生态影响变动趋势以及影响因素。结果表明，近 15 年来，北京市能源足迹在区域生态压力中的贡献份额高达 80%，且 99%来源于化石能源燃烧，北京市能源足迹总量与人均量均呈增加趋势。

马天山等^[23]认为交通运输行业的能源消耗主要包括两部分，一部分是交通运输生产前期准备的能源消耗，即交通运输基础设施建设的能源消耗(路网、站场、信息设施建设等)，这部分能源消耗既包括相应原材料生产时的消耗，也包括建设施工时的消耗；另一部分是交通运输生产过程的能耗，即交通运输工具运行过程的能源消耗，这一部分的消耗主要以石化能源消耗为主。总体而言，交通运输生产过程的石化能源消耗要远远高于其生产前期准备的能源消耗。高有景^[24]结合我国公路运输行业的特点，分析了影响公路运输能源消耗的主要因素，包括公路条件、车辆特性、交通流条件以及驾驶员的操作水平、交通管制等。Parviz Amir Koushki^[25]量化研究利雅德家庭机动化出行的燃油消耗增长，弹性计算显示燃油消耗、日机动化出行量和家庭规模之间存在着重要的联系，当燃油价格上升时，日出行量减少，且规模较大的家庭出行量减少更多。张树伟等^[26]通过建立交通能源消费分解模型，分别研究了交通部门的服务量水平 VA（人公里/吨公里）、交通模式的份额 SV（%）、能源消费强度 EI（吨石油当量/人（吨）公里）这三个因子对交通部门能源消费总量 E（吨石油当量）的贡献。对 1980 年-2001 年交通能耗的因子贡献进行了测算。结果表明，服务量的增长是能源消费增长的主要驱动力，同时运输结构的变化加剧了这种增长，过去实现的能耗强度降低不足以抑制能源消费的增加，而近年来能耗强度更显示出增加的趋势，交通石油消费增长趋势不可避免。

1.4 交通能源需求量预测研究

交通能源消费是一个国家能源消费非常重要的组成部分。预测交通能源需求，常用的方法是采用经济计量模型，或者采用“两步法”，即首先预测交通能源需求的驱动力—交通需求量，然后再预测相应的能源需求；另外情景分析方法也开始得到广泛应用，所谓情景，既不是预言，也不是预测，它只是展示了未来可能的发展方向，是对未来的发展前景进行构想，确立某些希望达到的目标，然后再来分析达到这一目标的种种可行性及需要采取的措施。

朱松丽^[27]对国内外普遍应用的预测交通需求和交通能源需求以及机动车保有量的方法进行了回顾、总结和比较。这些方法被分成两大类：集合模型和非集合模型。前者将出行行为看作一种平均的行为，主要用来预测宏观和长期交通能源需求，最常用的模型是经济计量模型；后者建立在效用理论的基础上，更注重家庭和个人的选择，主要预测微观和短期的交通能源需求和评价交通政策，通常使用的模型是逻辑模型和预算模型。Kebin He 等^[28]建立了一个自下而上模型，评估 1997 年至 2002 年中国道路交通石油消耗和二氧化碳排放，设计了三个情景并在预测未来石油使用和二氧化碳排放中考虑了机动车燃油经济性的提高，结论显示，在未来的二十年里，道路交通将逐渐成为中国最大的石油消耗部门。

LEAP 模型是由斯德哥尔摩环境研究所与美国波士顿大学（SEI. Boston）共同开发

的一个自下而上的计量经济模型，它可以根据终端用能的变化设置不同情景进行预测分析。朱跃中^[29]将交通运输系统分为城市客运、城间客运、货运三部分，城间客运与货运主要通过公路、铁路、水路、航空以及管道等运输方式来完成，城市客运主要由道路交通和地铁（轻轨）等方式完成，采用 LEAP 模型预测分析了在未来不同情景下，城间客运、货运及城市客运的能源消费需求。Ranjan Kumar Bose^[30]利用 LEAP 软件建立了德里城市客运模型，从客运出行需求、方式、车辆类型和占有率角度体现了各种交通形式，形成了交通需求和能源消耗计算的基础，通过五个设定的情景分析，研究了减少能源需求和排放的不同交通政策的影响。黄成等^[31]以上海城市交通为背景，根据交通工具的属性，将城市客运交通分为私人交通、商务交通和公共交通三个部门。私人交通包括私人轻型客车、助动车、摩托（包含轻便摩托车）、自行车；商务交通指商务轻型客车和重型客车；公共交通指出租、公交巴士以及轨道交通。在此基础上，结合不同交通出行方式的交通需求量、能源强度和排放因子，应用 LEAP 模型计算交通运输的能源需求及大气污染物排放量。其中，各出行方式的能源强度是模型的重要参数。能源强度是指机动车担负 1 个乘次或 1t 货物行驶 1km 的能耗，单位为 L/乘次·km 或 L/t·km。文中采用的能源强度见表 1-7。

表 1-7 主要交通方式的能源强度

交通方式	能源	能源强度 (L/乘次·km)
助动车	汽油	0.035
	液化石油气	0.021
摩托车	汽油	0.034
轻型客车	汽油	0.050
出租车	液化石油气	0.142
重型客车及巴士	汽油	0.016
	柴油	0.014
轻型货车	汽油	0.145
	柴油	0.133
重型货车	汽油	0.070
	柴油	0.065
轨道交通	电力	0.176

注：轨道交通能源强度单位为 106 焦耳/乘次·km

李道清等^[32]根据虚拟变量法的原理，利用我国交通能源消费的历史数据，建立了我国未来交通能源消费系统的预测模型。选取民用汽车保有量（Ant）、旅客周转量（PKt）和货物周转量（FKt）作为解释变量，以交通能源消费量（TRECt）作为被解释变量，建立包括虚拟变量的多元回归模型来分析和预测交通能源消费量：

$$\begin{aligned} TREC_t &= TRECP_t + \mu_t \\ &= C_0 + C_1 * PK_t + C_2 * FK_t + C_3 * AN_t + C_4 * D_t + C_5 * PK_t * D_t + C_6 * FK_t * D_t + C_7 * AN_t * D_t + \mu_t \quad (1-1) \end{aligned}$$

其中：TRECP_t 为 TREC_t 的预测量；μ_t 为包含其它解释变量的随机误差项。

在上述模型中， D_t 的取值为 0 或 1，0 代表没有发生结构变化，1 代表发生了结构变化。若取 0，预测模型变为：

$$TREC_t = C_0 + C_1 * PK_t + C_2 * FK_t + C_3 * AN_t + \mu \quad (1-2)$$

若取 1，预测模型变为：

$$TREC_t = C_0 + C_4 * D_t + (C_1 + C_5 * D_t) * PK_t + (C_2 + C_6 * D_t) * FK_t + (C_3 + C_7 * D_t) * AN_t + \mu \quad (1-3)$$

模型经过了 t 检验和 F 检验，表明模型设定是正确的。将 1980 年~2001 年的预测结果与实际值进行比较，预测值非常接近实际值，其残差很小，表明模型的预测精度比较高。该模型验证了我国交通能源消费系统中结构性变动的存在，并应用所建立的模型对 2010 年前我国交通能源消费量的高、中、低三种情景进行了预测。

陶冶等^[33]提出了一种中国交通可持续能源税收政策研究分析法。该方法以系统动力学为基础，考虑了能源价格、利率、能源税率、能源削减边际成本等因素对节能项目投资愿意的影响。通过确定最佳能源削减约束目标和为实现约束目标所采取的税率实施方案，研究未来中国交通能源消耗总量、交通能源消费的环境影响以及能源价格等的中长期发展情况。张晓东等^[34]将组合预测法应用于我国交通能源需求量的预测，以提高预测精度。通过赋予合理权重，将误差修正模型、非线性回归模型和多元回归模型加权组合建立组合预测模型，对各模型进行平均绝对百分误差 (MAPE)、希尔不等系数 (Theil IC) 和均方根误差 (RMSE) 等指标的比较，证明单一模型经过组合能够提高预测精度。杨洪年^[35]研究了铁路、公路、水运、航空不同交通运输方式的能源消耗需求量，通过对历史数据的分析，包括不同方式货物周转量、旅客周转量、能源消耗量等，结合对未来发展的分析，预测研究了 2010 年、2020 年不同交通运输方式的能源消耗量。Skeer 等^[36]通过分析中国客货运交通的发展趋势，同时基于需求弹性和能源强度的假设，设计了 2020 年中国石油需求情景，将中国交通部门的石油需求增量与世界能源需求预测对比，评价其可能对世界油价造成的压力。研究发现，参考情景下中国交通部门的能源需求将使世界石油价格增长 1-3%，如果石油供给投资受到限制，这个比例将变为 3-10%。

在城市化过程中，城市交通能源正承受着严峻的考验。城市交通的迅速发展已成为近年来推动我国石油需求增加的最重要的原因之一。如何解决城市交通能源系统中存在的诸多问题，实现城市交通能源系统的可持续发展，已成为关系城市交通能否实现可持续发展的一个重要课题。

杨富强^[37]在对比分析我国和其他主要国家人均能源消耗和一次能源构成的基础上，从城市立法、强制性的环保法规和标准、规划制定和定期修改、制定能效标准和标识、财政和税收政策、公共效益资金、推行节能新机制、加强技术研发，鼓励技术示范、政府采购、公众宣传等方面阐述了政府政策的作用。王伟^[38]在城市交通系统可持续发展规划框架研究中，将城市交通系统能源消耗分析与预测作为其中的关键技术之一，提出了今后的工作重点：

①研究城市公共汽车、无轨电车、有轨电车、轻轨、地铁、摩托车、出租车、单位大小客车、货车等的人均每公里（或吨货物每公里）出行能源（电、油、煤气或其他能源）消耗与城市规模、道路条件（纵坡及路面类型）、交通流量（拥挤度）、行车状态（车速及交叉口加减速、停车次数）等的相关关系，建立常用交通方式的能源消耗模型；

②基于以上研究结果，研究不同性质、规模的城市在不同交通方式结构及不同交通总体负荷水平下的城市交通总体能源消耗预测模型；

③研究先进国家已采用的低能耗交通方式在中国应用的可行性。刘恒伟等^[39]提出了以满足交通能源需求、改善环境质量、优化资源利用为目标的可持续城市交通能源规划理论框架。可持续城市交通能源规划就是在对城市交通能源系统的历史和现状充分调研和分析的基础上，编制不同发展水平的交通发展构想方案，进行能源需求预测，提出能源供需平衡方案，并制定相应保障措施的过程。

朱兆芳等^[40]重点对大城市交通节能降耗对策进行了研讨，提出道路设计理念要更新，道路设计规范、标准要调整更新，对照道路交通设计进行了反思。张卫华等^[41]认为节省能源不仅要改进汽车自身的性能，还应研究城市道路交通条件及设施对汽车燃油消耗影响的规律，分别从城市土地利用、交通方式结构、道路交通规划和交通管理几个方面论述降低城市交通能源消耗的策略。

1.5 不同交通方式能耗测算与比较研究

不同交通方式的能源消耗研究，研究成果主要有以下几个方面：

用能耗总量或单位能耗，描述某个区域交通能耗水平和结构。如王逢宝^[42]运用统计数据，选取每人公里的汽油、标准煤、焦耳热量三个指标比较了巴黎和澳大利亚城市公交和小汽车的能耗。王文俐^[43]提出，1992年美国货运铁路公司使用了30亿加仑柴油，仅占全国交通运输业石油消耗总量的2%，旅客列车占不到0.1%，公路拖挂卡车（在各类卡车中居多数）使用了170亿加仑柴油，占整个交通运输石油消耗总量的11.1%，但只承运了铁路运输周转量的2/3。1991年美国运输部在卡车与铁路货运列车相比较的研究中，对铁路的优越性进行了定量分析。研究表明，视承运货物的不同，货物列车的燃油效率是卡车的1.4-9倍，平均在3倍左右。铁道部节能办公室姜正才给出了我国铁路运输的消耗水平。我国铁路年消耗能源24M标准煤，约占全国能源消耗总量的2.4%。1981~1993年，铁路消耗能源总量311.86Mt标准煤，其中原煤314.38Mt，燃料油27.34Mt，电力726.7×108kw·h。其中，运输系统消耗能源总量278.04Mt标准煤，占铁路总消耗量的89%；铁路工厂系统消耗能源23.15Mt标准煤，占7%；铁路工程系统消耗能源12.44Mt标准煤，占4%。另外，据统计每百公里的人均能耗，公共汽车是小汽车的8.4%，电车为3.4%至4%，地铁为5%。

蔡凤田^[44]用统计数据比较了公路运输、水路运输、港口生产的能耗水平（单位：万吨标煤）、描述了公路运输客车、货车的汽油、柴油消耗量（单位：升/百吨公里或百人公里），并与美国、日本等国进行了比较，分析了常见汽车技术故障对汽车油耗的影响程度。李显生^[15]等运用数理统计的方法，用百公里柴油消耗量指标比较了公路运输企业公营车辆和私营车辆的能耗。石静雅^[13]等分析了城市轨道交通能耗的影响因素，并选取相关指标对不同线路的城市轨道交通能耗进行比较。指标为：

- (1)客流量能耗指标。年（月）“总耗电量/客流总量”，单位：度/人次；
- (2)车辆周转量指标。年（月）“总耗电量/车辆运行总里程”，单位：度/车.km；
- (3)客运周转量指标。年（月）“总耗电量/客运周转总量”，单位：度/人.km；
- (4)车站动力能耗指标。年（月）“总耗电量/（站×天）”，单位：度/站.天；
- (5)运输质量指标。年（月）“总耗电量/（车辆运行质量×里程总量）”，单位：度/t.km。

史茂^[45]通过计算车站作业时间增加、途中停车和减速、驾驶员操作不当等带来的燃油增加，分析了铁路机车能耗增加的原因及对策。高有景^[24]从公路条件、车辆特性、交通流条件、其他因素分析了影响公路运输能耗的因素。李鲲鹏^[46]等认为评价轨道交通系统的能耗指标为单位人公里能耗（kW.h/(人.km)），不应就某一个子系统的转换效率来评价整个系统的能耗。如果采用必要的措施，直线电机轨道交通系统的能耗不一定高于旋转电机轨道交通系统能耗。

如何在铁路运输中有效地使用能源，如何优化各种交通工具的配置，降低能耗，保护环境，这些问题在近年来引起了国内外研究学者的广泛关注。

Hoyt 等^[78]将影响铁路能耗的因素分为列车属性、地理属性以及其他的不可预测的变化因素等，但是没有考虑轨道的类型、限制速度、停站方案和司机行为等因素。IFEU 和 SGKV^[79]认为计算铁路燃油时应考虑机车牵引类型、列车编组信息、线路属性、司机操作方式和空气的阻力等影响因素。Lukaszewicz^[80]根据对瑞典铁路的统计数据认为铁路运输能源消耗量主要受轨道线路参数、铁轨类型、机械和物理参数、乘务员驾驶策略以及外部因素的影响如风和气候等因素影响，并在其博士论文中根据牵引力、速度、加速度、惰行率、机车转换效率和车轮半径、传动比公式等参数提出了估算列车能耗的方法，可适合于不同类型的列车和轨道的效率。EC^[81]认为在计算列车能耗时，稳定的负荷、速度和停靠站数量是重要参数，Jorgenson 在 1998 年就已经使用了类似的方法来评估铁路燃油消耗量。

Meibom^[82]对列车运行过程中的能量流以及传输效率进行了分析。如图 1-2 所示，发动机对能耗的影响较大，因为其决定了车辆所用的燃料类型以及能量转换效率，同样，在传输过程中能量损失即机车传动效率也会影响其运行过程中的总能耗。根据该研究的统计分析，列车辅助设备运行耗能如空调、照明等占总能耗的 20%，机车用于克服空气

阻力和制动导致的动能损失的牵引有效能耗约占总能耗的 13%,其余大部分能耗损失在发动机及其他驱动设备中。

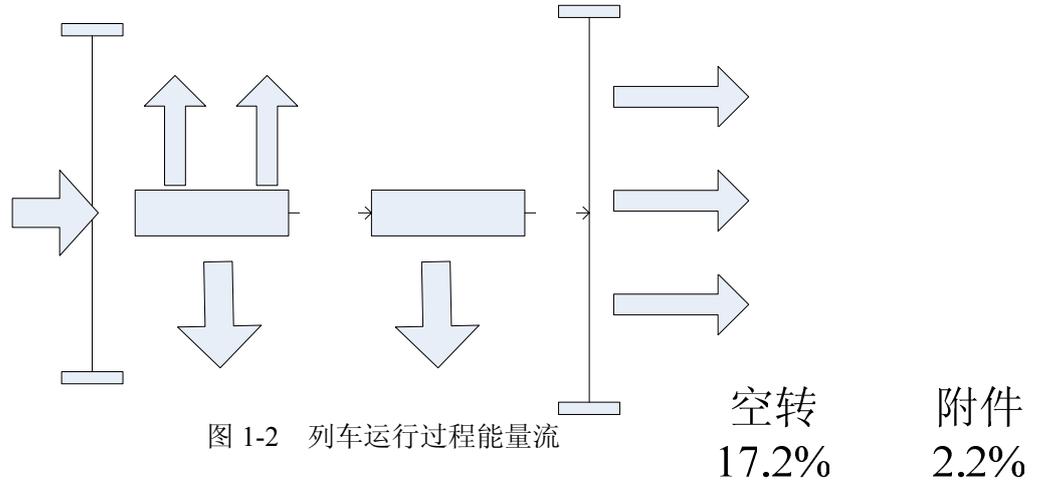


图 1-2 列车运行过程能量流

宾夕法尼亚大学的 Kraay 等^[83]提出了一个基于克服阻力和动能变化所需的功率来计算能耗的模型,其中阻力因素包括坡度、曲率半径、列车质量、空气摩擦、轨道摩擦和速度。在计算能耗的时候,由于列车和轨道型号的不同而采用不同的参数。

IFEU 和 SGKV^[79]曾提出过一个关于列车能耗的简化计算方法,即用一个关于列车质量 M_{train} 的方程来计算列车每运行一千米的能耗 EC_{train} 。

$$EC_{train} = 3 \text{量} * M_{train}^{0.6} \tag{1-4}$$

其中, EC_{train} 单位为 wh/km ; M_{train} 单位为吨。但这个模型过于简化,对其他能耗影响因素如线路条件、列车属性和运行速度变化等因素缺乏考虑。

根据列车运动方程可知,速度是影响列车运行能耗的主要因子之一。1999年,EC^[81]提出了基于平均速度和停靠站间距离的列车能耗估算公式,并且通过特定线路和机车对公式中常量进行了校正,基本形式如下:

$$E = k * V_{avg}^2 / \ln(x) + C \tag{1-5}$$

式中, E 表示能耗量,单位为 $KJ/t \cdot km$; k 和 C 表示与列车有关的常量; x 表示停靠站间的距离,单位 km ; V_{avg} 表示平均速度,单位 km/h 。

EC^[81]还提出了另一种既定牵引定数的列车能耗计算方法,即对于一个给定的线路,能耗计算公式为停靠站数量 $N_{停}$,海拔变量 Δh ,列车能耗可表示为平均速度、最大速度、运输距离等参数的多元方程,即:

$$E = (N_{停} + 1)/(2 * L) * V_{max}^2 + B_0 + B_1 * V_{avg} + B_2 * V_{avg}^2 + g * \Delta h / l \tag{1-6}$$

其中, B_0 、 B_1 、 B_2 表示与列车有关的常量; L 表示运输距离。该模型比较适用于停靠站较少、加减速不是很频繁的情况。

近年，国内研究学者对铁路运输能耗问题也日益关注。李连成^[84]等分析了我国铁路运输能源消费现状与利用效率，并对中远期铁路运输能源消费进行了预测，认为2010年国家铁路机车消耗能源将达910万吨标准煤，估算全国铁路行业消耗煤炭2400万~2500万吨标准煤。中国铁道科学研究所的薛艳冰等^[85]认为列车牵引能耗主要受机车属性、线路属性、运输种别、编组信息及其他相关因素的影响。其中，机车属性包括机车的运行阻力、发动机功率和能耗利用效率等因素。车辆属性包括车辆的自重、基本阻力计算参数和载重等因素。运输种别包括客运、货运、小运转、专用调车和其他运输等因素。编组信息主要包括编组辆数、空重车数和牵引总重等。运行状态是指列车的起停、牵引运行、制动、惰行等运动状况。线路属性包括径路里程、线路坡度、曲率半径等因素。其他相关因素包括司机操作方式；由地区差异引起的海拔高度、气候、气压变化等。

列车节能运行研究也是近期的研究热点，按研究角度划分可分为三类。丁勇^[86]、金炜东^[87]、韩长虎^[88]、柏赞^[89]等从优化机车操纵降低行车能耗的角度出发，研究了列车节能运行优化操纵模型并提出了相应的求解算法，并研制了基于列车动态运行信息的列车优化操纵实时控制系统。彭其渊^[90]等从运营组织管理的角度提出了基于运输总能耗的运行图模型。胡万玲^[91]、陈焕新^[92]对目前我国列车空调的现状进行了分析对列车空调的节能途径进行了探讨。

我国铁路运输能耗统计，一般采用两种统计指标，一为绝对燃油或耗电量，另一个为列车单耗，对于货物列车，一般采用万吨公里为单位，旅客列车则采用万人公里为统计单位。

以内燃牵引货物列车为例，每万吨公里的燃油消耗量是评价不同交路、牵引不同重量的货运内燃机车燃料消费的重要指标，其运行单耗 e 按下式计算：

$$e = \frac{E * 10^4}{G * S} \quad (1-7)$$

$$e_{aver} = \frac{10^4 * \sum E_i}{\sum (g_i * s_i)} \quad (1-8)$$

式中：

e —列车单耗，kg/万吨公里； e_{aver} —列车平均单耗，kg/万吨公里；

E —列车运行能耗，kg； E_i —各列列车运行能耗，kg；

G —列车牵引总重，t； g_i —各列列车牵引总重，t；

S —列车走行距离，km； s_i —各列列车走行距离，km。

综上，国外关于列车能耗模型的既有研究主要从两个方面进行，一部分学者独立地从列车运动方程即基于列车受力分析的机车功率角度出发从理论角度出发计算列车运行能耗。另一部分研究单位则建立了基于能耗影响因素如速度、停靠站数量、质量等的多

元回归方程，通过统计数据分析与校验其影响因子，进而估算出列车能耗。由于参数直接受列车运行环境等影响，上述模型很难直接应用于国内铁路能耗模型计算中。因此，关于我国铁路运输过程中的一般能耗模型研究尚有待于进一步深入。

1.6 进一步研究的方向及框架

目前关于交通运输能源消耗的研究，涉及面较广，包括了交通运输能源消耗的外部成本分析、影响因素分析、统计指标与数据比较研究，以及与社会经济互动关系、相关规划与政策研究、交通能源需求量预测等各个方面，从宏观角度和定性角度的研究较多。在此基础上，今后在以下几个方面可望进一步深入研究：

(1) 基础统计数据与指标的可比性研究。目前国内缺乏完整的、能够客观反映交通运输能源消耗的基础统计指标和数据，需要考虑与国际统计指标接轨，使指标具有可比性，又能兼顾数据可得性。

(2) 不同交通方式能源消耗的可比因子研究。不同交通方式能源消耗的比较要有一定的可比前提，比如相同的运输任务量和点到点条件，同时要包括全过程消耗和全承担消耗，全过程主要包括运输过程以及运输辅助过程；全承担包括直接消耗与间接消耗，直接消耗由研究对象直接承担，间接消耗要按照一定的分摊原则和方法进行合理分配。需要加强比选方法与平台的研究。

(3) 交通能源消耗影响因素及灵敏度研究。不同的技术水平、运输载荷、辅助消耗等会影响交通能源消耗水平，需要研究不同组合条件下的交通能源消耗水平，以及不同因素的影响灵敏度，建立相关的理论方法模型。

综合交通的本质是：在现有的技术经济条件下，以最合适的交通方式最大限度满足国民经济及社会发展对运输的需求。其中，最大限度满足运输需求是建立综合交通体系的根本目标，即可能流动的人或物都能得到流动，不会因为运输条件而受到限制；合适的交通方式安排是最大限度满足运输需求的前提条件。即既能满足需求者的要求，又能满足供给者的要求，同时从整个社会经济的角度能够满足可持续发展的要求。因而，综合交通体系是运输需求技术经济特征与交通方式技术经济特征的高度协调统一体。它具有以下几个基本的特征：

第一，能够实现交通运输系统投资效用和效益的最大化。这是综合交通最本质的特征，它要求综合交通能够实现运输服务能力的最大化，同时实现对国民经济和社会发展的支撑作用达到最佳水平。

第二，每一种交通方式的效用都得到最佳的发挥。综合交通首先要实现不同运输方式都得到充分的利用，这为最大限度的满足运输需求提供了条件。但不同运输方式又存

在着一定的替代。因此，各种运输方式的充分利用，必须以比较优势下的合理选择为基础。

第三，各种交通方式能够实现有效的衔接。综合交通的发展必须实现各种交通方式的有效衔接，在基础设施建设、运输组织等方面合理安排，真正实现“人便其行，货畅其流”。这是实现合适的运输方式安排的内在要求。

第四，各种交通方式能够实现协调发展。即各种交通方式具有各自合理的发展空间，且达到自身系统配置的协调，实现规模、品质、布局等方面的协调发展。如各种交通方式运输基础设施和运输工具等的数量，高等级公路、高速列车等所占的比例，运输线路的布局等形成合理的结构。

从综合交通的本质来看，不同交通方式能耗因子及其可比性研究的根本目标和思路应该是：以最大限度满足国民经济及社会发展对运输的需求为出发点，整个综合交通系统对社会经济的单位贡献能耗最低为标准，各种运输方式实际运用条件为基础，各种交通方式可比为准则，寻求不同交通方式能耗因子，选择比选指标，建立指标体系和比选方法。从而为优化综合交通系统结构，构建一个能以最小能耗最大限度满足社会经济发展需要的综合交通系统提供决策依据。即：

- (1) 以增加综合交通系统的服务能力为出发点，而不是降低其服务能力；
- (2) 以对社会经济的单位贡献能耗为标准，而不是能耗总量为标准；
- (3) 比较指标的选择应充分考虑不同交通方式的共性和差异，确保实现可比。

(4) 比选方法的构建必须考虑各种交通方式的实际运用条件，如需求分布状况、自身的技术经济条件等，不能是理论上的比选。

综合交通能耗虽然直接体现在生产过程当中，但产生交通能耗不仅在生产过程当中，还与综合交通系统的规划、布局、配置、结构等密切相关，同时还受综合交通如何满足社会经济发展需要的约束。而且后两个方面带来的能源消耗远远大于直接能耗。因而，不同交通方式能耗因子及其可比性研究需要充分考虑这些内容。从发展理念、系统布局与配置的层面分析不同交通方式的能耗比较。而在微观层面的综合交通能耗不能仅仅考虑技术和操作层面的因素，还应考虑制度、管理层面的因素，从行业管理、企业管理、运输组织、基础设施、运输工具、驾驶人员等多个方面加以分析，从而建立科学合理的能耗比较指标体系。所建立的指标体系和比选方法，必须要统一考虑各种交通方式自身的技术经济条件和实际的运用条件，不能仅考虑某一方面。其研究框架体系如图1-3所示。

能源问题已经成为全球高度重视的焦点。交通运输行业既是社会经济发展的基础，也是能源消耗大户之一。如何协调两者的矛盾，实现交通运输与社会经济的协调发展及交通运输自身的协调发展，是必须回答的问题。从发展理念和综合交通系统布局与配置的层面，寻求这一问题的答案，才能从根本上缓解两者的矛盾。分析不同交通方式能耗因子、建立比选平台是科学布局与配置综合交通体系的理论依据。从这方面看，需要解

决的科学问题很多：

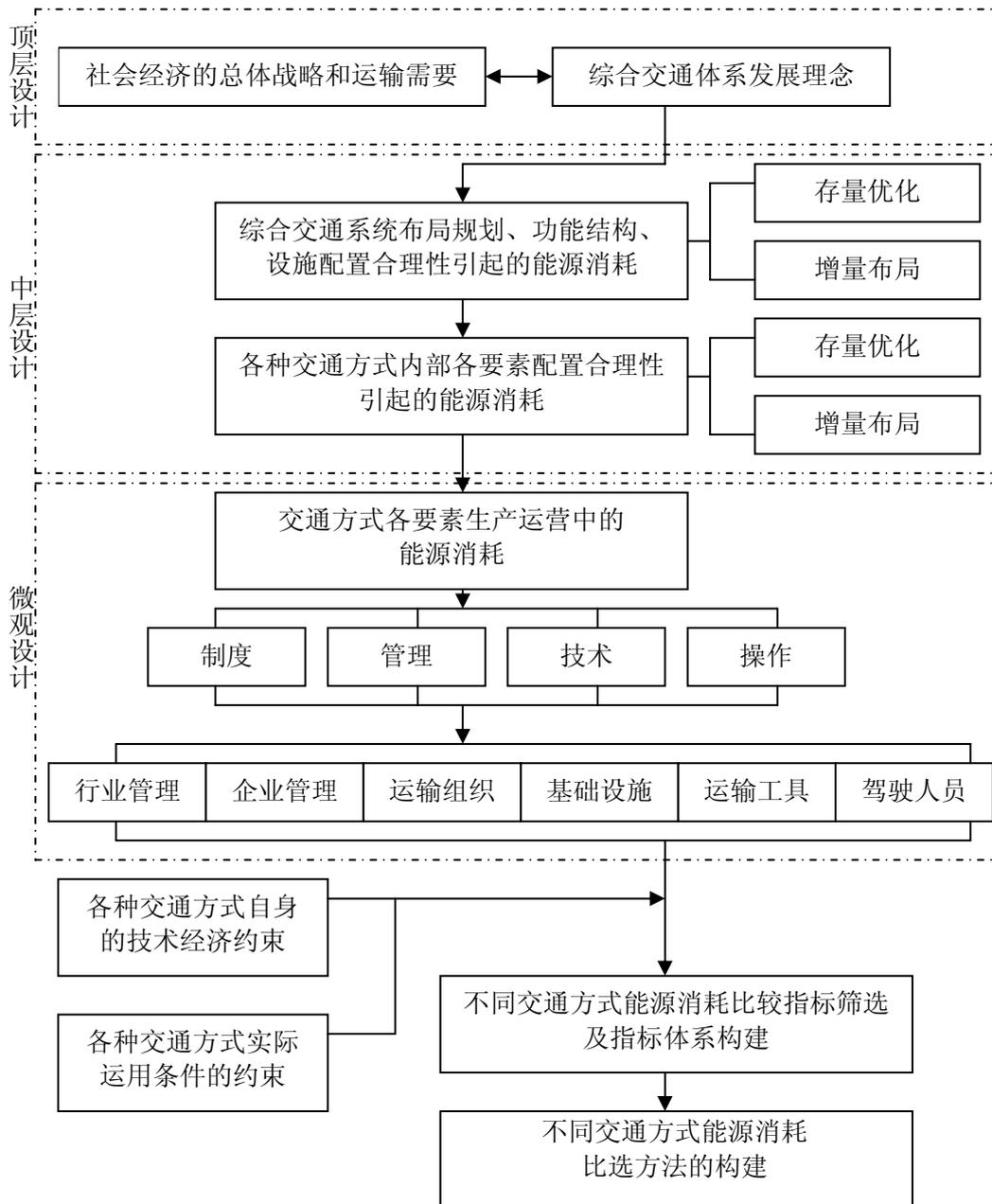


图 1-3 研究框架体系

首先，确定既能最大限度满足社会经济需要，又能实现最低能耗的交通方式能耗比较标准；

其次，筛选既能体现不同交通方式自身技术经济特性，又能体现不同交通方式实际运用条件的指标；

第三，建立能够定量比较不同交通方式能耗水平的比选模型。

本课题就是从上述问题出发，分析交通能耗在全社会能耗中的比重，着力研究不同

交通方式的能耗水平，以利于客观公正地认识我国交通发展形势。

2 交通能耗总量数据统计与测算

2.1 交通发展统计指标分析

2.1.1 交通运输线路里程

交通运输线路里程参见表 2-1。

表 2-1 我国历年交通运输线路年末里程统计

单位：万公里

年份	铁路营业里程	其中电气化里程	公路里程	其中高速公路	内河航道里程	民用航线里程	其中国际航线	管道里程
1990	5.79	0.69	102.83	0.05	10.92	50.68	16.64	1.59
1995	6.24	0.97	115.70	0.21	11.06	112.90	34.82	1.72
2000	6.87	1.49	140.27	1.63	11.93	150.29	50.84	2.47
2001	7.01	1.69	169.80	1.94	12.15	155.36	51.69	2.76
2002	7.19	1.74	176.52	2.51	12.16	163.77	57.45	2.98
2003	7.30	1.81	180.98	2.97	12.40	174.95	71.53	3.26
2004	7.44	1.86	187.07	3.43	12.33	204.94	89.42	3.82
2005	7.54	1.94	334.52	4.10	12.33	199.85	85.59	4.40
2006	7.71	2.34	345.70	4.53	12.34	211.35	96.62	4.81
2007	7.80	2.40	358.37	5.39	12.35	234.30	104.74	5.45

注：从 2003 年起，内河航道里程为内河航道通航里程数。从 2005 年起，公路里程包括村道，故与历史数据不可比。
来源：中国统计年鉴-2008

如表 2-1 所示，我国交通运输线路从 2000 年至 2007 年，铁路运营里程由 6.87 万公里增至 7.80 万公里，增加 13.5%；内河航道里程由 11.93 万公里增加至 12.35 万公里，增加 3.5%；民用航线里程由 150.29 万公里增至 234.30 万公里，增加 55.9%，管道里程由 2.47 万公里增加至 5.45 万公里，增加了 121%。其中航空与管道增加率较大，公路由于 2005 年后计算了乡村道路，因此与 2005 年前的数据不可比。

2.1.2 交通运载设备数量

随着交通运输线路里程的不断增长，交通运载工具数量也在迅速增加，参见表 2-2。

如表 2-2 所示，2000 年以来，我国交通运载设备，民用汽车增长最多，由 2000 年的 1609 万辆增加至 2007 年 4358 万辆，增长 170.9%；其次为民航飞机，由 2000 年的 982 架增加至 2007 年 1813 架，增长 84.6%；铁路机车由 2000 年的 15253 辆增加至 2007 年 18306 辆，增长 20.0%；水运运输船舶数量在减少，但船舶吨位在增加，船舶向大型化发展，

机动船的平均净载重量由 2000 年的 230 吨/艘增加到 2007 年的 676 吨/艘，驳船的平均净载重量由 2000 年的 193 吨/艘增加到 2007 年的 362 吨/艘。

表2-2 交通运输设备拥有量

指 标	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
铁路机车合计（辆）	15253	15756	16026	16320	17022	17473	17799	18306
其中：蒸汽机车	911	699	374	343	263	193	133	124
内燃机车	10826	11081	11312	11355	11872	12114	12148	12111
电力机车	3516	3976	3918	4622	4887	5166	5518	6071
铁路客车（辆）	35989	37214	37942	38972	39766	40328	40945	42471
铁路货车（辆）	439943	449921	446707	503868	520101	541824	558483	571078
民用汽车合计（万辆）	1609	1802	2053	2383	2694	3160	3697	4358
其中：载客汽车	854	994	1202	1479	1739	2132	2620	3196
载货汽车	716	765	812	854	893	956	986	1054
其它机动车			38.58	50.61	64.80	71.66	91.49	108.31
民航飞机合计（架）	982	1031	1112	1160	1245	1386	1614	1813
民用运输船舶（艘）	229676	210786	202977	204270	210700	207294	194360	191771
其中：机动船	185018	169329	165936	163813	166854	165900	157805	157544
驳 船	44658	41457	37041	40457	43846	41394	36555	34227
私人运输船舶（艘）	142117	121721	115108	114297	115503	95838	70292	70017

来源：中国能源统计年鉴-2008

2.1.3 交通运输量规模

各种运输方式完成的运输工作量参见表 2-3、表 2-4。

表2-3 中国历年货物周转量及其构成比例

单位：亿吨公里

年份	总计	铁路	比例 (%)	公路	比例 (%)	水运	比例 (%)	民航	比例 (%)	管道	比例 (%)
1990	26208	10622	40.6	3358	12.8	11592	44.2	8	0.0	627	2.4
1995	35909	13050	36.3	4650	13.1	17552	48.9	22	0.1	590	1.6
2000	44321	13771	31.1	6129	13.8	23734	53.6	50	0.1	636	1.4
2001	47710	14694	30.8	6330	13.3	25989	54.5	44	0.1	653	1.4
2002	50686	15658	30.9	6783	13.4	27511	54.3	52	0.1	683	1.3
2003	53859	17247	32.0	7100	13.2	28716	53.3	58	0.1	739	1.4
2004	69445	19289	27.8	7841	11.3	41429	59.7	72	0.1	815	1.2
2005	80258	20726	25.8	8693	10.8	49672	61.9	79	0.1	1088	1.4
2006	88840	21954	24.7	9754	11.0	55486	62.5	94	0.1	1551	1.7
2007	101419	23797	23.5	11355	11.2	64285	63.4	116	0.1	1866	1.8

来源：中国统计年鉴-2008

综合表 2-3、表 2-3 续可知，总体上，各种运输方式的货物周转量总量都是逐年递增，但在比例结构上的变化趋势不同。在包括远洋水运中，水运在货物周转量中的比例最大，从 2000 年的 53.6% 增加到 2007 年的 63.4%，说明我国强劲的对外贸易对交通运输的影响。处于第二位的铁路比例是下降的趋势，从 2000 年的 31.1% 下降到 2007 年的 23.5%。第三位的公路有小幅波动，2000 年为 13.8%，2007 年为 11.2%。

表2-3 (续) 中国历年货物周转量及其构成比例(水运不含远洋) 单位: 亿吨公里

年份	总计	铁路	比例 (%)	公路	比例 (%)	水运(不含远洋)	比例 (%)	民航	比例 (%)	管道	比例 (%)
1990	18067	10622	58.8	3358	18.6	3451	19.1	8	0.0	627	3.5
1995	23971	13050	54.4	4695	19.6	5614	23.4	22	0.1	590	2.5
2000	27247	13771	50.5	6129	22.5	6661	24.4	50	0.2	636	2.3
2001	26837	14694	54.8	6330	23.6	5116	19.1	44	0.2	653	2.4
2002	28953	15658	54.1	6783	23.4	5778	20.0	52	0.2	683	2.4
2003	31554	17247	54.7	7100	22.5	6411	20.3	58	0.2	739	2.3
2004	37190	19289	51.9	7841	21.1	9174	24.7	72	0.2	815	2.2
2005	41706	20726	49.7	8693	20.8	11120	26.7	79	0.2	1088	2.6
2006	46263	21954	47.5	9754	21.1	12908	27.9	94	0.2	1551	3.4
2007	52733	23797	45.1	11355	21.5	15599	29.6	116	0.2	1866	3.5

来源: 中国统计年鉴-2008

如果去除远洋水运, 只考虑国内水运, 占居货物周转量比例第一位的是铁路, 但其市场份额依然处于下降的趋势, 从 2000 年的 50.5% 下降到 2007 年的 45.1%。国内水运处于第二位, 由 2000 年的 24.4% 上升到 2007 年的 29.6%。公路依然处于第三位, 仍旧小幅波动, 2000 年为 22.5%, 2007 年为 21.5%。

表2-4 中国历年旅客周转量及其构成比例 单位: 亿人公里

年份	总计	铁路	比例 (%)	公路	比例 (%)	水运	比例 (%)	民航	比例 (%)
1990	5628	2613	46.4	2620	46.6	165	2.9	230	4.1
1995	9002	3546	39.4	4603	51.1	172	1.9	681	7.6
2000	12261	4533	37.0	6657	54.3	101	0.8	971	7.9
2001	13155	4767	36.2	7207	54.8	90	0.7	1091	8.3
2002	14126	4969	35.1	7806	55.3	82	0.6	1269	9.0
2003	13811	4789	34.6	7696	55.7	63	0.5	1263	9.2
2004	16309	5712	35.1	8748	53.6	66	0.4	1782	10.9
2005	17467	6062	34.7	9292	53.2	68	0.4	2045	11.7
2006	19197	6622	34.5	10131	52.8	74	0.4	2371	12.4
2007	21593	7216	33.4	11507	53.3	78	0.4	2792	12.9

来源: 中国统计年鉴-2008

由表 2-4 可知, 在旅客周转方面, 公路位居第一, 基本保持稳定, 2000 年为 54.3%, 2007 年为 53.3%; 铁路位居第二, 有小幅波动下降的趋势, 2000 年为 37.0%, 2007 年下降至 33.4%; 位居第三的是航空, 且处于上升势头, 由 2000 年的 7.9% 上升到 2007 年的 12.9%。说明随着我国人民生活水平的提高, 越来越多的人选择运输方式时向省时、快捷的航空方式倾斜。

2.1.4 不同交通方式平均运距

不同的交通运输方式具有各自不同的特点，适应不同运距的客货运输。图 2-1 反映的是不同交通方式的货物运输平均运距。

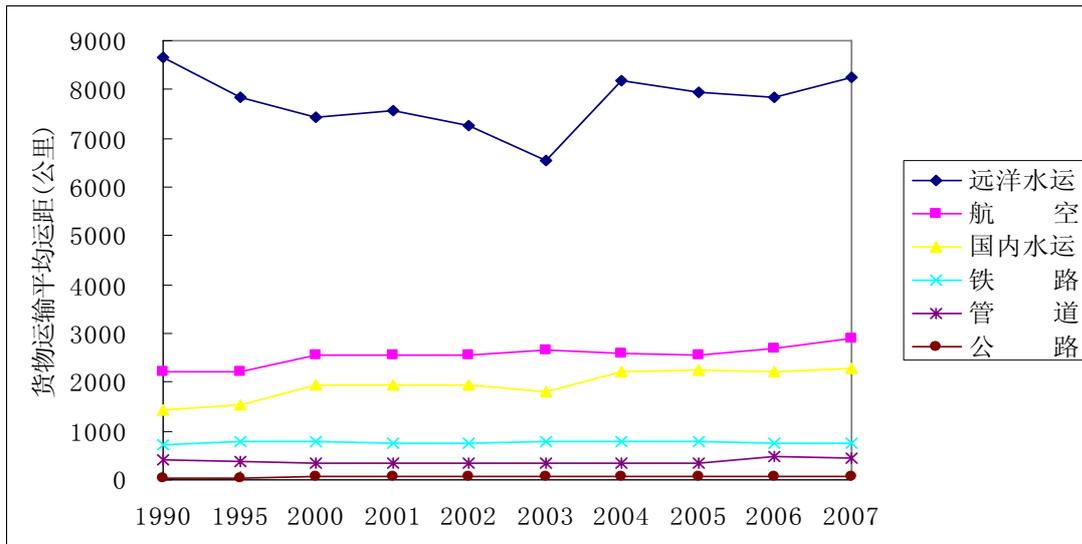


图 2-1 各交通方式货物运输平均运距

从图 2-1 可以看出，运输距离最长的是远洋水运，平均运距最低为 6560 公里（2003 年），2007 年平均运距为 8265 公里；位居第二的是航空运输，平均运距最低为 2205 公里（1995 年），2007 年平均运距为 2897 公里；位居第三的是国内水运，平均运距最低为 1447 公里（1990 年），2007 年平均运距为 2286 公里；位居第四的是铁路，平均运距最低为 705 公里（1990 年），2007 年平均运距为 757 公里；位居第五的是管道，平均运距最低为 329 公里（2004 年），2007 年平均运距为 460 公里；运距最短的是公路运输，平均运距最低为 46 公里（1990 年），2007 年平均运距为 69 公里

图 2-2 反映的是不同交通运输方式旅客运输平均运距。

如图 2-2 所示，由 1990 至 2007 年间，航空的平均运距远大于其他运输方式，凸显了航空运输在长距离运输中的优势，平均运距最低为 1331 公里（1995 年），2007 年平均运距为 1503 公里；铁路旅客运输在近年运距上升较快，平均运距最低为 273 公里（1990 年），2007 年平均运距为 532 公里，说明铁路在长距离旅客运输中正发挥着越来越重要的作用；水路旅客运输在近年运距有所减小，平均运距最高为 72 公里（1995 年），2007 年平均运距降为 34 公里，低于公路；公路旅客运输在近年运距缓慢波动上升，平均运距最低为 40 公里（1990 年），2007 年平均运距为 56 公里。

据交通运输部 2008 年发布的《全国公路水路运输量专项调查主要数据公报》，2008 年，全国营业性客车完成公路客运量 268.2 亿人，旅客周转量 12476.1 亿人公里，平均运距为 46.5 公里。对于公路客运运输，运距为 100 公里以下、100~200 公里、200~400 公

