

中国可持续能源项目

大卫与露茜尔·派克德基金会
威廉与佛洛拉·休利特基金会
能 源 基 金 会
项目资助号：G-0911-11631



轨道交通技术规范及其发展规划评估

**Technical Regulations of Rail Transport Modes
and Appraisal of Their Development Planning**

简要报告

Summarization Report

北京交通大学中国综合交通研究中心

2010 年 12 月

Integrated Transport Research Center of China
Beijing Jiaotong University, December, 2010

前 言

随着中国经济与社会的快速发展，交通运输总量有了快速增长，交通结构也在发生变化。交通总量与结构的变化无疑直接关系到交通行业的能耗与排放占全国各行业的比重。

进入 21 世纪以来，我国从中央主管部门到各级地方政府均加强了轨道交通的建设，目前开始形成三级网络体系：一是铁道部负责规划与建设的面向城市间运输的客运专线网络；二是以改善区域经济发展支撑条件的城际轨道交通网络，主要以地方政府为主体；三是由各大城市负责规划与建设的城市轨道交通网络，重点解决快速机动化背景下地面道路资源不足情况下的公共交通运输服务质量提高问题。

在铁路能力长期紧张局面下，铁道部加快了城市间铁路的规划与建设。自 20 世纪 90 年代开始论证高速铁路建设计划，进入本世纪，先后启动了十余条客运专线的建设计划。《中长期铁路网规划（2008 年调整）》规划建立省会城市及大中城市间的快速客运通道，规划“四纵四横”等客运专线以及经济发达和人口稠密地区城际客运系统。到 2020 年，中国客运专线网络全长将达到 16000km。此外，不少地方政府还提出了城际轨道交通网络的建设计划，珠江三角洲、长江三角洲、长株潭等区域也着手规划或已开始建设区域轨道交通网络。此外，包括北京、上海、广州等中国内地 48 个人口百万以上的特大城市中已有 11 个城市建成城市轨道交通并轨，另有 14 个城市正在兴建城市轨道交通，预计 2014 年总里程将突破 2500km，中国城市轨道交通里程将很快步入世界先进行列。

随着我国轨道交通建设速度的加快，无论政府决策部门还是行业技术管理部门均已认识到从可持续发展角度加强轨道交通技术适用性研究的重要性。作为可持续性研究的主要内容，能耗与排放是需要系统研究的要点。

对于发展中的我国来说，目前关于这三类网络的建设条件、技术经济特性与参数标准等问题还缺乏充分研究，各设计院在进行轨道交通线路设计时经常是“摸着石头过河”，缺乏确定相关设计参数与技术标准的依据，形成了许多线路的设备选型、技术参数与建设标准不一的局面。2009 年 6 月，国家发展和改革委员会基础产业司与广东省发展和改革委员会以珠江三角洲为对象立项研究“珠江三角洲地区轨道交通一体化问题”，重点研究三种类型的轨道交通在不同类型轨道交通技术经济特性、建设制式、通道能力、枢纽设计等方面的协调问题。上述事实表明政府和各行业部门已经意识到强化轨道交通建设技术参数与标准研究的重要性。

本项目受到能源基金会的资助 (G-0911-11631)，由北京交通大学中国综合交通研究中心组织开展研究。项目将以轨道交通的能耗为出发点，以我国当前铁路客运专线、区域城际轨道交通以及城市轨道交通三种形式的轨道交通系统的规划、建设实践为基础，结合规划、设计与运营管理中存在及亟待解决的问题，对轨道交通的关键技术进行研究。着重研究三类网络的能耗特性，提出三类网络的分类体系与适用条件，为国家和设计部门进行轨道交通系统规划与建设提供科学依据。

项目重点研究以下内容：

- (1) 现有不同类型轨道交通系统相关技术标准与规范的比较分析；
- (2) 不同类型轨道交通系统能耗影响因素的重要度分析；
- (3) 不同类型轨道交通能耗因子测算以及影响因素灵敏度分析；
- (4) 不同轨道交通的适用性及相关发展政策研究。

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

冯雪松 北京交通大学副教授

张秀媛 北京交通大学副教授
孙启鹏 长安大学副教授
刘海东 北京交通大学副教授
陈绍宽 北京交通大学副教授
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
周方明 北京交通大学博士生
张笑杰 北京交通大学博士生
许 奇 北京交通大学博士生
冯旭杰 北京交通大学博士生
冯 佳 北京交通大学博士生
陈 涛 北京交通大学硕士生
周志龙 北京交通大学硕士生
李喜华 北京交通大学硕士生
田盟蒙 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、国家发改委基础产业司司长黄民教授、原国家发改委能源司司长白荣春、北京交通大学张国伍教授与胡思继教授、国家发改委基础产业司铁道处郑剑处长、综合运输研究所吴文化研究员、国家能源研究所姜克隽研究员与朱跃中研究员、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、铁道部经济规划院林仲洪副院长与李建新高级工程师、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、广州铁路局科研所孙年友高级工程师、中国北车股份有限公司梁兵总工程师、大连机车车辆厂梁圣童总工程师、长春客车厂牛得田总工程师、上海磁浮交通发展有限公司莫凡副总经理、广州市地下铁道总公司袁敏正主任、唐锐经理、

洪嫚工程师和廖振宁工程师等各位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。

北京交通大学中国综合交通研究中心

2010 年 12 月

目 录

1 我国轨道交通的发展现状及其分类.....	1
1.1 现有轨道交通方式分类.....	1
1.2 本研究所采