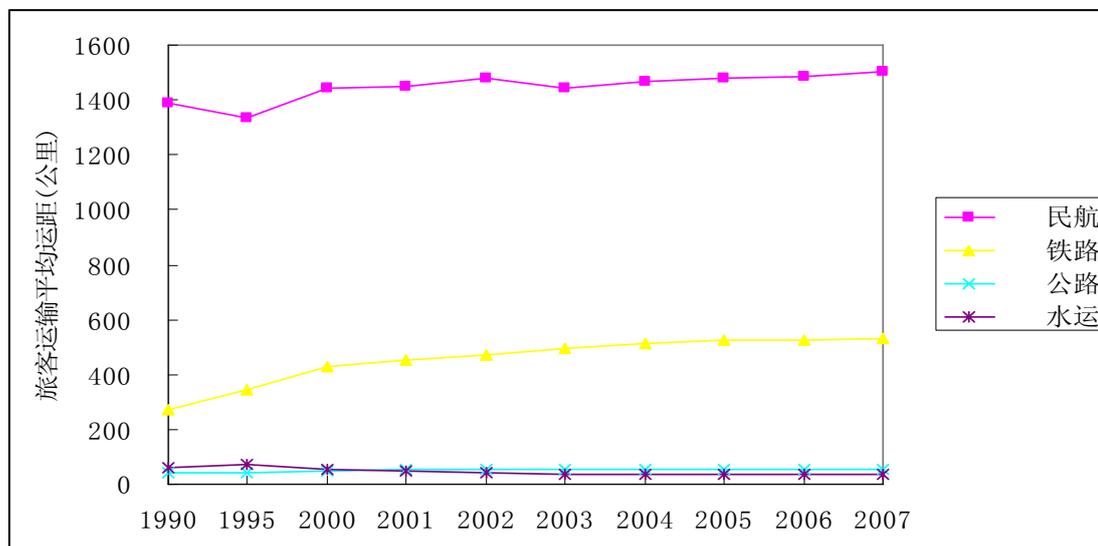


图 2-2 各交通方式旅客运输平均运距

里、400~800 公里和 800 公里及以上的旅客周转量所占比重分别为 43.2%、14.2%、14.9%、13.1%和 14.6%。2008 年，全国营业性货运车辆完成货运量 191.7 亿吨，货物周转量 32868.2 亿吨公里，平均运距为 171.5 公里。营业性货运车辆运距为 100 公里以下、100~400 公里、400~800 公里、800~1200 公里和 1200 公里及以上货物周转量分别占全年的比重分别为 12.0%、27.2%、19.8%、11.9%、和 29.1%。

2.2 国内外交通能耗统计口径及差异分析

2.2.1 中国交通能源消耗统计口径

国家统计局在国内分行业的能耗统计数据中，交通运输、仓储和邮政业作为一个行业进行统计。包括范围分为：铁路运输业、道路运输业、城市公共交通运输业、水上运输业、航空运输业、管道运输业、装卸搬运，仓储，邮政及其他运输服务业。

(1) 铁路运输业

铁路运输业是指铁路客运、货运及相关的调度、信号、机车、车辆、检修、工务等活动。包括铁路旅客运输（不包括客运火车站，计入运输辅助活动）、铁路货物运输（不包括货运火车站，计入运输辅助活动）、铁路运输辅助活动（不包括火车站内独立的餐饮及零售，计入餐饮零售业）、其他铁路运输辅助活动（指铁路旅客、货物运输及客、货火

车站以外的运输网、信号、调度及铁路设施的管理和养护，不包括铁路系统对社会提供的通信服务，计入通信业，铁轨，路基的抢修与重建，计入建筑业）。

（2）道路运输业

道路运输业是指公共旅客运输（指城市以外道路旅客运输，不包括城市内的旅客运输，计入城市公共交通业），道路货物运输（不包括汽车货运站（场）、道路货物运输打包服务，列入其他道路运输辅助活动；道路货运代办服务，列入运输代理服务；货物装卸站、货场、仓库的经营管理活动，列入其他仓储），道路运输辅助活动（指与道路运输相关的运输服务活动），客运汽车站（不包括货运汽车中转站的经营管理活动，列入其他道路运输辅助活动；市内公交车站的经营管理活动，列入公共电汽车客运），公路管理与养护（不包括城市内道路、桥梁、隧道的管理和养护活动，列入市政公共设施管理；道路、桥梁、隧道的抢修、重建活动，列入铁路、道路、隧道和桥梁工程建筑），其他道路运输辅助活动（不包括城市内的道路管理与养护，列入市政公共设施管理；公路旅客运输车站，列入客运汽车站；货物运输中转站独立（或相对独立）的货场，列入其他仓储）。

（3）城市公共交通业

城市公共交通业包括公共电汽车客运、城市轨道交通、出租车客运、城市轮渡及其他城市公共交通（主要指摩托车客运、三轮车、人力车客运）。

（4）水上运输业

水上运输业包括水上（远洋、沿海、内河）旅客运输、水上（远洋，沿海，内河）货物运输、水上运输辅助活动（包括客运港口、货运港口、其他水上运输辅助活动）。

（5）航空运输业

航空运输业包括航空客货运输、通用航空服务、航空运输辅助活动（机场、空中交通管理、其他航空运输辅助活动）。

（6）管道运输业

管道运输业指通过管道对气体、液体等的运输（不包括向用户提供天然气、煤气、热气和水的服务）。

（7）装卸搬运及其他运输服务业

装卸搬运及其他运输服务业包括装卸搬运和运输代理服务。

（8）仓储业

仓储业指专门从事货物仓储、货物运输中转仓储，以及以仓储为主的物流配送活动（包括谷物，棉花等农产品仓储及其他仓储）。

（9）邮政业

邮政业包括国家邮政及其他邮递服务（不包括广告宣传品的发送，列入广告业）。

2.2.2 中国交通能源消耗统计调查制度

(1) 铁路、航空、管道运输业

调查内容：煤炭、煤气、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气、电力消费量等。

调查范围：铁路、航空、管道运输企业。

调查频率：季报，2007年年报正式实施。

调查方式：铁道部、地方铁路协会、民航总局、三大石油公司管道运输部门组织全面调查。

(2) 公路、水上运输和港口

公路、水上运输和港口是指从事公路（包括城市公交）、水上营业性运输和港口装卸业务的企业（包括个体专业运输户），不包括社会车辆和私人家庭车辆的交通运输活动。运输企业管理分散、流动性强，需要对不同性质的企业采取不同调查方式。对从事营业性公路、水上运输的重点企业和港口，建立统一、规范的能源消费统计调查制度，并在工作规范化以后逐步将调查范围扩大到全部专业运输企业。对从事公路、水上运输的个体专业运输户实施典型调查，按照单车（单船）年均收入耗油量或单位客货周转量耗油量、交通运输管理部门登记的车（船）数量，推算其能源消费总量。

调查内容：汽油、柴油、燃料油消费量等。

调查频率：年报，2007年年报正式实施。

调查方式：统计局组织对重点专业运输企业和港口全面调查，对从事公路、水上运输的个体专业运输户典型调查。

2.2.3 不同能源品种的折算方法

由于各种能源原始计量单位不同，发热值也不一样，因此，在能源统计和审计过程中，生产或者消耗的各种能源必须换算成某一种标准燃料，以便纵、横向比较，分析评价节能效果。折算标准燃料系数是指某种能源的实际热值与标准燃料热值之比。

标准燃料可分为标准煤、标准油、标准气等。国际上一般采用标准煤、标准油指标较多。世界各国都按本国的用能特点确定自己的能源标准量。一些经济发达国家以用油为主，采用标准油；西欧有些国家以用电力为主，采用标准电，我国以煤为主，采用标准煤为计算基准，即将各种能源按其发热量折算为标准煤。

标准煤亦称煤当量，具有统一的热值标准。我国国家标准GB2589-81规定以标准煤（低位发热值等于29.27兆焦或7000千卡的固体燃料称1千克标准煤）为统一计算基准。标准煤的计算目前尚无国际公认的统一标准，1kg标准煤的热值，中国、前苏联、日本按7000千卡计算，联合国按6880千卡计算。能源热值有当量热值和等价热值之分。

当量热值：能源的当量热值就是指一、二次能源或载（耗）能工质所包含的热能值。当量热值又称理论热值（或实际发热值）是指某种能源一个度量单位本身所含热量。这种方法中，加工转换能量损失由能源加工转换企业承担。

等价热值：指二次能源或耗能工质所消耗的各种能源折算成一次能源的能量（其中包含了加工转化的损失）。加工转换产出的某种二次能源与相应投入的一次能源的当量，即获得一个度量单位的某种二次能源所消耗的以热值表示的一次能源量，也就是消耗一个度量单位的某种二次能源，就等价于消耗了以热值表示的一次能源量。因此，等价热值是个变动值，随着能源加工转换工艺的提高和能源管理工作的加强，转换损失逐渐减少，等价热值会不断降低。

所有的二次能源，都存在着等价值和当量值两种折标方式，但由于其他二次能源生产时转换效率较高（如原油加工成汽油、煤油、柴油等，转换效率高达95%以上），因此无论采用等价值还是当量值，计算结果都差异不大，而只有电力的转换效率最低，差异最大。此外，如果其他二次能源也都采用等价值折标，则能源统计工作量会大大增加，不利于提高统计效率。因此，我国目前只对电力折标采用等价值和当量值两种方法并存，而其他二次能源都统一采用当量值折标。

表2-5 能源计量单位换算系数表

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
原煤	20908kJ/(5000kcal)/kg	0.7143kgce/kg
洗精煤	26344kJ/(6300kcal)/kg	0.9000kgce/kg
焦炭	28435kJ/(6800kcal)/kg	0.9714kgce/kg
原油	41816kJ/(10000kcal)/kg	1.4286kgce/kg
燃料油	41816kJ/(10000kcal)/kg	1.4286kgce/kg
汽油	43070kJ/(10300kcal)/kg	1.4714kgce/kg
煤油	43070kJ/(10300kcal)/kg	1.4714kgce/kg
柴油	42652kJ/(10200kcal)/kg	1.4571kgce/kg
液化石油气	50179kJ/(12000kcal)/kg	1.7143kgce/kg
电力（当量）	3956kJ/(860kcal)/kW·h	0.1229kgce/kW·h

来源：中华人民共和国国家标准. 综合能耗计算通则(GB / T2589—2008). 北京：中国标准出版社

电能是使用面最广的一种二次能源，电能消费在我国终端能源消费中占有较大比例，且在不断提高。我国电力折算成标准煤采用等价热值和当量热值两种方法，而同样的电量，用这两种方法计算的结果可相差3倍左右。在企业的能耗统计中，对电力我国一直使用等价热值折算，而2005年《国家统计局关于布置2005年统计年报和2006年定期统计报表制度的通知》（国家统计局[2005]85号文）出台，规定从2006年开始，企业能源统计中“电力”消费的折算标煤系数取消原用的等价系数4.04，而统一采用当量系数1.229。此外，2008年6月1日实施的《综合能耗计算通则》（GB/T 2589—2008）中，也提出了电力折标既可用等价值，也可用当量热值折标，而此前该标准规定电力折标只用等价热值（如GB/T 2589—1990规定：“任一规定的体系实际消耗的二次能源及耗能工质均按相应的能源等价值折算为一次能源”）。因此，在我国的能源统计数据中，需要仔细甄别不同的换

算系数导致的结果的差异。

为了进行不同能源品种的比较，按照国际通行的标准，本研究报告对于能源系数的折算采用当量系数法，本报告涉及到的折算系数参见表2-5。

2.2.4 中国交通能源消耗相关统计数据

根据中国能源统计年鉴及中国交通统计年鉴，得到中国能源消耗相关数据。

(1) 中国能源消耗总量及构成

随着经济的发展，我国的全国总能耗逐渐增大，而随着我国交通运输设备的不断增加，交通运输在全国总能源消耗中所占的比重也逐渐增大，中国能源消费总量及构成如表2-6所示。

表 2-6 中国能源消费总量部门能耗情况

单位：万吨标准煤

年份	交通 运输	交通 所占比例	工业	农林 牧渔	建筑	批发零售 住宿餐饮	其他 行业	生活 消费	合计
1990	4541	4.6%	67578	4852	1213	1247	3473	15799	98073
1995	5863	4.5%	96191	5505	1335	2018	4519	15745	131176
2000	10067	7.3%	95443	6045	2143	3039	5852	15965	138553
2001	10363	7.3%	98273	6400	2234	3265	6096	16568	143199
2002	11171	7.4%	104088	6612	2544	3520	6334	17527	151797
2003	12819	7.3%	121771	6716	2860	4180	6819	19827	174990
2004	15104	7.4%	143244	7680	3259	4820	7839	21281	203227
2005	16629	7.4%	159492	7978	3411	5031	8691	23450	224682
2006	18583	7.6%	175137	8395	3715	5522	9530	25388	246270
2007	20643	7.8%	190167	8245	4031	5962	9744	26790	265583

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

由表2-6可知，2000年以来，我国能源消费总量由2000年的138553万吨标准煤增长为2007年的265583万吨标准煤，增长了约91.7%，而交通运输业由2000年的10067万吨标准煤增长为2007年的20643，增长了约105.1%，高于国家总能耗的增长速度，而由交通业能耗所占比例也可以看出，交通运输能耗在国家总能耗中所占的比例逐渐增大，说明随着国家经济和社会的发展，交通运输业正扮演着越来越重要的角色。2007年各部门能源消耗比例参见图2-3。

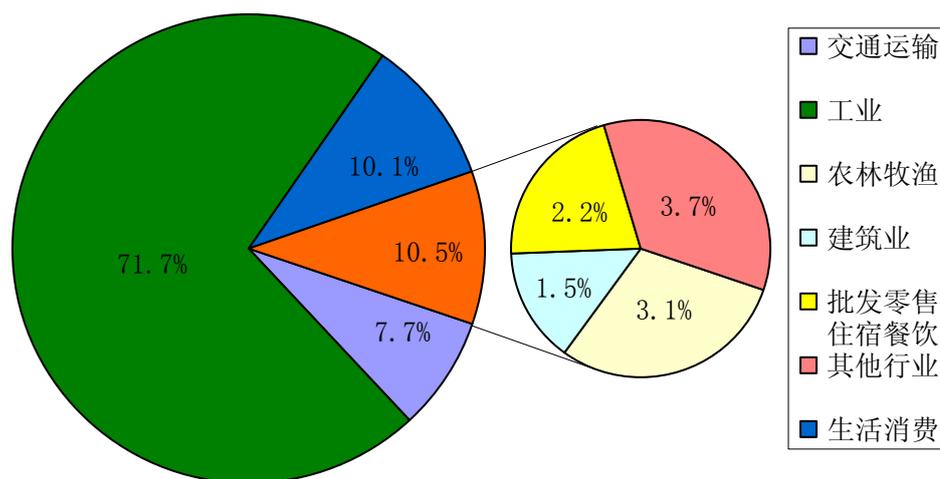


图 2-3 2007 年各部门能源消耗比例图

如图2-3所示，2007年交通运输业在国家总能耗中所占的比例为7.7%，远小于工业（71.7%）及生活消费（10.1%）所占的能耗比例，一方面是因为我国经济发展阶段所致，另一方面我国现有的的交通运输能耗统计口径与国际统计口径不同。上述统计口径的基础是总能耗（国际统计口径一般为终端能耗），同时我国的统计口径中，交通运输油耗仅仅计算了营业性汽车用油，未包括社会其他行业及私人车辆的能源消耗。

（2）中国煤炭消耗总量及构成

表2-7 中国能源消费部门的煤炭消耗情况

单位：万吨

年份	交通运输	交通所占比例	工业	建筑业	农林牧渔水利	批发零售住宿餐饮	其他行业	生活消费	合计
1990	2160.9	2.05%	81090.9	437.6	2095.2	1058.3	1980.4	16699.7	105523.0
1995	1315.1	0.96%	117570.7	439.8	1856.7	977.4	1986.7	13530.1	137676.5
2000	1132.2	0.86%	119300.7	536.8	1647.7	814.6	661.0	7907.0	132000.0
2001	1041.3	0.77%	122518.3	535.0	1599.6	810.9	664.7	7830.3	135000.0
2002	1055.0	0.75%	129290.4	553.6	1622.9	809.1	667.1	7602.6	141600.5
2003	1067.3	0.63%	156168.5	577.2	1683.3	860.4	700.6	8174.7	169232.0
2004	832.1	0.43%	180135.2	601.5	2251.2	871.8	731.0	8173.2	193596.0
2005	815.3	0.38%	202609.1	603.6	2315.2	874.4	765.9	8739.0	216722.5
2006	724.8	0.30%	225539.4	582.0	2309.6	891.5	782.9	8386.3	239216.5
2007	685.5	0.27%	245272.5	565.3	2337.8	868.3	811.4	8100.6	258641.4

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

如表2-7所示，我国的煤炭消耗量持续增加，由1990年的105523.0万吨增加至2007年的258641.4万吨，增加145.1%。与此同时，交通部门的煤炭消耗量及所占的比重却逐渐减小，消耗量由1990年的2160.9万吨减少到2007年的685.5万吨，减少68.3%；比重由1990年的2.05%减少到2007年的0.27%，说明交通业近年对煤炭能源的使用变小。2007年各部门煤炭消耗比例参见图2-4。

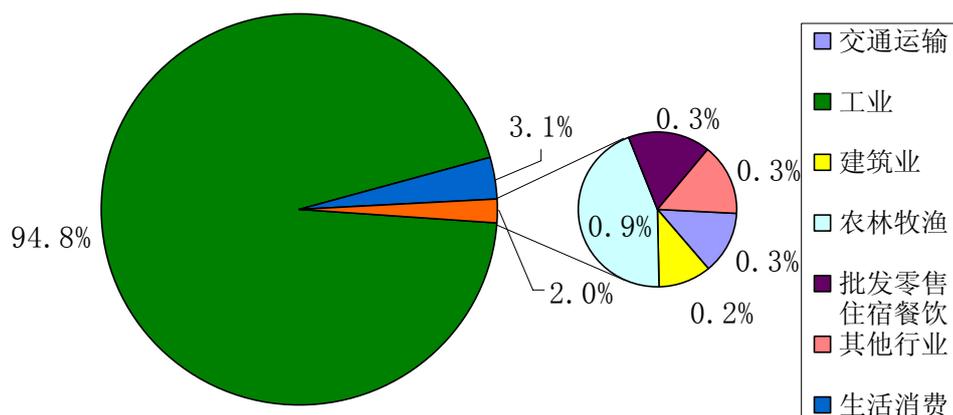


图 2-4 2007 年中国能源消费部门的煤炭消耗图

如图2-4所示，2007年在我国各能源消费部门的煤炭消耗中，工业到占据了90%以上的煤炭消耗，其他各消费部门比重均低于5%。

(3) 中国电力消耗总量及构成

表2-8 中国能源消费部门的电力消耗情况

单位：亿千瓦时

年份	交通运输	交通所占比例	工业	建筑业	农林牧渔水利	批发零售住宿餐饮	其他行业	生活消费	合计
1990	105.9	1.70%	4873.3	65.0	426.8	76.2	202.4	480.4	6230.4
1995	182.3	1.82%	7659.8	159.6	582.4	199.5	234.2	1005.6	10023.4
2000	281.2	2.09%	9653.6	154.8	673.0	393.7	643.2	1672.0	13471.4
2001	309.3	2.10%	10543.7	144.9	762.4	444.9	688.1	1839.2	14723.5
2002	338.0	2.05%	11927.2	164.1	776.2	500.0	758.5	2001.4	16465.5
2003	396.9	2.09%	13899.7	189.8	773.2	623.0	911.0	2238.0	19031.6
2004	449.6	2.05%	16254.3	222.1	808.9	735.4	1036.6	2464.5	21971.4
2005	430.3	1.73%	18481.7	233.9	876.3	752.3	1340.9	2824.8	24940.4
2006	467.4	1.63%	21247.7	271.0	947.0	847.3	1555.9	3251.6	28588.0
2007	531.9	1.63%	24630.8	309.0	979.0	929.8	1708.6	3622.7	32711.8

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

如表2-8所示，我国的电力总消耗逐年递增，由1990年的6230.4亿千瓦小时增长至32711.8亿千瓦小时，增长率为425.03%，增长速度很快。交通运输业的电力消耗由1990年的105.9亿千瓦小时增长至2007年的531.9亿千瓦小时，增长率为402.27%，相对于电力总消耗来说增长速度较慢，因此交通所占比例由1990年的1.70%减小至1.63%。2007年各部门电力消耗比例参见图2-5。

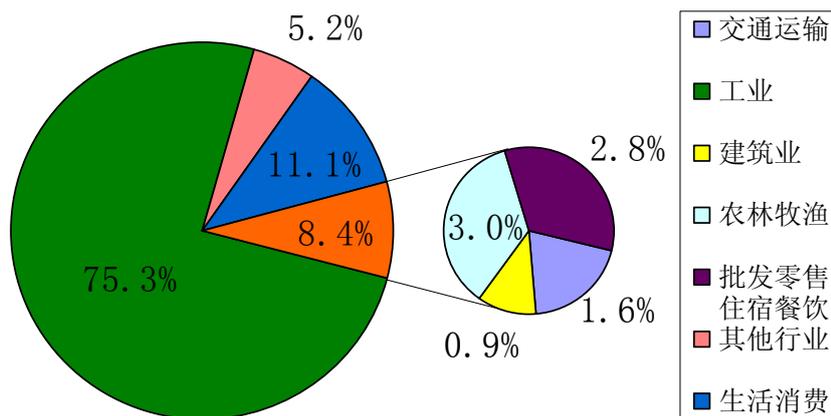


图2-5 2007年中国能源消费部门的电力消耗图

如图2-5所示，2007年在我国各能源消费部门的电力消耗中，工业到占据了75.3%的消耗，第二位为生活消费，占11.1%，其他各消费部门比重均低于5%，交通运输占1.6%。

(4) 中国石油终端消耗及构成

如表2-9所示，2000年以来，我国的石油终端消耗量持续增加，由19893.5万吨增加至33769.0万吨，增加了69.7%，交通运输用油在石油消耗中所占的比例也持续上升，由27.69%上升至36.41%，上升了8.72个百分点。说明随着我国的发展，我国机动车保有量的持续增加，对石油的需求也越来越大。

表2-9 中国能源消费部门的石油消耗情况

单位：万吨

年份	交通运输	交通所占比例	工业	建筑业	农林牧渔水利	批发零售住宿餐饮	其他行业	生活消费	合计终端能耗
1990	1683.2	18.09%	5180.4	327.3	1033.6	77.6	757.8	284.5	9304.7
1995	2863.6	20.94%	7095.5	242.8	1203.2	333.9	1390.3	682.0	13676.3
2000	5509.0	27.69%	8530.0	830.6	1496.9	545.0	1882.9	1256.5	19893.5
2001	5692.9	27.97%	8498.4	933.8	1568.5	567.4	1953.7	1294.8	20357.0
2002	6163.7	28.03%	9168.3	1096.6	1674.1	593.0	1978.6	1477.5	21989.8
2003	7093.2	29.48%	9958.7	1230.6	1681.4	682.3	1916.4	1635.8	24062.8
2004	8620.6	30.72%	11344.1	1422.3	2001.3	818.7	2201.7	1778.0	28062.0
2005	9708.5	33.26%	11245.0	1502.2	2072.9	915.6	2079.2	1794.4	29189.3
2006	10969.2	34.70%	11875.5	1648.5	2213.6	992.2	2087.6	1992.5	31613.9
2007	12296.6	36.41%	12404.2	1823.1	2130.3	1116.9	1895.9	2267.1	33769.0

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

2007年各部门石油消耗比例参见图2-6。

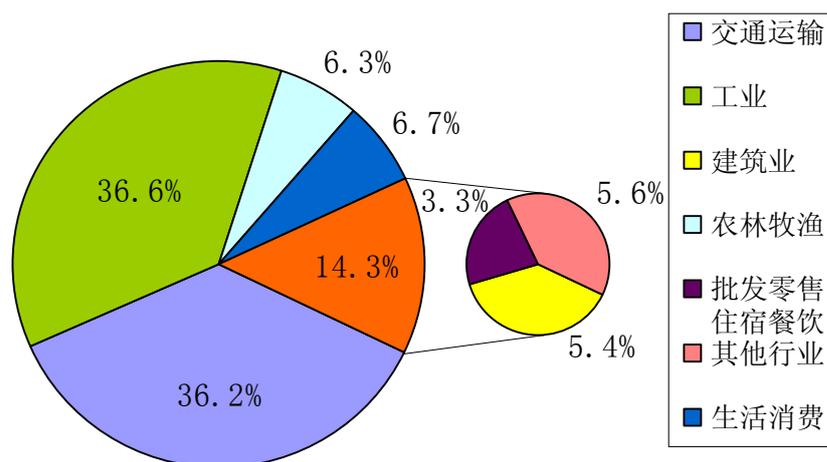


图2-6 2007年中国能源消费部门的石油消耗图

由图2-6中可以看到，各部门石油消耗比例与煤炭、电力消耗有所不同，2007年交通运输石油消耗占全国比例为36.2%，与工业十分接近，而目前工业及其他部门所消耗的石油中，很大一部分也是用于交通工具。

(5) 中国汽油消耗总量及构成

在石油消耗中，与交通运输关系最为密切的是汽油消耗。

如表2-10所示，我国的汽油消耗量持续增加，由1990年的1899.5万吨增加至2007年的5519.1万吨，增加了190.6%。与此同时，交通部门的汽油消耗量及所占的比重也逐渐增大，消耗量由1990年的620.1万吨增加到了2007年的2763.2万吨，增加了341.25%；比重由1990年的32.65%增加到2007年的49.58%，说明交通业在近年来对石油的使用越来越多。

表2-10 中国能源消费部门的汽油消耗情况

单位：万吨

年份	交通运输	交通行业所占比例	工业	建筑业	农林牧渔水利	批发零售住宿餐饮	其他行业	生活消费	合计
1990	620.1	32.65%	589.3	89.5	145.9	46.0	390.7	18.0	1899.5
1995	982.3	33.76%	812.4	103.6	179.7	197.2	570.7	63.7	2909.6
2000	1387.8	39.60%	602.0	115.6	184.5	209.8	877.7	127.6	3504.9
2001	1419.4	39.45%	618.1	116.7	190.6	214.0	904.3	134.6	3597.8
2002	1503.5	40.10%	631.6	122.3	187.9	224.2	916.3	163.8	3749.7
2003	1861.6	45.72%	617.9	123.7	195.0	238.1	837.0	198.8	4072.0
2004	2308.5	49.16%	507.4	156.5	220.1	279.8	936.9	286.5	4695.8
2005	2470.0	50.89%	461.7	172.1	228.0	299.4	918.2	303.8	4853.3
2006	2722.4	51.94%	468.5	180.7	239.6	323.3	964.1	343.0	5241.7
2007	2763.2	49.58%	574.5	198.8	246.8	351.7	949.7	434.4	5519.1

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

2007年各部门汽油消耗比例参见图2-7。

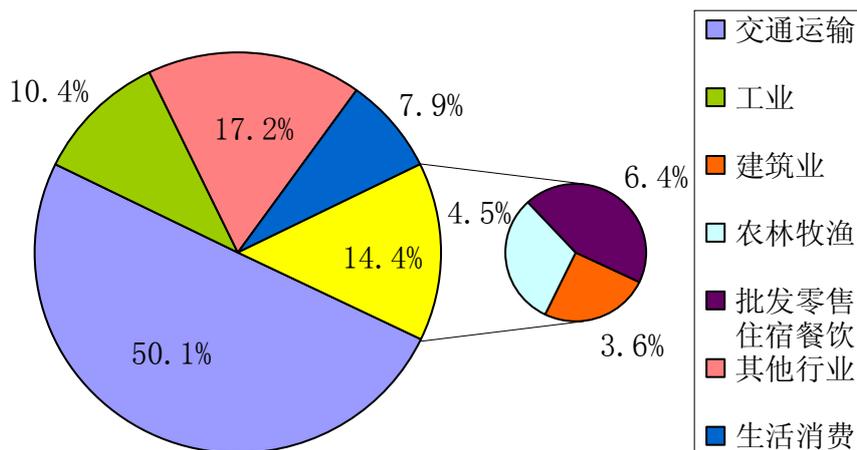


图 2-7 2007 年中国能源消费部门的汽油消耗图

如图2-7所示，在我国各能源消费部门的汽油消耗中，交通运输和建筑业占据了大部分。2007年，交通业占据了50%的汽油消耗，说明我国汽油是交通业的主要能源之一，而工业仅占约10%，可见工业的能源消耗重心已不是汽油。

(6) 中国柴油消耗总量及构成

在石油消耗中，与交通运输关系最为密切的是除了汽油消耗，还有柴油消耗。

如表2-11所示，我国的柴油总消耗逐年递增，由1990年的2691.7万吨增长至12493.0万吨，增长率为364.1%。交通运输业的柴油消耗由1990年的709.4万吨增长至2007年的6794.4万吨，增长率为857.8%，相对于电力总消耗来说增长速度较快，因此交通所占比例由1990年的26.36%增加至54.39%。

表2-11 中国能源消费部门的柴油消耗情况

单位：万吨

年份	交通运输	交通所占比例	工业	建筑业	农林牧渔水利	批发零售住宿餐饮	其他行业	生活消费	合计
1990	709.4	26.36%	728.1	133.0	881.5	22.5	217.0		2691.7
1995	1246.6	28.85%	1189.9	118.2	1001.4	103.6	645.7	16.1	4321.4
2000	2543.8	37.55%	1596.5	195.9	1310.1	255.9	803.7	68.4	6774.3
2001	2671.0	37.58%	1636.8	223.1	1375.6	268.1	853.9	79.2	7107.7
2002	2964.8	38.67%	1731.3	252.0	1484.3	280.8	870.0	83.9	7667.2
2003	3485.2	41.44%	1830.5	276.2	1484.4	355.5	890.0	87.9	8409.8
2004	4182.2	42.26%	2004.8	333.1	1774.3	419.0	1068.0	113.7	9895.2
2005	5019.4	45.75%	2091.3	386.6	1837.6	486.0	1015.1	136.4	10972.5
2006	5747.3	48.56%	1961.6	428.7	1965.0	529.8	1033.0	170.6	11835.9
2007	6794.4	54.39%	1722.8	433.8	1875.3	603.9	857.5	205.3	12493.0

来源：中国能源统计年鉴（2007，2008）

2007年各部门柴油消耗比例参见图2-8。

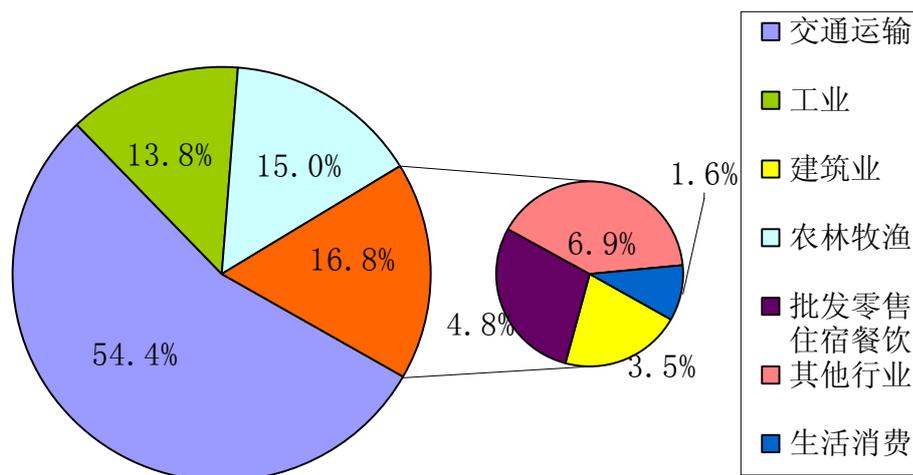


图2-8 2007年中国能源消费部门的柴油消耗图

如图2-8所示，2007年交通消耗占据了我国柴油总消耗的大部分（54.4%），成为消耗柴油的主要消费部门；农林牧渔也是柴油的消耗大户，占15%，工业及建筑业消费比例与汽油消耗情况基本一致，工业13.8%，建筑业为3.5%。

2.2.5 国外交通能耗统计口径

（1）终端能耗

国际能源机构(IEA)和经济合作与发展组织(OECD) 20世纪90年代建立的能源平衡体系，是目前国际通行的模式，联合国、欧盟、亚太经济合作组织(APEC)等都采用此模式。其中能源平衡表根据热力学第一定律构建，即能源投入量等于能源产出量和损失量。终端消耗定义为终端耗能设备入口得到的能源量。它等于一次能源扣除加工、转换、贮运损失和能源工业所用能源后的能源量。一次能源供应量，燃料按净热值计算，煤炭、原油、天然气按其品种、质量和用途确定不同国家的换算系数，终端能源消费中，电力按热功当量计算。终端能耗数据是节能政策分析、预测、规划的重要依据。

（2）部门划分

①国际能源机构(IEA)能源平衡表的终端能源消耗部门划分为工业部门、运输部门、其他部门和非能源产品消耗四大类，其中其他部门包括农业、商业和公共服务、居民和其他。国际能源署(IEA)明确定义了5种主要的运输模式：公路运输、铁路运输、航空运输、国内水上运输、管道运输。调查中所提供的数据仅与运输活动本身消耗的燃料相关，运输企业在其他方面的燃料包括在“商业与公共事业”中，不包括在此。

- 铁路运输：所有为铁路运输活动提供支持的燃料消耗。
- 公路运输：适用于所有为运输活动提供支持的公路运输燃料。

- 航空运输：为航空飞行提供的燃料量。
- 管道运输：在压缩站或泵站或在燃气、石油或煤浆管道上使用的燃料和电力。
- 国内水上运输：应包括用于内陆水道上的货运或客运以及用于国内海洋航行的所有燃料消费。国内海洋航行是指起点和终点均位于同一国家并且途中不停靠任何外国港口的航行。

②IEA平衡表包括管道运输，欧洲共同体统计局（EUROSTAT）则将这种消费视作能源部门自用的一部分，EUROSTAT能源平衡表交通运输项目包括：公路运输、铁路运输、航空运输、国内水上运输。

③EIA（Energy Information Administration）是美国能源部下属的能源统计部门。根据美国国情，将最终能源消费分为工业、商业、交通运输业和居民生活四大类。交通运输能源主要包括化石燃料（煤、石油、天然气）、可再生能源（生物能源）、电力消耗以及分担到运输行业的电力系统能量损失。从1978年开始，运输行业煤的消耗量很少，其数量统计到工业部门。

（3）调查方法

EIA的能耗调查有两种方法：供应调查，即对能源的生产商和供应商进行调查，得到供给市场的能源数量；消费调查，即收集不同种类能源消费信息，同时调查消费者的个体特征。在交通运输行业，EIA的核心调查是居民交通能源消耗调查，它直接从居民家庭收集信息。EIA从1983年开始此项调查，是每三年一次的能源使用和花费、车辆行驶里程（VMT）、居民车辆特征的调查。从1994年以后不再进行此项调查，为了得到家庭车辆能耗数据，EIA与美国交通部合作，通过国家居民出行调查获取与能耗相关的交通统计数据。EIA在不同地区根据不同车型对车辆能耗进行调查。调查内容包括地区、城市/郊区、家庭规模、家庭成员年龄分布、家庭收入、家庭驾驶员人数、车辆类型（私家车、卡车、轻型货车、组合式货车等）等。调查指标包括：车辆数、车-英里，燃料消耗量（百万加仑）、人-英里、吨-英里，推算指标包括平均每车行驶英里、平均每加仑行驶英里、平均每车燃料消耗量、能源强度（Btu/人-英里），从而得到全部车辆的燃油消耗总量。

2.2.6 国内外交通能耗统计口径的差异

按我国统计方法，交通能耗统计与国际通行准则相比，存在很多的差异。主要表现在以下几个方面：

（1）行业划分上，我国把交通运输和仓储、邮政业划分为一个行业进行统计，国外不包括仓储和邮政。。

（2）我国的公路运输用油只统计交通部门运营车辆用油，未统计社会其他部门行业

及私人车辆用油。

(3) 部分用于旅游的车辆、船舶等交通工具能耗未计入交通运输能耗中而计入了旅游业中。

(4) 交通运输行业部分建筑能耗也计入交通运输行业能耗。

以上第二项差异涉及到的范围广泛，能源数值大，对于计算交通运输能耗所占比重有着很大的影响，使得我国交通能耗数据比国际统计口径数据的计算结果明显偏小；而其他差异涉及到的能源数值也较小，对于交通运输能耗所占比重的影响不大，且数据难以统计，因此，本研究着重从社会及私人其他部门车辆燃油消耗修正方面进行。

2.3 依国际口径对我国交通能耗数据的修正

由于社会及私人车辆的能源消耗主要为汽油和柴油，因此目前相关研究（《节能手册2006》，《中国可持续能源项目参考资料——2009能源数据》等），采用油品分摊法，即对汽油及柴油用途进行重新分类估算，将非运输行业用于交通运输的能源消耗按一定比例折算到运输能耗中，得到新的交通运输能源消耗量数值：工业、建筑业、服务业消费的95%的汽油、35%的柴油用于交通工具；居民生活、农业消费和其他行业的全部汽油，居民生活消费、其他行业的95%的柴油用于交通工具。测算模型：

$$E_Q = 0.95 \times (GY_Q + JZ_Q + FW_Q) + (NY_Q + QT_Q + SH_Q) \quad (2-1)$$

其中： E_Q ——社会及私人车辆汽油消耗量（万吨）；

GY_Q ——工业汽油消费量（万吨）；

JZ_Q ——建筑业汽油消费量（万吨）；

FW_Q ——服务业汽油消费量（万吨）；

NY_Q ——农业汽油消费量（万吨）；

QT_Q ——其他行业汽油消费量（万吨）；

SH_Q ——居民生活消费汽油消费量（万吨）。

$$E_C = 0.35 \times (GY_C + JZ_C + FW_C) + 0.95 \times (QT_C + SH_C) \quad (2-2)$$

其中： E_C ——社会及私人车辆柴油消耗量（万吨）；

GY_C ——工业柴油消费量（万吨）；

JZ_C ——建筑业柴油消费量（万吨）；

FW_C ——服务业柴油消费量（万吨）；

QT_C ——其他行业柴油消费量（万吨）；

SH_C ——居民生活消费柴油消费量（万吨）。

根据前述汽油平衡表和柴油平衡表数据，以及公式2-1、公式2-2计算可得表2-12。

表2-12 交通运输在全部终端能耗中所占的比重（油品分摊法）

单位：万吨

年份	交通运输 行业消耗 (标煤)	行业外运 输汽油消耗	行业外运 输柴油消耗	行业外运 输总消耗 (标煤)	交通运输 总消耗 (标煤)	终端能 源消耗 (标煤)	交通运 输能耗 比例
1990	4541	1243	515	2580	7121	94289	7.6%
1995	5863	1872	1123	4390	10253	124252	8.3%
2000	10067	2071	1545	5299	15366	132030	11.6%
2001	10363	2131	1631	5512	15875	138743	11.4%
2002	11171	2197	1699	5708	16879	144231	11.7%
2003	12819	2162	1791	5790	18609	166633	11.2%
2004	15104	2340	2088	6485	21589	194104	11.1%
2005	16629	2337	2131	6543	23172	214479	10.8%
2006	18583	2471	2165	6790	25373	235114	10.8%
2007	20643	2700	1976	6851	27494	253862	10.8%

注：汽油与标煤折算系数 1.4714，柴油与标煤折算系数 1.4571

对汽油及柴油用途进行重新分类估算的测算方法其优点是简便易行，可以分别估算出汽油和柴油的消耗量。但如何确定合适的分摊系数缺乏理论计算支持。从表2-12也可以看出，按此方法测算，从2000年以后，交通运输能耗比例呈稳定甚至下降的趋势，这显然与实际发展趋势情况不太相符。

因此我们采用按社会及私人车辆单耗及行驶里程估算的方法进行测算。

公路运输中社会车辆和私人家庭车辆主要包括四部分：

- (1) 社会及私人汽车；
- (2) 摩托车；
- (3) 低速汽车（农用运输汽车）；
- (4) 其它车辆（比如军车等）。

其中其它车辆（军车等）由于缺乏必要的基础数据，难以进行测算。本研究重点测算社会及私人汽车、摩托车、低速汽车（农用运输汽车）的燃油消耗。

2.3.1 社会及私人汽车能耗测算

吴文化（2001年）提出了以百公里燃料消耗量和车辆年行驶里程为调查指标，利用汽车保有量指标推算出燃料消耗总量的方法，测算公式如下：

$$FC_g = \sum V_{i,g} \times M_i \times F_{g,i} \times D_g \quad (2-3)$$

$$FC_d = \sum V_{i,d} \times M_i \times F_{d,i} \times D_d \quad (2-4)$$

式中： FC_g ——汽油消耗量（吨/年）；

FC_d ——柴油消耗量（吨/年）；

$V_{i,g}$ ——全国第*i*类汽油机动车数量；

$V_{i,d}$ ——全国第*i*类柴油机动车数量；

M_i ——第*i*类机动车的年行驶公里数；

$F_{g,i}$ ——全国第*i*类汽油机动车燃油消耗水平（升/百公里）；

$F_{d,i}$ ——全国第*i*类柴油机动车燃油消耗水平（升/百公里）；

D_g ——汽油密度（吨/升）；

D_d ——柴油密度（吨/升）。

此方法如果基础数据足够完备，可以精确测算出机动车能源的消耗规模。但在实际运用中，需要兼顾计算精度和数据可得性的关系。在统计数据中，很难确切得到不同燃油类型的车辆保有量。

本研究报告以此为基础，利用可以得到的数据，寻求一种可行的测算社会及私人汽车能耗的方法。对车辆不再按汽油、柴油车进行分类，而是按照表2-13进行分类。

表2-13 车型分类表

车型分类	说明
车型1（中小客车）	≤19座的客车
车型2（大客车）	>19座的客车
车型3（微型货车）	载重量≤2吨的货车
车型4（轻型货车）	2吨<载重量≤7吨的货车
车型5（中型货车）	7吨<载重量≤14吨的货车
车型6（重型货车）	载重量>14吨的货车

来源：交通部公路司，中国工程建设标准化协会公路工程委员会（JTGB01-2003）公路工程技术标准，北京：中国交通出版社，2004

（1）测算模型

对社会及私人汽车能耗的测算分载客车辆和载货车辆两部分进行。

$$E = EC + EF \quad (2-5)$$

其中： E 为社会及私人汽车总耗油量（万吨）；

EC 为社会及私人载客车辆耗油量（万吨）；

EF 为社会及私人载货车辆耗油量（万吨）。

社会及私人载客车辆能耗 EC 的计算方法为：

$$EC = D \times \sum_{i=1}^2 QC_i \times GC_i \times LC_i \quad (2-6)$$

其中： i 为载客车辆分类； $i=1$ 中小客车， 2 为大客车。

QC_1 、 QC_2 分别为社会及私人载客中小客车、大客车数量（万辆）

GC_1 、 GC_2 为社会及私人载客中小客车、大客车平均百公里油耗（升/百公里）

LC_1 、 LC_2 为社会及私人载客中小客车、大客车年平均行驶里程（百公里）

D 为燃油密度（取汽油密度0.740和柴油密度0.839的平均值：0.7895吨/千升）

社会及私人载货车辆能耗EF的测算方法为：

$$EF = D \times \sum_{i=1}^4 QF_i \times GF_i \times LF_i \quad (2-7)$$

其中： i 为载货车辆分类。 $i=1$ 微型货车，2轻型货车，3中型货车，4重型货车。

QF_i 为不同分类的社会及私人载货车辆总数（万辆）

GF_i 为不同类型社会及私人载货车辆平均百公里油耗（升/百公里）

LF_i 为社会及私人载货车辆年平均行驶里程（百公里）

D 为燃油密度（取汽油密度0.740和柴油密度0.839的平均值：0.7895吨/千升）

（2）社会及私人汽车保有量数据

公路营业性运输车辆是指在公路运输管理部门注册登记的，近两年内进行了年审或本年进行了缴费，未办理停运（一年以上）、报废、注销、转出手续的从事公路运输的营业性运输工具，不包括城市公交与出租车。因此根据中国统计年鉴（2008）相关数据，需要从民用汽车总数中减去营运汽车、公共汽车、出租车数量，计算出社会及私人汽车分载客和载货汽车的保有量数据，参见表2-14。

在社会及私人汽车中，根据统计年鉴对客车类型和货车类型的划分数据，可以计算出不同车型的数量，参见表2-15。

表2-14 民用汽车分类型保有量

单位：万辆

年份	民用载 客汽车 合计	减：营运 客车	减：公共 汽车	减：出 租车	社会及 私人载 客车辆	民用载 货汽车 合计	减：营运 货车	社会及 私人载 货车辆
2002	1202	290	24	88	800	812	537	275
2003	1479	352	26	90	1011	854	572	282
2004	1739	439	28	90	1182	893	628	265
2005	2132	128	31	94	1879	956	605	351
2006	2620	162	31	92	2335	986	641	345
2007	3196	165	34	96	2901	1054	684	370

来源：《中国统计年鉴-2008》

表2-15 分类型社会及私人汽车保有量

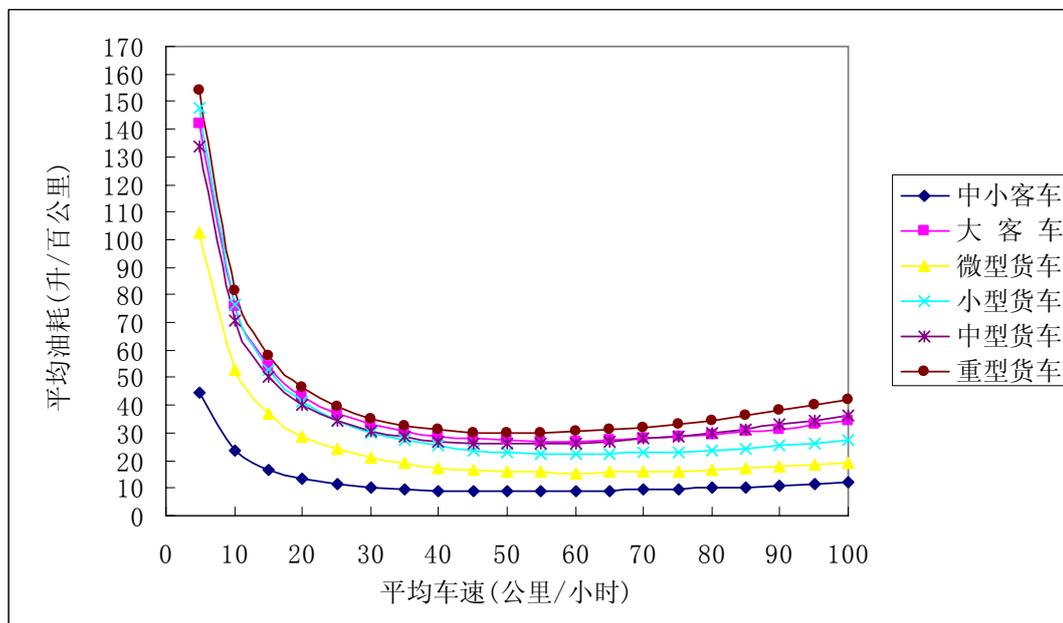
单位：万辆

年份	中小客车	大客车	微型货车	轻型货车	中型货车	重型货车
2002	741	59	40	128	68	39
2003	951	60	39	135	73	34
2004	1122	60	33	134	62	35
2005	1800	79	36	189	78	49
2006	2249	86	23	202	76	45
2007	2821	80	19	228	76	47

来源：根据《中国统计年鉴-2008》私人汽车车型比例及表 2-14 相关数据计算得到

(3) 车辆平均油耗数据

不同类型的车辆，在不同的行驶速度下其燃油消耗是不同的，根据相关研究，不同类型车辆平均油耗曲线参见图2-9。



来源：《中国公路交通资源优化利用上卷——政策建议与行动计划》，亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，北京：中国经济出版社，2009：106-107

图2-9 不同类型车辆平均油耗曲线（燃油包括汽油和柴油）

可以看到，在30公里/小时~80公里/小时的速度区间，车辆的百公里油耗变化不大。模型中的油耗取30公里/小时~80公里/小时速度区间油耗平均值，参见表2-16。

表2-16 不同类型车辆百公里油耗（燃油包括汽油和柴油） 单位：升/百公里

	中小客车	大客车	微型货车	小型货车	中型货车	重型货车
平均油耗	9.2	28.5	16.8	24.2	27.6	31.8

(4) 不同类型车辆年平均行驶里程

不同车辆类型的行驶里程有很大的差异，按照（《中国公路交通资源优化利用上卷——政策建议与行动计划》引用的研究资料，城市私人用车和商务用车的年均行驶里程为1.6~1.8万公里，重型货车的年平均行驶里程为2~5万公里，中型货车和轻型货车的年均行驶里程为2~2.5万公里；大型客车的年均行驶里程与货车类似，高于中小型客车。根据相关资料，不同类型车辆年平均行驶里程取值参见表2-17。

表2-17 不同类型车辆年平均行驶里程

单位：万公里

	中小客车	大客车	微型货车	小型货车	中型货车	重型货车
年均行驶里程	1.7	2.0	2.0	2.1	2.5	3.5

根据上述数据可以测算出社会及私人汽车燃油消耗量。

2.3.2 低速汽车（农用运输车）能耗测算

低速汽车即原农用运输车，是三轮汽车和低速货车通称。三轮汽车原称“三轮农用运输车”，低速货车原称“四轮农用运输车”。在GB 18320-2001《农用运输车安全技术要求》标准中，对农用运输车的定义如下：以柴油机为动力装置，中小吨位、中低速度，从事道路运输的机动车辆，包括三轮农用运输车和四轮农用运输车等，但不包括轮式拖拉机运输机组、手扶拖拉机运输机组和手扶变型运输机。

（1）低速汽车保有量数据

低速汽车已成为我国农村交通运输工具的主力军，是我国道路交通运输网络的重要组成部分。由于历史原因，低速汽车自出现以来一直按农机产品管理，由农机部门负责注册登记，致使低速汽车的统计存在公安部门和农机管理部门两个数据，目前这方面的数据不全。因此，本研究以历年低速汽车产销量为基础，结合低速汽车报废期限（三轮汽车最长9年，低速货车最长12年），进行保有量测算。

历年三轮汽车和四轮汽车的生产量参见表2-18。

据此测算出2002年~2007年我国低速汽车保有量，参见表2-19。

年份	三轮汽车	低速货车	总计
1990	40	4.8	44.8
1991	60	7.8	67.8
1992	100	13	113
1993	107	17	124
1994	140	20	160
1995	200	30	230
1996	205	35	240
1997	220	42	262
1998	246	47	293
1999	268	52	320
2000	248	50	298
2001	244	36	280
2002	220	39	259
2003	223	45	268
2004	165	44	209
2005	148	42	190
2006	164	46	210

来源：《中国低速汽车节能标准与政策研究》（机械工业农用运输车发展研究中心，2007年10月）

表2-19 低速汽车历年保有量

单位：万辆

年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007
三轮汽车	1878	1991	2074	2039	1982	1926
低速货车	355	389	426	457	482	508
低速汽车总量	2233	2380	2500	2496	2464	2434

(2) 低速汽车平均油耗数据

通过对国家农机具质量监督检验中心、国家拖拉机质量监督检验中心对三轮汽车和低速货车进行的燃料消耗量试验所得到的有关数据分析，当前三轮汽车、低速货车的燃料消耗量平均水平，如表2-20所示。

表2-20 三轮汽车、低速货车燃油消耗量水平

三轮汽车平均燃料消耗量水平	低速货车燃料消耗量水平
4.9 L/100Km	9.45 L/100Km

来源：《中国低速汽车节能标准与政策研究》（机械工业农用运输车发展研究中心，2007年10月）

(3) 低速汽车年平均行驶里程

根据相关资料分析（《中国低速汽车节能标准与政策研究》，机械工业农用运输车发展研究中心，2007年10月），我国低速汽车的行驶距离为：三轮汽车平均行驶里程为10000公里/年，低速货车平均行驶里程为15000公里/年。

根据上述数据可以测算出低速汽车燃油消耗量。

2.3.3 摩托车能耗测算

摩托车工业是我国汽车工业的一个重要组成部分，随着人民群众收入不断增加，摩托车已成为广大城乡居民的重要代步工具和致富工具，也逐渐成为休闲娱乐和体育竞技工具。我国自1993年到2008的十余年中，一直是世界摩托车第一生产大国。在中小排量摩托车制造技术领域方面，已接近发达国家水平。

近年来，我国摩托车产销一直呈现增长趋势。2008年，摩托车产销达到2750万辆。在为社会民众提供了大量方便快捷的交通运输工具的同时，在能源消耗率中所占比率也越来越大，并呈明显上升趋势。

(1) 摩托车保有量及车型比例分布

我国历年摩托车保有量数据参见表2-21。

由于我国摩托车主要用为代步工具，最大排量一般为250mL，几乎没有更大排量的摩托车，这与国外主要以休闲、娱乐为主的大排量摩托车不同。图2-10、2-11显示出我国

摩托车不同排量所占比例。

表 2-21 中国历年摩托车保有量

单位：万辆

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
摩托车	5102.8	5955.8	6717.1	7578.7	8147.3	8721.7

来源：中国交通统计年鉴

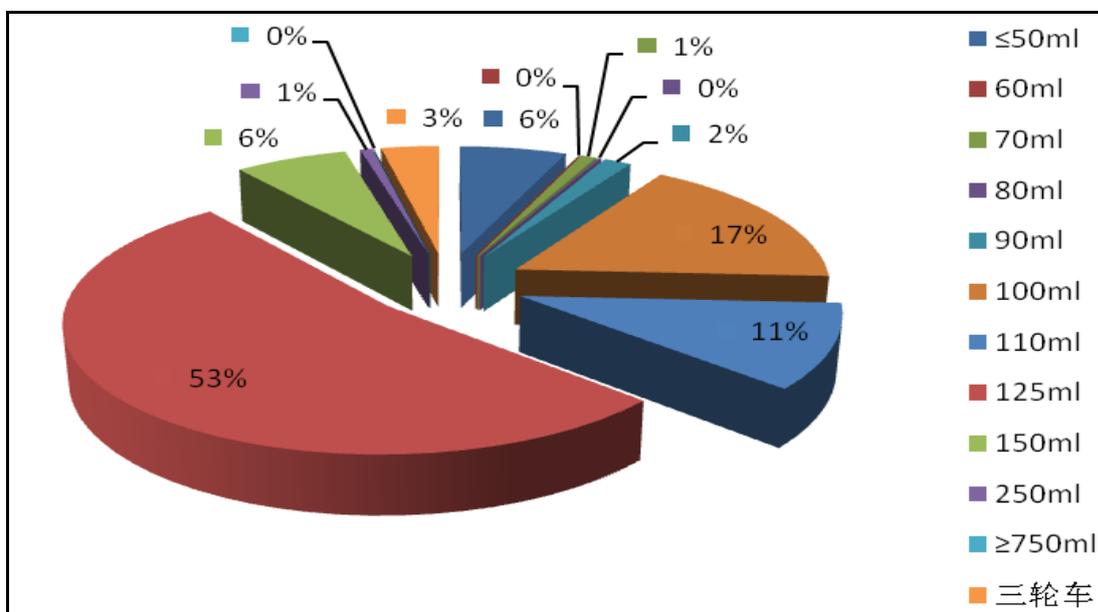


图2-10 2004年摩托车产量比例统计

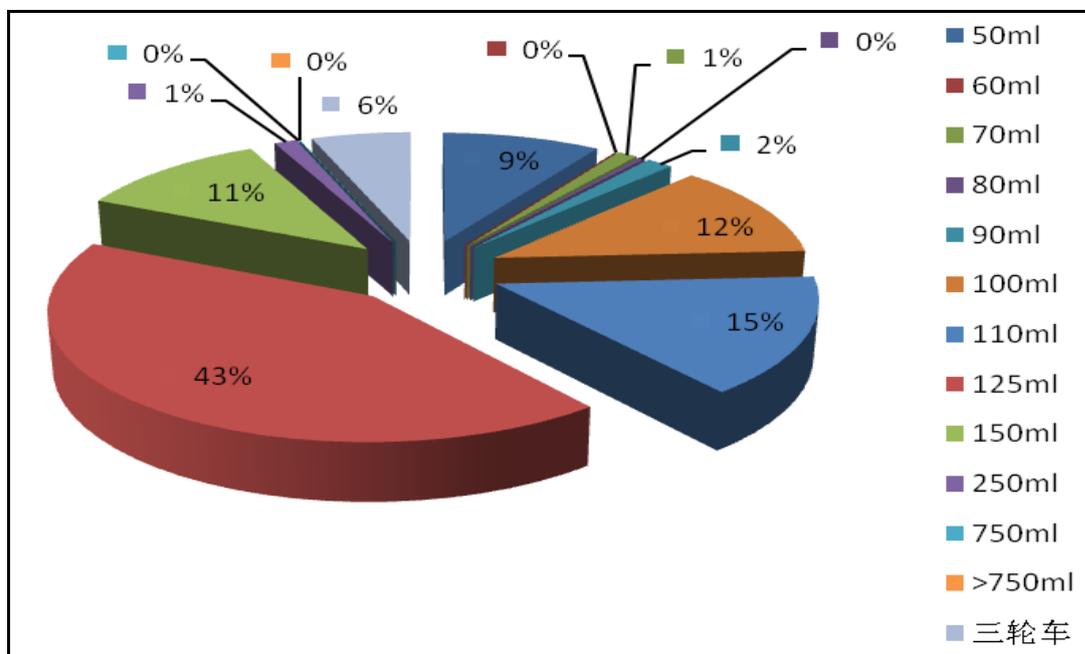


图2-11 2008年摩托车产量比例统计

其中，100~150ml排量的车均占大多数，04年为87%，08年为81%。根据上述数据，可以大致推算出不同排量的摩托车保有量。

(2) 摩托车燃油单耗

标准的油耗限值按中国摩托车的需求结构以及摩托车的现状制定。表2-22、表2-23分别列出了国产两轮摩托车和三轮摩托车国标规定的限值。

表2-22 两轮摩托车国标规定的限值

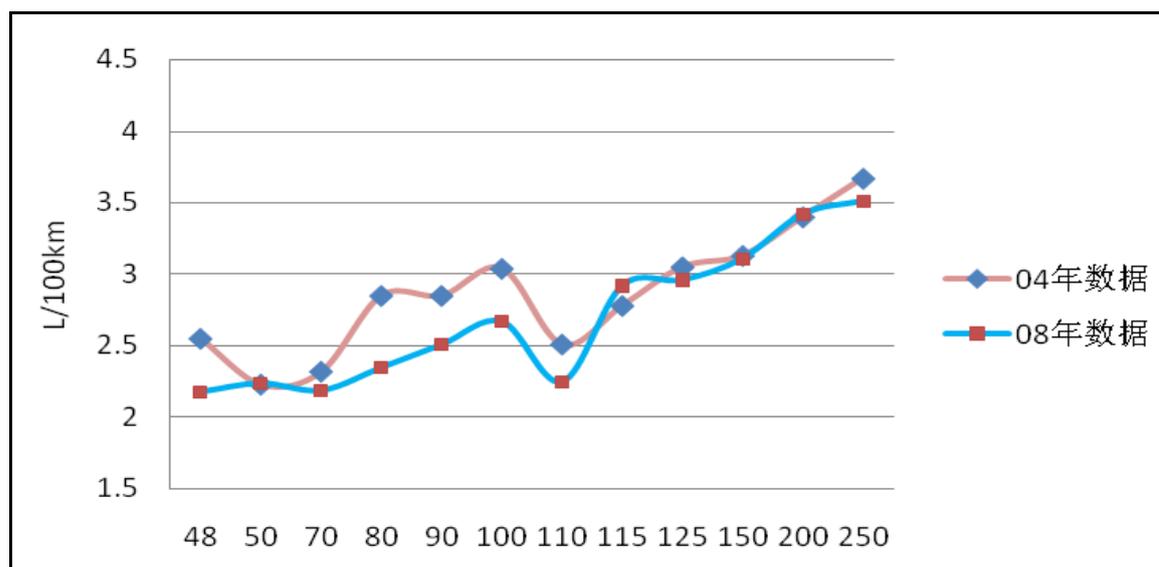
发动机排量 mL	单位: L/100km								
	≤50	>50~ 100	≥100 ~125	≥125 ~250	≥250 ~400	≥400 ~650	≥650 ~1000	≥1000 ~1250	≥1250
燃油消耗限值L/100km	2.0	2.3	2.5	2.9	3.4	5.2	6.3	7.2	8.0

表2-23 三轮摩托车国标规定的限值

发动机排量 mL	单位: L/100km						
	≤50	>50~100	≥100~150	≥150~250	≥250~400	≥400~650	≥650
燃油消耗限值L/100km	2.3	3.3	3.8	4.3	5.1	7.8	9.0

对实际油耗的抽样调查, 结果参见图2-12。

从图可以看出, 我国摩托车I型试验的实测数据与国标限值标准基本吻合。



来源:《中国摩托车燃油消耗及环保达标管理政策研究》, 国家摩托车质量监督检验中心(天津), 2009年4月

图2-12 2004年和2008年两轮摩托不同排量车型的I型试验平均油耗数据

(3) 摩托车行驶里程

我国摩托车主要在城乡地区作为代步工具, 一般来说不适合长途旅行, 因此其年行驶里程比较低, 相关研究认为, 目前中国摩托车年行驶里程约4000~10000公里(《中国公路交通资源优化利用上卷——政策建议与行动计划》引用的研究资料)。

根据上述数据, 可以测算出历年摩托车燃油消耗量。

2.3.4 交通总能耗数据修正

根据上述模型及参数进行测算，各部分未统计在交通运输行业能耗中的能耗数据参见表2-24。

表2-24 未统计的社会交通能耗 单位：万吨

年份	社会及私人汽车耗油	低速汽车耗油	摩托车耗油	合计耗油	合计耗标煤
2002	2512	1194	561	4267	6248
2003	2786	1281	655	4722	6914
2004	2929	1359	738	5026	7360
2005	4284	1382	833	6499	9516
2006	4842	1388	896	7126	10435
2007	5633	1396	959	7988	11697

由此可以得到经数据修正后的交通运输总能耗的比例，参见表2-25。

表2-25 交通运输在总能耗中所占的比重 单位：万吨标准煤

年份	交通运输行业消耗	行业外用于交通运输消耗	交通运输总消耗	全部终端能源消耗	交通运输能耗比例
2002	11171	6248	17419	144231	12.1%
2003	12819	6914	19733	166633	11.8%
2004	15104	7360	22464	194104	11.6%
2005	16629	9516	26145	214479	12.2%
2006	18583	10435	29018	235114	12.3%
2007	20643	11697	32340	253862	12.7%

注：交通运输行业消耗、全部终端能源消耗数据来自《中国能源统计年鉴 2008》

由此可见，按国际统计口径修正后，交通运输能耗在总终端能耗中的比例基本在11.6%以上，从2004年以后呈现逐年上升的趋势，2007年达到12.7%。

2.4 国内外同口径交通能耗数据比较

2.4.1 交通能耗在总终端能耗中的比例比较

在可比口径下，中国和其他国家交通运输能耗在总终端能耗中的比例参见表2-26。

从横断面上看，2007年，中国交通运输能耗在总终端能耗中的比例为12.7%，发达国家均超过25%。美国为28.6%，英国为28.6%，日本为25.9%（2006）。主要因为不同国家的发展阶段和产业结构不同，一方面我国属于发展中国家，我国的产业结构是以工业为

主，工业的发展仍然是国家发展的主体，因此，在国家的能源消耗方面，工业的能源消耗所占的比例最大；另一方面，交通运输业的发展可以从侧面体现出人民的生活水平，只有解决了温饱等基本问题人民才会有出行的要求，目前我国人民生活属于小康水平，甚至部分地区并未达到小康水平，因此，相对于发达国家来说，我国交通运输业能源消耗在全国总消耗中所占的比重较低。世界范围内国家的发展表明，经济越发达，交通运输业能耗在全国总能耗中所占的比重越大。

表2-26 中国和相关国家交通能耗比重数据比较

单位：%

年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007
中国	12.1	11.8	11.6	12.2	12.3	12.7
美国	27.4	27.5	27.8	28.2	28.8	28.6
英国	27.0	26.7	27.2	27.6	27.9	28.6
日本		26.3	25.1	24.4	25.9	

从变化趋势看，近几年中国交通运输能源消耗增长速度较快，增速远远高于其他发达国家。2007年中国交通运输总能耗为32340万吨标煤，比2002年增加了85.7%，同期美国交通总能耗增加了7.7%，英国交通总能耗增加了4.2%，日本交通总能耗增加了约2.8%。这主要是由于我国仍处于发展中国家，而近年我国的发展进入高峰期，随着我国经济的发展，人民生活水平有所提高，交通运输能耗也迅速增加。

2.4.2 交通石油能源消耗比较

为了与发达国家比较，应计算包括私家车和社会车辆在内的交通运输所占比例，在可比口径下，中国与其他发达国家石油总消耗量中交通运输所占比重参见表2-27。

表2-27 各国石油终端消耗量及交通石油消耗

单位：万吨%

	中国石油总耗	中国交通石油能耗	中国交通比例	美国石油总耗	美国交通石油能耗	美国交通比例	英国石油总耗	英国交通石油能耗	英国交通比例
2002	21990	10430	47.4%	102481	68355	66.7%	7400	6000	81.1%
2003	24063	11815	49.1%	103731	68772	66.3%	7350	5990	81.5%
2004	28062	13647	48.6%	107534	70908	65.9%	7530	6130	81.4%
2005	29189	16207	55.5%	107482	71846	66.8%	7730	6260	81.0%
2006	31614	18095	57.2%	106545	72680	68.2%	7710	6250	81.1%
2007	33769	20285	60.1%	106180	72940	68.7%	7560	6230	82.4%

注：中国石油终端能耗来自《中国能源统计年鉴 2008》，中国交通石油能耗为交通行业石油消耗统计数据加模型测算的行业外交通运输消耗数据；英国能源消耗统计年鉴（Energy Consumption in the United Kingdom 2009）；美国运输能源年鉴第 28 版（Transportation Energy Data Book, Edition28）

从横断面上看，2007年中国石油终端消耗为33769万吨，为美国的31.8%，是英国的4.5倍；但按年人均消耗石油来计，中国为0.257吨/人年，是美国的7.3%，英国的20.6%。2007年中国交通石油消耗约为20285万吨，为美国的28%，英国的3.2倍；但按年人均交通

消耗石油来计，中国为0.155吨/人年，是美国的6.3%，英国的15.0%。2007年交通石油消耗比例，中国为60.1%，美国为68.7%，英国为82.4%。

图2-13所示为各国石油消耗总量的变化趋势，从变化趋势上看，中国无论从全社会石油能源总消耗量，还是交通石油消耗量的增长速度都远远大于其它发达国家。

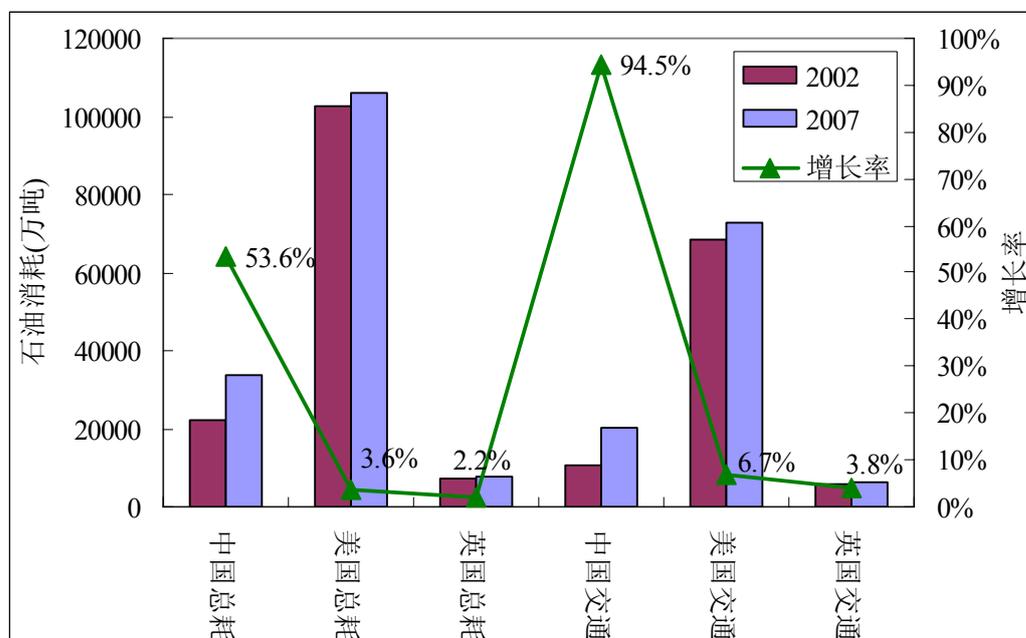


图2-13 各国石油终端消耗总量变化趋势

从2002年到2007年，中国石油终端消耗量从21990万吨增加到33769万吨，增加了53.6%，同期，美国增加3.6%，英国只增加2.2%。

伴随着人民生活水平的提高，近几年我国的机动车保有量有了大幅度提高，因此，我国石油消耗量中交通运输消耗量越来越大。从2002到2007年，中国交通石油消耗量从10430万吨增加到20285万吨，增加了94.5%，同期，美国增加6.7%，英国只增加3.8%。

2.5 主要结论

(1) 在交通运输能耗统计方面，我国与国外的统计口径存在着差异，主要表现在：

①行业划分上，我国把交通运输和仓储、邮政业划分为一个行业进行统计，国外不包括仓储和邮政。

②我国的公路运输用油只统计交通部门运营车辆用油，未统计社会其他部门行业及私人车辆用油。

③部分用于旅游的车辆、船舶等交通工具能耗未计入交通运输能耗中而计入了旅游

业中。

④交通运输行业部分建筑能耗也计入交通运输行业能耗。

以上第二项差异涉及到的范围广泛，能源数值大，对于计算交通运输能耗水平有着很大的影响，使得我国交通能耗数据比国际统计口径数据的计算结果明显偏小。

(2) 为了测算社会其他部门行业及私人车辆用油，目前相关研究采用油品分摊法，即对汽油及柴油用途进行重新分类估算，将非运输行业的能源消耗按一定比例折算到运输能耗中，得到新的交通运输能源消耗量数值。本研究认为对汽油及柴油用途进行重新分类估算的测算方法其优点是简便易行，可以分别估算出汽油和柴油的消耗量。但如何确定合适的分摊系数缺乏理论计算支持。按此方法测算的交通运输能耗与实际发展趋势情况不太相符。

(3) 本研究利用可以得到的数据，寻求一种可行的基于车辆行驶运用的测算社会及私人车辆能耗的模型。公路运输中社会车辆和私人家庭车辆主要包括四部分：

- ①社会及私人汽车，
- ②摩托车，
- ③低速汽车（农用运输汽车），
- ④其它车辆（比如军车等）。

其中其它车辆（军车等）由于缺乏必要的基础数据，难以进行测算。本研究重点测算社会及私人汽车、摩托车、低速汽车（农用运输汽车）的燃油消耗。

(4) 2007年国家统计的交通运输与仓储邮电行业石油消耗为12297万吨，总能耗为20643万吨标准煤；全国石油终端能耗为33769万吨，全部终端能耗为253862万吨标准煤。根据本研究测算，2007年中国未统计在交通运输行业能耗中的车辆油耗约为7988万吨，折合标准煤11679万吨。与行业统计数据相比，大约56.6%的能耗未统计。按照国际统计口径修正后，2007年中国交通运输石油能耗占全部石油终端能耗的比例为60.1%（按国家统计局数据计算为36.4%），交通运输总能耗在全部终端能耗中的比例为12.7%（按国家统计局数据计算为8.1%）。可以看到，目前的交通运输能耗统计数据低估了交通运输的总能耗水平，特别是大大低估了交通运输对石油这种一次性化石能源的消耗水平。

(5) 世界范围内国家的发展历程表明：交通运输能耗比例大小关联于国家的经济发展阶段及其产业结构。经济越发达，交通运输业能耗在全国总能耗中所占的比重越大。2007年，中国交通运输能耗在总终端能耗中的比例为12.7%，而美国为28.6%，英国为28.6%，日本为25.9%（2006），发达国家交通运输能耗所占比例仍远高于我国。

(6) 2007年中国石油终端消耗为33769万吨，为美国的31.8%，是英国的4.5倍；但按年人均消耗石油来计，中国为0.257吨/人年，是美国的7.3%，英国的20.6%。2007年中国交通石油消耗约为20285万吨（统计加测算），为美国的28%，英国的3.2倍；但按年人均

交通消耗石油来计，中国为0.155吨/人年，是美国的6.3%，英国的15.0%。在可比口径下2007年石油消耗中交通所占比例，中国为60.1%，美国为68.7%，英国为82.4%。中国目前比例虽然较低，但近年来美国、英国交通石油消耗比例基本保持稳定，中国交通石油消耗比例有较快的增长。

（7）各国交通石油消耗量的增长速度均大于全社会石油终端消耗总量的增长速度。作为一个发展中国家，中国无论是全社会石油能源总消耗量，还是交通石油消耗量的增长速度都远远大于其它发达国家。从2002年到2007年，中国石油终端消耗量从21990万吨增加到33769万吨，增加了53.6%，交通石油消耗量从10430万吨增加到20285万吨，增加了94.5%；同期，美国石油终端消耗量增加3.6%，交通石油消耗量增加6.7%；英国石油终端消耗量只增加2.2%，交通石油消耗量增加3.8%。

3 铁路能耗数据统计与测算

按照调整后的《中长期铁路网规划》，我国加快了大规模铁路建设步伐，特别是为应对国际金融危机对我国经济社会的影响，积极主动落实拉动内需的任务，进一步加快投资建设力度，2008年全国铁路固定资产投资完成4168.47亿元，比上年增加1587.10亿元、增长61.5%；其中建设投资完成3602.12亿元，比上年增加1591.34亿元、增长79.1%。

2008年，铁路路网规模继续扩展，全国铁路营业里程达到8万公里，里程长度位居世界第三，路网密度83.0公里/万平方公里。路网结构得到优化，全国铁路复线里程2.9万公里，复线率36.2%，比上年提高1.5%；电气化里程2.8万公里，电气化率34.6%，比上年提高1.9%。同时，路网质量也进一步提升，经过第六次大面积提速改造和新线建设，时速120公里及以上线路延展里程达到2.4万公里；时速160公里及以上线路延展里程达到1.6万公里；时速200公里及以上线路延展里程达到6415公里，其中时速250公里线路延展里程达到1207公里、时速350公里线路延展里程185公里，轨重60千克及以上正线里程占正线总里程的80.2%，比上年提高2.7%。

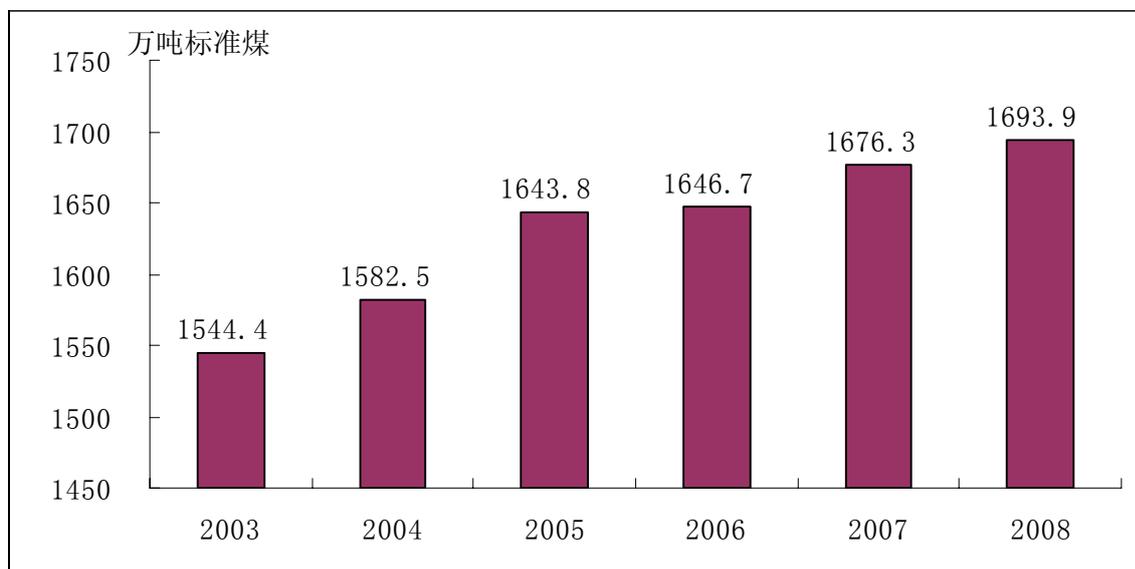
相应的，机车车辆质量明显提高，全国铁路机车拥有量达到1.84万台，内燃机车占65.2%，电力机车占34.2%，其中“和谐型”大功率电力机车744台，主要干线全部实现内燃、电力机车牵引。全国铁路客车拥有量达到4.51万辆，其中空调车2.71万辆、“和谐号”动车组176组。全国铁路货车(不含企业自备车)拥有量达到59.18万辆，其中提速货车55.50万辆。

3.1 铁路能耗统计数据分析

铁路能耗是指铁路旅客运输、货物运输及相关的调度、信号、机车、车辆、检修、工务等铁路运输辅助活动中所产生的能源消耗。

铁路能耗数据统计主要包括铁路旅客运输(不包括客运火车站，计入运输辅助活动)、铁路货物运输(不包括货运火车站，计入运输辅助活动)、铁路运输辅助活动(不包括火车站内独立的餐饮及零售，计入餐饮零售业)、其他铁路运输辅助活动(指铁路旅客、货物运输及客、货火车站以外的运输网、信号、调度及铁路设施的管理和养护，不包括铁路系统对社会提供的通信服务，计入通信业，铁轨、路基的抢修与重建，计入建筑业)。

国家铁路能耗统计数据比较丰富，合资铁路和地方铁路能耗统计数据相对缺乏，其所占的比重较小，因此本研究将以国家铁路能耗统计数据为基础进行。2003~2008年国家铁路运输企业能源消耗量如图3-1所示。



数据来源：《2007、2008 铁道统计公报》

图 3-1 国家铁路运输企业能源消耗量

从图3-1可以看出，2003年至2008年，国家铁路运输企业能源消耗量逐年增加，增加量分别为38.1、61.2、29.6、29.6、17.6万吨，增长比例分别为2.5%、3.9%、0.2%、1.8%、1.0%。2008年国家铁路运输企业能源消耗折算标准煤1693.9万吨，比2003年增加149.5万吨、增长9.7%。

虽然能耗总量增加，但2003~2008年国家铁路换算周转量单耗逐年降低。2008年国家铁路万换算吨公里消耗56.0千克标准煤，比2007年减少1.8千克标准煤，降低3.1%；与2003年相比，降低了17.2千克标煤，降幅达23.5%。国家铁路换算周转量单耗的降低主要是因为铁路能源消耗量的增幅远低于换算周转量的增幅。2008年国家铁路换算周转量比上年增长8.2%，而能源消耗量仅比上年增长1.0%，远低于换算周转量的增幅，其他年份亦如此，从而使换算周转量的单耗逐年降低。

国家铁路运输企业消耗能源中，主要包括柴油、电力、原煤、汽油等，其中柴油和电力主要用于运输生产，如牵引机车、调车作业等，煤炭和汽油用于运输辅助活动中。1990~2007年国家铁路能源消费结构比例如图3-2所示。

从图3-2可以看出，1990~2007年，原煤消耗量不断下降，柴油和电力的消耗量逐年增加，这与国家铁路牵引方式的变化密切相关，上个世纪九十年代，铁路加快了电气化和现代化建设，蒸汽机车被大面积淘汰，新型内燃机车和电力机车成为主要牵引方式，带来了铁路柴油和电力消耗量的大幅增加。

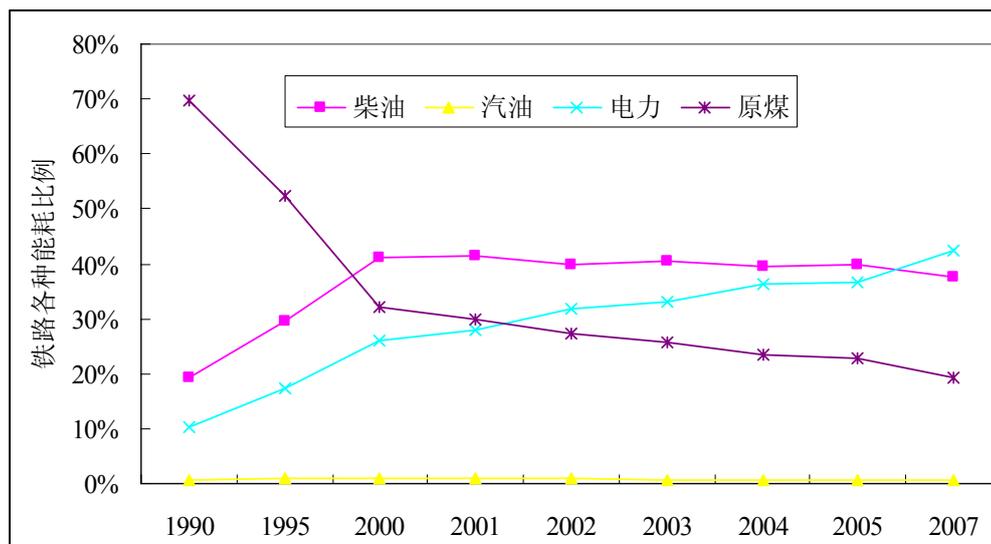
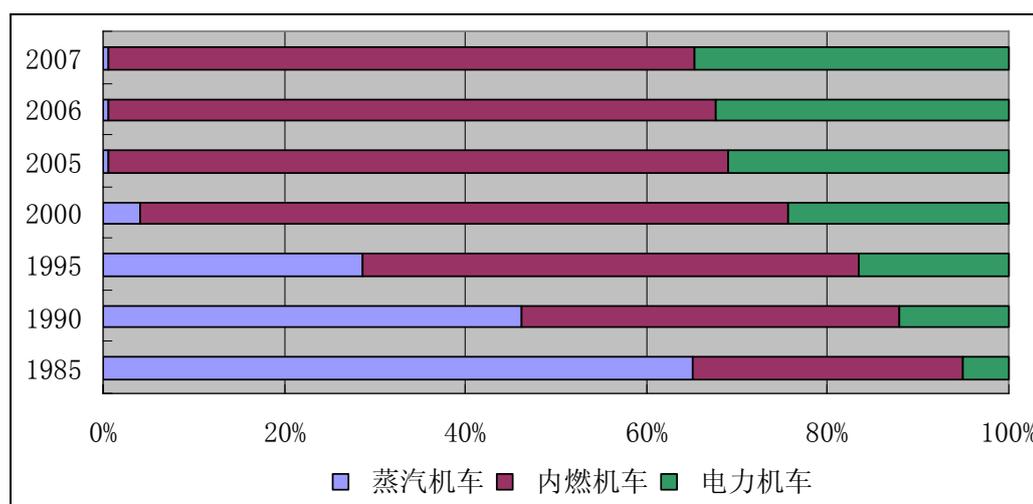


图 3-2 国家铁路能源消耗结构变化曲线

目前，国家铁路牵引方式主要分为内燃机车牵引和电力机车牵引两种，图3-3为1985~2007年国家铁路机车结构比例变化。



来源：《铁路简明统计资料》，铁道部统计中心，中国铁道出版社，2009.1

图 3-3 国家铁路机车结构比例

各类机车不断发展变化形成了现有铁路机车的组成结构，2007年国家铁路拥有机车总量为18306台，其中蒸汽机车124台，内燃机车12111台，电力机车6071台，各类机车分别占机车总量的0.68%、66.2%和33.2%。我国铁路近年来一直致力于牵引动力结构改革，从过去以蒸汽机车为主，转变为以内燃和电力机车为主。主要干线全部实现内燃、电力机车牵引。电力机车比例的提高与我国铁路电气化建设密切相关，2000年国家铁路电气化线路长1.49万公里，占铁路营业里程的21.7%，2007年这两项指标分别达到2.8万公里和34.6%。而牵引动力结构的变化使能源消耗结构也发生了相应的变化。

3.2 影响铁路能耗的微观因素分析

通过对大量列车实际运行数据分析，可以发现影响列车运行能耗的微观因素主要包括两大部分，一部分为是乘务员不可改变的硬件以及运营条件，另一部分由列车操纵控制技术引起的列车运行效果差异，主要包括列车惰行点选择和速度均衡性。

3.2.1 列车特性及运营环境条件

第一类因素是指列车特性及运营环境条件。对货物列车运行能耗有着一定影响的列车特性及运营环境条件主要包括列车类型、列车编组（含机车牵引特性、列车制动特性、车辆阻力方程）、停站方案、线路运行条件（坡道、曲线、隧道、桥梁、工程限速、信号制式等）、运行时分以及气候条件等，上述因素属于机车乘务员不可控影响因素。

（1）列车类型和种别

列车类型主要包括电力机车、内燃机车以及蒸汽机车，运输种别则包括客运、货运、小运转、专用调车和其他运输等因素。由于动力系统的根本性差异，列车类型对运行能耗的影响很大。同时，内燃机车和电力机车型号众多，不同型号的机车能耗也有很大差别。在内燃机车能耗计算公式中，单位时间燃油消耗量由各型内燃机车燃油消耗量曲线图或牵引计算数据表得出，主要与机车型号、手柄位和速度相关。电力机车能耗计算公式中，平均有功电流由各型电力机车有功电流曲线图或牵引计算数据表得出，同样与机车型号、手柄位和速度相关。

目前，铁路运输已全面推广使用电力机车，研究电力机车节能技术十分必要。电力机车节能技术可以从以下几个方面开展：

① 降低机车运行阻力

机车（含所挂的车厢，以下均同）在轨道上的运行阻力由两部分组成，分别是机械阻力和空气阻力。其中，机械阻力与列车质量成正比，可以通过车辆轻型化及降低轮/轨间滚动摩擦阻力以及轴承等的摩擦阻力来降低机械阻力。空气阻力与速度的平方成正比，能够通过缩小车辆截面，改进车头形状，使车体表面平滑化等，改进空气动力学特性来降低空气阻力。

② 减轻车辆质量

减轻车辆质量可以明显降低运行阻力中的机械阻力，并可降低上坡道阻力；同时，因为加、减速时用较小的力就可以获得所需的加、减速度，所以能减小车辆的拉力、制动力；另外，减轻车辆质量能够抑制随高速化而增大的制动吸收动能。如：速度从 200km/h 提高到 260km/h，动能增加 70%左右，但是如果质量降低 35%，则动能仅增加 10%左右。

③ 采用再生制动系统，再生制动系统可以将制动时产生的动能转变为电能返回电

网。

④ 改善功率因数，采用先进的 PWM 逆变器控制功率因数，可使受电弓处的功率因数为 1，而以往的晶闸管连续相位控制的直流电动机驱动方式的功率因数为 0.8 左右，所以受电弓处的电流可以降低 20%，输电损耗减少，利于节能。

⑤ 降低机器损耗，提高机车驱动系统的电气设备效率，减少从牵引变压器的输入到牵引电动机输出的电力损耗，达到节能目的。

(2) 运输组织

运输组织对列车操纵有着直接的影响，因此对列车行车能耗也有较大的影响，其具体表现为列车编组、停站方案以及运行时分要求等对行车能耗的影响。

在内燃机车和电力机车能耗的计算公式中，运输组织的影响主要体现在牵引工况的运行时分，惰行、空气制动、停站等柴油机空转的运行时分，以及电阻制动工况的运行时分等时间参数上。

① 列车编组

列车编组是指组成列车的车辆数及其车种构成，由于实际运输情况的差异，列车编组具有多样性，即组成列车的车辆种类（平车、敞车、棚车等）及其数量是不同的，同时列车还可以采取空车和重车混合编组的形式，从而导致列车重量的不同，牵引运行和制动运行时的能耗量有产生变化。

牵引定数对列车运行单耗有重要的影响，选取宁西线同种类型牵引机车、相同运输区段的列车运行能耗数据分析，当牵引定数增加，列车运行单耗显著降低，其运行单耗与牵引定数变化关系如图 3-4 所示。

不过如果机车牵引定数过大，一方面对运输安全造成隐患；另一方面，会造成机车额外的能源消耗。因此，合理确定机车牵引定数才能在安全的前提下有效增加能源利用效率。

② 停站方案

停站次数的增加，意味着列车制动导致的动能损失增加，列车运行能耗也会相应增加。根据既有文献，列车制动耗能（即制动造成的动能损失）约占机车总能耗的 10-20%。以内燃机车为例，列车制动耗能折合的燃油损失 $E_{\text{制}}$ 一般意义上的公式可表示为：

$$E_{\text{制}} = m(v_t^2 - v_i^2)/(2Q \cdot \eta) \quad (3-1)$$

其中 m 表示列车质量（等于机车计算质量加牵引质量），单位 t； v_t 、 v_i 分别表示列车制动初速度和末速度，单位 km/h； Q 表示燃油热值，单位 kJ/kg； η 表示机车平均效率。

若取 $Q = 4.22 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ ， $\eta = 0.31$ ，可得： $E_{\text{制}} \approx 2.95 \times 10^{-6} m(v_t^2 - v_i^2)^{[60]}$

由上式可知，4000 吨的列车在平坡上由 75km/h 制动停车，因动能损失而折合的柴油消耗能约为 50kg，停站方案对列车运行能耗有着较大的影响。

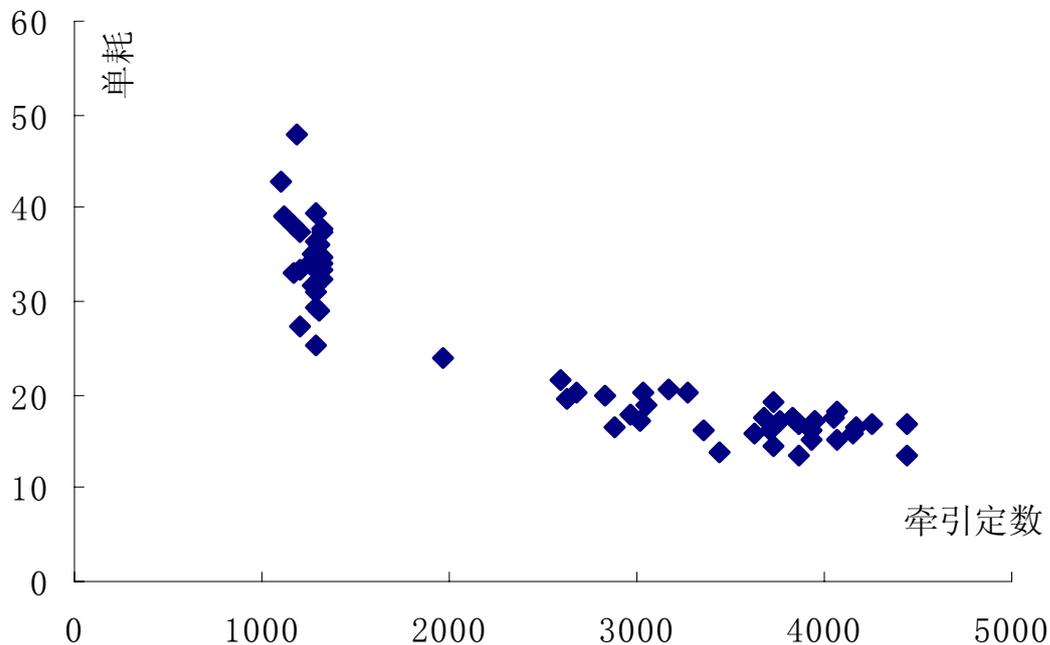


图 3-4 列车单耗与牵引定数变化关系示意图

③ 运行时分

在其他运行条件相同的情形下，运行时分的增加可在一定程度上允许更多的惰行，列车牵引能耗也相应降低。由于运行速度与时分直接相关，因此，运行时分对行车能耗的影响也可通过运行速度来体现。根据机车牵引特征，SS3 型电力机车恒功速度范围为 47.2-63.6km/h，在此速度范围内机车牵引性能最好，同时机车牵引电机电枢电流也最经济。当机车牵引速度降低，机车轮周牵引力增大，消耗电能也越多。内燃机车牵引电机原理也相同。

(3) 线路条件

对列车运行能耗有着显著影响的线路条件，主要包括坡道、曲线、隧道、桥梁、工程限速和信号制式等，其中，坡道和工程限速的影响最为显著。

3.2.2 列车操控技术因素

第二类因素是指由列车操纵控制技术引起的列车运行效果差异，通过现场测试与观察分析，影响列车运行能耗的乘务员操纵策略主要包括乘务员预判距离、途中运行速度控制范围、使用的最大牵引力、最大制动力、牵引率、惰行控制比例等，这类因素属于乘务员可控制变化因素。

在一定的牵引机车、车辆、线路等硬件环境下和既定的运行图、列车编组计划等运营管理状况下，改进车辆的操纵方法以实现列车的节能运行，是一条经济有效且直接可行的节能途径。

近年来，由于多次扩能改造与列车牵引方式的转型和受列车运行监控记录装置、计长增加和平稳操纵等各种条件的限制，在对乘务员操纵技能提出新考验的同时，也给节能降耗增加难度。许多机车乘务员操纵时不能很好地利用动能闯坡，新司机不容易熟练掌握各种线路坡道条件下的给退电、油时机，以及起步、停车、加减速等环节的节能技术，使机车的能耗增加。据上海铁路局合肥机务段统计，在相同其他条件下，因司机操纵技术水平引起的列车运行能耗差异可达 30%。

(1) 速度均衡控制

图 3-5 所示为速度均衡性对运行阻力功和能耗的影响。速度均衡性是指列车运行中实际速度与目标速度的标准差。

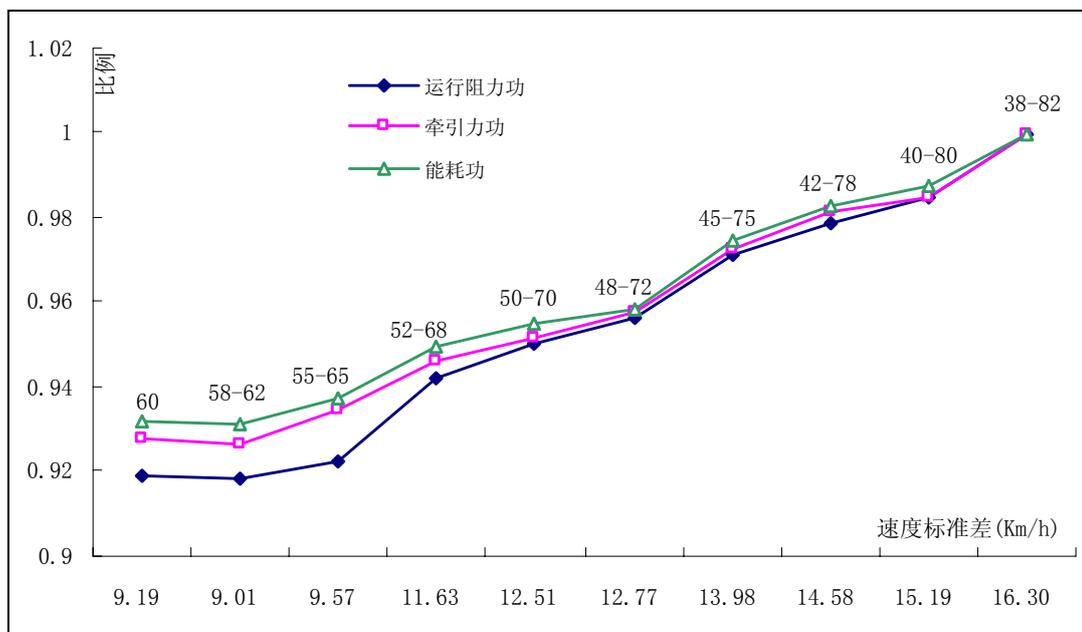


图 3-5 速度标准差对运行阻力功和能耗影响

从图可以看出，列车运行阻力功、牵引力功、能耗和速度标准差正相关，列车运行速度均衡性越好，其阻力功和运行能耗更小。较小的目标速度控制范围具有最小的速度标准差，其运行阻力功、牵引力功和能耗均为最小。

(2) 预判距离影响

图 3-6 所示为乘务员预判距离对列车运行能耗的影响。预判距离指列车在临时限速以及停车制动前的惰行距离。由图可知，在停车制动前采取惰行减少动能损失的策略可较大幅度的降低运行能耗。在临时限速区段前惰行 4 km，在停车制动前增加 6 km 的惰行，可节约列车运行能耗 16%，而运行时分仅增加 3%。

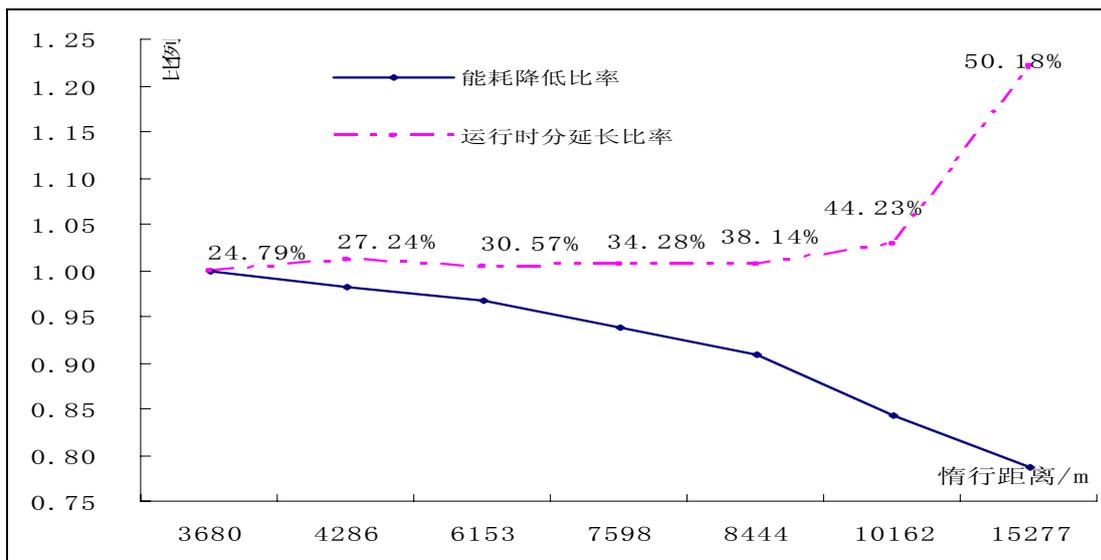


图 3-6 预判距离对运行能耗的影响

通过避免不必要制动和增加停站制动前的惰行距离，可在运行时分增加 0.5% 的情况下节约列车运行能耗达 9%。同样，通过合理的设置目标速度控制上下限，控制列车运行速度均衡性以减少列车运行阻力功，可在严格遵守运行时分的情况下节约列车运行能耗 6.8%^[61]。

20 世纪 80 年代以来，欧美等许多国家在列车节能操纵方面总结出了节能的列车操纵方式，并应用微机技术研制开发列车优化操纵的微机指导系统、微机控制系统、操纵模拟系统等，列车优化操纵的节能效果一般为 5%~15%。

对于平道或坡度变化很小的线路，理论证明存在的最优操纵序列为“最大加速、匀速运行、惰行、最大制动”，即刚出站时就以最大加速度，加速前进，达到限速时，匀速前进，快要进站时就不要施加任何牵引力，让机车滑行，进站时，施加最大制动，列车速度减为零。

3.2.3 其他影响因素

由地区差异引起的海拔高度、气候、气压差异，将引起列车运动方程参数的变化，因此，其列车运行能耗也将受到影响。由于受地形、线路条件、列车种类和列车运行速度等因素影响，各铁路局平均每万吨公里的能耗相差很大，例如 2005 年，内燃牵引能耗最高的成都铁路局（77.3 千克/万吨公里）与能耗最低的济南铁路局相差 3.77 倍，电力牵引能耗最高的昆明铁路局（149.4 千瓦时/万吨公里）与能耗最低的哈尔滨铁路局相差 1.82 倍。

3.3 铁路机车单耗测算模型

铁路能源消耗微观计算模型以机车单耗为研究目标，运用列车运行计算的相关原理计算单个机车的能源消耗量。计算的基本思路是：根据全国机车平均牵引的列车重量和平均技术速度，计算各种型号机车的牵引力，然后通过机车的牵引特征曲线，取得机车的手柄位(柴油机转速)，进而确定机车单位时间的能耗，这样就得到了各型号机车的单耗，最后按照各种型号机车的数量和比例进行加权平均，获得内燃机车和电力机车的单耗数据。

按照牵引方式，我国铁路机车主要分为内燃机车和电力机车，2007年我国铁路机车主要型号及其数量如表 3-1 所示。

表 3-1 2007 年国家铁路机车主要型号及其数量

内燃机车	数量(台)	比例	电力机车	数量(台)	比例
合计	11229	100.00%	合计	5993	100.00%
DF4	6188	55.11%	SS1	629	10.50%
DF8	964	8.58%	SS3	1909	31.85%
DF11	611	5.44%	SS4	1365	22.78%
ND5	388	3.46%	SS7	486	8.11%
			6K	80	1.33%
			8G	96	1.60%
其他	3078	27.41%	其他	1428	23.82%

因内燃机车和电力机车的型号众多，本研究根据基础数据的可得性以及车型的代表性，选取一些有代表意义的机车型号进行计算，被选用的机车型号一般占机车总量的比例较大，或较之前年、去年的保有量有所增加，反映了机车添置的趋势。其中内燃机车主要选取 DF4、DF8、DF11 和 ND5，占内燃机车总量的 73%；电力机车主要选取 SS1、SS3、SS4、SS7、6K 和 8G，占电力机车总量的 76%。另外，需要指出的是，电力机车的数量比前年增加了 871 台，增长迅猛。可见，随着电气化铁路的逐步增多，电力机车的数量预计在不久的将来就会超过内燃机车。

本报告中计算公式和技术参数均根据铁道部《列车牵引计算规程 TB/T 1407-1998》得出。

3.3.1 内燃机车单耗计算模型

内燃机车的能源消耗是以机车耗油量为基础计算的。内燃机车燃油消耗量通常按照牵引工况和非牵引工况分别进行计算，非牵引工况包括：惰行、空气制动、停站等柴油机空转的工况，以及电阻制动的工况。牵引工况和非牵引工况指的都是机车在牵引区段内的工作状态，不包括机车在区间内与牵引、推送列车无关的机车运用如调车、出入段等辅助走行时的工作状态。

牵引区段内的燃油消耗量计算公式如下（区段长度取 1km）：

$$E = E_y = \sum (e_y \cdot \Delta t_y) \quad (\text{kg}) \quad (3-2)$$

式中：

E_y ——牵引运行的燃油消耗量，单位为 kg；

e_y ——对应一定工况（手柄位或柴油机转速）和速度的单位时间燃油消耗量，单位为 kg/min，其值由各型内燃机车燃油消耗量曲线图或牵引计算数据表查出，按新《牵规》规定，最高手柄位或柴油机转速的燃油消耗量打九折（即查出的 e_y 值乘以牵引力使用系数 0.9），其余手柄位（柴油机转速）的 e_y 取值不应大于同一速度上述最高手柄位打九折后的 e_y 值。在本报告中为了简化，假定列车匀速运行在水平直线上，所以手柄位和 e_y 值保持不变；

Δt_y ——牵引工况的运行时分，单位为 min。

列车在平直坡道上匀速运行时的机车牵引力 F （单位 kN）计算公式为：

$$F = (P \cdot \omega_0' + G \cdot \omega_0'')g \times 10^{-3} \quad (3-3)$$

式中：

G ——机车牵引重量，单位为 t；

P ——机车计算重量，单位为 t；

ω_0' ——机车运行单位基本阻力，单位 N/kN；

ω_0'' ——车辆运行单位基本阻力，单位 N/kN；

g ——重力加速度，取 9.81N/kg。

同一种机车不同速度和工况（手柄位或柴油机转速）条件下，机车单位时间的燃油消耗量是不同的，图 3-7、图 3-8 分别为 DF4（货）型内燃机车牵引特性曲线、燃油消耗量曲线。

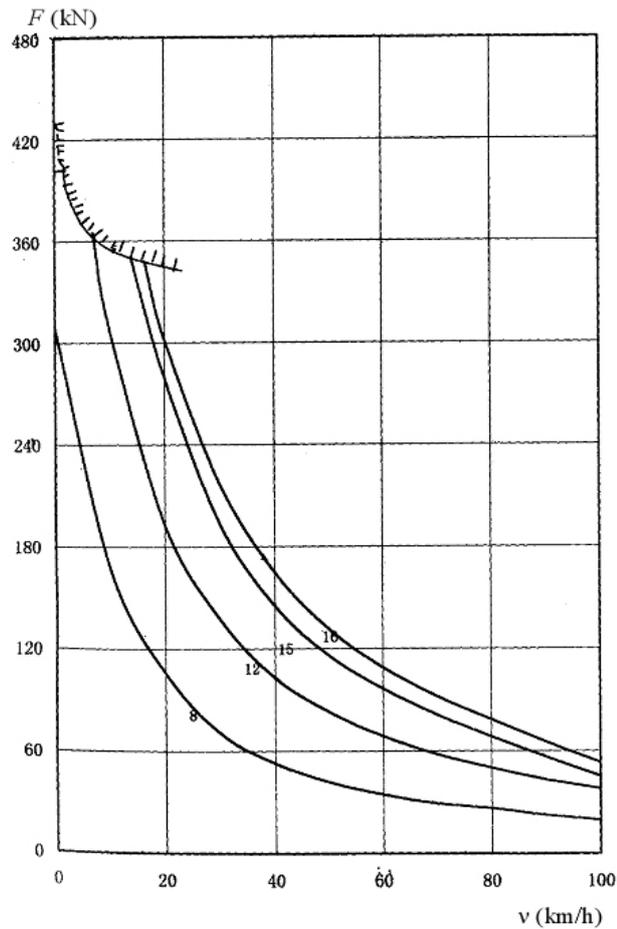


图 3-7 DF4（货）型内燃机车牵引特性曲线

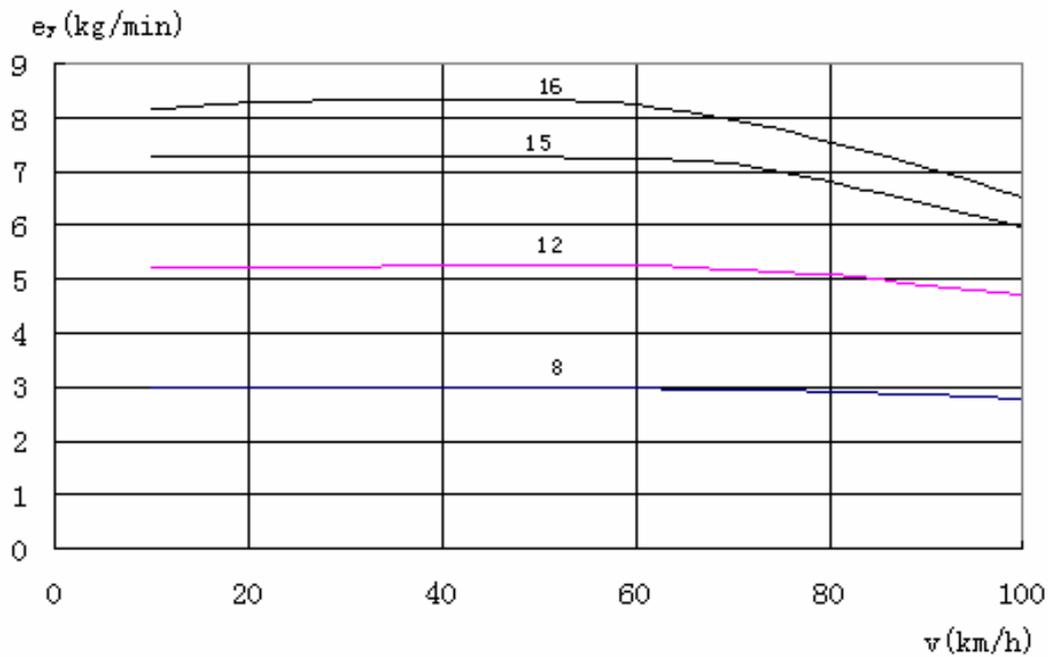


图 3-8 DF4（货）型内燃机车燃油消耗量曲线

不同机车的牵引特性曲线、燃油消耗量曲线各不相同，图 3-9、图 3-10 分别为 DF8 型内燃机车牵引特性曲线、燃油消耗量曲线。

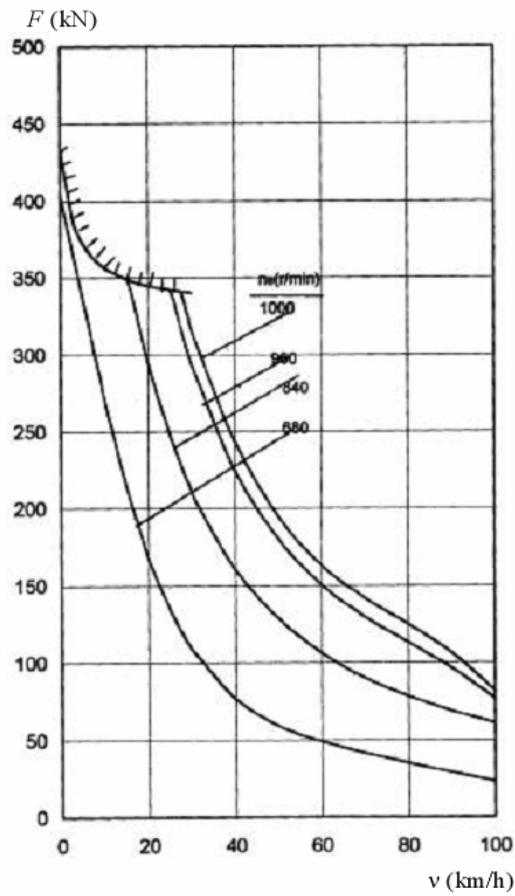


图 3-9 DF8 型内燃机车牵引特性曲线

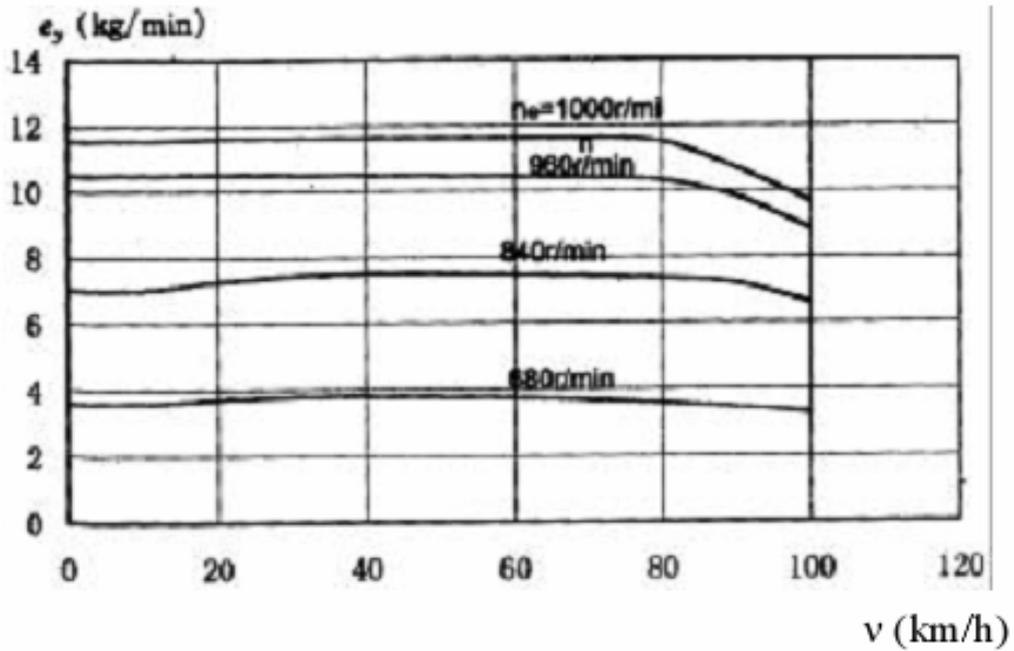


图 3-10 DF8 型内燃机车燃油消耗量曲线

机车每万吨公里燃油消耗量 e (单位 kg), 按下式计算:

$$e = \frac{E \times 10^4}{G \times L} = \frac{e_y \times \Delta t_y \times 10^4}{G \times L} = \frac{e_y \times 60 \times 10^4}{G \times V} \quad (3-4)$$

式中：

- G——机车牵引重量，单位为 t；
- L——牵引区段长度，单位为 km；
- V——列车运行速度，单位为 km/h。

对于客运和货运，计算时的区别除了由于机车车型不同外，主要是机车的牵引重量和速度不同从而导致能耗的不同。

3.3.2 电力机车单耗计算模型

对于电力机车，能量消耗是以机车消耗的电流为基础的。电力机车耗电量 Q 通常按牵引运行耗电量 Q_y （包括自用电量）和惰行、空气制动、停站时的自用电量 Q_0 两部分进行计算。与内燃机车相同的是，计算的能源消耗也不包括机车在区间内与牵引、推送列车无关的机车运用如调车、出入段等辅助走行时的能源消耗。

$$Q = Q_y = \frac{U_w \cdot \sum [(I_p + I_{po}) \cdot \Delta t]}{60 \times 1000} \quad (kw \cdot h) \quad (3-5)$$

式中：

U_w ——受电弓处网压，单位为 V，取值为 25 000V；

I_p ——平均有功电流，单位为 A；其值由各型电力机车有功电流曲线图或牵引计算数据表查出。按新《牵规》规定，最高负荷或最高手柄的 I_p 值打九折（即查出的 I_p 值乘以牵引力使用系数 0.9）；部分负荷或其他手柄位的 I_p 取值不应大于同一速度上述最高负荷打九折后的 I_p 值。在本报告中为了简化，假定列车匀速运行在水平直线上，所以手柄位和 I_p 值保持不变。

I_{po} ——自用电有功电流，单位为 A，牵引运行 4 轴和 6 轴机车取 6A，8 轴机车取 7.5A；

Δt ——牵引工况时间，单位为 min。

同一种机车在不同速度和运行级位下，单位时间机车的有功电流是不同的，有功电流的不同导致机车耗电量的不同。图 3-11、图 3-12 为 SS1 型电力机车牵引力特性曲线、有功电流曲线。

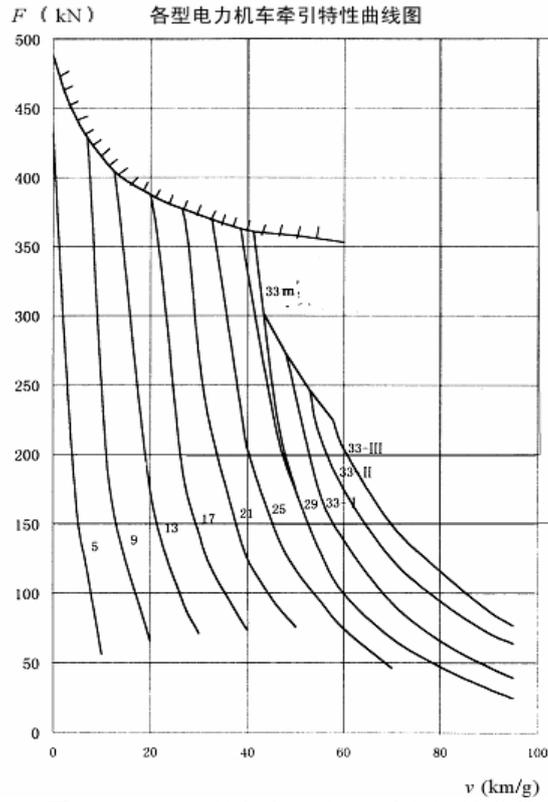


图 3-11 SS_1 型电力机车牵引力特性曲线

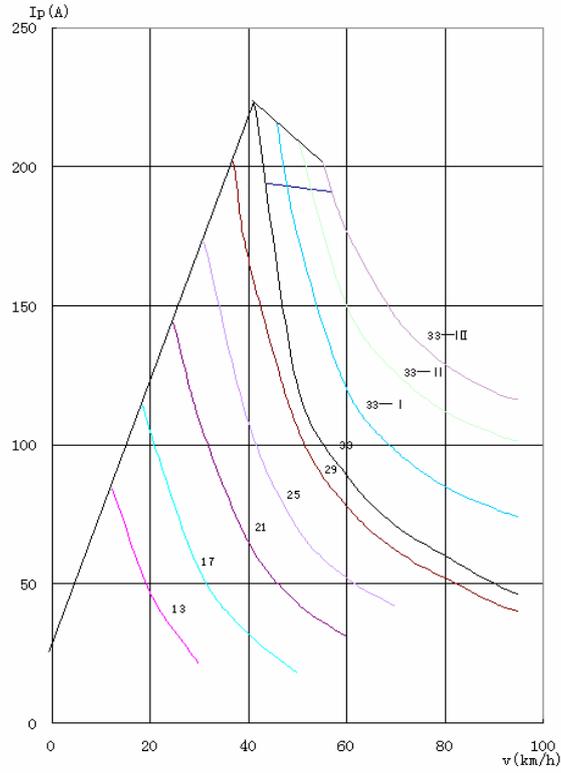


图 3-12 SS_1 型电力机车有功电流曲线

不同机车的牵引力特性曲线、有功电流曲线也不同。图 3-13、图 3-14 为 SS3 型电力机车牵引力特性曲线、有功电流曲线。

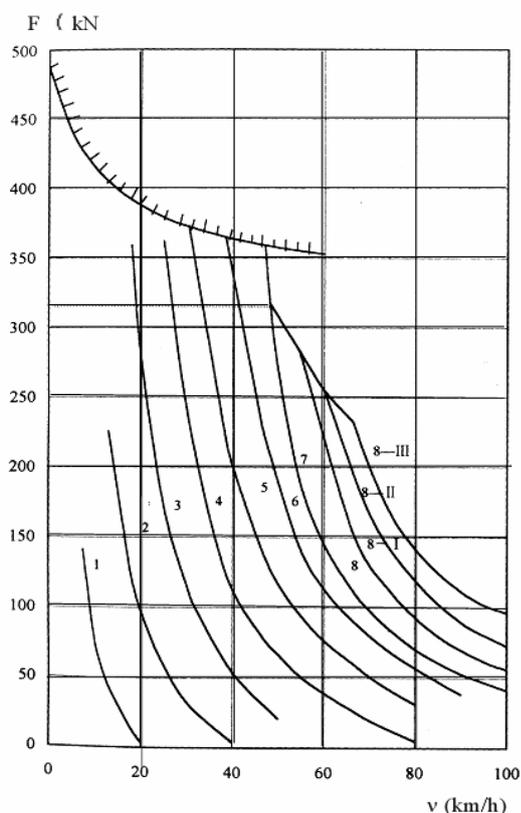


图 3-13 SS₃ 型电力机车牵引力特性曲线

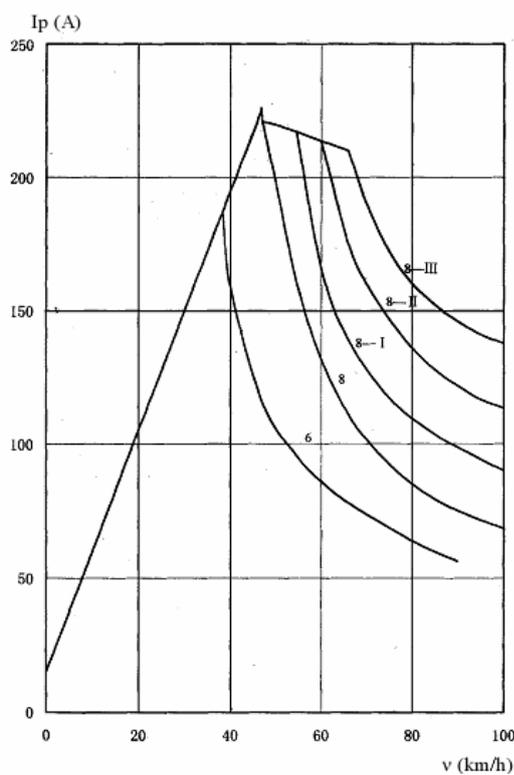


图 3-14 SS₃ 型电力机车有功电流曲线

机车每万吨公里耗电量 q (单位 kwh) , 按下式计算:

$$q = \frac{Q \cdot 10^4}{G \cdot L} = \frac{U_w \cdot (I_p + I_{po}) \cdot 10}{G \times V} \quad (\text{kw} \cdot \text{h}) \quad (3-6)$$

式中:

- G ——机车牵引重量, 单位为 t;
- L ——牵引区段长度, 单位为 km;
- V ——列车运行速度, 单位为 km/h。

同样对于客运和货运, 计算时的区别除了由于机车车型不同外, 主要是机车的牵引重量和速度不同从而导致能耗的不同。

3.3.3 列车运行计算相关参数

(1) 列车运行牵引力 F (单位 kN)

采用列车在平直坡道上匀速运行时的机车牵引力, 计算公式为:

$$F = (P \cdot \omega_0' + G \cdot \omega_0'')g \times 10^{-3} \quad (3-7)$$

其中: g 为重力加速度, 取9.81N/kg。

(2) 机车运行单位基本阻力 ω_0' (单位 N/kN)

$$\text{DF4 型、DF4B 型:} \quad \omega_0' = 2.28 + 0.0293v + 0.000178v^2 \quad (3-8)$$

$$\text{ND5 型:} \quad \omega_0' = 1.31 + 0.0167v + 0.000391v^2 \quad (3-9)$$

$$\text{SS1、SS3 型:} \quad \omega_0' = 2.25 + 0.0190v + 0.000320v^2 \quad (3-10)$$

$$\text{6K 型:} \quad \omega_0' = 3.25 + 0.0092v + 0.000308v^2 \quad (3-11)$$

(3) 车辆运行单位基本阻力 ω_0'' (单位 N/kN)

滚动轴承货车运行单位基本阻力:

$$\omega_0'' = 0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2 \quad (3-12)$$

25B、25G 型客车运行单位基本阻力:

$$\omega_0'' = 1.82 + 0.0100v + 0.000145v^2 \quad (3-13)$$

(4) 机车牵引重量 G (单位 t)

货运列车和客运列车的牵引重量差别较大, 货运列车牵引重量的确定可以参考 2000-2007 年国家铁路货运机车平均牵引总重, 如表 3-2 所示, 2000 年以来货运列车的牵

引重量不断增加，符合“重载”的发展趋势。

表3-2 国家铁路货运机车平均牵引总重

单位: t

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
牵引总重	2676	2760	2789	2829	2934	3038	3105	3193

来源:《铁路简明统计资料》,铁道部统计中心,中国铁道出版社,2009.1

2007年,国家铁路货运机车平均牵引总重为3193吨,其中,内燃机车的平均牵引重量为2920吨,电力机车为3528吨。

旅客列车牵引重量的确定需要根据表3-3中的客运机车工作量进行推算。表中的本务机车指为牵引列车担任本务作业的机车。本务机走行公里指为牵引列车的本务机车走行的公里,也就是直接牵引列车的机车所走行的公里数。总重吨公里指机车牵引列车完成的工作量,它与本务机车走行公里的比值就是客运机车的牵引重量。经计算,用于客运的内燃机车的平均牵引重量为882吨,用于客运的电力机车为942吨,总的客运平均牵引重量为909吨。

表3-3 2007年国家铁路客运机车工作量

内燃机车(客)			电力机车(客)		
本务机车走行 km(万)	总重t-km(百万)	牵引重量t	本务机车走行 km(万)	总重t-km(百万)	牵引重量t
38501	339765	882	31697	298474	942

(5) 机车计算重量 P(单位 t)

不同类型机车计算重量的取值如表3-4所示。

表3-4 不同类型机车计算重量

单位: t

机车型号	DF4	DF8	DF11	ND5	SS1	SS3	SS4	SS7	6K	8G
计算重量	135	138	138	135	138	138	184	138	138	184

资料来源:铁道部《列车牵引计算规程 TB/T 1407-1998》

(6) 列车技术速度 V(单位 km/h)

列车运行的速度总体上呈逐年增加的趋势,见表3-5,2000年以来,旅客列车的技术速度从66.6km/h提高到2007年的78.8km/h,提高了18%;货运列车从46.4km/h提高到47.6,由于货运列车致力于增加牵引重量,所以对运行速度的要求不高,运行速度也就没有太大的变化。

本报告中的列车速度采技术速度(表3-6):用于货运的内燃机车的平均技术速度为46.7km/h,电力机车为48.9km/h,用于客运的内燃机车的平均技术速度为75.7km/h,电力机车为82.7km/h。

表3-5 国家铁路列车技术速度

单位: km/h

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
旅客列车	66.6	69.5	71.4	71.7	73.7	74.2	74.7	78.8
货物列车	46.4	46.7	47.1	47.1	46.7	46.3	46.2	47.6

资料来源:《中国统计年鉴》2005、2008

表3-6 2007年国家铁路列车平均技术速度

内燃机车(km/h)		电力机车(km/h)	
货运	客运	货运	客运
46.7	75.7	48.9	82.7

(7) 机车运行手柄位或运行级位

根据列车速度和相应的牵引力,通过查询机车牵引特性曲线或牵引计算数据表,确定该速度和牵引力所对应的机车运行手柄位或运行级位。

由于《列车牵引计算规程》对于机车手柄位或运行级位的描述是不联系的,需要根据已有数据,对中间手柄位或运行级位的数据采用线性插值法计算。

(8) 机车单位时间能耗参数(内燃机车 kg/min; 电力机车 A/min)

对于内燃机车,单位时间能耗参数是指机车在一定速度和手柄位下的燃油消耗量,单位 kg/min;对于电力机车,单位时间能耗参数是指机车在一定速度和运行级位下的有功电流,单位 A/min。

内燃机车单位时间燃油消耗量和电力机车有功电流的取值,根据计算的手柄位和列车速度查机车牵引特性曲线或牵引计算数据表得到。

3.3.4 铁路机车单耗测算

根据上述的内燃机车和电力机车的单耗计算方法,确定所需的计算参数后,进行选定型号机车的分别计算,然后汇总,计算结果如表 3-7 所示。表中内燃机车和电力机车的单耗值为各型机车的加权平均值,因缺乏各型机车的工作量的详细数据,所以按照所占总量的比例进行加权平均,得出内燃机车牵引货物列车的单耗为 12.69 千克/万吨公里,牵引旅客列车的单耗为 32.47 千克/万吨公里;电力机车牵引货物列车的单耗为 57.87 千瓦时/万吨公里,牵引旅客列车的单耗为 180.92 千瓦时/万吨公里。这里的“万吨公里”均指的是机车牵引完成的总重吨公里工作量。

根据 2007 年统计资料,在机车总工作量中,大部分用于货物运输,比例占到 84.3%,客运只占到 15.7%;另外电力机车牵引比例达到 48.9%,内燃机车牵引比例为 51.1%,参见表 3-8。

表3-7 电力及内燃机车分货运、客运牵引能源消耗表

机车型号	数量比例	速度	速度	耗油量(货)	耗油	牵引总重(货) t	牵引总重	货运单耗	客运单耗
		(货) km/h	(客) km/h	kg/min	量(客) kg/min		(客)t	kg/万 t-km	kg/万 t-km
内燃机车平均(kg/万t-km)								12.69	32.47
DF4	55.11%	46.7	75.7	3.00	3.70	2920	882	13.20	33.25
DF8	8.58%	46.7	75.7	2.65	3.69	2920	882	11.66	33.16
DF11	5.44%	46.7	75.7	2.00	2.50	2920	882	8.80	22.47
ND5	3.46%	46.7	75.7	3.00	3.80	2920	882	13.20	34.15
机车型号	数量比例	速度	速度	耗电量(货)	耗电	牵引总重(货) t	牵引总重	货运单耗	客运单耗
		(货) km/h	(客) km/h	A/min	量(客) A/min		(客)t	kWh/万 t-km	kWh/万 t-km
电力机车平均(kWh/万t-km)								57.87	180.92
SS1	10.50%	48.9	82.7	31.00	45.72	3528	942	53.62	165.97
SS3	31.85%	48.9	82.7	33.60	52.70	3528	942	57.38	188.37
SS4	22.78%	48.9	82.7	35.00	50.70	3528	942	59.41	181.96
SS7	8.11%	48.9	82.7	30.70	41.70	3528	942	53.18	153.07
6K	1.33%	48.9	82.7	51.30	61.30	3528	942	83.03	215.97
8G	1.60%	48.9	82.7	46.60	65.00	3528	942	76.22	227.85

表3-8 国家铁路机车工作量分类型比例

	机车综合工作量 100%		机车综合工作量 100%	
	内燃机车比例	电力机车比例	客运比例	货运比例
2007	51.1%	48.9%	15.7%	84.3%

根据相关研究,在铁路运输主业总能耗中,牵引能耗占到70%~75%(根据《中国铁道年鉴2007》(铁道部档案史志中心编,中国铁道出版社,2007年12月),2005年铁路运输系统主业能源消耗量为1358.53万吨标煤,其中机车牵引全年消费油电折合981.15万吨标煤,占72.2%)。本研究取72%。得到经模型测算的机车单耗,参见表3-9。

表3-9 模型测算机车综合单位能耗量

平均	内燃机车耗油(kg/万 t-km)		电力机车耗电(kw-h/万 t-km)		
	客运	货运	平均	客运	货运
22.1	45.1	17.6	106.2	251.3	80.4

国家铁路机车历年综合单位能耗数据参见表3-10。

表3-10 国家铁路机车综合单位能耗量

	2003	2004	2005	2006	2007	模型测算
内燃机车耗油(kg/万t-km)	25.4	25.0	24.6	24.3	24.6	22.1
电力机车耗电(kw·h/万t-km)	110.0	111.2	111.8	110.0	109.5	106.2

资料来源：历年数据来自《中国统计年鉴》2008

从表 3-10 可以看出，采用模型测算的机车单耗结果与统计数据的误差较小，说明模型有效。

3.4 铁路运输能源效率及客货换算系数分析

上述测算的是铁路机车综合单位能耗量，即单位铁路机车牵引工作量（总重吨公里）在运输过程中所消耗的能源量。而铁路能源效率一般用单位运输工作量所消耗的总能耗来表示，二者之间存在如下区别：

（1）需要进行铁路总能耗修正

铁路总能耗既包括铁路运输过程（或铁路运输主业）能源消耗，也要包括辅助能耗（辅助能耗主要包括客运火车站、货运火车站、运输网、信号、调度及铁路设施的管理和养护等消耗的能源）。根据相关统计数据，铁路运输过程能耗占总能耗的 80%，辅助能耗占 20%。（根据《中国铁道年鉴 2008》，2006 年 18 个铁路局总能耗为 1642.5 万吨标准煤，其中运输过程能耗为 1299.56 万吨标准煤，占 79.2%）。

（2）需要进行机车牵引工作量与铁路运输工作量的转换

铁路机车牵引工作量（总重吨公里）和铁路运输工作量是不同口径的统计指标，铁路运输工作量一般用货物运输周转量（吨公里）和旅客运输周转量（人公里）衡量，但两者之间又存在一定的相关关系。表 3-11 为国家铁路运输货运、客运周转量以及为了实现周转量所完成的机车工作量。

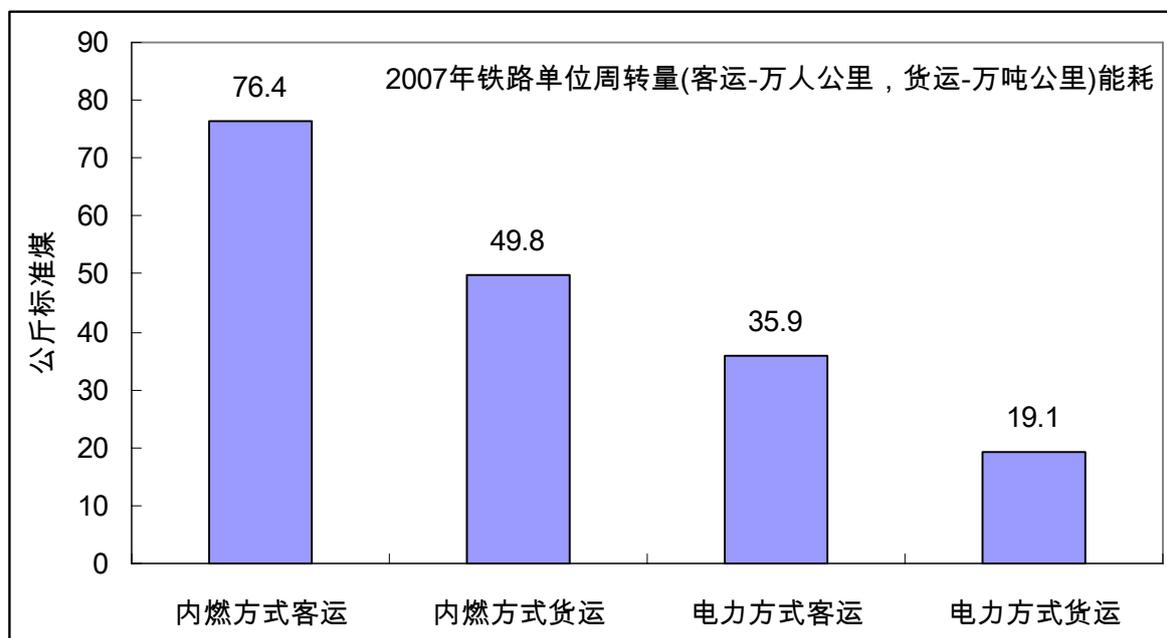
表3-11 国家铁路货运、客运周转量及机车工作量

年份	旅客周转量 (亿人公里)	客运机车 工作量 (亿吨公里)	机车工作量/ 旅客周转量	货物周转量 (亿吨公里)	货运机车 工作量 (亿吨公里)	机车工作量/ 货物周转量
2007	6896.18	6382.38	0.93	22112.5	34177.81	1.55

根据表 3-11，货运机车工作量与货物周转量的比值表示货运列车每运输 1 吨公里货物需要机车完成 1.55 吨公里的工作量，客运机车工作量与旅客周转量的比值表示客运列车每运输 1 人公里旅客需要机车完成 0.93 吨公里的工作量。

(3) 铁路运输综合能源效率

综合模型测算数据，并进行数据修正，可以得到铁路能源效率，即不同机车类型完成单位货物周转量和单位旅客周转量所消耗的能源，参见图 3-15。



注：柴油标煤系数 1.457，电力标煤系数为 0.1229

图 3-15 铁路客货运能源效率（2007 年）

从计算结果可见，总体上，内燃方式能耗要大于电力方式能耗，另外，同一种方式下单位人公里客运的能耗要大于单位吨公里货运的能耗。内燃方式客运能耗最高，为 76.4 千克标准煤/万人公里，内燃方式货运次之，为 49.8 千克标准煤/万吨公里，第三位为电力方式客运能耗，35.9 千克标准煤/万人公里，最后为电力方式货运能耗 19.1 千克标准煤/万吨公里。

在进行运输工作量对比分析时常常要用到换算周转量的概念。铁路规定旅客周转量（人公里）和货物周转量（吨公里）的换算标准为：1 人公里相当于 1 吨公里，即换算系数为 1。这种换算系数的制定是在一定条件下以运输能力相当为前提计算得到的。在进行能耗比较时，这种换算系数存在不合理性，即 1 人公里的能耗并不等于 1 吨公里的能耗。经过机车单耗模型初步测算，在进行铁路货运和客运的能耗比较时，换算系数不应该为 1，而应该为 1.7，即 1 人公里旅客周转量消耗的能源等于 1.7 吨公里货物周转量消耗的能源。反过来说，即 1 吨公里相当于 0.6 人公里消耗的能源。

另外，综合以上定量测算结果可知，随着今后铁路客运高速化、货运重载化的趋势，可以预见未来单位旅客周转量的能耗水平仍将继续提高，而单位货物周转量的能耗水平有下降的趋势。

3.5 主要结论

本章对铁路能耗统计数据进行了分析，研究了影响铁路能耗的微观因素，以典型内燃机车和电力机车为例，构建了铁路机车单耗测算模型并进行了数值计算，同时对计算结果进行了分析研究，主要得出以下结论：

(1) 铁路能耗是指铁路旅客运输、货物运输及相关的调度、信号、机车、车辆、检修、工务等铁路运输辅助活动中所产生的能源消耗。铁路能耗数据统计主要包括铁路旅客运输（不包括客运火车站，计入运输辅助活动）、铁路货物运输（不包括货运火车站，计入运输辅助活动）、铁路运输辅助活动（不包括火车站内独立的餐饮及零售，计入餐饮零售业）、其他铁路运输辅助活动（指铁路旅客、货物运输及客、货火车站以外的运输网、信号、调度及铁路设施的管理和养护，不包括铁路系统对社会提供的通信服务，计入通信业，铁轨、路基的抢修与重建，计入建筑业）。

(2) 随着铁路的发展，铁路运输企业能源消耗总量也逐年增加。按照铁道统计公告数据，2008年国家铁路运输企业能源消耗折算标准煤1693.9万吨，比2003年增加149.5万吨，增长9.7%。柴油、电力、原煤构成了铁路运输企业的主要消耗能源。柴油和电力的消耗量逐年增加，原煤消耗量不断下降，新型内燃机车和电力机车成为主要牵引方式。

(3) 分析了影响铁路能耗的微观因素，指出列车特性及运营环境条件是主要因素，但列车操控技术的作用也不容忽视，为节能降耗提供了措施方向。

(4) 建立了铁路能源消耗微观计算模型。运用列车运行计算的相关原理，根据全国机车平均牵引列车重量和平均技术速度，计算各种型号机车的牵引力，然后通过机车的牵引特征曲线，取得机车的手柄位(柴油机转速)，进而确定机车的单耗，最后按照各种型号机车进行加权平均，获得内燃机车和电力机车的单耗数据，经与实际数据比较，模型计算结果可信。

(5) 经模型测算，总体上，内燃方式能耗要大于电力方式能耗，另外，同一种方式下单位人公里客运的能耗要大于单位吨公里货运的能耗。内燃方式客运能耗最高，为76.4千克标准煤/万人公里，内燃方式货运次之，为49.8千克标准煤/万吨公里，第三位为电力方式客运能耗，35.9千克标准煤/万人公里，最后为电力方式货运能耗19.1千克标准煤/万吨公里。

(6) 在进行运输工作量对比分析时常常要用到换算周转量的概念。铁路规定旅客周转量（人公里）和货物周转量（吨公里）的换算标准为：1人公里相当于1吨公里，即换算系数为1。这种换算系数的制定是在一定条件下以运输能力相当为前提计算得到的。在

进行能耗比较时，这种换算系数存在不合理性，即1人公里的能耗并不等于1吨公里的能耗。经模型初步测算，在进行铁路货运和客运的能耗比较时，换算系数不应该为1，而应该为1.7，即1人公里旅客周转量消耗的能源等于1.7吨公里货物周转量消耗的能源。反过来说，即1吨公里相当于0.6人公里消耗的能源。

(7) 综合以上定量测算结果可知，随着今后铁路客运高速化、货运重载化的趋势，可以预见未来铁路单位旅客周转量的能耗水平仍将继续提高，而单位货物周转量的能耗水平有下降的趋势。

4 公路能耗数据统计与测算

我国国民经济的快速发展促进公路运输业也快速发展。据统计, 2007 年我国全社会完成公路客运量 205.07 亿人, 旅客周转量 11506.8 亿人公里, 完成公路货运量 163.94 亿吨, 货物周转量 11354.7 亿吨公里。公路客运量、旅客周转量在综合运输体系中所占比重分别为 92.1%和 53.3%, 公路货运量、货物周转量在综合运输体系中所占比重分别为 72.0%和 11.2%。公路运输大力发展的同时, 公路运输的能源消耗也在快速增加, 根据交通部《道路运输业发展规划纲要(2001~2010 年)》的预测, 2010 年完成道路客运量将达到 230 亿人次, 旅客周转量 12415 亿人公里, 货运量将达到 153 亿吨, 货物周转量 10457 亿吨公里。

公路运输业是全国成品油消耗最大的行业。2005 年我国公路营业性载客汽车 128.4 万辆, 营业性载货汽车 604.8 万辆, 两者汽油消耗总量为 1700.7 万吨, 柴油消耗总量为 3772.2 万吨, 分别占交通运输业汽油和柴油消费总量的 68.9%和 75.2%。如果将社会非营业性运输工具的能源消耗考虑进来, 道路运输的能源消费将大大提高。根据国家发改委宏观经济研究院所作的《交通运输业节能降耗问题研究》(2007 年 12 月) 报告估算 2005 年道路交通工具共消耗各类燃油 9800 万吨, 比 2000 年增长了 50%多。其中社会非营业性运输工具燃油消耗量约为 4030 万吨, 约占全部道路交通工具燃油消耗量的 40%。公路运输业的节能降耗工作任重道远。

4.1 公路能耗统计指标分析

4.1.1 公路能耗统计主要指标

目前公路运输能源消耗统计指标主要有营业性汽车燃油消耗总量、营业性客车百公里燃料(汽油、柴油)消耗量、营业性货车百公里燃料(汽油、柴油)消耗量、百吨公里燃料(汽油、柴油)消耗量。

这三个指标都是在抽样调查的基础上得到的。根据调查期平均每天的燃油消耗量, 再乘以相应的日历天数, 就可推算出燃油消耗总量; 用燃油总消耗量除以总行程就可得出百车公里燃油消耗量; 百吨公里燃油消耗等于用燃油总消耗量除以总换算周转量。

通过对部分发达国家公路运输及能耗统计指标进行分析可以看出,美、英、日三国公路运输能耗统计指标中的调查指标基本一致,即车辆数、车英里(车公里)、燃料消耗量、人英里(人公里)和吨英里(吨公里),见表4-1(刘莉,2008)。其中美国的推算指标相对较多,如平均每车行驶英里、平均每加仑行驶英里、平均每车燃料消耗量和能源强度等。我国现有公路运输能耗统计指标中,有的能与发达国家指标进行换算,如“平均每加仑行驶英里”就可以换算成我国的“百车公里燃料消耗量”;但有的指标存在一定差异,如能源强度指标中的“人英里”是通过调查得到的平均载客人数乘以车英里推算出的,而我国统计的旅客周转量是指车辆实际运送的每位旅客与其相应运送距离的乘积之和,单位为人公里,同样是“人公里”指标,由于计算方法不同,导致计算结果也不同,因此两个指标的可比性也会受到影响。此外我国现有统计指标还存在明显缺憾,即缺少反映车辆运行状况的关键指标“车辆行驶里程”,即“车英里”。

表4-1 部分发达国家与我国的能耗统计指标比较

国别	美国	英国	日本	我国(现有)
	车辆数	车辆数	车辆数	车辆数
	车·英里	车·英里	车·公里	
调查指标	燃料消耗量 (百万加仑)	燃油消耗量	燃油消耗量	燃油消耗量
	人·英里	人·英里	人·公里	旅客周转量
	吨·英里	吨·英里	吨·公里	货物周转量
	平均每车行驶英里	平均每车 行驶英里	平均每车 行驶公里	
推算指标	平均每加仑行驶英里	平均每加仑 行驶英里		百车公里 燃料消耗量
	平均每车燃料消耗量			
	能源强度(Btu/人·英里)			百吨(千人)公里燃料 消耗量

4.1.2 公路能耗统计车型分类

关于车型分类,美国公路运输能源消耗统计指标的车型分类特点是各统计指标的车型分类方式基本一致,可以通过调查指标推算出一系列的均值指标,用以分析能耗变化的趋势。英国公路运输能源消耗统计指标的车型分类见表4-2,由于数据来源不同,使英国统计指标的车型分类方式不尽相同。如客车的“平均每加仑行驶英里”是按车龄进行分类,而货车则是按车辆形式分类;“燃料消耗量”则是在“车英里”的基础上细分了燃料类型等。各类统计指标的车型分类不一致,直接影响了指标之间的相互利用和推算。

日本的车型分类较粗,车辆类别较少,统计指标的车型分类基本一致,除客车的“人公里”指标外,其余指标基本可以实现相互利用和推算,见表4-3。

表 4-2 英国公路运输能源消耗统计指标的车型分类

统计指标	车型分类				数据来源		
车辆数	私家小汽车及轻型货车, 摩托车、公共运输车辆、货车、特许车辆、专业车辆、皇家车辆						
车英里	轿车与出租车、摩托车、公共汽车及长途客车、轻型卡车、货车(又细分为单体两轴货车、单体三轴货车、单体四轴或更多货车、铰接三轴和四轴货车、铰接五轴货车、铰接六轴或更多轴货车)				合计		
燃油消耗量	汽油	轿车与出租车、摩托车、轻型货车			合计	贸易工业部	
	柴油	轿车与出租车、轻型货车、重型货车、公共汽车与长途客车					
平均每加仑行驶英里	客运	汽油	车龄不到 2 年		综合	国家统计局 国民出行调查	
			车龄超过 2 年不到 6 年				
			车龄超过 6 年不到 10 年				
			车龄超过 10 年				
	柴油	车龄不到 2 年		综合			
		车龄超过 2 年					
货车	单体货车 铰链货车						
吨-英里(总质量>3.5t)	经营模式		公营车辆				
			私营车辆				
	车辆总重		单体货车	总质量 3.5t-17t		合计	国家运输部 公路货运调查
				总质量 17t-25t			
				总质量>25t			
			铰接货车	总质量 3.5t-33t			
总质量>33t							
货物类型		十五类货品					

表 4-3 日本公路运输能源消耗统计指标的车型分类

统计指标	客车					货车			
	营运客车			私家客车		营运货车		私家货车	
	公共汽车		其他 客车	公共 汽车	其他 客车	普通 货车	轻型 货车	普通 货车	轻型 货车
	普通	特许							
车辆数									
车公里									
吨公里		公共 汽车	客车	其他客车		货车			
人公里									
燃料消耗量		汽油		柴油		汽油		柴油	

目前,我国交通行业现行《交通运输综合统计报表制度》规定的营业性汽车燃料消耗统计指标见表 4-4。统计指标的设置上缺乏客位数、吨位数的数据统计,因此难以计算出人公里、吨公里油耗。

在车型的分类上,不同的统计有不同的分类方法,一定程度上造成了统计结果的混乱和相关数据的不统一,如表 4-5、表 4-5 续就有两种不同的分类标准。

表 4-4 燃料消耗统计指标

指标	换算周转量		燃油消耗量		百公里耗汽油	百公里耗柴油
	汽油车	柴油车	汽油	柴油		
载货汽车						
载客汽车						

来源：《交通运输综合统计报表制度》

表 4-5 车型分类方法 (1)

车辆种类	车型分类	车身长度	标记客位
载客汽车	特大型	12m<d≤13.7m	
	大型	9m<d≤12m	P>30
	中型	6m<d≤9m	16<P≤30
	小型	3.5m<d≤6m	P≤15
载货汽车	重型	标记吨位 8 吨及以上的载货汽车、15 吨以上的公路牵引车	
	大型	标记吨位 4 吨以上至 8 吨	
	中型	标记吨位 2 吨以上至 4 吨	
	小型	标记吨位 2 吨以下	

来源：《交通运输综合统计报表制度》

表4-5续 车型分类方法 (2)

车型分类	说明
车型1 (中小客车)	≤19座的客车
车型2 (大客车)	>19座的客车
车型3 (微型货车)	载重量≤2吨的货车
车型4 (轻型货车)	2吨<载重量≤7吨的货车
车型5 (中型货车)	7吨<载重量≤14吨的货车
车型6 (重型货车)	载重量>14吨的货车

来源：交通部公路司，中国工程建设标准化协会公路工程委员会（JTGB01-2003）公路工程技术标准[S]，北京：中国交通出版社，2004

通过分析可以看出，现有营运车辆数统计的车辆类型是按照不同载重能力进行分类的，这种分类方式与能耗统计对车型的分类原则基本一致，存在的问题是车辆数的统计按照车辆载重能力分类后，没有进一步细分燃料类型，这一点就不能满足能耗统计的需求。此外，原有能耗统计指标过于宏观。总之，国内现有的统计一是涵盖的统计对象不全，二是指标设置过于宏观，在客货车型细分、燃料类型细分、载客客位数及载货吨位数细分方面不够，难于提供进一步研究分析的基础。

4.1.3 公路交通行业能耗标准

2008 年国家发布了两个交通行业标准：营运客车燃料消耗量限值及测量方法（JT 711—2008）、营运货车燃料消耗量限值及测量方法（JT 719—2008），对达到燃料消耗量限值的新车建立准入制度。该标准规定了油耗测量方法、车型分类、权重系数等有关内容，对加强营运车燃料消耗检测的监督管理具有重要意义。

(1) 等速燃料消耗量的计算

取同一试验车速下每次燃料消耗量测量结果的算术平均值作为该车速的等速燃料消耗量测定值，并按《商用车燃料消耗量试验方法》GB/T 12545.2 规定的方法进行标准状态校正。

(2) 综合燃料消耗量的计算

营运客车的综合燃料消耗量按以下公式进行计算。

$$Q = \sum_i \bar{Q}_{Qi} \times K_i \quad (4-1)$$

Q ——综合燃料消耗量，L/100km；

\bar{Q}_{Qi} ——在第*i*个车速下校正后的满载等速燃料消耗量，L/100km；

K_i ——在第*i*个车速下的满载等速燃料消耗量权重系数（见表 4-6）。

表 4-6 营运客车在各规定车速下的满载等速燃料消耗量权重系数

车速 (km/h)		40	50	60	70	80	90	100
特大型	高级	—	0.03	0.02	0.02	0.20	0.55	0.18
	中级及普通级	0.05	0.10	0.25	0.30	0.30	—	—
大型	高级	—	0.01	0.02	0.02	0.15	0.55	0.25
	中级及普通级	0.05	0.10	0.25	0.30	0.30	—	—
中型	高级	—	0.05	0.05	0.05	0.20	0.60	0.05
	中级及普通级	0.05	0.10	0.30	0.30	0.25	—	—
小型	高级	—	0.02	0.04	0.04	0.30	0.30	0.30
	中级及普通级	0.05	0.10	0.30	0.30	0.25	—	—

(3) 燃料消耗量限值

营运客车燃料消耗量限值用综合燃料消耗量指标表示。柴油客车燃料消耗量限值见表 4-7。汽油客车燃料消耗量限值为相应车长柴油客车限值的 1.15 倍（取值按四舍五入至小数点后一位）。

表 4-7 营运柴油客车燃料消耗量限值（单位：L/100km）

车型	车长 L(m)	第一阶段		第二阶段	
		高级车	中级及普通级车	高级车	中级及普通级车
特大型	L>12	28.5	28	28	27
	11<L≤12	27.1	22.8	24.4	20.5
大型	10<L≤11	26.5	21.7	23.9	19.5
	9<L≤10	25	19.4	22.5	17.5
中型	8<L≤9	21.5	17.3	19.4	15.6
	7<L≤8	20	16.7	18	15
	6<L≤7	17.1	14.3	15.4	12.9
小型	L≤6	14.4	12	13	10.8

注：第一阶段执行期为 2008 年 9 月 1 日-2010 年 2 月 28 日

第二阶段从 2010 年 3 月 1 日开始执行

营运柴油货车燃料消耗量限值见表 4-8。

表 4-8 营运柴油汽车（单车）燃料消耗量限值

车辆总质量 T(kg)	第一阶段限值(L/ 100 km)	第二阶段限值(L/ 100 km)
3500 < T ≤ 5000	12.6	11.3
5000 < T ≤ 7000	16.3	14.7
7000 < T ≤ 9000	18.8	16.9
9000 < T ≤ 11000	21.5	19.4
11000 < T ≤ 13000	23.8	21.4
13000 < T ≤ 15000	25.7	23.1
15000 < T ≤ 17000	27.4	24.7
17000 < T ≤ 19000	28.9	26.0
19000 < T ≤ 21000	30.2	27.2
21000 < T ≤ 23000	31.4	28.3
23000 < T ≤ 25000	32.5	29.3
25000 < T ≤ 27000	33.5	30.2
27000 < T ≤ 29000	34.5	31.1
29000 < T ≤ 31000	35.5	32.0

注：第一阶段执行期为 2008 年 9 月 1 日-2010 年 2 月 28 日

第二阶段从 2010 年 3 月 1 日开始执行

根据中国汽车技术研究中心《中国汽车燃料经济性标准法规及政策研究》中对《商用车辆燃料消耗量试验方法》GB/T 12545.2 的分析，第一阶段的限值基本相当于当前国产乘用车燃料消耗量的平均水平，符合和不符合限值的车型各约占 50%。第二阶段的限值是在第一阶段限值基础上加严约 10%。因此，第一阶段的限值可以作为估算我国营运汽车燃油消耗总量的依据。

4.2 影响汽车能耗的微观因素分析

影响汽车燃油经济性水平的高低跟道路状况、汽车本身的性能、交通流量、交通调度等因素有关。因此对于汽车节能工作需从改善城市道路状况，提高交通指挥疏导能力，提高汽车本身性能，调整现有城市交通方式结构等方面开展。

4.2.1 道路因素

(1) 公路等级条件

公路等级条件对汽车的油耗影响非常大,国家标准 GB 4352-2007《载货汽车运行燃料消耗量》及 GB 4353-2007《载客汽车运行燃料消耗量》把公路分为 6 类，见表 4-9。

根据交通部公路科学研究院蔡凤田《公路交通运输领域节能减排对策》课题试验研究的结果，如以 1 类公路的汽车油耗为基数，汽车在 2 类公路上行驶油耗要高 10%，在 3 类公路上行驶油耗要高 25%，在 4 类公路上行驶油耗要高 35%，在 5 类公路上行驶油

耗要高 45%，在 6 类公路上行驶油耗要高 70%。

表 4-9 《载货汽车运行燃料消耗量》的公路分类

公路类别	公路等级
1 类公路	平原、微丘地形的高速一、二级公路
2 类公路	平原、微丘地形的三、四级公路，山岭、重丘地形的高速公路
3 类公路	山岭、重丘地形的一、二、三级公路
4 类公路	平原、微丘地形的级外公路
5 类公路	山岭、重丘地形的四级公路
6 类公路	山岭、重丘地形的级外公路

(2) 公路收费站设置

公路收费站的通行能力也对车辆油耗有着一定的影响。经过收费站时停车缴费造成的通行速度缓慢、频繁制动引起的机械磨损，油耗加大以及由此产生的大量有害尾气等问题严重。因此通过不停车收费等技术措施能够收到较好的节能减排效果。

4.2.2 运输车辆因素

运输车辆的技术状况及其运用情况是决定燃料消耗和尾气排放的核心因素。

(1) 发动机

发动机作为汽车的动力源，其能耗的高低对汽车的燃料消耗有着决定性的影响，开发节能高效的发动机是汽车制造行业追求的目标。发动机的工作性能包括动力性、经济性、运转性和可靠性等几个方面，其中动力性、经济性与节能密切相关。为了将燃料的化学能转化为汽车的驱动效率，可以从燃料的充分燃烧、改善热力循环系统、减少活塞及发动机内的其余摩擦、减少泵气损失等方面来实现发动机的节能。

目前汽车常用的发动机为汽油机和柴油机，由于燃烧的方式不同，柴油发动机的热效率比汽油机要高 30% 左右。另外目前所开发的各种技术手段对燃油消耗也有很大影响。

① 汽油缸内直喷技术，如大众公司的燃油分层喷射技术（Fuel Stratified Injection—简称 FSI），在低负荷为分层稀薄燃烧模式，大负荷为均质理论空燃比），由于这种发动机采用稀薄燃烧技术，对于汽油发动机，采用气缸内直接喷射技术可以降低 20% 左右的燃料消耗。采用电子控制共轨技术的柴油机效率可达到 45%。

② 电控废气涡流增压技术。汽油机的涡轮增压技术能够提高发动机的功率，同样是 1.8t 的汽车采用电控废气涡流增压技术，动力相当于 2.4t 的普通自燃机系统，功率可以提升 30%，而油耗提升并不多，大动力的车采用小排量的增压发动机可以达到节能减排的目标。

③ 可变气门正时技术（Variable Valve Timing—简称 VVT 技术），如本田的 i-VTEC，

丰田的 VVT-i，现代的 CVVT 等。可以有效的改善发动机的性能，不仅提高了功率而且可以改善燃烧，具有较好的节能减排效果。

④ 汽车选择性催化还原技术（SCR）。与 EGR 相比，SCR 既不增加燃油消耗，也不需要额外的底盘空间，还能达到减轻重量的目的。

（2）整车自重

减轻汽车自身重量是汽车降低燃油消耗及减少排放的有效措施之一。大量试验和数据表明，在风阻和滚动阻力不变的情况下，其质量每减轻 100kg，汽车每百公里耗油便会减少 0.6~0.7L。1978 年进行的统计表明，整备质量为 1360kg 的汽车，当整车自重减轻 10%，可降低燃油消耗量 8%。

（3）汽车外形

根据理论计算，汽车行驶时发动机克服空气阻力所消耗的功率与车速的三次方成正比。随着高等级公路的发展，汽车的行驶速度大大提高，通过减小汽车空气阻力来降低汽车的燃料消耗也是一种非常有效的措施。

（4）整车动力和传动系统匹配

提高汽车传动系统的效率对燃油经济性的作用大约有 10%。对汽车与发动机根据不同使用环境条件进行优化匹配，可使汽车在运输环境下具有良好的技术性能。首先发动机的功率应与整车质量匹配，大马拉小车或小马拉大车均会造成车辆行驶油耗上升；其次要优化汽车传动系速比，要根据汽车的行驶环境确定合理的经济车速。

发动机的有效功率必须通过传动系统转变为驱动功率，提高驱动功率的主要途径有：一是采用节油自动离合器，二是采用机械多档变速传动系的档位越多，汽车在运行过程中越有可能选用合适的速比，使发动机处于最经济的工作状况，三是采用无级变速器。

（5）汽车附属设备

目前汽车上带有多种附属设备以满足不同的需要，附属设备的能耗成为汽车耗能的一个重要组成部分。如汽车空调要消耗发动机功率占整个发动机的 10%~12%，使发动机燃油消耗量增加 10%~20%。冷却风扇消耗的功率为 5%~10%。

（6）轮胎

作为承载汽车重量直接与地面接触的轮胎，在汽车按正常速度行驶时所造成油耗占整个汽车油耗的 20%。当轮胎与路面接触时，由于承重的原因会产生变形，其组成部件会变热，并将发动机传输来的能量损耗一部分。另一方面，汽车滚动阻力与轮胎结构及传动系统、润滑油等都有关系，可以通过合适的轮胎并充至合适的气压来减少汽车的滚动阻力。轮胎的充气压力对滚动阻力系数 f 影响很大，气压越低时，滚动阻力系数 f 迅速增大。因此经常检查并保持轮胎的标准气压，使轮胎的滚动阻力最小就会节省燃油消耗，

从而减少二氧化碳和其他温室气体的排放。另外胎压的高低也会影响到油耗的大小。

4.2.3 运输组织管理因素

运输组织管理是在保障客流与货流服务质量水准前提下,合理安排运输生产过程以及运输生产中各个生产环节的配合与衔接,做好各项工作在人力、设备和工艺方案方面的调配与计划安排,实现运输过程服务质量优、运输效率高、运输成本低、经济效益好的目标。

车辆的合理运用,采用柴油车代替汽油车,能减少燃油消耗 20%以上;提高车辆平均吨位也能节油,据测算,普通载货汽车的平均吨位每提高 1 吨,车辆的单耗降低 6%;拖挂运输与单车相比,油耗平均低 30%左右。

装载质量对载货汽车影响很大。一般情况下,满载时的百公里油耗比空驶多 25%-30%,但百吨公里(或百人公里)油耗却大大下降,对企业降低成本、提高运输经济效益有重大意义。

4.2.4 驾驶员因素

汽车驾驶过程中,驾驶员的驾驶技术、驾驶习惯、节能意识等与汽车的油耗量有很大的关系。研究表明,普通驾驶员驾驶习惯对汽车的燃料耗量影响范围达 30%,职业驾驶员的操作对车辆能耗影响可达 10%-12%。在驾驶过程中,对油耗影响较大的操作环节有:发动机起动升温、汽车起步与加速、换档变速、离合器运用、加速踏板控制、运行车速控制、汽车滑行、行车温度等方面。

(1) 发动机启动

根据发动机温度与大气温度的不同,发动机启动分为常温启动、冷车启动和热启动。常温启动时,要注意化油器充满汽油,尽量做到一次启动成功。冷车启动时应预热发动机,待发动机水套的水温与气缸体的温度趋于一致后再启动。热启动发动机时,要求踩加速踏板轻一些,做到一次启动成功。启动后立即进入怠速运转。

(2) 汽车起步加速

经科学实验证明,40°C 以下水温的车辆起步行驶,会增加 6%的油耗。一般情况下,气温 0~5°C 以内的各档行驶时间为:二档 50s 左右,三档和四档 35s 左右,待水温和各式润滑油温度升高后再进入正常车速。

行车起步时需要通过变速器的减速增加扭矩作用加大车辆的驱动扭矩。在起步档位中,一般使用二档起步最节油。做到起步用低档,加速要缓慢。不可猛加速开快车。尽量避免不必要的怠速,怠速运转每分钟比重新启动一次发动机所耗燃油还要多,也不宜

突然停止发动机的运转或启动发动机，突然加速比平稳加速多耗燃油近三分之一。

（3）合理选择档位

从节油的角度要求，换挡动作要准确、迅速、及时，要避免动作过慢而车速下降过多。由于低档高速与高档低速同样费油，应根据车速及时调整行车档位，以发动机动力能平稳运转作为换挡标准。

如东风 EQ1090E 中型载货汽车的各档位经济车速分别是：一档为 4-7km/h、二档为 10-14km/h、三档为 15-23km/h、四档为 24-33km/h、五档为 40-60km/h。在条件允许的情况下，在相同的运行条件下，同样的车速，高档比低档省油。当以 50km/h 速度行驶时，五档比四档百公里油耗低 11.55%左右；当车速为 40km/h 时，用五档比四档节油 8.91%左右；当车速为 30km/h 时，用五档比四档节油约为 8%，用四档比三档节油 15%左右，而四档比一档节油约为 50%。一般情况下，以五档行驶的里程越长，节油的效果就越佳，一般可节油 5%-10%。

（4）合理选择运行速度

保持按经济车速行驶对节油和安全最有利。在该经济车速下运行汽车的燃油经济性最佳，即每运行 100km 所消耗的燃油量最小。低于或高于经济车速，燃油消耗率均有增加的趋势。经济车速一般在中速范围内，国产中型载货汽车在高速公路上行驶时，车速应控制在 65-75km/h 以内。但是经济车速往往偏低，为了兼顾效率及其他原因，在长途驾驶中，驾驶员要尽量采取略高于经济车速的车速。

安全滑行

汽车在滑行时，发动机处于怠速运转或不运转，只消耗很少的油或不耗油。所以滑行时汽车重要的节能措施，经验丰富的驾驶员可使行驶过程中的滑行里程占总行程的 30%~40%。

（5）合理选择行车温度

汽车形成温度包括发动机温度、机油温度、发动机罩内空气温度等，这些温度都直接影响行车燃料的消耗。发动机温度过高或过低不仅会导致油耗增加，还会引起发动机磨损加剧。

分析表明，驾驶员的操作技术、驾驶方法、驾驶经验对燃油消耗有很大程度的影响，因此，在保障良好的车辆技术状态的前提下，不断规范并提高驾驶员的驾驶技术是节油的一种有效途径。

4.3 公路能耗测算及数据分析

4.3.1 公路能耗涉及数据范围

中国的统计资料中，一般把“交通运输、仓储和邮电业”作为一个行业进行统计。具体到交通运输行业，铁路、水运、航空、管道相对而言其管理体制和统计分类口径比较一致，因此实际统计数据的范围与统计指标的口径具有高度的对应性。而对于公路交通运输，情况要复杂的多。

按照国际通行的统计指标口径，公路交通运输统计数据应该包括所有的道路车辆的燃油消耗，在中国，不同的政府管理部门有不同的管理权限，比如，城际交通运输营运归交通部管理，城市公共交通归建设部和公安部管理（新近成立交通运输部后情况有所变化），因此不同的统计数据有不同的统计口径。涉及到公路交通运输能耗统计的数据范围如表 4-10 所示。

表4-10 涉及到公路交通运输能耗统计的数据范围

序号	统计指标	包括范围	备注
1	交通运输、仓储和邮电业能耗	包括 2、3 以及城市公交中的地铁	国家统计局
2	营业性道路运输能耗	城际公路客货运输	交通运输部
3	城市地面公共交通能耗	城市公交汽车、出租车	建设部
4	社会及私人民用汽车能耗	可用一定模型测算	未统计
5	摩托车能耗	可用一定模型测算	未统计
6	低速汽车（农用运输车）能耗	可用一定模型测算	未统计
7	其他机动车(军车、工程机械车等)能耗	缺乏基本数据，难以测算	未统计

由表 4-10 可知，在国家统计局统计的交通运输、仓储和邮电业能耗统计数据中，包括了交通运输部调查统计的营业性道路运输能耗（城际公路运输）部分，以及城市公共交通能耗部分，但未包括非营业性社会及私人民用汽车、摩托车、农用车、军车等消耗部分。

全部公路运输能耗数据应该包括四部分：

①营业性道路运输能耗。营业性道路运输能耗是指城市以外道路旅客运输（不包括城市公共交通）、道路货物运输、道路运输辅助活动等能耗。

②城市地面公共交通能耗。城市地面公共交通能耗包括公共汽车客运、出租车客运能耗。

③非营业性社会及私人民用汽车能耗

④摩托车能耗

⑤低速汽车能耗

⑥其他机动车(军车等)能耗

其中,除其他机动车(军车等)能耗由于基础数据的缺乏,无法进行有效的估算外,另外几项能耗数据需要进行统计数据的汇总与测算。

4.3.2 营业性道路运输能耗数据测算

从现有交通能耗测算方法和能耗水平测算的分析来看,测算方法不尽相同,测算结果也有一定差异。但总体来看,可以肯定的是只有细分运输工具的分类,以单位能源消耗为基础进行测算,依据更充分、科学,结果更准确。

(1) 营业性载客汽车能耗测算模型

营业性载客汽车的单位能耗指标有两个,分别为:单位周转量能耗(人公里)和单车公里能耗(车公里)。从载客汽车能耗的影响因素来看,车公里是影响能耗的主要因素;从数据的可靠性来看,目前道路运输企业运行中主要统计车公里油耗。因此,选择单车公里能耗更合理。故能耗总量公式如下:

$$Q = Y \times C \quad (4-2)$$

式中: Q ——能耗总量(升);

Y ——年车公里数(公里);

C ——单位能耗(百车公里)。

$$Y = \frac{W}{\beta \times \gamma \times q_0} \quad (4-3)$$

式中: W ——周转量;

β ——里程利用率;

γ ——载客量利用率;

q_0 ——平均车座。

根据以上分析,营业性载客汽车能耗总量的计算模型如下:

$$Q = \frac{W \times C}{\beta \times \gamma \times q_0} \quad (4-4)$$

(2) 里程利用率 β

目前我国班线客车的里程利用率接近 100%,而旅游包车的里程利用率在 95%以上。综合来看,营业性载客汽车的里程利用率取 98%。

(3) 载客量利用率 γ

目前我国班线客车的载客量利用率 50%-75%之间，旅游包车的载客量利用率在 55%-80%之间。综合来看，营业性载客汽车的载客量利用率取 63%。

(4) 平均车座 q_0

根据相关材料，经过整理，采用均值作为 2000-2007 年的平均车座值进行估算，具体见表 4-11 所示。

表 4-11 2000-2007 年营业性客车车座位情况

年 份	平均车座值 (客位/车)
2000	24.18
2001	25.65
2002	25.65
2003	26.39
2004	26.72
2005	27.23
2006	26.37
2007	27.37

(5) 单位能耗 C

选取了 2007 年三个具有不同经营性质、拥有不同车型的道路客运公司的 194 辆单车能耗数据作为样本，并进行定性分析和一致性检验分析（样本数据见附录）。结果表明可以 72.6%的可靠保证程度接受样本总体单车能耗的一般水平为 24.1369(L/100km)。故本文认为取样本的中位数作为单位能耗最为合理，即 $C = 24.1369$ (L/100km)。具体见表 4-12、图 4-1 所示及分析说明。

① 调查样本总体的基本统计量

本部分结果一律采用 SPSS16.0 进行计算、检验和绘制的。

表 4-12 样本的基本统计量

单车能耗		
N	有效样本数	194
	缺失样本数	0
算术平均值		23.8849
中位数		24.1369
最小的众数		17.39
算术平均值对应的方差		10.242
偏度系数		.201
峰度系数		1.469
极差		20.52
极小值		15.89
极大值		36.41
四分位数	25	22.2775
	50	24.1369
	75	25.6610

② 样本总体单车能耗分布

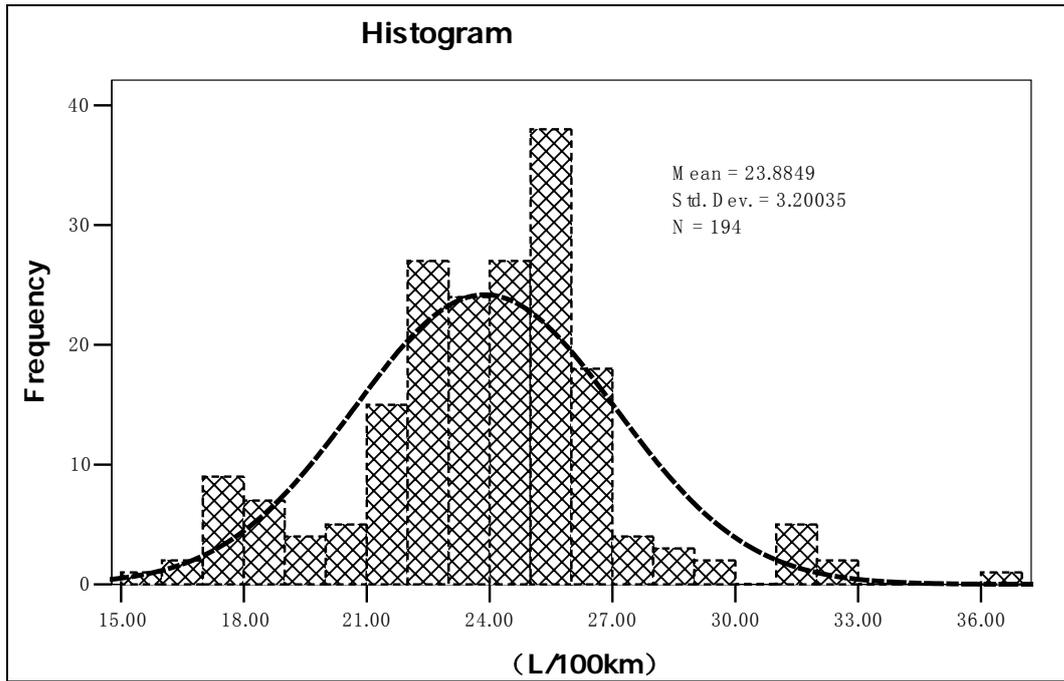


图 4-1 单车能耗样本总体分布图

从单车能耗的直方图分布来看它属于左偏正态分布，即单车能耗的算术平均数(23.8849)处于中位数(24.1369)左边，又因为这个样本总体的组成单车能耗极差为 20.52，超过单车能耗样本数目近 1/7(26/194),所以单车能耗算术平均数掩盖了不同经营性质、不同经营业务和不同车型之间的差异，已经失去了一般水平的代表意义；又由于众数为多个众数，所以表明样本总体内部差异较大，任何一个众数都同样失去作为样本总体一般水平的代表性；而中位数则剔除了样本总体内个别样本的极端值，它表明在所调查的 194 个单车能耗数据中有一半的数据小于它，一半的数据大于它，它处在这些样本数据从小到大或者从大到小排列后的中点位置，所以它比其它平均指标更具有代表意义。

③ 对中位数作为样本总体一般水平的一致性检验结果（见表 4-13）。

表4-13 对中位数指标一致性检验

	检验值（中位数=24.1369）		
	t-统计量	自由度	双侧检验的精确概率
单车能耗（L/100km）	-1.097	193	0.274

这个检验结果说明把所选样本总体单车能耗的一般水平确定为 24.14 在 72.6%的把握程度是可靠的。

(6) 周转量 W

根据《中国统计年鉴》(2000-2007) 的统计数据整理得到 2000-2007 年客运周转量的

值如表 4-14 所示。

表 4-14 2000-2007 年公路运输客运量及客运周转量完成情况

年份	客运量 万人	周转量 亿人公里
2000	134.73	6657.42
2001	140.28	7207.10
2002	147.53	7805.80
2003	146.43	7695.60
2004	163.45	8748.40
2005	169.74	9292.10
2006	186.05	10130.80
2007	205.07	11506.80

来源：《中国统计年鉴》2008

(7) 能耗总量 Q

根据公式 (4-6)，以及上述参数，可以大致测算出全国营业性载客汽车的燃油消耗总量，参见表 4-15。

表 4-15 营业性载客汽车燃油消耗总量测算 单位：万吨

年份	模型测算值	实际统计数据	测算相对误差
2000	849.9	722.1	17.70%
2001	867.4	1126.3	-22.99%
2002	939.4	1034.9	-9.23%
2003	900.2	1355.3	-33.58%
2004	1010.7	993.1	1.77%
2005	1053.4	1176.9	-10.49%
2006	1185.9		
2007	1297.8		

实际统计数据来源：（亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，《中国公路交通资源优化利用上卷—政策建议与行动计划》，北京：中国经济出版社，2009：106-107）

可以看到，除 2003 年由于“非典”等特殊情况的影响（主要影响到里程利用率和载客量利用率参数），致使测算结果误差较大，近几年的测算结果基本符合实际，说明测算方法模型可行。

表4-16 中国营运性道路客货车燃油（包括汽油和柴油）消耗数据表 单位：万吨

年份	营业性客车(万辆)	营业性货车(万辆)	营业性道路运输燃油消耗(万吨)
2002	290	537	4267
2003	352	572	4363
2004	439	628	4771
2005	128	605	5473
2006	162	641	5745
2007	165	684	6082

来源：车辆数来自中国统计年鉴；燃油消耗数2002~2005来自亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，《中国公路交通资源优化利用上卷—政策建议与行动计划》，北京：中国经济出版社，2009：106-107；燃油消耗数2006~2007由模型测算。

对于营业性载货汽车能耗可以采用类似的方法模型测算，不再赘述。

根据相关资料及模型测算，可以得到营业性道路运输能耗统计数据，参见表 4-16。

4.3.3 城市地面公共交通能耗数据测算

这部分能耗指城市地面公共交通以及出租车能耗。可以根据城市公共汽车及出租车数量、年营运里程以及百公里耗油数据测算：

城市公共交通能耗 EC 的计算方法为：

$$EC = D \times (B \times G_B \times L_B + T \times G_T \times L_T) \quad (4-5)$$

其中： B 、 T 分别为城市公共汽车及出租车数量（万辆）

G_B 、 G_T 为城市公共汽车及出租车平均百公里油耗（升/百公里）

L_B 、 L_T 为城市公共汽车及出租车年平均行驶里程（百公里）

D 为燃油密度（取汽油密度（0.740）和柴油密度（0.839）的平均值：0.7895吨/千升）

根据《中国公路交通资源优化利用下卷——指南、手册与技术规程》，（亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，北京：中国经济出版社，2009：157），城市公共汽车与出租车的单耗分别取 28.5 升/百公里、9.2 升/百公里，另外根据《中国公路交通资源优化利用上卷——政策建议与行动计划》，（亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，北京：中国经济出版社，2009：9-10），城市公共汽车与出租车的年平均行驶里程分别为 40000 公里、110000 公里。相关计算数据见表 4-17。

表 4-17 全国城市公共汽车及出租车燃油消耗 单位：万吨

年份	公共汽车万辆	出租车万辆	公共汽车耗油	出租车耗油	合计油耗
2000	22.2	82.6	199.5	618.4	817.9
2001	22.7	87.0	203.9	651.5	855.5
2002	24.2	88.4	217.7	662.2	879.9
2003	25.9	90.3	233.4	676.5	909.9
2004	27.7	90.4	249.2	676.8	926.0
2005	30.8	93.7	277.6	701.7	979.3
2006	31.3	91.9	281.5	687.9	969.5
2007	34.5	96.0	310.1	718.7	1028.8

来源：公共汽车及出租车数量来自中国统计年鉴（2001-2008），油耗数据根据模型测算

4.3.4 社会及私人汽车能耗数据测算

这部分能耗已经在第 2 章进行了计算。

4.3.5 摩托车能耗数据测算

这部分能耗已经在第 2 章进行了计算。

4.3.6 低速汽车能耗数据测算

这部分能耗已经在第 2 章进行了计算。

4.3.7 公路交通总能耗分析

因此，中国全部公路交通运输能耗（除军车等能耗外）参见表 4-18。

表 4-18 全国公路交通总燃油消耗

单位：万吨

年份	营业性 道路 运输	社会及 私人 汽车	城市地 面公交	低速 汽车	摩托车	公路交 通总燃 油消耗	全社会 石油终 端消耗	公路能 耗比例
2002	4267	2512	880	1172	561	9392	21990	42.7%
2003	4363	2786	910	1252	655	9966	24063	41.4%
2004	4771	2929	926	1333	738	10697	28062	38.1%
2005	5473	4284	979	1372	833	12941	29189	44.3%
2006	5745	4842	970	1365	896	13818	31614	43.7%
2007	6082	5533	1029	1361	959	14964	33769	44.3%

来源：全社会石油终端消耗来自《中国能源统计年鉴》，其他为模型测算。

从表 4-18 看出，可以看出，在经济快速发展及机动化背景下，我国公路交通燃油消耗总量自 2002 年以来一直呈增长趋势，2007 年已经达到 14964 万吨，比 2002 年增长了 59.3%，在全社会石油消耗中的比例达到 44.3%。其中社会及私人汽车部分增速较快，2007 年比 2002 年增长了 124.2%。

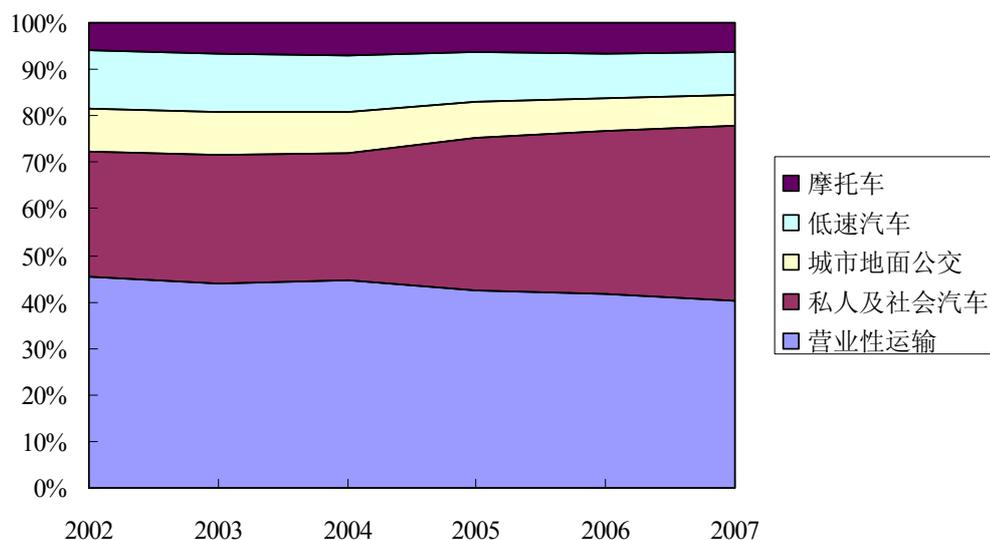


图 4-2 各种类型车辆能耗在公路交通能耗中的比例

从整个公路燃油消耗的构成来看，营业性道路运输能耗比例则稍有下降，从2002年的45.4%降到2007年的40.4%。社会及私人汽车的能耗增长迅速，所占比例显著扩大，从2002年的26.7%增加到了2007年的37.4%，如果再加上摩托车的能耗，在全部公路交通能耗中占的比例可达到43.7%。

4.4 营业性公路运输能源效率及客货换算系数分析

本文中计算的为营业性公路运输的能源效率。根据相关资料，可得出中国营运性客货车燃油消耗数据如表4-19所示。

从可比较的角度折算为标准煤消耗，2007年营业性公路客运能耗水平为165.1（千克标准煤/万人公里），货运能耗水平为616.8（千克标准煤/万吨公里）。对公路运输来说，单位货物周转量的能耗水平约是单位旅客周转量能耗水平的3.7倍。

在进行运输工作量对比分析时常常要用到换算周转量的概念。公路规定旅客周转量（人公里）和货物周转量（吨公里）的换算标准为：1吨公里相当于10人公里，即换算系数为0.1。这种换算系数的制定是在一定条件下以运输能力相当为前提计算得到的。在进行能耗比较时，这种换算系数存在不合理性，即1吨公里的能耗并不等于10人公里的能耗。随着技术的改进，换算系数应该是相对变化而非一个定值。

表4-19 营业性公路客货运能源效率及客货周转量换算系数

年份	营运客车 能耗 tce	营运货车 能耗 tce	客运周 转量亿 人公里	货运周 转量亿 吨公里	客运单耗 Kgce/万人 公里	货运单耗 Kgce/万吨 公里	换算周转量 系数吨公里/ 人公里
2000	1057	3574	6657	6129	158.8	583.1	0.27
2001	1649	4060	7207	6330	228.8	641.4	0.36
2002	1515	4731	7806	6783	194.1	697.6	0.28
2003	1984	4404	7696	7100	257.8	620.3	0.42
2004	1454	5530	8748	7841	166.2	705.3	0.24
2005	1723	6289	9292	8693	185.4	723.5	0.26
2006	1736	6674	10131	9754	171.4	684.3	0.25
2007	1900	7004	11507	11355	165.1	616.8	0.27

来源：中国统计年鉴；亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目，《中国公路交通资源优化利用上卷—政策建议与行动计划》，北京：中国经济出版社，2009：106-107；模型测算。

注：标煤折算系数取汽油折算系数（1.471）和柴油折算系数（1.457）的平均值1.464

由计算结果可知，在能源消耗相同的情况下，2007年公路客货周转量换算系数为0.27，即1人公里相当于0.27吨公里，换句话说，1吨公里相当于3.7人公里。单位吨公里货运周转量消耗的能源是单位人公里旅客周转量消耗能源的3.7倍，传统的1吨公里等于10人公里的换算系数低估了公路旅客运输的能源消耗水平。

4.5 主要结论

本部分针对公路能耗数据统计与测算进行了研究，主要有以下结论：

(1) 对公路能耗统计的主要指标进行了分析，并对比了国外的相关统计指标设置。研究表明，国内现有的统计一是涵盖的统计对象不全，二是指标设置过于宏观，在客货车型细分、燃料类型细分、载客客位数及载货吨位数细分方面不够，难于提供进一步研究分析的基础。

(2) 按照国际通行的统计指标口径，公路交通运输统计数据应该包括所有的道路车辆的燃油消耗，即：

- ①营业性道路运输能耗；
- ②城市地面公共交通（包括出租车）能耗；
- ③非营业性社会及私人民用汽车能耗；
- ④摩托车能耗；
- ⑤低速汽车（农用运输车）能耗；
- ⑥其他机动车（军车等）能耗。

在中国，不同的政府管理部门有不同的管理权限，比如，城际交通运输营运归交通部管理，城市公共交通归建设部（新近成立交通运输部后情况有所变化），低速汽车归农机部门管理，因此不同的统计数据有不同的统计口径。目前可得到的官方统计资料只有部分年度的营业性道路运输能耗。

(3) 本研究测算了城市地面公共交通（包括出租车）能耗、非营业性社会及私人民用车辆能耗、摩托车能耗、低速汽车能耗，同时建立了营业性载客汽车能耗测算模型，结果分析表明模型计算有效。根据统计资料及测算，得到了公路交通能源消耗总量数据（未军车能耗）。研究表明，公路交通燃油消耗总量一直呈增长趋势，2002年为9392万吨，2007年已经达到14964万吨，增长59.2%。但在全社会石油终端消费中的比例起伏波动，2007年达到44.3%。

(4) 从道路因素、运输车辆因素、运输组织管理因素、驾驶员因素等方面分析了对汽车能耗的影响。相关研究表明，公路交通节能是一个系统工程。

(5) 从可比较的角度折算为标准煤消耗，2007年营业性公路客运能耗水平为165.1（千克标准煤/万人公里），货运能耗水平为616.8（千克标准煤/万吨公里）。对公路运输来说，单位货物周转量的能耗水平约是单位旅客周转量能耗水平的3.7倍。

(6) 根据研究测算，在能源消耗相同的情况下，公路客货周转量换算系数为0.27，

即 1 人公里相当于 0.27 吨公里，换句话说，1 吨公里相当于 3.7 人公里。

5 不同交通方式能耗因子比较研究

运输周转量包括货物周转量和旅客周转量，货物（旅客）周转量指在一定时期内，由各种运输工具运送的货物（旅客）数量与其相应运输距离的乘积之总和，它是反映运输业生产总成果的重要指标。不同交通方式的能耗与运输周转量的关系反映了该种交通方式能源利用情况，将为交通运输节能降耗提供科学指标依据。

5.1 交通能耗因子指标定义

(1) 交通能耗因子指标

本研究定义交通能耗因子为单位交通运输工作量所消耗的能源量。研究不同交通方式的能耗因子，意味着要在完成相同的交通运输工作量条件下，比较分析不同交通方式的能耗水平。因此，需要选取合适的指标，用来衡量交通运输工作量，以及相应的能源消耗量。

- ①客运能耗因子： $\text{kgce}/\text{万人公里}$
- ②货运能耗因子： $\text{kgce}/\text{万吨公里}$
- ③综合能耗因子： $\text{kgce}/\text{万换算吨公里}$

(2) 运输工作量指标

本研究中，对于不同的交通方式，采用其完成的货物周转量（吨公里）来衡量货物运输工作量，采用其完成的旅客周转量（人公里）来衡量旅客运输工作量。对于某种交通方式的综合运输工作量，采用换算周转量（吨公里）来衡量，计算方法为将旅客周转量（人公里）按一定的换算系数（吨公里/人公里）折算为吨公里，使其和货物周转量相加，得到换算周转量（吨公里）。

(3) 交通能耗指标

不同方式交通运输能耗指标范围：

①铁路运输包括了运输生产过程（牵引与辅助走行）能耗以及辅助生产过程（车站）能耗；

②公路运输能耗特指营业性道路运输车辆的燃油消耗；

③水运能耗指内河、沿海、远洋的船舶燃油消耗，不包括港口；

④航空能耗指飞机燃油消耗，不包括机场。

各种能源品种均按热当量法均折算为标准煤，对于电力，采用热当量系数（0.1229）进行折算。

5.2 不同交通方式综合能耗因子比较

综合能耗因子，指不同交通方式单位换算周转量(万吨公里)消耗的能源数量(kgce)。此处，主要研究铁路、公路、水运、航空四种交通方式。

(1) 铁路综合能耗因子

根据统计数据，可以得到铁路历年总能耗（电力按热功当量0.1229折算）、货物周转量、旅客周转量，根据本研究结果，基于能耗相同的铁路旅客周转量换算系数为1.7吨公里/人公里。因此，可以计算出铁路综合能耗因子，参见表5-1、图5-1。

表 5-1 铁路综合能耗因子

	铁路总能耗 (万吨标准煤)	铁路货物周转量 (亿吨公里)	铁路旅客周转量 (亿人公里)	铁路综合能耗因子 (kgce/万换算吨公里)
2002	1500	15658	4969	62.2
2003	1544	17247	4789	60.8
2004	1583	19289	5712	54.6
2005	1644	20726	6062	53.0
2006	1647	21954	6622	49.6
2007	1677	23797	7216	46.5

注：铁路总能耗、货物周转量、旅客周转量数据来源于《铁路简明统计资料》，旅客周转量换算系数按 1.7 吨公里/人公里计算。

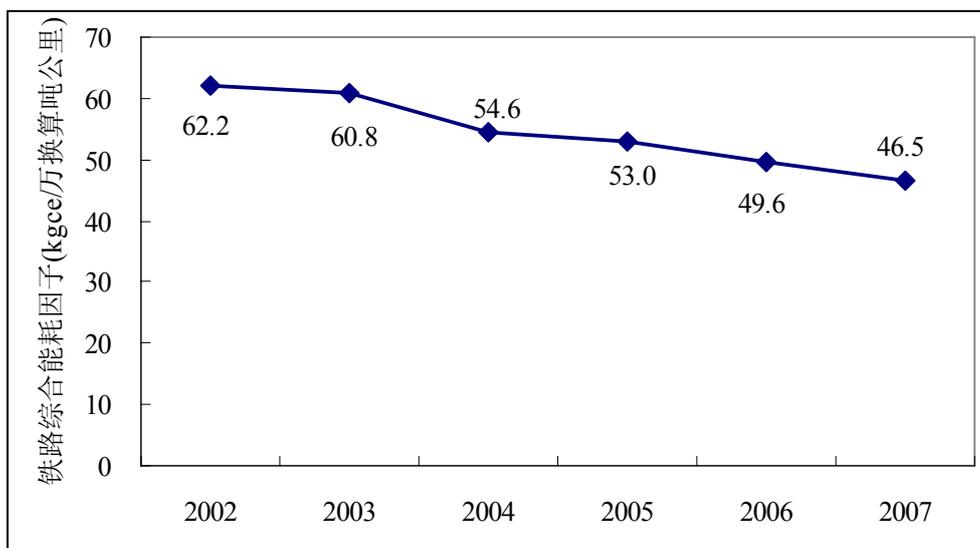


图 5-1 铁路综合能耗因子

可以看到，近几年铁路综合能耗因子有逐渐下降的趋势。

(2) 公路综合能耗因子

根据统计数据，可以得到营业性公路运输历年总能耗、货物周转量、旅客周转量，根据本研究结果，基于能耗相同的公路旅客周转量换算系数为0.27吨公里/人公里。因此，可以计算出营业性公路运输综合能耗因子，参见表5-2、图5-2。

表 5-2 营业性公路运输综合能耗因子

	营业性公路能耗 (万吨标准煤)	公路货物周转量 (亿吨公里)	公路旅客周转量 (亿人公里)	公路综合能耗因子 (kgce/万换算吨公里)
2002	6248	6783	7806	702.8
2003	6389	7100	7696	696.1
2004	6986	7841	8748	684.7
2005	8014	8693	9292	715.4
2006	8412	9754	10131	673.6
2007	8906	11355	11507	615.8

注：营业性公路能耗数据（2002~2005）来源于亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目：《中国公路交通资源优化利用上卷—政策建议与行动计划》，北京：中国经济出版社，2006~2007 能耗数据根据趋势外推测算；公路货物周转量、旅客周转量数据来自《中国交通统计年鉴》；旅客周转量换算系数为 0.27 吨公里/人公里。

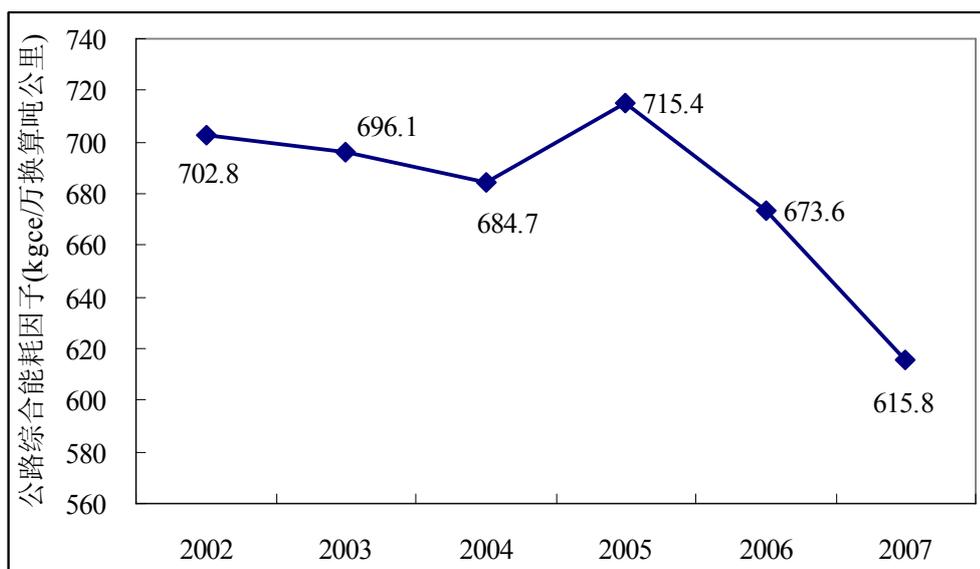


图 5-2 营业性公路运输综合能耗因子

可以看到，2005年以后，公路运输能耗因子下降较大。

(3) 水运综合能耗因子

根据统计资料水运船舶燃油单耗数据，可以计算出水运综合能耗因子，参见表5-1和图5-3。

表 5-3 水运船舶燃油单耗

	水运船舶燃油单耗(公斤/千吨公里)	水运综合能耗因子(kgce/万吨公里)
2002	6	87.4
2003	6	87.4
2004	6	87.4
2005	7	102.0
2006	5	72.9
2007	12*	72.9

注：水运船舶燃油单耗来源于《中国交通统计年鉴》，水运综合能耗因子按柴油折算系数 1.4571 计算。2007 年水运船舶燃油单耗统计数据为 12，疑有误（或统计口径变化），因此 2007 年水运综合能耗因子取 2006 年数据。

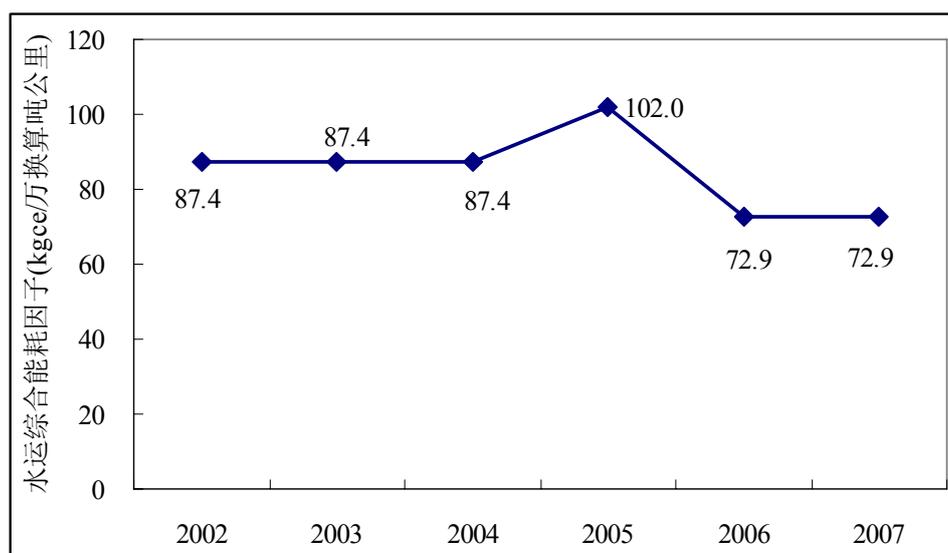


图 5-3 水运综合能耗因子

可以看出，水运综合能耗因子基本变化不大。

(4) 航空综合能耗因子

根据统计资料中航空飞机每吨公里燃油单耗数据，可以计算出航空综合能耗因子，参见表5-4和图5-4。

表 5-4 航空飞机燃油单耗

	航空飞机燃油单耗(公斤/吨公里)	航空综合能耗因子(kgce/万吨公里)
2002	0.364	5355.9
2003	0.354	5208.8
2004	0.341	5017.5
2005	0.336	4943.9
2006	0.327	4811.5
2007	0.309	4546.6

注：航空飞机燃油单耗来源于《从统计看民航》，航空综合能耗因子按煤油折算系数 1.4714 计算。

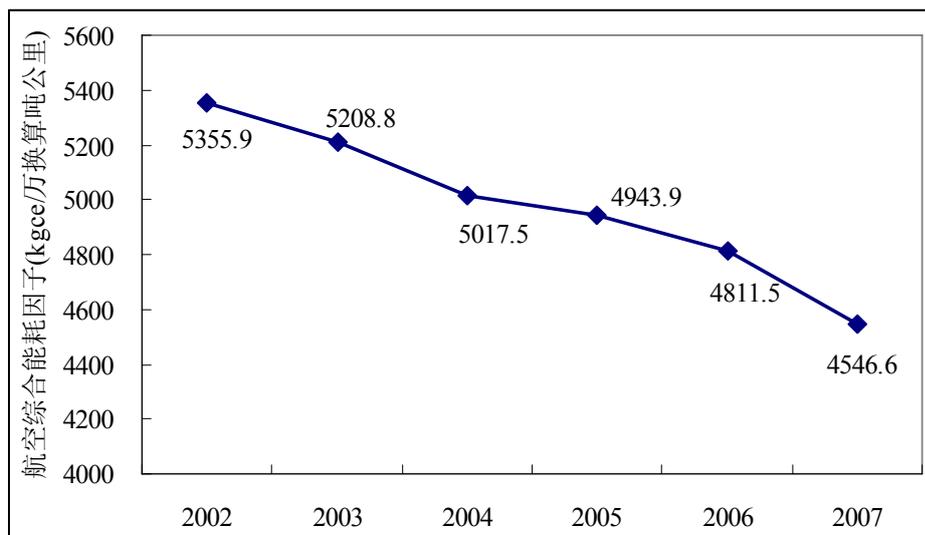


图 5-4 航空综合能耗因子

可以看出，航空综合能耗因子具有逐年下降的趋势。

(5) 不同交通方式能耗综合因子比较

根据本课题的研究，表5-5列出了2002与2007两个典型年度我国不同交通方式综合能耗因子水平的测算结果。

表5-5 中国不同交通方式综合能耗因子 (kgce/万换算吨公里)

	铁路	水运	公路	航空
2002	62.2	87.4	702.8	5355.9
2007	46.5	72.9	615.8	4546.6

可以看出，各种交通方式的综合能耗因子均有下降的趋势。2007年与2002年相比，以下降幅度排序，铁路单位能耗水平下降了30.0%，航空下降了15.1%，水运下降了14.3%，营业性公路运输下降了12.4%。这得益于技术的进步，以及国家节能政策的实施效果。相对而言，在目前的技术水平和运输载荷水平下，铁路仍然是最为节能的交通方式，其次为水运、公路、航空，各种交通方式能耗因子的对比关系参见图5-5。

2002年以铁路单位换算周转量的能耗水平为1，那么水运能耗水平为1.4，公路为11.3，航空为86.1。2007年如果以铁路单位换算周转量的能耗水平为1，那么水运能耗水平为1.7，公路为14.1，航空为104.4。

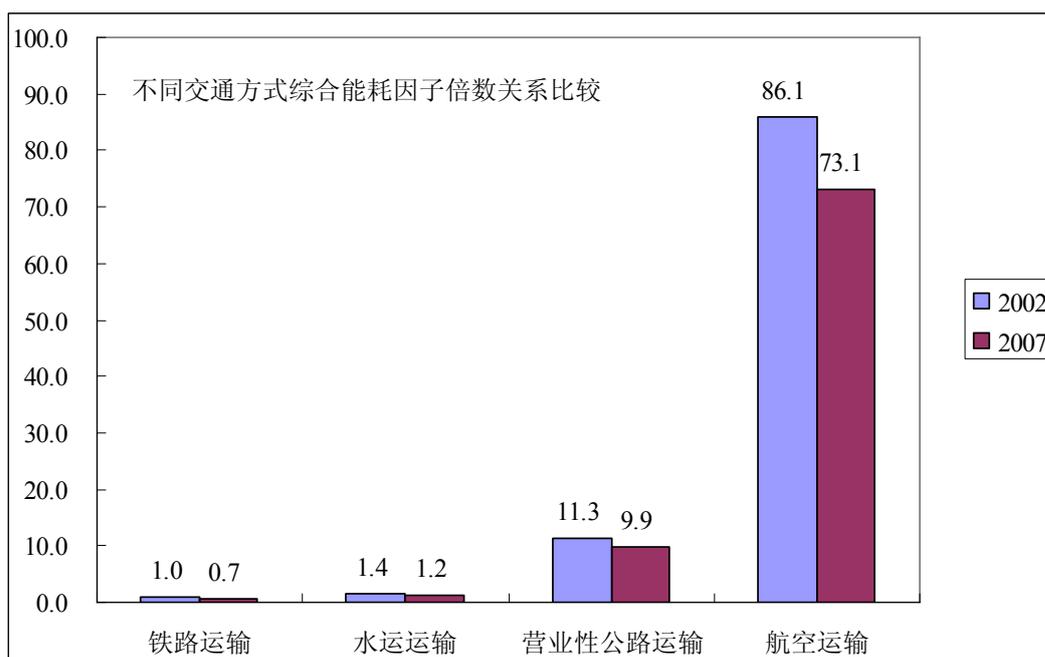


图 5-5 不同交通方式综合能耗因子对比

5.3 铁路与公路客货交通能耗因子比较

本研究对铁路交通与公路交通能耗进行了较为详细的研究。

(1) 旅客运输能源效率比较。

2007年铁路旅客运输与营业性公路旅客运输的能源利用效率参见图5-6。

可以看出，2007年公路完成单位旅客周转量（万人km）所消耗的能源是铁路的2.9倍，即铁路客运万人km能耗水平（非高速客运专线）大约是公路客运能耗水平的34.5%。

(2) 货物运输能源效率比较。

2007年铁路货物运输与营业性公路货物运输的能源利用效率参见图5-7。

可以看出，公路货物运输完成单位货物周转量（万吨km）所消耗的能源约为铁路的17.7倍，换言之，铁路货运万吨km能耗水平为公路货运能耗水平的5.6%。

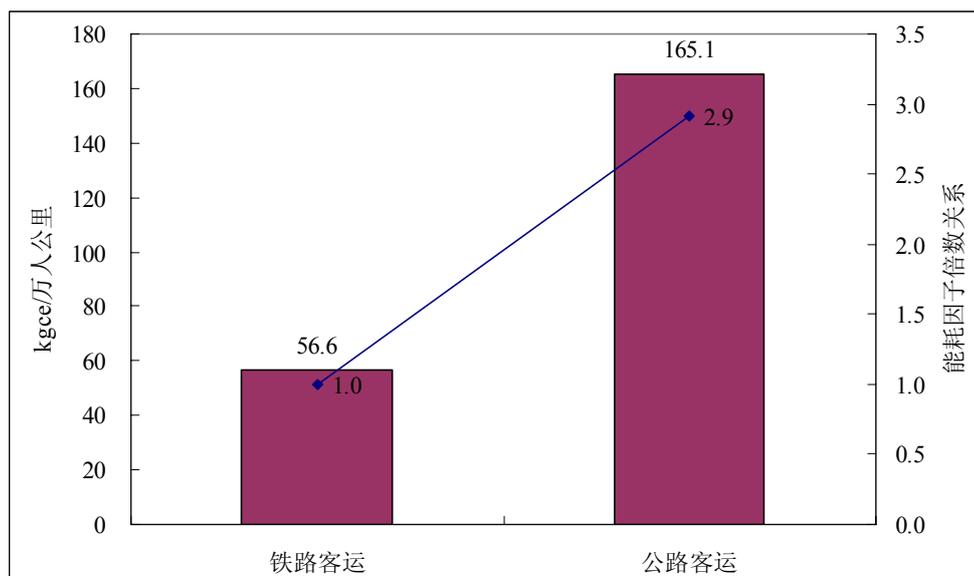


图5-6 铁路与公路旅客运输能源效率比较

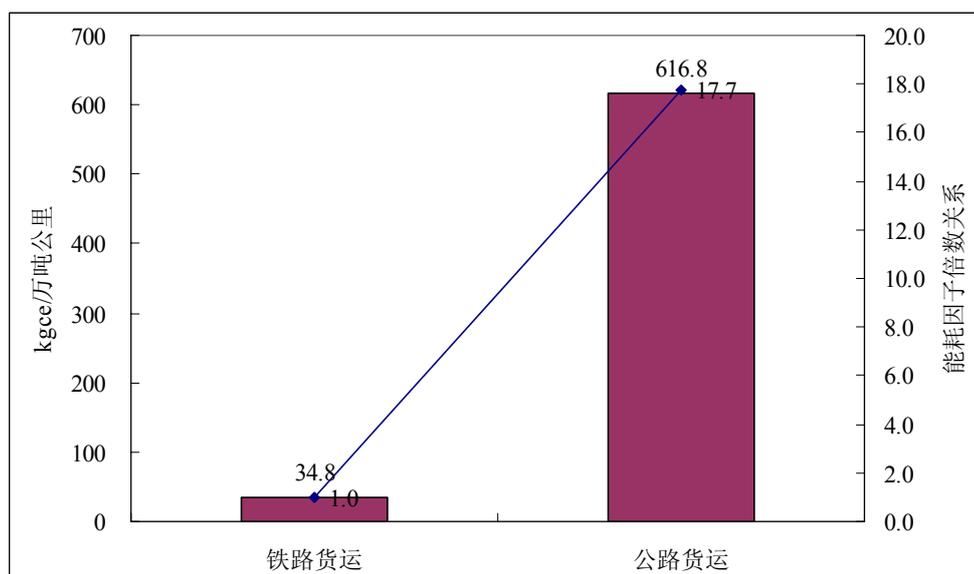


图5-7 铁路与公路货物运输能源效率比较

5.4 国内外不同交通方式能耗结构比较

本报告中选取美国、英国、日本与中国的相关数据来说明国内外不同交通方式的能耗情况。由于统计口径的差异，各国数据不存在严格意义上的对应可比关系，比如美国包括了铁路、水运、公路、航空、管道五种方式的能耗结构，英国、日本、中国缺乏管道数据，同时在一些具体的能耗统计范围上也存在差异，比如美国水运能耗包括了国内及国际的船舶能耗，但未包括港口能耗；英国只统计国内船舶能耗，但包括了港口能耗，日本只包括国内船舶能耗。本研究尽量选取相近口径数据进行比较。

(1) 美国相关统计数据

1990年以来美国不同交通方式能源消耗结构如表5-6所示。

表5-6 美国不同交通方式能源消耗结构

年份	公路	铁路	水运	航空	管道	合计
1990	77.1%	2.3%	6.7%	9.6%	4.3%	100%
1995	78.1%	2.4%	6.3%	9.1%	4.1%	100%
2000	79.1%	2.3%	5.5%	9.7%	3.4%	100%
2001	80.4%	2.3%	4.6%	9.3%	3.4%	100%
2002	81.2%	2.3%	4.7%	8.3%	3.5%	100%
2003	82.2%	2.3%	4.0%	8.3%	3.2%	100%
2004	81.1%	2.4%	4.8%	8.7%	3.0%	100%
2005	80.5%	2.4%	5.0%	9.0%	3.1%	100%
2006	80.4%	2.4%	5.2%	9.0%	3.0%	100%
2007	79.9%	2.3%	5.6%	9.0%	3.2%	100%

来源：(Transportation Energy Data Book, Edition28), 水运数据包括美国国内及国际船舶运输能耗

从不同交通方式能耗结构来看，2007年美国各种道路运输工具消费的能源占整个交通运输能耗的79.9%，其中轻型机动车（包括小汽车、轻型卡车）和摩托车能耗占整个交通运输能耗的60.4%，公共汽车能耗占0.70%，重型卡车能耗占18.8%。非道路运输工具能耗只占交通运输能耗的20.1%，其中航空能耗占整个交通运输能耗的9.0%，水运能耗占5.6%，管道能耗占3.2%，铁路能耗占2.3%。

(2) 英国相关统计数据

1990年以来英国不同交通方式能源消耗结构如表5-7所示。

表5-7 英国不同交通方式能源消耗结构

年份	公路	铁路	水运	航空	合计
1990	79.8%	2.3%	2.8%	15.1%	100%
1995	78.2%	2.6%	2.4%	16.9%	100%
2000	74.1%	2.5%	1.9%	21.6%	100%
2001	74.5%	2.6%	1.5%	21.4%	100%
2002	75.3%	2.5%	1.3%	20.9%	100%
2003	74.2%	2.4%	2.2%	21.2%	100%
2004	73.1%	2.5%	2.1%	22.4%	100%
2005	71.8%	2.5%	2.3%	23.5%	100%
2006	71.2%	2.4%	3.0%	23.4%	100%
2007	71.9%	2.3%	2.7%	23.1%	100%

来源：《Energy Consumption in the United Kingdom》，水运数据包括英国国内船舶能耗和港口能耗。

从不同交通方式能耗结构来看，2007年英国道路运输消费的能源占整个交通运输能耗的71.9%，非道路运输工具能耗占交通运输总能耗的28.1%，其中航空能耗占整个交通运输能耗的23.1%而位居第二，水运、铁路能耗分别仅占2.7%和2.3%。从各种交通方式的发展来看，道路交通能耗比例缓慢下降，由1990年的79.8%下降到2007年的71.9%；航空运输体系不断壮大，能耗所占比例从1990年的15.1%上升到2008年的23.1%。

(3) 日本相关统计数据

1990年以来日本不同交通方式能源消耗结构如表5-8所示。

表5-8 日本不同交通方式能源消耗结构

	公路	铁路	水运	航空	合计
1990	87.9%	2.7%	5.1%	4.4%	100%
1995	88.2%	2.4%	4.5%	4.9%	100%
2000	87.2%	2.3%	6.1%	4.5%	100%
2001	86.8%	2.3%	6.1%	4.8%	100%
2002	86.9%	2.2%	6.5%	4.4%	100%
2003	87.1%	2.3%	6.3%	4.4%	100%
2004	87.2%	2.2%	5.9%	4.7%	100%
2005	87.0%	2.3%	5.8%	5.0%	100%
2006	86.9%	2.3%	5.5%	5.3%	100%

来源：2008年《日本能源经济统计手册》，水运数据只包括日本国内船舶能耗。

从不同交通方式能耗来看，2006年日本各种道路运输工具能源消费占整个交通运输能耗的86.9%，其中私人机动车、营业机动车分别占54.1%和1.7%，公共汽车占1.7%，货物机动车占29.4%。非道路交通工具能耗只占交通总能耗的13.1%，其中铁路、水运和航空部门分别占交通部门总能耗的2.3%、5.5%和5.3%。

(4) 中国与美国比较

中国不同交通方式能源消耗结构如表5-9所示。

表5-9 中国不同交通方式能源消耗结构（水运含远洋）

	公路	铁路	水运含远洋	航空	合计
2002	74.2%	8.1%	13.0%	4.8%	100%
2003	74.7%	7.9%	12.8%	4.6%	100%
2004	71.1%	7.2%	16.4%	5.3%	100%
2005	70.3%	6.1%	18.8%	4.8%	100%
2006	73.9%	6.0%	14.8%	5.4%	100%
2007	73.3%	5.6%	15.6%	5.5%	100%

注：公路为全部公路交通工具能耗（除军车等外）；铁路为包括牵引、站场等能耗；水运为全部（内河、沿海、远洋）船舶能耗，不包括港口能耗；航空为飞机航油能耗，不包括机场能耗。

从表中可以看出，2007年我国公路能耗占整个交通运输能耗的73.3%，铁路、水运（此处假定远洋运输全部由国内运输船舶承担，相关能源消耗计入中国交通能源消耗）和航空部门分别占交通部门总能耗的5.6%、15.6%和5.5%。

图5-8为2007年中国与美国类似统计口径（但美国加管道为100%，中国未包括管道）不同交通方式能耗构成比较。

从图中可以看出，公路是交通运输业中能源消耗最多的交通方式，2007年中国公路能耗比例为73.3%，美国为79.9%。与美国不同，中国作为世界制造工厂和最大的外贸出口国，远洋运输占很大比例（2007年中国包括远洋的整个水运完成的货物周转量占全国总货物周转量的63.4%），含远洋的水运能耗占15.6%（此处假定远洋运输全部由国内运

输船舶承担，相关能源消耗计入中国交通能源消耗）。美国为5.6%。中国铁路能耗比例为5.6%，高于美国（2.3%），但中国航空能耗比例为5.5%，低于美国的9.0%。

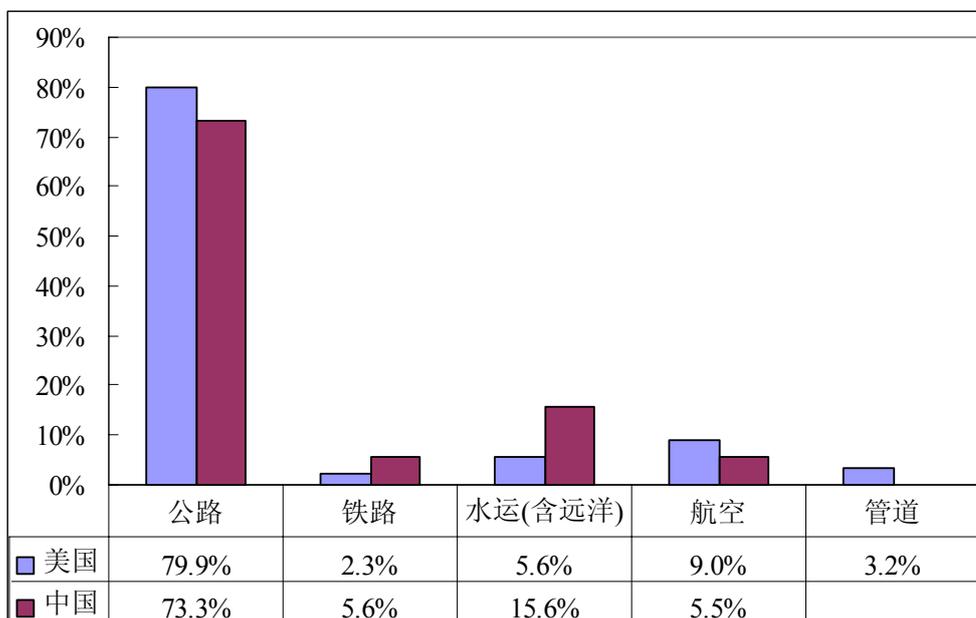


图5-8 2007年中国与美国不同交通方式能源消耗结构（水运含远洋）

考虑到上述数据中国未包括管道运输，如果从美国统计数据中去除管道运输，那么美国相应交通运输方式的比例数据会有一些增加。但不会增加太多。

（5）中国与英国、日本比较

为了和英国、日本进行比较，只考虑国内内河、沿海水运的中国不同交通方式能源消耗结构如表5-10所示。

表5-10 中国不同交通方式能源消耗结构（水运不含远洋）

	公路	铁路	水运不含远洋	航空	合计
2002	82.6%	9.0%	3.1%	5.3%	100%
2003	82.9%	8.8%	3.2%	5.1%	100%
2004	81.5%	8.2%	4.2%	6.0%	100%
2005	82.3%	7.1%	5.0%	5.6%	100%
2006	83.3%	6.8%	3.9%	6.1%	100%
2007	83.1%	6.3%	4.3%	6.3%	100%

注：公路为全部公路交通工具能耗（除军车等外）；铁路为包括牵引、站场等能耗；水运为内河、沿海（不含远洋）船舶能耗，不包括港口能耗；航空为飞机航油能耗，不包括机场能耗。

图5-9为2007年中国与英国、日本（2006年）类似统计口径（但英国水运包括了港口能耗，中国与日本未包括）不同交通方式能耗构成比较。

从图中可以看出，公路仍然是交通运输业中能源消耗最多的交通方式，中国公路能耗比例为83.1%，与日本接近（86.9%），英国为71.9%。去除远洋运输后，中国水运能耗在所有交通方式中的比例为4.3%（日本为5.5%，英国为2.7%），中国铁路为6.3%（日本

为2.3%，英国为2.3%），中国航空为6.3%（日本为5.3%，英国为23.1%）。

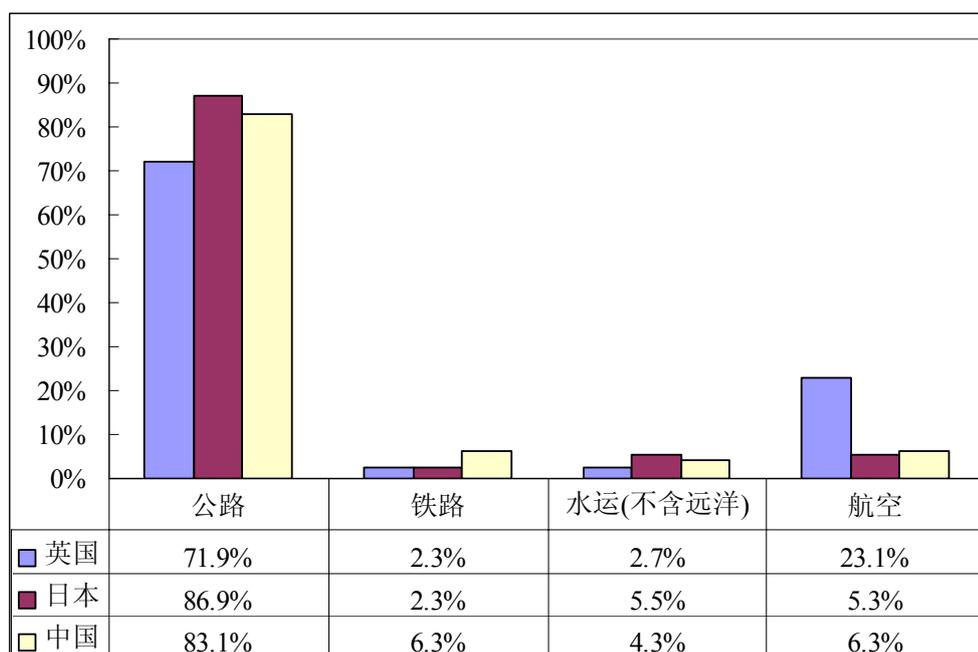


图5-9 2007年中国与英国、日本不同交通方式能源消耗结构（水运不含远洋）

5.5 主要结论

本章对国内外不同交通方式能耗因子进行了对比分析，研究了不同交通方式能耗与运输周转量的关系，比较了不同交通方式能源的利用效率，同时对国内外不同交通方式能耗比例进行了分析。通过研究，得到以下主要结论：

（1）本研究定义能耗因子为单位交通运输工作量所消耗的能量量，包括客运能耗因子（kgce/万人公里）；货运能耗因子（kgce/万吨公里）；综合能耗因子（kgce/万换算吨公里）。对于不同的交通方式，采用其完成的货物周转量（吨公里）来衡量货物运输工作量，采用其完成的旅客周转量（人公里）来衡量旅客运输工作量。对于某种交通方式的综合运输工作量，采用换算周转量（吨公里）来衡量。

（2）各种交通方式的综合能耗因子均有下降的趋势。2007年与2002年相比，以下降幅度排序，铁路单位能耗水平下降了30.0%，航空下降了15.1%，水运下降了14.3%，营业性公路运输下降了12.4%。这得益于技术的进步，以及国家节能政策的实施效果。

（3）相对而言，在目前的技术水平和运输载荷水平下，铁路仍然是最为节能的交通方式，2007年综合能耗因子为46.5kgce/万吨公里，其次为水运72.9kgce/万吨公里，第三为营业性公路运输615.8kgce/万吨公里，最后为航空4546.6kgce/万吨公里。2007年如果以铁路单位换算周转量的能耗水平为1，那么水运能耗水平为1.7，公路为14.1，航空

为 104.4。

(4) 对铁路和公路客货运输能耗水平进行了详细研究。2007 年公路完成单位旅客周转量（万人 km）所消耗的能源是铁路的 2.9 倍，即铁路客运万人 km 能耗水平（非高速客运专线）大约是公路客运能耗水平的 34.5%。公路货物运输完成单位货物周转量（万吨 km）所消耗的能源约为铁路的 17.7 倍，换言之，铁路货运万吨 km 能耗水平为公路货运能耗水平的 5.6%。可以看出，铁路货运对公路货运的替代能耗节约远大于铁路客运对公路客运的替代能耗节约效果。

(5) 从国内外不同交通方式能耗构成比较分析，道路运输是交通运输业中能源消耗最多的交通方式。如果考虑水运远洋运输，2007 年中国公路能耗比例为 73.3%（美国为 79.9%），中国作为世界制造工厂和最大的外贸出口国，远洋运输占很大比例（2007 年中国包括远洋的整个水运完成的货物周转量占全国总货物周转量的 63.4%），含远洋的水运能耗占 15.6%（此处假定远洋运输全部由国内运输船舶承担，相关能源消耗计入中国交通能源消耗）。美国为 5.6%。中国铁路能耗比例为 5.6%，高于美国（2.3%），但中国航空能耗比例为 5.5%，低于美国的 9.0%。上述数据中国未包括管道运输，美国包括管道运输。

(6) 不考虑水运远洋运输，公路仍然是交通运输业中能源消耗最多的交通方式，这种情况下，2007 年中国公路能耗比例为 83.1%，与日本接近（86.9%），英国为 71.9%。去除远洋运输后，中国水运能耗在所有交通方式中的比例为 4.3%（日本为 5.5%，英国为 2.7%），中国铁路为 6.3%（日本为 2.3%，英国为 2.3%），中国航空为 6.3%（日本为 5.3%，英国为 23.1%）。

6 不同交通方式排放因子初步研究

自从工业化时代以来，以机动车为主要运输工具的城际、城市交通给人类社会带来的极大的便利，城市规模不断扩大，机动化水平不断提高，推动了社会经济的快速发展。随之而来，城市交通拥堵状况日益加剧，由此带来的机动车尾气污染严重的困扰着城市居民的工作和生活，恶化着城市生态环境，严重危害着人们的健康，由此带来的机动车尾气排放污染问题，严重的困扰着城市居民的工作和生活，恶化着城市生态环境，严重危害着人们的健康，环境污染问题已成为世界各国现代城市交通发展中面临的首要问题。

6.1 温室气体与交通排放

从广义的角度，能产生温室效应的大气成分称为温室气体，包括水蒸气、二氧化碳（ CO_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、氧化亚氮（ N_2O ）等。广大学者与各国政府更关心的是人为排放的温室气体，既狭义的温室气体。人类活动排放的温室气体主要有 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、其他含氟温室气体，从构成来看， CO_2 是目前最重要的人为温室气体。1970~2004年，温室气体排放增加了约70%，仅在1990-2004年就大约增长了24%，其中 CO_2 是最大的排放源，已增长了大约80%。1970-2004年，全球人类活动温室气体排放的最重要增长来自能源行业（增长了145%），其次是交通运输业（直接排放增长了120%），工业的直接排放增长了65%，土地利用变化和林业的直接排放增长了40%。1970-1999年，源自于农业的直接排放增长了27%，源自于建筑物的直接排放增长了26%^[93]。

交通工具排放的主要温室气体 CO_2 导致全球变暖，交通工具排放的烟尘、燃料碳末、有机碳和各种硫化物也会对气候和人体健康产生影响，烟尘还会改变云的分布和特性。交通污染对大气总体影响非常复杂，有些气体会马上对大气产生影响，另一些气体对大气的影响则可能发生在几十年甚至几个世界之后。

交通工具燃油是由多种成分碳氢化合物所组成，以汽油机为例，汽油机排放温室气体的途径可分为曲轴箱串气、燃料蒸发和燃烧排气三部分。曲轴箱串气、燃料蒸发主要排出污染物HC，分别占汽油机排放总量的25%和20%。汽油机的排气污染物主要从排气管排出。如果燃料燃烧完全，烃燃料的碳和氢将被氧化成 CO_2 和 H_2O ，燃烧不完全会生成CO（一氧化碳）和HC（碳氢化合物）等不完全氧化物。由于燃烧是在高温下进行，进入气缸的 N_2 还会氧化成 NO_x （氮氧化物，主要为NO和 NO_2 ）。汽油机排气的主要成分有

以下几种：大气成分，N₂和剩余O₂；完全燃烧物，水蒸气和CO₂；不完全燃烧物，CO和H₂；未燃燃料和燃烧分解生成物，HC；燃烧的中间产物；氮氧化物；燃料的润滑油添加物的混合物。以一台不加排气催化转化器的汽油机为例，在欧洲标准测试循环中的排气组成中，来自空气的N₂占70.9%，完全燃烧的产物水蒸气占9.2%，CO₂占18.1%，其他污染物占1.1%（包括NO_x占0.13%、HC占0.09%、CO占0.9%）^[67]。

机动车排放的污染物主要有CO、HC、NO_x和碳烟等化合物，这些污染物分为尾气、曲轴箱排放物和燃油蒸发排放物，内燃机废气由排气管排出，占尾气60%左右；曲轴箱泄露气体及汽化器重蒸发出的气体，一般各占20%左右，经调查统计，每千台未受控制车辆每天排出CO约3000kg，HC200-400kg，NO_x50-150kg，平均每燃烧1吨90[#]汽油生成有害物质总量40-70kg。机动车排放源3种污染物所占的比例^[67]见表6-1。

表 6-1 机动车排放源 3 种污染物所占的比例

单位：%

污染物	单位：%		
	排气管	曲轴箱	燃油系统
NO _x	96	4	0
CO	98	2	0
HC	55	25	20

6.2 世界交通运输排放现状

从世界范围来看，交通运输是温室气体排放的主要领域之一，同时交通需求也在不断增长。以欧盟为例，至今为止，最大的交通排放源为小汽车，占欧盟交通总CO₂排放的近一半。国际能源总署（IEA）统计结果显示，目前全球交通运输领域CO₂排放量约占全球CO₂排放量的25%，其中机动车所产生的CO₂排放量占总量的14%左右^[93]。

从部门上看，CO₂排放量增加最快的部门是电力行业和公路运输业，家庭和服务业的CO₂排放量在过去35年中的排放量基本稳定在同一水平。2004年，交通运输领域对总能源有关的温室气体排放的贡献率约为23%，CO₂和CH₄的排放总计约为（6.3~6.4）*10⁹t CO₂-eq。2004年的温室气体排放增加量中，25.9%来自于能源供应（电力和热力），有19.4%来自于工业，有13.5%来自于农业，17.4%来自于土地利用，13.1%来自于交通运输，7.9%来自于居民生活、商业和服务业，2.8%来自于废弃物和废水^[93]。发达国家道路运输业排放的CO₂所占比重高于世界平均水平。根据2007年欧洲运输部长会议《减少运输二氧化碳排放报告》，2003年经济合作和发展组织（OECD）国家来自燃油消费所排放的CO₂中，交通运输业（包括营业性运输和私人运输）占到34%，其中公路为23%，水路为2%，航空为6%，其他为3%；在全世界范围，交通运输占28%，其中公路为18%，水路为2%，航空为5%，其他为3%。

在工业领域纷纷制定自己的减排目标之时，交通污染却变得难以控制。根据奥斯陆

气候和环境国际研究中心在美国《国家科学院学报》月刊上的研究报告指出，过去10年全球CO₂排放总量增加了13%，而源自交通工具的碳排放增长率却达25%。欧盟大部分工业领域都做到了成功减排，但交通工具的碳排放却在10年间增长了21%。预计2050年全球交通工具碳排放将比目前增长30-50%。

不同地区的CO₂排放趋势存在巨大差别。北美、亚洲和中东地区的CO₂排放量从1972年开始都还在不断增加，但是增长越来越缓慢，2002年CO₂排放量比1990年有所减少的发达国家有德国、英国、瑞典和瑞士。

2006年，日本交通运输部门CO₂的排放量约为2.54亿吨。其中，道路运输部门（全社会）的排放量为2.23亿吨，占交通运输总排放量的8%，占日本2006年CO₂排放总量（12.75亿吨）的18%。

美国运输部发布的《2005年运输统计报告》表明，2003年美国运输部门温室气体(GHG)排放总量为18.64亿吨CO₂当量，占当年美国全部温室气体排放量的27%。在所有运输方式温室气体排放量中，道路运输占82%，其中小汽车占43%、轻型卡车占33%、公共汽车占1%，其余23%为除轻型外的各类卡车。根据近期的温室气体排放报告，在2002年美国的温室气体排放源中，交通部门的温室气体排放量仅次于工业部门，占美国温室气体排放总量的27%，如图6-1所示。该数据不包括整个生命周期其他环节的温室气体排放量，如燃料的开采和精炼过程、交通工具的生产过程中温室气体的排放，这也是地区和全球温室气体排放的重要来源之一。交通行业是美国温室气体尤其是CO₂排放这一主要的温室气体排放量增加速度最快的行业。

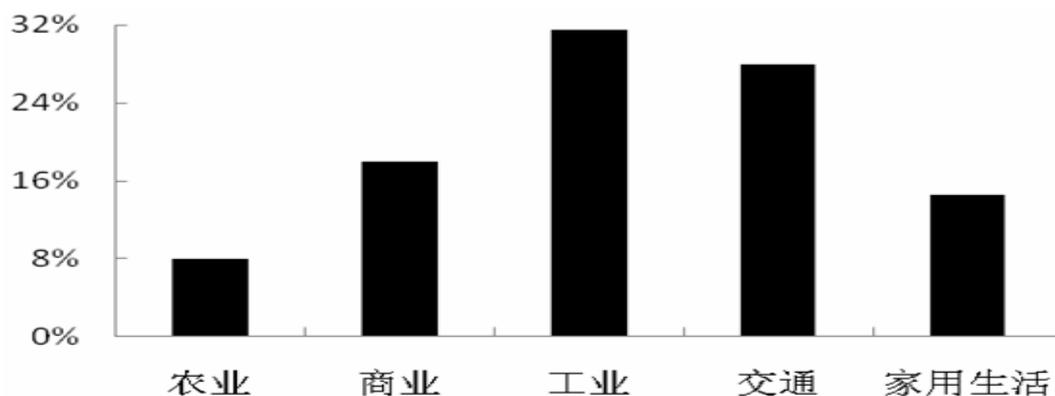


图 6-1 2002 年美国各行业温室气体排放

美国根据联邦公路管理局的统计数据估算了国家交通工具的温室气体排放量。联邦公路管理局提供的交通工具燃油使用效率为：客车22.1mpg(英里、加仑，每百公里油耗为16.8升)，轻型卡车17.6mpg。交通工具典型的行驶里程是每年12000英里。由此计算出非重型交通工具每年的温室气体(包括CO₂、甲烷、N₂O、氟氯烃类化合物)排放量是5.5tCO₂排放当量每年(不包括整个生命周期其他环节的温室气体排放量)。2002年美国交通运

输各部门温室气体排放量^[67]见表6-2。

表 6-2 2002 年美国交通运输各部门温室气体排放量

部门	排放量/ $\times 10^6$ CO ₂ e(百万吨 CO ₂ 当量)
非公路交通	100.2
铁路	33.9
轮船	52.9
飞机	179.4
机动车 HFCs	40.3
润滑剂	10.8
公交车	8.5
重型卡车	296.7
客车	1153
轻型卡车和摩托车	占交通温室气体排放量的 62%

分析美国私家车的燃油使用效率在1980-2002年间的变化可以发现，22年中私家车的燃油使用效率呈现先升高又逐渐降低的变化规律。1980-1989年，私家车的燃油使用效率逐年升高，1989年后私家车的燃油使用效率逐年降低。而同时，美国交通工具行驶里程在不断增加，2002年的交通工具行驶里程较1970年增长了近两倍^[67]。

6.3 我国交通运输排放现状

交通运输领域的能源消费主要体现在各种运输工具或设施通过对能源的消耗，驱动相应的运输工具来完成运输活动，实现人或物有经济目的的位移。不同运输的耗能类型包括以下几种。

(1) 道路机动车。包括各种能源驱动的道路机动车辆，如各种类型的汽车、电车、拖拉机、摩托车、助力车等，使用的能源类型包括汽油、柴油、电力、压缩天然气、液化石油气、燃料电池、甲醇、乙醇等。随着科学技术的发展，采用太阳能等更清洁高效能源驱动的汽车已经在研发阶段，环保型机动车不断得到应用与推广，机动车用能多样化和环保化将成为发展趋势。目前在中国，汽油和柴油仍然是主要驱动燃料，占道路机动车燃料的绝大部分。压缩天然气、液化石油气在一些城市公共汽车和出租车汽车开始使用，在吉林省、河南省等地区开始推广使用乙醇汽油（即在汽油中添加一定比例，如 10%的乙醇）作为机动车燃料。

(2) 铁路机车。目前有蒸汽机车、内燃机车和电力机车三种类型，分别采用煤炭、燃油（主要是柴油）、电力作为驱动能源，磁悬浮列车也采用电力为驱动能源，可归于电力机车类型。中国目前三种耗能类型的铁路机车都存在，但主要是内燃机车和电力机车。

(3) 民用航空。主要交通工具是各种民用飞行器，以航空煤油为燃料。

(4) 水路运输。包括各种在内河、湖泊、远近洋运输的船舶以及以不同类型的能源

作为动力源港口装卸作业设施等，能源类型主要有柴油、重油、汽油、电力等。

(5) 管道运输。主要是管道输送动力设施，消耗燃油、电力、原油、天然气等能源。由于管道运输并不属于机动设施，而且排放量也比较少，在本章中不作研究。

交通运输业虽然不是国民经济各行业中能源消费最多的行业领域，但却成为能源消费特别是石油消费增长最快的行业领域。在交通运输的能源消耗构成中，道路交通工具所消耗的车用燃油（主要是汽油和柴油）是主体，约占整个交通运输行业能源消费总量的近70%（按当量计）。据测算，全国汽油消费量的90%以上和柴油消费量的50%左右被各种道路交通工具所消耗，而且随着机动车数量的快速增长，车内燃油消费量将会不断增加。

虽然目前我国汽车密度远低于世界上一些发达城市，但由于车型、燃料、保养维护以及道路等原因，车辆的排放远高于国外汽车，有些汽车的污染排放量是正常排放量的10倍以上。据统计，我国单车污染物排放是发达国家的脊背甚至十几倍。国产机动车怠速时的CO排放量平均为日本1975标准的2倍，HC为1.7-3.0倍。

1994—2004年，我国温室气体排放总量的年均增长率为4%，其中CO₂排放量在温室气体排放总量中所占的比重由1994年的76%上升到2004年的83%。据国际能源组织统计，2004年我国石油消耗CO₂排放总量为8.156亿吨，2005年我国石油消耗量为3.25亿吨，比2004年增长2.6%，由此推算2005年我国石油消耗CO₂排放总量为8.371亿吨，如果照此推算2005年我国营业性质道路运输CO₂排放量占全部石油消费CO₂排放量的21%，营业性车辆CO₂排放量已经超过全社会车辆CO₂排放量18%的世界平均水平^[67]。

中国已是世界第二大能源生产国和消费国，2007年中国一次能源生产总量和消耗总量分别达23.7亿吨标准煤和26.5亿吨标准煤，其中缘由生产为1.87亿吨，而消费辆却达3.4亿吨，石油依赖进口比例已经达到了45%。中国交通运输业面对的能源形势更为严峻，交通石油消耗量与日俱增，占化石能源消耗总量约40%，且中国汽车销量自1992年以来每年两位数的百分比上升。其中汽车的年销售量上升30%，2007年汽车销售量更是达到880万辆，交通能源给国家能源安全造成了巨大的压力。

人口基数和能源消费结构决定了中国温室气体排放总量及排放潜力都非常大，中国CO₂的排放量居世界第二位。2004年中国交通温室气体排放约3.52亿吨，而随着国内汽车业的持续快速发展和人们生活水平的稳步提高，交通温室气体排放将迅速增长交通领域的能源节约、温室气体排放的压力将越来越大。

机动车尾气排放与城市大气环境质量紧密相关。衡量机动车尾气对城市大气污染贡献大小的一个重要指标是机动车排放污染物分担率，是用机动车排放污染物的量占大气总污染物数量的百分数来计算的。我国主要城市与美国、英国、欧洲地区两种主要空气污染物一氧化碳（CO）与氮氧化物（NO_x）的机动车排放分担率如表6-3所示。统计数据显示，无论是我国各大城市还是在机动车排放控制严格、技术水平先进欧美发达国家，

机动车尾气污染物均为大气污染的最主要来源。

表 6-3 我国部分城市与美国、欧洲、英国机动车污染物排放分担率 单位：%

地区	北京	上海	天津	沈阳	杭州	美国	欧洲	英国
NO _x	46.0	20.9	55	33.8	37.9	42.0	36.0	34.0
CO	78.0	61.8	83	71.8	81.9	84.0	76.0	52.0

由表6-3可以看出，机动车排放CO的分担率都超过60%以上，少数城市达到了80%以上，而且仍有继续增大的趋势。因此，机动车排放污染物已是城市大气环境的主要污染源。据北京市统计，70%以上的路段两侧一氧化碳和氮氧化物的浓度都长年超过国家标准。甚至在车速较高的三环、四环氮氧化物的浓度也长年超标。城市中心的交叉口，一氧化碳的浓度更是长年超标数倍（王京伟，2005）。根据西安市环境监测站2002年7月16日-18日对西安市三条典型街道东大街，北大街和南二环连续3日监测结果（任小平，2006），道路中心CO超标率依次为83.3%、72.2%和61.1%。道路中心NO₂超标率依次为50.0%、22.2%和16.7%。在早晚上下班车流强度高峰时，典型街道路中心CO最高值为51.625mg/m³，NO₂路中心最高值为0.732 mg/m³。

我国交通运输部门的能源消费量占全国能源消费的比重为6.54%，远低于各主要的发达国家占1/3左右的比重。交通运输部门是以CO₂排放系数较低的油品为主，1990年交通运输部门CO₂排放量为113.45百万度碳，其中公路运输占61.3%，铁路运输占29.3%，CO₂排放量占全国比重为5.56%，也远低于发达国家占1/3左右的比重^[67]。而随着交通和运输结构的变化，以及交通运输服务的升级，我国交通运输部门的能源消费量和占全国能源消费的比重将增加。

我国交通运输的CO₂排放量受能源消费量和能源利用的CO₂排放强度两方面的影响，而这两者都受到我国能源结构的制约。

我国能源利用的CO₂排放强度较高。1990年我国商品能源消费的CO₂排放强度为0.58kgC/kgce，世界平均水平为0.48kgC/kgce，OECD国家为0.46kgC/kgce，我国比世界平均水平高21%。我国的CO₂排放强度高，也是由于我国特有的能源结构造成的。

我国特有的以煤炭为主的一次能源构成，使得我国商品能源消费的CO₂排放强度高于世界平均水平，这也是造成我国CO₂排放量占全球的比例高于能源消费比例的原因。能源转换和利用效率低，导致我国GDP能源消费强度高。除技术落后外，我国能源利用效率低的另一个原因，是以煤炭为主的能源供应结构。以煤炭作为燃料，在大多数情况下效率比石油和天然气要低得多。如在民用炊事方面，烧煤炉灶效率仅为15%-20%，而天然气则可高达60%以上。

我国商品能源消费以煤炭为主，占一次能源总消费量的76%。而世界上大多数国家以油气为主，石油和天然气的比重平均占一次能源总消费量的60%，煤炭仅占27%。煤炭

的CO₂排放因子是石油的1.53倍，天然气的1.77倍。我国非化石燃料的比例低于世界平均水平，水电在一次能源构成中占5.1%。而世界水电和核能在一次能源构成中的比例则达13%，OECD国家更是高达16%。我国特有以煤炭为主的能源供应格局在相当长的时期内将难以改变，所以要缩短我国与发达国家在效率方面的差距，任务很艰巨。

6.4 不同交通方式排放构成分析与比较

6.4.1 铁路运输排放构成与分析

铁路运输部门是单位能耗较低的运输部门，低于航空运输、管道运输与公路运输。目前我国铁路运输污染排放主要是由内燃机车牵引排放所组成，其中能够对人体健康造成危害的常规排放物包括CO、NO_x、HC、PM（颗粒物）、烟度，度量单位为g/kwh。在内燃机车运营过程中，各种污染物排放所占的比例大小关系为NO_x>CO>HC>PM，其具体所占比例和排放量大小依据不同的内燃机车类型而定，其中NO_x占60%以上，CO占10-20%，其余污染物所占比例较小。

(1) 铁路内燃机车排放气态污染物试验

根据用途的不同，可将内燃机车分为：干线内燃机车，包括货运内燃机车和客运内燃机车；调车内燃机车和调车小运转内燃机车；工矿内燃机车；地方铁路内燃机车。按传动方式的不同，可将内燃机车分为以下三种：(1)机械传动，只在小功率的地方铁路和工矿机车上运用。(2)液力传动可分为：一般（机械换向）液力传动和液力换向的液力传动；另有一种为液力-机械传动。北京型和东方红系列机车均为液力传动机车；多数GK系列工矿机车为液力换向机车。(3)电传动可分为：直流电传动、交直流电传动和交直交(简称交流)电传动。东风、东风2和东风3型机车，为直流电传动机车；东风4型以后研制的电传动内燃机车，均为交直流电传动机车；1999年制成的NJ1型和2000年制成的东风4DJ型机车，为交流电传动内燃机车。

在我国，蔡惟瑾等针对不同的机车类型及其对应的发动机类型进行了内燃机车排放气态污染物的实验研究，其得出的主要结果如表6-4所示。

(2) 内燃牵引排放标准

依据所使用的内燃机车的不同，其排放指标也不同。目前，在我国铁路内燃牵引排放方面规定的限制比较少，在欧洲以及美国对于铁路内燃牵引的排放标准均有明确的规定。

表 6-4 测试机车柴油机标定工况主要污染物排放量统计结果

机型	柴油机型号	转速 n/r·min ⁻¹	功率 p/kw	比排放量 g/kw·h			排放系数 g/kg 燃料		
				CO	NO _x	SO ₂	CO	NO _x	SO ₂
东风 4B	16V240ZJB	1000	2426	1.05	10.26*	0.17	5.08	49.45	0.81
#东风 4B	16V240ZJB	1000	2426	2.03	11.28*	0.36	9.46	52.43	1.70
东风 8	16V240ZJA	1000	3874	1.57	13.23*	0.55	7.74	62.92	2.60
东风 7C	12V240ZJ6	1000	1620	1.30	7.89	0.76	5.97	36.35	3.52

注：* 超过欧共体法规标准；#厂修（其他为新造）

美国环保局（以下简称EPA）于1997年12月正式通过了铁路机车的第一个排放法规。该法规推行了新造和改造的铁路机车和机车发动、机关于CO、NO_x、HC、PM和烟度的Tier 0-2级排放标准。这些排放标准于2000年开始生效，对于1973年之后原造的机车，只要对其进行翻新改造，均应达到此标准。其中Tier 0 标准适用于从1973年开始原造的机车和机车发动机，到2001年为止，只要对其翻新改造，均需执行该标准。Tier 1标准适用于2002-2004年期间原造的机车和机车发动机。Tier 2标准适用于2005年及其后原造的机车及机车发动机。所有这些机车和机车发动机都要求在其原造和其后的每次改造时达到上述适用标准。其具体指标如表6-5所示。

表 6-5 美国环保局机车排放标准 单位：g/制动英制马力-小时

循环	HC	CO	NO _x	PM
Tier 0(1973-2001)				
干线牵引	1.0	5.0	9.5	0.60
调车牵引	2.1	8.0	14.0	0.72
Tier 1(2002-2004)				
干线牵引	0.55	2.2	7.4	0.45
调车牵引	1.2	2.5	11.0	0.54
Tier 2(2005-)				
干线牵引	0.3	1.5	5.5	0.20
调车牵引	0.6	2.4	8.1	0.24
非限制的机车(1997 的估计值)				
干线牵引	0.5	1.5	13.5	0.34
调车牵引	1.1	2.4	19.8	0.41

注：* HC 标准取柴油机的 THC 形式

20世纪80年代出台的国际铁路联盟UI C 623标准规定了铁路用柴油机的型式试验过程，其中ISO 8178-4F循环规定了废气排放限值。从1984年UIC标准首版发行到现在，可允许的废气污染限值已经明显降低，由于试验循环以及试验条件的不同，这两种标准不具比较性。如表6-6所示。

(3) 内燃牵引减排技术

对于铁路内燃牵引，减少受限制的废气排放量有多种方法。就环境效益、技术上

表 6-6 UIC 内燃牵引排放标准

标准	生效时间	NO _x	HC	CO	PM
UIC II (g/kwh)	2003.1.1	9.5 或 9.9	0.8	3.0	0.25
UIC III (g/kwh)	2008.1.1	6.0	0.5	2.0	0.20

表 6-7 内燃牵引降低排放的方法

采取方法	优点	缺点
改进燃烧	NO _x 排放率低 有利于机器维护	能量消耗高仅对小型现代化车队使用
更换发动机	排放率低 更好的使用性能	受空间和技术限制费用很高
后处理	排放率低	受空间和技术限制费用很高
燃油升级	硫和颗粒物排放率低 易于实施	并非各项排放指标都能达标, 不解决根本问题

的限制和成本方面而言, 这里的方法都具有不同的特点。铁路柴油机专家们认为, 在已有的车队也搞排放性能的升级在技术上是非常复杂的, 这主要是由于任何一台车上设备在车上非常受限的空间内安装, 会受到许多技术上的限制。目前主要所采取的方法如表 6-7 所示。

6.4.2 公路运输排放构成与分析

公路运输部门是我国交通运输的能源(油品)消费大户, 机动车是燃油包括汽油和柴油的主要消费者。2004年我国机动车消耗了全国汽油总量的85%, 柴油总量的42%。我国目前一辆汽车的年平均油耗是2.1吨, 我国进口的原油油30%是被汽车消耗的, 这一比例预计在今后将升至50%。

根据既有文献, 公路排放的一次污染物主要有CO、NO_x、HC、可吸入颗粒物(用IP或PM10表示)、Pb(铅), 以及SO₂、CO₂、CFC(名称为“氟氯烃”或“氟利昂”)等, 二次污染物主要为O₃(臭氧)。国内学者通过对不同车型和油品进行划分, 研究给出了各类车型的综合排放因子及各种燃料排放置信区间, 如表6-8、6-9所示。

城市交通的发展对于城市生态环境的影响已经得到社会的广泛关注, 各国纷纷在研究汽车交通的出路, 如有学者研究了天然气和汽油者两种不同燃料对排放和城市环境的影响, 其结果如表6-10所示。

表 6-8 各类车型的综合排放因子

单位: g/km·辆

排放物	大型客车		大型货车		中型客车		轻型客车	
	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油
CO	28.6	3.8	22.7	3.6	25.0	1.4	1.8	0.6
NO _x	2.8	9.8	1.7	11.8	1.7	3.8	0.3	0.8
HC	3.5	2.3	2.8	2.2	3.1	1.1	0.1	0.2
PM	0.0	0.6	0.0	0.8	0.0	0.3	0.0	0.1

表 6-9 各种燃料排放物最低、最高值 (20℃)

燃料	CO	HC	NO _x
汽油	3.27/6.75	0.30/0.50	0.09/0.22
柴油	0.08/0.40	0.05/0.14	0.40/0.94
LPG	0.71/1.07	0.09/0.14	0.10/0.21
CNG	0.32/0.48	0.21/0.61	0.06/0.19

表 6-10 天然气与汽油排放对比

环境温度	燃料种类	排 放 物 (g/km)			
		CO	CO ₂	NO _x	THC
24℃	天然气	0.156	229.3	0.025	0.058
	汽油	1.21	302.7	0.14	0.174
-20℃	天然气	0.21	289.6	0.06	0.08
	汽油	5.87	356.1	0.39	0.92
天然气与汽油相比 平均减少排放百分比		91.5%	21.5%	83.5%	76.0%

环境对于交通发展具有一定的承载力，交通环境所能负荷的交通总量是有限的。交通系统发展需要利用环境资源，并向环境排放一定数量的污染物。环境对交通系统的最大负载能力即为交通环境承载力(TECC)。城市交通的发展，应当在满足社会经济发展需求的同时，不突破城市生态环境的承载力。在城市交通环境容量一定的情况下，TECC主要取决于单位交通量的排污强度和资源耗费量，它同微观的技术水平紧密相连。

汽油与柴油燃料燃烧会产生多种氮氧化物，如NO、NO₂、N₂O₃、N₂O₅等，其中NO、NO₂为最主要成分，总称为称NO_x。NO_x最终会转化成硝酸和硝酸盐，随着降水和降尘从空气中去除，硝酸是酸雨的原因之一。NO是无色无味气体，只有轻度刺激性，毒性不大，高浓度时会造成中枢神经系统轻度障碍，NO可以被氧化成NO₂。NO₂是一种棕红色强烈刺激性的有毒气体，对心、肝、肾都会有影响。

对于机动车尾气中NO₂比例问题，已有研究给出了检测结果。北京市汽车研究所等单位(1997)的研究结论为，NO、NO₂占NO_x总质量浓度的99.05%、0.95%；王伟、项乔君等人(2002)的测试结果为NO、NO₂占NO_x总质量浓度的99.0%、1.0%；Levitin(2005)的研究结论则为，NO₂占NO_x总质量浓度的10%，Benson(1989)在CALINE4报告中的推荐值为NO₂占NO_x总体积浓度的7.5%。与CO不同，机动车尾气排放的NO_x在空气中发生复杂的化学反应，各成分比例与尾气排出的初始值有很大差别，通过化学反应原理推导计算NO_x与NO₂浓度关系在实际研究中难度较大，且容易产生误差。

作为二次污染物，O₃并非直接来源于机动车排放，但是机动车尾气排放的NO_x、CO、VOC等污染物是O₃生成的主要反应前体物，机动车污染物参与O₃形成并与之反应，对于城市道路环境下O₃浓度有着重要影响(Crutzen, 1974; Nevers, 2000; Derwent, 2003; Deepak, 2006)。研究表明(Leighton, 1961; Mazzeo, 2005; 殷永泉, 2004; 安俊岭, 2006)，O₃生成与消耗反应中最主要的是与氮氧化物(NO_x=NO+NO₂)之间的光化学反

应，NO₂在阳光中紫外线的作用下与空气中的O₂结合生成O₃，而NO可以通过还原反应生成NO₂和O₂来消耗O₃。该反应过程为近地面大气O₃化学反应的基础，主要反应方程式如下式所示。



大量观测结果表明，O₃浓度的变化特征呈现出典型的时间特性，白天较夜间易于出现浓度高峰（Tu，2007），休息日较工作日易于出现浓度高峰（Cleveland，1974；Qin，2004；Sakamoto，2005）；臭氧浓度特征还体现出空间特性，机动车流量较大中心城区的O₃浓度低于机动车流量较小的郊区，造成该现象的原因在于机动车排放的NO消耗O₃的速度大于O₃光化学反应生成速度（Diemetal，2002；Greggetal，2003；McConnell，2006），使得城市道路环境下O₃被消耗而浓度降低。因此，O₃浓度变化的时空特性与机动车流量、排放的变化密切相关，分析机动车流量、排放与城市道路环境下的O₃浓度关系，对于研究O₃浓度变化规律十分关键。

O₃浓度变化受到的影响因素较为复杂，风速、风向、太阳辐射、温度及湿度都影响着O₃及其反应前体的生成与反应（Dueñas，2002；Elminir，2005；Satsangi，2004），但是以往研究多以空气质量检测系统检测到的O₃的城市大范围背景值为研究对象，对于城市道路微观环境下各种因素对O₃浓度影响的比较分析研究，目前还不充分。

6.4.3 水路运输排放构成与分析

尽管海洋船舶的温室气体排放问题刚刚引起国际社会的关注，鉴于全球温室气体减排任务的紧迫全球气候变暖正成为困扰人类的一大难题。船舶排放的温室气体，尤其是CO₂也正引起人们越来越多的关注。数据显示，在2007年，船舶排放的二氧化碳占到全球温室气体排放量的3.3%，达到10.46亿吨。与各个国家的排放量相比较，我国船舶的温室气体排放量已超过德国，排在第六位。

根据法国利摩日大学的研究，相对于道路、铁路和航空等运输方式，水路运输是产生温室气体最少的运输方式^[93]。海洋船舶是多种污染物的主要排放源，包括CO₂，硫化物和氮化物。然而除CO₂以外，已存在规范其他污染气体排放的国际公约，主要指《1978年议定书修订的1973年国际防止船舶造成污染公约》（Marpol73/78公约）附件VI的规定。CO₂作为一种主要温室气体，尚没有被纳入到与其他船舶排放的污染物统一的减排框架中。《联合国气候变化公约》以及后来的《京都议定书》也没有将海洋船舶纳入到义务减排的框架中，而是将这个权力赋予了国际海事组织（IMO）。IMO进行了多次会议，旨在探讨全球海洋船舶温室气体减排措施。

6.4.4 民航运输排放构成与分析

机场的空气污染是人们所关心的污染问题之一。飞机发动机排放物有一氧化碳、氧化氮、碳氢化合物、二氧化硫、粒状污染物等。民航温室气体排放来自喷气燃料（喷气煤油和喷漆汽油）和航空汽油的燃烧。飞机发动机排放气体的组成为：约70%的CO₂，略少于30%的H₂O，和不足1%的NO_x、CO、SO_x等。目前已有研究成果表明现代发动机很少或不排放CH₄和N₂O。一般而言，除了碳氢化合物和CO，所有类型飞机排放的约10%的CO₂都产生于机场地面水平滑行和着陆/起飞（LTO）周期中，大部分排放（90%）发生在高海拔^[93]。

1970年美国环境保护局和当地的空气污染控制单位一起对该机场进行了空气污染测定。方法是在9.6kmX6.7km的机场和生活区里设立26个监测点，使用各种仪器如非散射红外线(NDIR)连续测量仪测量一氧化碳、悬浮微粒测量仪和大容量空气取样机测定微粒等，为期一年的连续测量。有些仪器还被装在飞机上来跟踪测量前面滑行的飞机所排放的污染物。

表6-11表明了污染物在不同季节各点上的变化及同季节在不同距离上的变化。夏季空气污染较轻，秋季较重。美国环境保护局工程师们把测定的数据按每架飞机每次起落的排放量分类如表6-12。

表 6-11 平均每小时内空气中一氧化碳的含量 (ppm)

1970 年洛杉矶国际机场	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
最远端雷达站	3.0	2.2	1.7	2.2	3.9	4.9
最远端居民区	3.4	3.2	3.3	3.6	5.0	5.9
候机楼外面	5.3	4.8	5.1	5.6	7.0	7.1
指挥塔台	4.8	4.6	4.4	5.1	6.4	7.1
市中心	5.5	5.0	5.0	4.0	4.6	6.0

表 6-12 各种类型发动机每个起落排放的污染物 单位: kg/每次起飞和着陆

发动机型号	粒状污染物	一氧化碳	氧化氮	碳氢化合物	二氧化硫
JT4A	6.26	19.3	4.13	5.54	1.95
JT8D	5.99	9.22	3.27	5.25	1.27
501D	2.95	0.59	3.08	1.73	0.77

表6-12只是统计每次起飞和着陆在低空中的污染物排放量，不包括巡航时高空污染物排放量。该表说明推力越大的发动机排放的污染物越多。该表数据对估算进口飞机和国产类似型号的发动机排放的污染物是很有用的。

1970年有关当局对英国希思罗机场的空气污染进行了测定。但他们做法与洛杉矶机场不同，他们把一架飞机的飞行活动细分为：滑行、起飞、爬升和着陆4个阶段。并统计出每架飞机每个阶段平均所用的时间，然后按照航班表统计出一天进出该机场的总飞行架次（离场390次，进场385次）把离场和进场的次数乘上每架飞机上述各阶段所用的平

均时间，就可算出一天里希思罗机场所有飞机用在这几个阶段的总时间。根据航空公司给出各阶段真实燃油燃烧率数据如表6-13：

表 6-13 飞机燃油燃烧率 单位：kg/Min

飞机类型	滑行	起飞	着陆
涡轮螺旋桨机	11.3	55.8	36.3
短程喷气机	17.2	136.2	75.8
远程喷气机	40.4	348.7	138.0

把表6-13的各阶段的燃油燃烧率乘上一天里机场所有飞机在滑行、起飞、着陆的时间，就可得出一天里所有飞机在各阶段所用的燃油总量。再根据北方工程和研究公司提供的飞机发动机排放污染物的数据有如表6-14的结果。

表 6-14 飞机燃油的污染物排放率 单位：kg 污染物/1000 kg 燃油

飞机运动形式	一氧化碳	氧化氮	碳氢化物	粒状污染物
涡轮螺旋桨				
滑行	24.8	3.7	8.1	0.6
起飞爬升着陆	2.3	3.1	3.2	0.8
短程喷气机				
滑行	50.0	2.0	9.6	0.6
起飞爬升着陆	1.2	4.3	0.6	2.5
远程喷气机				
滑行	174.0	2.0	75.0	0.3
起飞爬升着陆	0.7	4.3	0.1	0.6

用滑行、起飞、爬升、着陆分别消耗的燃油总量乘上表6-14的燃油污染物排放率，就可得出一天里所有飞机排放的污染物如表6-15。

表 6-15 希思罗机场一天里飞机排放的污染物 单位：t/d

飞机运动形式	一氧化碳	氧化氮	碳氢化物	粒状物
滑行	18.47	0.40	6.92	0.09
起飞滑跑	0.04	0.16	0.02	0.06
起飞爬升	0.06	0.24	0.05	0.08
着陆	0.03	0.11	0.01	0.04

从表6-15可看到，飞机在滑行阶段排放的污染物最为严重。滑行时一氧化碳的排放量是起飞滑跑的462倍，是爬升时排放量的308倍，是着陆时排放量的615倍。而且主要的污染源是一氧化碳，几乎是其他污染物的几倍到几百倍。因此减少滑行时间是降低机场空气污染的有效方法。

表 6-16 闫良机场 1991 年飞机污染物排放量复算值(包括 10%的地面试车) 单位：吨/年

粒状污染物	一氧化碳	氮氧化物	碳氢化物	二氧化硫
24.27	37.36	13.24	212.78	5.15

一些国内学者对闫良机场进行案例研究。由于该机场试飞的飞机种类繁多，有大型飞机、小型飞机，有喷气式发动机飞机，也有活塞式发动机飞机，有四发动机、两发动机飞机，也有单发动机。如果要精确地测定我院飞机污染物排放量的话，就需用各种仪器，各种不同的测定方法来实施实现。因为歼八II飞机是双发动机，它所排放的污染物最多，而一些小型飞机排放的污染物又很少，因此研究者采用折衷办法，就可推算得到闫良机场一年里飞机污染物排放量如表6-16。

6.4.5 不同运输方式排放比较分析

根据既有研究，在各种运输方式中，铁路是污染物排放较小的运输方式。从OECD对前联邦德国交通运输污染物排放研究看，在客运和货运方面，铁路主要污染物的排放量一般是公路、民航的十分之一（见表6-17）。高速铁路的排放量比常规铁路要低70%左右。

表 6-17 1986 年前联邦德国交通运输污染物排放系数

主要污染物	客运/ (g·(人·km) ⁻¹)			货运/ (g·(t·km) ⁻¹)	
	公路	铁路	航空	公路	铁路
CO	14.4	0.01	2.2	0.25	0.15
CO ₂	180	45.0	465	140	48
NO _x	2.4	0.15	1.8	3	0.4
C _m H _n	2.5	0.01	0.4	0.32	0.07

来源：《优化运输结构 加快铁路发展》[J],中国铁路, 2007,12.

高田等人2003年对日本的机车、汽车和飞机三种交通工具的排放进行估算和对比,对比的排放物以二氧化碳为主。对比分析中不仅考虑运营阶段,而且还包括基础设施建设、制造阶段,以及维护和保养过程。估算所依据的资料为日本1985~1997年间的各种统计报表。另外,对三种交通工具运营阶段的能量效率进行了对比,其对比结果如表6-18所示。研究表明:小汽车和卡车的二氧化碳总排放量明显偏高;铁路(尤其是轮轨系统)的能量效率最高。

针对原有电气铁路通勤电动车、近郊电动车、新干线电动车、城市跨座式单轨铁路电车、新交通系统电动车、中等城市的路面电车、城市近郊的内燃机车牵引的列车、内燃动车,进行运行时的环境负荷(CO₂排放量)计算,计算过程中引用了同类型列车铁路环境负荷按年度统计的同一资料,求出其平均值,并汇总在一起。而且该结果中即使引用数据的年度不同,对于通勤电动车、近郊电动车、新干线电动车等,其同类型列车环境负荷差别也很小。因此,即使所用资料年度不同,也可以对同类型列车引起的差别进行对比分析,而后再作研究。对于铁路系统,采用轮轨系统的原铁路电动车的环境负荷最小,可见其能量效率相当好。内燃机车牵引的列车与电动车几乎在同一水平上,而内燃动车则有些偏高。通勤电动车由于站间距离短,要频繁进行加减速,故其环境负荷要比

近郊电动车高。而且，通勤电动车与新干线电动车相比，新干线电

表 6-18 车辆等的分担重量(一人份)

车辆等种类	分担重量 (kg/人)
小汽车	323
普通公共公共汽车	122
通勤电动车	213
城市单轨电车	234
新都市交通系统	211
路面电车	210
新干线 300 系动车组	484
飞机	316

注：*铁路是指典型线路平均值；飞机是指波音 747、767、777 的平均值。

动车速度要高许多，但环境负荷却无大的差别，其主要原因之一是加减速的频度不同。有文献指出，越是高速交通工具，越是燃料消耗得多，不过，考虑到其燃料消耗受到上述种种条件的影响，像这样高速的新干线，其环境负荷可以算是很小的。同样是铁路交通工具，单轨式或新交通系统以及路面电车的环境负荷，是一般电动车的2-3倍。对于这一点，单轨式或新交通系统是因为采用橡胶轮胎，它在水泥面上转动产生推进力，与一般铁路轮轨系统相比，滚动摩擦阻力很大，所以在很大程度上影响了前者的环境负荷指标。另外，路面电车环境负荷比一般电动车大，其原因之一是路面电车在马路中运行，其加减速频繁。

高田等还对各种运输方式在市内、市郊、城市间高速运输运行时的环境负荷(每单位重量·距离的CO₂排放量)进行了比较，结果如下：

(1) 市内交通在市内交通拥挤区，以通勤电动车作为对比基准，单轨铁路、新交通系统、路面电车的环境负荷约为基准值的2倍，公共汽车约为5倍，小汽车约为10倍。汽车与一般铁路交通工具相比，环境负荷明显偏高。这在很大程度上是与其反复进行加减速、轮胎摩擦阻力以及斜坡阻力等因素有关。

(2) 城市近郊交通在城市近郊的一般道路上运行，与电车相比，公共汽车的环境负荷为其5倍，小汽车为10倍左右。

(3) 城市间高速交通的环境负荷，以新干线(300系：希望号及光明号列车的平均值)为比较基准，高速公共汽车为其3倍，飞机为10倍左右。其中高速公共汽车的环境负荷的确定，参考了运输政策研究机构(前运输经济研究中心)公布的资料(东京一大阪间)；飞机的环境负荷则为波音747、767和777的平均值。

6.5 不同交通方式排放因子确定方法与参考值

6.5.1 排放因子确定方法

排放因子的确定方法包括以下几个方面^[93]：

① 《IPCC2006 清单指南》和《IPCC 国家温室气体清单优良作法指南的不确定性管理》推荐排放因子计算方法。

② 美国 EPA 排放因子和 OECD 排放因子研究方法和数据库。

③ ICLEI 的温室气体排放研究系统 CACP。

④ 典型样本的实测与调研数据。

⑤ 科研文献。

⑥ 部门领导、机构负责人和专家的建议。

对于关键源，基于典型样本实测和调研数据进行统计学分析，从而确定整体排放因子。

对于道路机动车、火车、轮船和飞机而言，计算其CO₂排放量有两种方法，一是根据统计部门提供的燃油消耗量并结合燃料种类的排放因子计算；另一种则相对复杂，根据移动源实际行驶里程并结合排放因子计算。这里又可分为两种情况，一种为排放因子直接与行驶里程相关，但这种情况需要大量实验数据支持，或由相关部门发布权威的官方排放因子；第二种则根据排放源实际行驶里程推算出其消耗的燃油量，进而结合燃料种类的排放因子计算。

基于社会经济发展具体情况，界定各类型排放源，根据活动水平数据可获得性和排放因子可获得性等情况确定计算方法的层次和排放因子。由于我国目前还没有比较权威的移动源温室气体排放因子，相关研究也较少，因此目前移动源排放因子主要参考《IPCC2006国家温室气体清单指南》中推荐或默认的排放因子^[93]。计算移动源CO₂排放时，CO₂排放因子考虑了燃料中的所有碳，包括以CO₂、CH₄、CO和微粒形式排放出的碳。当然由于排放因子等同于含碳量乘以44/12，因此推荐排放因子与车辆所使用的燃料的含碳量有关。

由于燃料销售的准确数据可通过统计部门获取，为了保证计算得出的温室气体排放量具有较高精确性，建议选择基于燃料燃烧消耗的计算方法，CO₂排放因子采用IPCC推荐值。为了使计算更加准确，需要考虑燃料氧化率，IPCC报告中的排放因子假设燃料已充分氧化。

公路、铁路、水运和航空运输CH₄和N₂O排放因子均采用IPCC推荐值^[93]。

6.5.2 排放因子参考值

(1) CO₂

公路运输推荐的CO₂排放因子见表6-19^[93]。由于CO₂排放因子基于燃料的含碳量，碳不可能完全被氧化，为了得到更准确的结果，参考《中国温室气体清单研究》（2007年），氧化率可选择98%。

表 6-19 公路运输推荐的 CO₂ 排放因子 单位: kg/10⁹J

燃料类型	排放因子
动力汽油	69300
汽油/柴油	74100
液化石油气	63100
煤油	71900
润滑剂	73300
压缩天然气	56100
液化天然气	56100

铁路运输推荐的CO₂排放因子见表6-20^[93]。参考《中国温室气体清单研究》（2007年），氧化率可选择99%。

民航推荐的CO₂排放因子见表6-21^[93]。参考《中国温室气体清单研究》（2007年），氧化率可选择98%。

表 6-20 铁路运输推荐 CO₂ 排放因子

名称	柴油 (kg/10 ⁹ J)	次沥青煤 (kg/10 ¹² J)
铁路 CO ₂	74100	96100

表 6-21 民航的推荐 CO₂ 排放因子 单位: kg/10¹²J

燃料类型	排放因子
航空汽油	69300
航空煤油	71500

水运推荐的CO₂排放因子见表6-22^[93]。参考《中国温室气体清单研究》（2007年），氧化率可选择99%。

(2) CH₄

公路运输CH₄推荐排放因子见表6-23^[93]，铁路运输CH₄推荐排放因子见表6-24^[93]。对于一些替代燃料车辆，美国已制定了排放因子。随着替代能源的广泛普及，将来必将考虑替代燃料车辆的排放因子。

不同类型的飞机/发动机组合有着特定排放因子，而且这些因子也会根据飞行的距离而不同，由于巡航模式的CH₄排放很少，可忽略不计。排放因子仅适用LTO周期，推荐飞机平均排放因子为0.5kg/10¹²J^[93]。

表 6-22 水运的推荐 CO₂ 排放因子 单位: kg/10⁹J

燃料类型	排放因子	
汽油	69300	
其他煤油	71900	
汽油/柴油	74100	
残留燃料油	77400	
液化石油气	63100	
天然气	56100	
其他油	炼厂厂汽	57600
	固体石蜡	73300
	石油溶剂和 SBP	73300
	其他石油产品	73300

注: SBP 表示特殊沸点, 溶剂油。

表 6-23 公路运输 CH₄ 推荐排放因子 单位: kg/10¹²J

燃料类型/代表车辆类型	排放因子
动力汽油-未控制	33
动力汽油氧化过程催化剂	25
汽油/柴油	3.9
天然气	92
液化石油气	62
乙醇, 卡车, 美国	260
乙醇, 卡车, 巴西	18

表 6-24 铁路运输 CH₄ 推荐排放因子

名称	柴油 (kg/10 ¹² J)	次沥青煤 (kg/10 ¹² J)
铁路 CH ₄	4.15	2.0

IPCC给出了使用重质燃料油的柴油机发动机产生的缺省值, 虽然国内并不是所有的船只都是用重质燃料油, 但由于没有其他数据可以参考, 仍然推荐使用IPCC排放因子, 推荐N₂O排放因子为7.0kg/10¹²J^[93]。

(3) N₂O

公路运输、铁路、民航和水运的N₂O排放与CO₂的计算方法相同。公路运输N₂O推荐排放因子见表6-25^[93], 铁路运输N₂O推荐排放因子见表6-26^[93]。

不同类型的飞机/发动机组合有着特定排放因子, 而且这些因子也会根据飞行的距离而不同, 由于巡航模式的N₂O排放很少, 可忽略不计。排放因子仅适用LTO周期, 推荐飞机平均排放因子为2kg/10¹²J^[93]。

国内并不是所有的船只都是用重质燃料油, 但由于没有其他数据可以参考, 仍然推荐使用IPCC排放因子, 推荐N₂O排放因子为2kg/10¹²J^[93]。

表 6-25 公路运输 N₂O 推荐排放因子 单位: kg/10¹²J

燃料类型/代表车辆类型	排放因子
动力汽油-未控制	3.2
动力汽油氧化过程催化剂	8.0
汽油/柴油	3.9
天然气	3.0
液化石油气	0.2
乙醇	41.0

表 6-26 铁路运输 N₂O 推荐排放因子

名称	柴油 (kg/10 ¹² J)	次沥青煤 (kg/10 ¹² J)
铁路 N ₂ O	28.6	1.5

6.6 国外节能环保运输发展及对我国的启示

有关资料显示,在西方发达国家中,汽车排出的污染物占大气污染物总量的60%以上、交通噪声占城市环境噪声的70%以上、汽车能源消耗约占各种运输方式能源消耗的70%~80%,占石油消耗量的40%-70%。

以美国为例,从1960年开始,美国运输部门的石油消耗量占全国石油总消耗量的比例呈平稳上升的趋势。到2003年,运输部门总共消耗13.24百万桶,比例达到66%。其中,道路运输业的燃油消耗在过去的20年内翻了两倍,而其他几种运输方式的消耗在不断下降。2003年道路运输的能源消耗占了各种运输方式能源消耗总量的70%左右(见图6-2)。

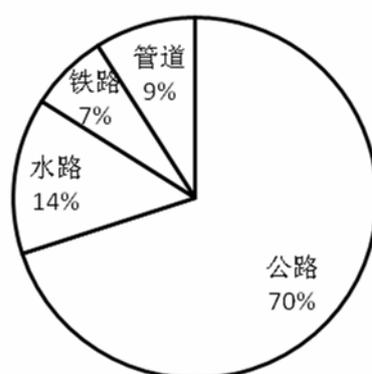


图 6-2 2003 年美国各种交通运输方式能源消耗比例

在日本,近几年运输部门的二氧化碳排放量占到了日本二氧化碳排放总量的20%左右。在所有运输方式中,汽车的二氧化碳的排放量约占运输部门排放量的90%。表6-27则给出了美国2002年主要运输方式空气污染物(氧化氮和微粒物质)排放的对比情况,

显然，道路运输污染物的排放量在运输总排放量中占很大比例，而且这种比例仍表现出逐年上升的趋势。

表 6-27 美国不同货物运输的氧化氮和微粒物质排放量(2002)

	氧化氮 (NO _x)		微粒物质 (PM)	
	吨	比例	吨	比例
公路运输	3782000	66.8%	12000	64.7%
铁路运输	857200	15.1%	21300	11.5%
水路运输	1011000	17.9%	44000	23.7%
航空运输	8200	0.1%	300	0.2%
总计	5658400	100%	185600	100%

如何在道路运输发展中尽可能减少对资源的占用和消耗，降低对环境的污染成为全球各国面临的关键问题。发达国家无论是在战略规划、政策法规、技术应用，乃至具体操作等方面都十分注重道路运输向资源节约、环境友好的方向发展，总结分析各国取得成功经验，对于我国道路运输节能、降耗目标的实现有着重要的意义。

一是发达国家充分重视道路运输发展过程中的环保与节能，以法律的形式确定了运输可持续发展战略。美国在上世纪50年代步入以州际公路系统建设为标志的公路交通大发展时期，公路运输开始成为主要的方式，但这一转变也消耗了大量资源能源，带来了环境污染、交通拥挤和土地占用等问题，使得美国开始重视道路运输的能源政策。早在1955年，美国在其《空气污染控制法》中明确交通尾气污染是最主要的空气污染源之一，首次从国家法律的高度重视运输所带来的环境问题。《清洁空气法案》（1963修正案）规定，政府需要对汽车等移动污染源进行排污控制等；在节能方面，上世纪70年代美国制定了机动车燃油公告及燃油节约法规，规定了汽车的平均燃油经济性所应达到的标准。1982年，美国针对机动车的效能问题制定了《机动车情报及成本节约法》。1990年的《多式地面运输效率法案》则明确了可持续发展战略目标和手段，提出要实现公路、水路和铁路运输方式之间的紧密衔接与配合，大力发展公共交通运输系统，应用先进的技术来提高运输效率，从而解决运输需求不断增长与资源消耗、环境污染之间的矛盾。

二是发展多式联运，实现不同运输方式的合理分工，降低运输全过程的资源消耗和环境污染。不同运输方式完成运输量的单位能耗和污染物的排放量是不一样的。公共汽车每人公里的二氧化碳排放量是铁路运输的4倍左右，而航空运输是公共汽车运输的1.5倍左右；美国公路运输的单位能耗是铁路运输的1.5倍，水路运输是铁路运输的1.36倍左右。因此，在运输经济合理性的前提下，实现不同运输方式的优化组合对于降低能源消耗具有很大的意义。美国和日本在长途运输中积极发展多式联运，提高铁路运输和水路运输的比重，加强不同运输方式之间的衔接，实现由全程的公路运输向公路运输与铁路、水路运输联运转移，从而建立分工合理、优势互补、实现资源节约和环境友好的多式联运体系。

表 6-28 日本联合集配运输活动的效果

	联运之前	联运之后	联运效果
卡车数量（辆）	75	26	-65%
总停车频率（次/天）	502	139	-72%
总停车时间（小时/天）	100.4	82.9	-17%

三是发展联合集配运输，大力推动道路公共运输的发展。为提高运输效率，日本确立了在21世纪运输实载率提高50%的目标。在这一目标的指引下，日本国土运输省推进了货物联合集配运输和干线联运服务，即鼓励运输企业或者货主企业之间建立起合作网络或货物联合集配系统，从而大幅度降低了汽车的空驶，减少了行驶车辆数量（见表6-28），进而减少了卡车停留和启动过程中更多的尾气排放和燃油消耗。四是鼓励运输节能技术的应用和创新，加快发展和扩大使用低能耗、低排放量的车辆。各国普遍重视降低运输资源消耗和减少污染物技术的应用和创新，从而提高运输工具的能源效率，降低对燃油的依赖性。比如，欧盟可持续能源政策中的一个重要内容是鼓励替代燃料和低排放燃料的研究、推广和应用，并确定了促进生物燃料应用的短期目标和发展氢燃料的长期目标，大力支持欧盟各国和各地区旨在提高交通中的能源利用效率、寻找替代燃料的各项行动。

从技术上看，不同车型的单车能耗或单位燃油的行驶里程是不相同的。以货物运输为例，目前国外半挂列车的额定百吨公里油耗已下降到1升左右，大吨位、低能耗和高可靠性已经成为货车车辆的技术发展重点。为促进车辆结构调整，国外大多放松了对总重和大型卡车或铰接车辆的管制，主要通过财税政策等调节道路运输车辆结构，引导和扶持发展低能耗、低排量的车辆，以达到降耗、减排的目的。比如，在日本，购买使用替代燃料的车辆可少缴购置税，符合若干排放要求的车辆可少缴25%-75%不等的费用，日本还推出了对购买替代燃料汽车和纯电动汽车给予补贴的政策。

能源安全与气候问题是21世纪全球可持续发展进程中的两大挑战和瓶颈问题。中国作为目前世界经济发展速度最快、能源消耗增加、环境问题较为严重的国家，在寻求可持续发展的过程中更加需要积极应对这两个问题。通过对美国、日本两个发达国家的运输发展过程分析，对我国的启示主要包括：

一是要明确道路运输可持续发展战略，改善与自然资源和环境之间的关系，建立具有较强法律或行政效力约束的目标体系，包括能源利用的降低、污染物排放的减少等，完善道路运输组织、车辆和能源等结构调整以及运输技术应用等保障措施和手段，充分考虑这些保障措施实施的外部因素，并建立详实、可操作性强的资源节约和环境友好的绩效考核评价体系。

二是大力发展多式联运。道路运输属于资源消耗和环境污染较大的运输方式，因此必须转变发展思路，与铁路运输、水路运输等主动对接。大力发展多式联运，加强各种

运输方式之间的衔接，是一种更广泛意义下的资源节约和环境友好。

三是开发新型能源^[67]。近年来随着城市环境问题与全球环境问题的日益突出，替代燃料作为解决城市环境问题与减排温室气体的一种重要措施而受到广泛重视。作为汽车代用燃料比较有前途的主要有天然气、液化石油气、醇类、甲烷水合物、煤、油页岩、氢气和生物柴油等。各种代用燃料都有都具有不同的特点决定了其作为汽车燃料的应用前景。

四是应用节能减排技术^[67]。汽车节能主要有提高行使效率、发动机高性能化、能量合理化等几种途径。对汽车尾气需要进行管理与控制，进行汽油机废气再循环控制，研究尾气催化净化技术，推行合理有效的在用汽车尾气排放管理措施。轮机节能、推进节能以及船体节能是船舶节能技术发展的主要研究途径。目前大规模的高速铁路建设将优化我国交通运输结构，对我国交通部门尤其是铁路运输节能减排产生重大影响。

7 主要结论及政策建议

7.1 主要结论

(1) 加强不同交通方式能耗因子可比研究具有重要意义。

交通运输是国民经济的一个重要组成部分。从世界范围来看，交通运输作为能源消耗性行业，尤其是一次性石油能源消耗大户备受社会各界关注。交通能源消耗数据已经成为国内、国际高度关注的重要信息。准确、客观的交通能源数据可以为政府能源管理以及政策法规和规划的制订、实施提供信息支持；为能源生产者和消费者制订计划和投资决策提供依据。我国交通运输能耗数据统计口径与方法与国际上存在较大的差异，难以直接进行对比分析。国内的相关研究也试图从不同的角度进行修正与完善，但由于问题设计的范围比较广，各种数据来源不同，导致各种数据繁杂，有时互相矛盾，缺乏可比性。本研究针对目前国内缺乏完整的、能够客观反映交通运输能源消耗水平数据的现状，建立测算模型，对现有统计数据进行必要的修正，与国际统计指标接轨，使指标具有可比性，从而能够正确反映我国交通运输的总能源消耗水平，以及不同交通方式能耗的可比因子，对制定交通运输发展政策具有重要参考价值。

(2) 我国在交通运输能耗统计方面与国际统计口径存在较大差异。

主要表现在：①行业划分上，我国把交通运输和仓储、邮政业划分为一个行业进行统计，国外不包括仓储和邮政。②我国的公路运输用油只统计交通部门运营车辆用油，未统计社会其他部门行业及私人车辆用油。③部分用于旅游的车辆、船舶等交通工具能耗未计入交通运输能耗中而计入了旅游业中。④交通运输行业部分建筑能耗也计入交通运输行业能耗。其中第二项差异涉及到的范围广泛，能源数值大，对于计算交通运输能耗水平有着很大的影响，使得我国交通能耗数据比国际统计口径数据的计算结果明显偏小。

(3) 建立了基于车辆行驶运用的社会其他部门行业及私人车辆能耗测算模型。

为了测算社会其他部门行业及私人车辆用油，本研究利用可以得到的数据，寻求一种可行的基于车辆单耗及行驶里程的测算模型。公路运输中社会车辆和私人家庭车辆主

要包括四部分：①社会及私人汽车，②摩托车，③低速汽车（农用运输汽车），④其它车辆（如军车等）。其中其它车辆（军车等）由于缺乏必要的基础数据，难以进行测算。本研究重点测算社会及私人汽车、摩托车、低速汽车（农用运输汽车）的燃油消耗。

（4）中国交通能耗统计数据低估了交通对能源特别是对石油的消耗水平。

2007年国家统计的交通运输与仓储邮电行业石油消耗为12297万吨，总能耗为20643万吨标准煤；全国石油终端能耗为33769万吨，全部终端能耗为253862万吨标准煤。根据本研究测算，2007年中国未统计在交通运输行业能耗中的车辆油耗约为7988万吨，折合标准煤11679万吨。与行业统计数据相比，大约56.6%的能耗未统计。按照国际统计口径修正后，2007年中国交通运输石油能耗占全部石油终端能耗的比例为60.1%（按国家统计局数据计算为36.4%），交通运输总能耗在全部终端能耗中的比例为12.7%（按国家统计局数据计算为8.1%）。可以看到，目前的交通运输能耗统计数据低估了交通运输的总能耗水平，特别是大大低估了交通运输对石油这种一次性化石能源的消耗水平。

（5）相关国家发展历程表明经济越发达交通能耗比例越大。

世界范围内国家的发展历程表明：交通运输能耗比例大小关联于国家的经济发展阶段及其产业结构。经济越发达，交通运输业能耗在全国总能耗中所占的比重越大。2007年，中国交通运输能耗在总终端能耗中的比例为12.7%，而美国为28.6%，英国为28.6%，日本为25.9%（2006），发达国家交通运输能耗所占比例仍远高于我国。

2007年中国石油终端消耗为33769万吨，为美国的31.8%，是英国的4.5倍；但按年人均消耗石油来计，中国为0.257吨/人年，是美国的7.3%，英国的20.6%。2007年中国交通石油消耗约为20285万吨（统计加测算），为美国的28%，英国的3.2倍；但按年人均交通消耗石油来计，中国为0.155吨/人年，是美国的6.3%，英国的15.0%。在可比口径下2007年石油消耗中交通所占比例，中国为60.1%，美国为68.7%，英国为82.4%。

（6）中国交通石油消耗量的增长速度远远大于其它发达国家。

各国交通石油消耗量的增长速度均大于全社会石油终端消耗总量的增长速度。作为一个发展中国家，中国无论是全社会石油能源总消耗量，还是交通石油消耗量的增长速度都远远大于其它发达国家。从2002年到2007年，中国石油终端消耗量从21990万吨增加到33769万吨，增加了53.6%，交通石油消耗量从10430万吨增加到20285万吨，增加了94.5%；同期，美国石油终端消耗量增加3.6%，交通石油消耗量增加6.7%；英国石油终端消耗量只增加2.2%，交通石油消耗量增加3.8%。

（7）采用交通能耗因子来比较不同交通方式的能耗水平。

本研究定义能耗因子为单位交通运输工作量所消耗的能源量，包括客运能耗因子

(kgce/万人公里)；货运能耗因子(kgce/万吨公里)；综合能耗因子(kgce/万换算吨公里)。对于不同的交通方式，采用其完成的货物周转量(吨公里)来衡量货物运输工作量，采用其完成的旅客周转量(人公里)来衡量旅客运输工作量。对于某种交通方式的综合运输工作量，采用换算周转量(吨公里)来衡量。通常认为，铁路1人公里客运周转量相当于1吨公里货运周转量，公路1人公里客运周转量相当于0.1吨公里货运周转量。本研究结果，基于能耗相同的角度，铁路1人公里货运周转量相当于1.7吨公里客运周转量，公路1人公里货运周转量相当于0.27吨公里客运周转量。

(8) 建立了基于机车牵引的铁路能源消耗测算模型。

分析了影响铁路能耗的微观因素，建立了基于机车牵引的铁路能源消耗测算模型。运用列车运行计算的相关原理，根据全国机车平均牵引列车重量和平均技术速度，计算各种型号机车的牵引力，然后通过机车的牵引特征曲线，取得机车的手柄位(柴油机转速)，进而确定机车的单耗，最后按照各种型号机车进行加权平均，获得内燃机车和电力机车的单耗数据，经与实际数据比较，模型计算结果可信。

(9) 铁路客运单位能耗水平要高于货运能耗水平。

经模型测算，总体上，内燃方式能耗要大于电力方式能耗(均按热功当量折算为标准煤，电力折算系数为0.1229)，另外，同一种牵引方式下单位人公里客运的能耗要大于单位吨公里货运的能耗。内燃方式客运能耗最高，为76.4千克标准煤/万人公里，内燃方式货运次之，为49.8千克标准煤/万吨公里，第三位为电力方式客运能耗，35.9千克标准煤/万人公里，最后为电力方式货运能耗19.1千克标准煤/万吨公里。随着今后铁路客运高速化、货运重载化的趋势，如果技术装备水平不变的话，铁路单位旅客周转量的能耗水平有增加的趋势，单位货物周转量的能耗水平有下降的趋势。

(10) 公路能耗统计涵盖的对象不全且数据来源分散。

对公路能耗统计的主要指标进行了分析，并对比了国外的相关统计指标设置。研究表明，国内现有的统计一是涵盖的统计对象不全，二是数据来源分散。按照国际通行的统计指标口径，公路交通运输统计数据应该包括所有的道路车辆的燃油消耗，即：①营业性道路运输能耗；②城市地面公共交通(包括出租车)能耗；③非营业性社会及私人民用汽车能耗；④摩托车能耗；⑤低速汽车(农用运输车)能耗；⑥其他机动车(军车等)能耗。在中国，不同的政府管理部门有不同的管理权限，比如，城际交通运输运营归交通部管理，城市公共交通归建设部(新近成立交通运输部后情况有所变化)，低速汽车归农机部门管理，因此不同的统计数据有不同的统计口径。目前可得到的官方统计资料只有部分年度的营业性道路运输能耗。

(11) 公路交通燃油消耗特别是私人车辆燃油消耗增长迅速。

在经济快速发展及出行机动化背景下，我国公路交通燃油消耗总量一直呈增长趋势，

2007年达到14964万吨，在全社会石油终端消费中的比例达到44.3%。从增长速度看，2007公路交通燃油消耗比2002年增长了59.3%，其中社会及私人汽车消耗部分增长了124.2%。从整个公路燃油消耗的构成来看，营业性道路运输能耗比例则稍有下降，从2002年的45.4%降到2007年的40.4%；社会及私人汽车的能耗增长迅速，所占比例显著扩大，从2002年的26.7%增加到了2007年的37.4%

（12）公路运输货运单位能耗水平要高于客运能耗水平。

从可比较的角度折算为标准煤消耗，2007年营业性公路客运能耗水平为165.1（千克标准煤/万人公里），货运能耗水平为616.8（千克标准煤/万吨公里）。对公路运输来说，单位货物周转量的能耗水平约是单位旅客周转量能耗水平的3.7倍。

（13）在目前的技术和运输载荷水平下铁路是最为节能的交通方式。

相对而言，在目前的技术水平和运输载荷水平下，铁路仍然是最为节能的交通方式，2007年铁路综合能耗因子为46.5kgce/万吨公里，其次为水运72.9 kgce/万吨公里，第三为营业性公路运输615.8 kgce/万吨公里，最后为航空4546.6 kgce/万吨公里。2007年如果以铁路单位换算周转量的能耗水平为1，那么水运能耗水平为1.7，公路为14.1，航空为104.4。

（14）各种交通方式的综合能耗因子均有下降的趋势。

近年来，各种交通方式的综合能耗因子均有下降的趋势。2007年与2002年相比，以下降幅度排序，铁路单位能耗水平下降了30.0%，航空下降了15.1%，水运下降了14.3%，营业性公路运输下降了12.4%。这得益于技术的进步，以及国家节能政策的实施效果。

（15）铁路货运对公路货运的替代能耗节约大于对客运的替代能耗节约效果。

2007年公路完成单位旅客周转量（万人km）所消耗的能源是铁路的2.9倍，即铁路客运万人km能耗水平（非高速客运专线）大约是公路客运能耗水平的34.5%。公路货物运输完成单位货物周转量（万吨km）所消耗的能源约为铁路的17.7倍，即铁路货运万吨km能耗水平为公路货运能耗水平的5.6%。可以看出，铁路货运对公路货运的替代能耗节约远大于铁路客运对公路客运的替代能耗节约效果。

（16）公路交通能耗总量在交通运输中比例最大。

从国内外不同交通方式能耗构成比较分析，道路运输是交通运输业中能源消耗最多的交通方式。如果考虑水运远洋运输，2007年中国公路能耗比例为73.3%（美国为79.9%），中国作为世界制造工厂和最大的外贸出口国，远洋运输占很大比例（2007年中国包括远洋的整个水运完成的货物周转量占全国总货物周转量的63.4%），含远洋的水运能耗占15.6%（此处假定远洋运输全部由国内运输船舶承担，相关能源消耗计入中国交通能源消耗）。美国为5.6%。中国铁路能耗比例为5.6%，高于美国（2.3%），但中国航空能耗比

例为5.5%，低于美国的9.0%。上述数据中国未包括管道运输，美国包括管道运输。

不考虑水运远洋运输，2007年中国公路能耗比例为83.1%，与日本接近（86.9%），英国为71.9%。中国水运能耗比例为4.3%（日本为5.5%，英国为2.7%），中国铁路为6.3%（日本为2.3%，英国为2.3%），中国航空为6.3%（日本为5.3%，英国为23.1%）。

7.2 政策建议

（1）加强我国交通能耗的基础数据统计工作，建立并完善相关指标的统计、分析与研究制度，为科学决策提供依据

与西方部分发达国家相比，目前我国交通能耗数据统计工作，主要存在两方面的问题：一是统计口径方面，主要体现在行业划分，我国把交通运输和仓储、邮政业划分为一个行业进行统计，西方国家则一般不包括仓储和邮政，同时，我国不同部门的统计数据由于存在口径差异，可比性往往较差。2007年国家交通运输、仓储和邮政业能源消耗统计数据为20643万吨标准煤，根据研究测算，未统计部分交通工具消耗的能源为11697万吨标准煤，是国家交通运输、仓储和邮政业能源消耗统计数据的56.7%。另外，在交通运输不同方式、不同企业的能耗统计指标范围含义不明确，各种数据繁杂，有时互相矛盾，无法进行比较。另一方面是统计数据的缺失，由于没有建立规范的统计制度，许多数据主要靠抽样和推测得到，这给研究带来了较大的不确定性，也影响了结果的权威性。例如，关于我国交通运输行业部门运营车辆的能耗，存在较多漏洞，一些运输企业还没有建立能耗统计制度，部分社会其他部门及私人汽车、摩托车、低速汽车（农用运输车）等交通工具的能耗实际上也未能统计在内。

因此，建议参照国际统计指标与方法，研究建立完整的、能够客观反映交通运输能源消耗的基础统计指标和数据，尤其是常态的抽样调查与统计制度，可以为各种交通方式的合理分工与协调发展提供更科学的依据。

（2）研究制定我国交通行业各时期节能目标，并分解到技术、组织、结构调整等环节，作为落实我国交通节能政策的工作重点

研究表明，由于不同国家的发展阶段和产业结构不同，行业能耗结构也存在较大差异。水平经济越发达，交通运输能耗在全国总能耗中所占的比重越大。2007年中国交通运输能耗在总终端能耗中的比例为12.7%，美国为28.6%，英国为28.6%，日本（2006）为25.9%。从变化趋势看，近几年中国交通运输能源消耗增长速度较快，增速远远高于其他发达国家。2007年中国交通运输总能耗比2002年增加了85.7%，同期美国交通总能耗增加了7.7%，英国交通总能耗增加了4.2%，日本交通总能耗增加了约2.8%。

因此，随着未来中国经济的持续发展，中国交通运输能耗仍将会继续增长。在这个过程中，如何在不影响经济发展和人民生活水平的同时，从交通结构调整、节能技术、运输组织等角度提高能源利用效率，严格把握重大交通项目的建设审批及技术参数选择权，促进交通系统节能效果的实现，需要从国家层面提出分阶段目标及具体的分解落实方案。

（3）研究国家城市化与出行机动化大趋势下的区域交通系统发展战略，在鼓励节能车辆、发展相关技术的同时，从公共交通组织优化角度出台引导政策

中国2007年石油终端总消耗为33769万吨（约为美国的31.8%，英国的4.5倍），其中60.1%消耗于交通运输，而公路消耗占交通石油消耗的74.2%，这与近年来中国快速机动化的背景是分不开的。从趋势上看，中国无论从全社会石油能源总消耗量，还是交通石油消耗量的增长速度都远远大于其它发达国家。从2002年到2007年，中国石油终端消耗量从21990万吨增加到33769万吨，增加了53.6%，交通石油消耗量从10430万吨增加到20285万吨，增加了94.5%；同期，美国石油终端消耗量增加3.6%，交通石油消耗量增加6.7%；英国石油终端消耗量只增加2.2%，交通石油消耗量增加3.8%。

公路交通是石油能源消耗的大户，随着私家车的发展，2007年社会及私人汽车和摩托车的能耗比2002年增加了114.5%，在全部公路交通能耗中占43.7%的比例。如何减少对一次性石油能源的依赖，是摆在我们面前的重要任务。因此，在鼓励低排量车辆和低单耗运输组织方式的同时，加快建设一体化的城市与城市间公共交通系统，降低私人汽车等高单耗方式在综合交通系统中所占的比重，对降低交通能耗、减缓交通对石油的依存度具有重要现实意义。

（4）从综合交通运输体系角度，结合不同区域经济地理发展环境，在优化调整区域交通结构的目标下发展交通运输系统，对交通运输节能意义重大

2007年交通运输总能耗（不包括管道，水运不含远洋）中，公路能耗占83.1%，铁路占6.3%，航空占6.3%，水运占4.3%。2007年中国完成的货物周转量50867亿吨公里（不包括管道，水运不含远洋）中，按不同方式货物周转量在全部货物周转量中的比例排序，铁路所占比例为46.8%，水运（不含远洋）为30.7%，公路为22.3%，航空为0.2%；同年完成的旅客周转量21593亿人公里中，按不同方式旅客周转量在全部旅客周转量中的比例排序，公路所占比例为53.3%，铁路为33.4%，航空为12.9%，水运（不含远洋）为0.4%。

因此，占交通运输总能耗 83.1%的公路运输实际上仅完成了 22.3%的货物周转量和 53.5%的旅客周转量。因此，优化综合交通运输结构对于交通节能意义重大。

值得指出的是：西方国家交通设施建设趋于完善，在公路运输主导综合交通运输系统的既成事实条件下，将公路车辆节能技术的研究作为降低能耗的重点，符合西方国家

的国情，这也是与我国国情完全不同之处。我国是一个发展中国家，交通运输系统的发展还有较大空间，存在结构调整余地。因此，从国家层面研究针对区域经济地理特征的区域综合交通体系结构，从节省包括能源在内的资源消耗的角度研究优化综合交通结构，充分发挥铁路运输与城市轨道交通的作用具有重要实现意义。

(5) 从加强综合规划和完善运输市场环境两方面，大力推进中长距离铁路集装箱运输与其它方式的一体化联运，提高交通运输系统整体能源利用效率

据测算，2007年我国铁路客运万人km能耗（不包括高速客运专线）大约是公路客运能耗的34.5%，铁路货运万吨km能耗为公路货运能耗的5.6%，铁路运输具有更高的能源利用效率。2007年营业性道路货物运输车辆能耗因子为616.8 kg标准煤/万吨km，全年完成的公路货物周转量为11355亿吨km。据统计，目前大约80%以上的港口集装箱货物通过公路集疏运（2007年全国港口集装箱吞吐量为1.14亿TEU，公路运输集装箱4616.02万TEU）。因此，公路货物周转量对交通能耗有重要作用。

降低公路货物周转量的主要途径是降低公路运输距离。我国公路货物运输平均运距从1990年的46km增加到了2008年的171.5km，其中60.8%的公路货物周转量运距超过400km。据交通运输部2008年发布的《全国公路水路运输量专项调查主要数据公报》，2008年，全国营业性货运车辆在不同运距下的货物周转量比例为：12.0%运距为100km以下，27.2%运距为100~400km，19.8%运距为400~800km，800km以上的周转量占41%，其中29.1%更在1200km以上。

从技术经济的角度，400km以上长途运输铁路比公路具有成本效益优势，但技术经济优势需要通过经营才能体现出来。由于目前管理体制和市场运行机制的不完善，促进各种交通运输方式合理分工的机制还不健全，提高铁路货物运输的效率与吸引力仍有很大空间。

因此，从综合交通角度，研究建立以重点港口、重点城市为节点，延伸以铁路货运为核心的综合运输链，针对轴幅中转式、干支衔接式网络化运输中的多式一体化联运问题进行深入研究，出台相关的政策措施，创造市场条件，对降低货物运输的能耗具有重要价值。

参考文献

- [1] IEA. Energy Statistics and Balances [M]. International Energy Agency, 2004.
- [2] 夏晶, 朱顺应. 中国交通能源消耗与社会经济发展协调性分析[J]. 商品储运与养护, 2008(9): 1-3. [Xia Jing, Zhu Shunying. Coordination analysis between Chinese transportation energy consumption and socio-economic development [J]. Storage Transportation & Preservation of Commodities, 2008(9): 1-3.]
- [3] Orit Mindali, Adi Raveh, Ilan Salomon. Urban density and energy consumption: a new look at old statistics[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38(2): 143-162
- [4] James Cooper, Tim Ryley, Austin Smyth, Edward Granzow. Energy use and transport correlation linking personal and travel related energy uses to the urban structure[J]. Environmental Science & Policy, 2001, 4(6): 307-318
- [5] 陆化普, 王建伟, 张鹏. 基于能源消耗的城市交通结构优化[J], 清华大学学报(自然科学版), 2004: 44(3): 383-386. [Lu Huapu, Wang Jianwei, Zhang Peng. Urban Transport Structure Optimization based on Energy Consumption[J]. Journal TsingHua University(Sci & Tech), 2004, 44(3): 383-386.]
- [6] 李夏苗, 谢如鹤. 论交通运输与能源的关系—兼论交通运输的能源消耗与节能[J], 综合运输, 1999, (10), 23-27[Li Xiamiao, Xie Ruhe. Relation between Transportation and Energy-and Energy-consumption and Energy-saving of Transportation [J]. Comprehensive Transport, 1999, (10), 23-27.]
- [7] 吴宗鑫, 刘滨, 齐志新. 美国和日本能源消费比较对我国的启示[J]. 当代石油石化, 2005, 13(9): 25-28, 37. [Wu Zongxin, Liu Bin, Qi Zhixin. Enlightenment From Comparison on Energy-consumption in Japan and U.S. [J]. Petroleum & Petrochemical Today. 2005, 13(9): 25-28, 37.]
- [8] 潘自强. 不同能源链外部成本比较的研究[J]. 中国核工业, 1999(4): 17-19. [Pan Ziqiang,. Research on the Comparison of External Cost of Different Energy Chains[J]. China Nuclear Industry, 1999(4): 17-19.]
- [9] 吕正昱, 季令. 考虑能源安全与外部成本的交通运输成本分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, 2(1): 92-98. [Lu Zhengyu, Ji Ling. Transportation Cost Analysis Considering Energy Security and External Cost[J], Journal of Transportation Engineering and Information, 2004, 2(1): 92-98.]
- [10] 李连成, 吴文化. 我国交通运输业能源利用效率及发展趋势[J]. 综合运输, 2008(3): 16-20. [Li Liancheng, Wu Wenhua. Energy Utilization Efficiency and Development Tendency of China's Transportation[J]. Comprehensive Transportation, 2008(3): 16-20.]
- [11] 徐创军, 杨立中, 杨红薇, 等. 运输系统生态可持续性评价指标体系的研究[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(5): 4-7. [Xu Chuangjun, Yang Lizhong, Yang Hongwei, et al. Research on Evaluation Index System for Ecological Sustainability of Transport System[J]. Railway Transport and Economy, 2007, 29(5): 4-7.]
- [12] 宋敏华, 城市轨道交通节能技术发展趋势研究[J]. 工程建设与设计, 2009(1): 15-19. [Song Minhua. Research on Development Tendency of Urban Rail Transit Energy-saving Technologies[J]. Construction & Design for Project, 2009(1): 15-19.]
- [13] 石静雅, 苏永清, 岳继光. 轨道交通能耗影响因素分析及能耗评价体系的建立[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(9): 46-49. [Shi Yajing, Su Yongqing, Yue Jiguang. Analysis on Influencing Factors of Energy-consumption and Establishment on Measurement System of Energy-consumption of Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2008, 30(9): 46-49.]
- [14] 李显生, 王云龙, 蔡凤田, 等. 道路运输能源消耗统计模型的对比研究 [J], 交通与计算机, 2007, 25(6): 49-55. [Li Xiansheng, Wang Yunlong, Cai Fengtian, et al. Contrast Research on Fuel Consumption Statistics Model for Road Transportation [J]. Computer and Communications, 2007, 25(6): 49-55.]
- [15] 李显生, 王云龙, 蔡凤田, 等. 道路运输企业公营私营车辆能耗差异分析研究[J]. 交通与计算机,

- 2008, 26(3): 76-78. [Li Xiansheng, Wang Yunlong, Cai Fengtian, et al. Energy Consumption Difference Analysis for Public-operated and Private-operated Vehicles in Road Transport Corporation[J]. Computer and Communications, 2008, 26(3): 76-78.]
- [16]刘莉, 董国亮, 王云龙, 等. 公路运输能源消耗统计指标研究[J]. 交通节能与环保, 2008(3): 16-22.[Liu Li, Dong Guoliang, Wang Yunlong, et al. Research on Energy-consumption Statistical Indicators of Highway Transportation[J]. Transportation Energy-saving and Environmental Protection, 2008(3): 16-22.]
- [17]王庆一, 中国可持续能源项目参考资料: 2009 能源数据[R], 能源基金会 (Energy Foundation), 2009.10
- [18]彭家惠, 林学山, 姜涵. 重庆市终端能源消耗计算与分析[J]. 建设科技, 2008(19): 109-111. [Peng Jiahui, Lin Xueshan, Jianghan. Calculation and Analysis on Terminal Energy Consumption of Chongqing[J]. Construction Science and Technology, 2008(19): 109-111.]
- [19]吴文化, 我国交通运输行业能源消费和排放与典型国家的比较[J], 中国能源, 2007, 29 (10): 19-23. [Wu Wenhua. The Situation of Energy Consumption and Emission of Transportation Sectors in China and Comparison with Typical Countries[J]. Energy of China, 2007, 29 (10): 19-23.]
- [20]William Rees, Understanding Sustainable Development: Natural capital and the new World Order[R].UBC School of Community and Regional Planning, Vancouver, Canada, 1992.
- [21]李艳梅, 张雷, 杨涛. 基于生态足迹方法的交通可持续发展研究[J]. 生产力研究, 2007(1): 55-57. [Li Yanmei, Zhang Lei, Yang Tao. Research on Transportation Sustainable Development based on Ecological Footprints[J]. Productivity Research, 2007(1): 55-57.]
- [22]曹淑艳, 张卫, 郭红, 北京市能源足迹变动及其分解分析[J]. 环境与可持续发展, 2009(1): 7-9. [Cao Shuyan, Zhang Wei, Guo Hong. Beijing's Energy Track Alteration and It's Resolution and Analysis[J]. Environment and Sustainable Development, 2009(1): 7-9.]
- [23]马天山, 樊一江. 交通运输与能源和环境战略研究[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(4): 116-120. [Ma Tianshan, Fan Yijiang. Study of transportation and strategy of energy and environment in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(4): 116-120.]
- [24]高有景. 影响公路运输能耗的因素和节能途径[J]. 平原大学学报, 2007, 24(4): 11-12. [Gao Youjing. Brief Analysis on the Energy-saving of Highway Transportation[J]. Journal PingYuan University, 2007, 24(4): 11-12.]
- [25]Parviz Amir Koushki. Auto travel fuel elasticity in a rapidly developing urban area[J]. Transportation Research Part A: General, 1991, 25(6): 399-405
- [26]张树伟, 姜克隽, 刘德顺. 中国交通发展的能源消费与对策研究[J]. 中国软科学, 2006(5): 58-62. [Zhang Shuwei, Jiang Kejun, Liu Deshun. Energy Consumption of China's Transport Development and Its Policy Implications[J]. China Soft Science, 2006(5): 58-62.]
- [27]朱松丽. 交通需求和交通能源需求预测方法[J]. 数量经济技术经济研究, 2004(5): 100-108. [Zhu Lisong. Prediction Method on Transportation Demand and Transportation Energy Demand[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2004(5): 100-108.]
- [28]Kebin He, Hong Huo, Qiang Zhang, et. Oil consumption and CO2 emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications[J]. Energy Policy, 2005,33(12): 1499-1507
- [29]朱跃中. 中国交通运输部门中长期能源发展与碳排放情景设计及其结果分析[J]. 中国能源, 2001(11): 25-27. [Zhu Yuezhong. Circumstance Designing and Result Analysis for Long -Middle Term Energy Development and Carbon Emission of China's Transportation[J]. Energy of China, 2001(11): 25-27.]
- [30]Ranjan Kumar Bose. Energy demand and environmental implications in urban transport — Case of Delhi[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 403-412
- [31]黄成, 陈长虹, 王冰妍, 等. 城市交通出行方式对能源与环境的影响[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 163-166. [Huang Cheng, Chen Changhong, Wang Bingyan, et al. Urban Travel Modal Split and Its Impact on Energy and Environment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 163-166.]
- [32]李道清, 任玉珑, 胡大江, 等. 基于虚拟变量法的我国交通能源消费量预测[J]. 科技管理研究, 2005, 25(11): 139-141. [Li Daoqiong, Ren Yulong, Hu Dajiang, et al. Prediction on Transportation Energy Consumption of China based on Dummy Variable Method[J]. Science and Technology Management Research. 2005, 25(11): 139-141.]
- [33]陶冶, 薛惠锋. 交通能源决策系统模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(6): 5-9. [Tao Ye, Xue Huifeng. Study on decision-making system model of transportation energy consuming[J]. Computer

- Engineering and Application. 2009, 45(6): 5-9.]
- [34] 张晓东, 阳亮. 交通能源需求量组合预测模型研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008, 6(2): 62-66. [Zang Xiaodong, Yang Liang. Study on Combination Forecasting Model for Traffic Energy Demand [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2008, 6(2): 62-66.]
- [35] 杨洪年. 我国交通运输能源消耗及节约潜力分析[J]. 能源政策研究, 2007(5): 51-55, 60. [Yang Hongnian, Analysis on Transportation Energy Consumption and Saving Potentiality in China [J]. Energy Policy Research, 2007(5): 51-55, 60.]
- [36] J. Skeer, Y. Wang, China on the move: oil price explosion[J], Energy Policy, 2007, 35 (1): 678-691.
- [37] 杨富强, 交通和建筑节能是可持续城市能源发展的重点[R], 能源基金会—中国可持续能源项目. Energy-saving on Transportation and Construction is the emphasis of Energy Development of Sustainable Cities[R]. Energy Foudation-Sustainable Energy Project of China.
- [38] 王炜, 城市交通系统可持续发展规划框架研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 1-6.[Wang Wei. Research on Sustainable Development Planning Theory of Urban Transportation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2001, 31(3): 1-6.]
- [39] 刘恒伟, 麻林巍, 付峰等, 城市交通能源可持续发展规划理论体系初探[J]. 中国能源, 2007, 29(4): 21-25. [Liu Hnengwei, Ma Linwei, Fu Feng, et al. Primary Exploration on Planning Theory of Urban Transportation Energy Sustainable Development[J]. Energy of China, 2007, 29(4): 21-25.]
- [40] 朱兆芳, 赵建伟, 张欣红, 城市道路交通与节能降耗[J]. 城市道桥与防洪, 2008(10): 1-8. [Zhu ZhaoFang, Zhao Jianwei, Zhang Xinhong. Urban Road Traffic and Energy-saving[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008(10): 1-8.]
- [41] 张卫华, 王炜, 胡刚. 基于低交通能源消耗的城市发展策略[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 80-84. [Zhang Weihua, Wang Wei, Hu Gang. Strategies on Urban Development Based on Low Energy Consumption of Trafic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 80-84.]
- [42] 王逢宝. 城市交通节能减排策略研究——从城市公交与小汽车交通的比较来看[J]. 城市车辆, 2008 (8) :30-33. [WANG F B. Strategy study on energy-saving and pollutioncuting in urban transportation——from the view of urban public transport and car traffic comparisons[J]. Urban Vehicles. 2008 (8): 30-33.]
- [43] 王文俐. 美国铁路能耗统计[J]. 铁道运输与经济, 1995 (6): 4. [WANG W L. Energy consumption statistics of American Railroads[J]. Railway Transport and Economy. 1995 (6): 4.]
- [44] 蔡凤田. 公路交通运输领域节能减排对策[J]. 交通环保. 2008 (2): 36-44. [CAI F T. Strategies for energy efficient and emission reduction in the field of road transportation[J]. Environmental Protection In Transportation. 2008 (2): 36-44.]
- [45] 史茂. 铁路运输中机车能耗的浪费[J]. 上海铁道科技. 2004 (5): 42-43. [SHI M. Waste of locomotive energy consumption for railway transportation[J]. Shanghai Railway Science & Technology. 2004 (5): 42-43.]
- [46] 李鲲鹏, 张振生. 直线电机轨道交通系统能耗分析[J]. 都市快轨交通. 2008, 21 (1): 31-33. [LI K P, ZHANG Z S. Analysis of the electrical energy consumption for linear motor rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit. 2008, 21 (1): 31-33.]
- [47] 国家发改委宏观经济研究院. 交通运输节能降耗问题研究[R]. 北京: 国家发改委宏观经济研究院, 2007
- [48] 国家统计局. 2008年中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2009
- [49] 国家统计局. 2007年中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2008
- [50] 国家统计局. 2008年中国交通统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2009
- [51] 国家统计局. 2008年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2009
- [52] 国家统计局. 国民经济行业统计标准[M]. 北京: 中国统计出版社. 2008
- [53] 国家统计局, 发展改革委员会, 能源办. 单位 GDP 能耗统计指标体系实施方案[M]. 北京: 中国统计出版社. 2008
- [54] 国际能源署. 能源统计手册[M]. 国际能源署. 2007
- [55] 美国能源信息局. 能源统计标准[M]. 美国能源信息局. 2008
- [56] 中国汽车协会. 我国在售汽车“综合能耗”标准[S]. 中国汽车协会. 2009
- [57] 王庆一. 节能手册[M]. 北京: 节能与环保杂志社. 2006
- [58] 韩长虎等. 列车制动耗能一般意义公式及机车优化操作侧重点问题[J]. 铁路机车车辆, 2004, 24(2): 47-49

- [59]柏赞等.基于功耗分析的货物列车节能运行控制方法研究[J].交通运输系统工程与信息, 2009, 9(3):43-51
- [60]交通行业标准. 列车牵引计算规程 TB/T 1407-1998 [S].北京: 中国标准出版社, 1998.
- [61]中国民用航空总局规划发展司.2007 从统计看民航[M].北京: 中国民航出版社, 2007.
- [62]国家能源领导小组办公室.中国能源效率分析与国际比较研究[R].北京: 中华人民共和国能源局.2007
- [63]交通行业标准. 营运客车燃料消耗量限值及测量方法.JT711—2008 [S].北京: 中国标准出版社, 2008.
- [64]梅娟等.交通运输领域温室气体减排与控制技术[M].北京: 化学工业出版社, 2009.
- [65]交通与大气质量局.美国交通与大气质量局温室气体排放报告[R].美国: 交通与大气质量局.2005.
- [66]蔡惟瑾, 赵春亭, 扬玉森. 铁道劳动安全卫生与环保[J].1996, 23 (2): 136-138
- [67]美国环保局.铁路牵引排放标准[J].国外内燃机车, 2006, 6: 46-47.
- [68]美国环保局.铁路内燃牵引排放要求[J].国外内燃机车, 2003, 3: 44-47.
- [69]美国环保局. 降低欧洲内燃机车和动车的排放[J].国外内燃机车, 2005, 2: 37-39.
- [70]余艳春, 虞明远.我国公路营运汽车污染物排放量总量及预测[J].公路交通科技, 2008, 25 (6): 154-158.
- [71]张晶, 雷黎.机动车代用燃料性能比较[J].内蒙古环境保护, 2005, 17 (4): 27-29.
- [72]唐升达.天然气汽车及发展[J].北京汽车,1998, 2: 5-10.
- [73]蔡君仪.飞机排放及机场污染物测定方法和仿真技术研究[J].飞行试验, 1993, 9 (1): 37-41.
- [74]张建平.优化运输结构, 加快铁路发展[J].中国铁路, 2007, 12: 16-18.
- [75]Hoyt E V, levay R R. Assessing the effects of several variables on freight train fuel consumption and performance using a train performance simulator [J]. Transportation Research A, 1990, 24A(2):99-112.
- [76]IFEU, SGKV. Comparative analysis of energy consumption and CO2 emissions of road transport and combined transport road/rail [R]. Institute for Energy and Environmental research (IFEU) and Association for Study of Combined Transport (SGKV),2002.
- [77]Lukaszewicz P. Energy consumption and running time for trains. Modelling of running resistance and driver behavior based on full scale testing [D]. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [78]EC. MEET: Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. ISBN 92-828-6785-4 [C]. European commission, Luxemburg, 1999.
- [79] Meibom P. Technology analysis of public transport modes [R]. Final report for an industrial PhD fellowship, Technical University of Denmark, 2001.
- [80]Kraay D, Harker P T, Chen B. Optimal pacing of trains in freight railroads: Model formulation and solution [J]. Operations Research,1991, 39(1):82-99.
- [81]李连成, 吴文化. 我国交通运输业能源利用效率及发展趋势[J]. 综合运输 2008,3: 16-20.
- [82]薛艳冰, 马大炜. 列车牵引能耗计算方法[J]. 中国铁道科学, 2007,5: 84-87.
- [83]丁勇. 列车运行计算与操纵优化模拟系统的研究, 北京交通大学博士学位论文, 2005.
- [84]金炜东, 靳蕃, 李崇维. 列车优化操纵速度模式曲线生成的智能计算研究[J]. 铁道学报,1998,20(5): 47-52.
- [85]韩长虎, 郝建杰, 徐强. 列车制动耗能一般意义共识及机车优化操纵侧重点问题[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(2): 47-49.
- [86]Bai Y, Mao B H, Ding Y, et al. An onboard optimal control system for freight trains[C]. Proceeding of ICTTS'2008, Nanning, China, 2008: 700-783.
- [87]彭其渊, 朱松年, 王培. 网络列车运行图的数学模型及算法研究[J]. 铁道学报, 2001, (23): 1-8.
- [88]胡万玲, 管勇. 我国列车空调的现状及其节能途径探讨[J].甘肃科技, 2003, 6: 55-56.
- [89]陈焕新, 欧阳召文, 蔡敏. 空调列车运行能耗调查与分析 [J].节能技术. 2003, 1: 18-20.
- [90]蔡博峰等.城市温室气体清单研究[M].北京: 化学工业出版社, 2009.
- [91]Stacy C. Davis, Susan W. Diegel, Robert G. Boundy. Transportation Energy Data Book: Edition28[R]. U.S. Department of Energy, <http://cta.ornl.gov/data>.
- [92]Department of Energy & Climate Change. Energy consumption in the United Kingdom[R]. <http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/statistics/publications/ecuk/ecuk.aspx>.
- [93]The Institute of Energy Economics. EDMC Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan 2008[R]. The Energy Conservation Center, Japan.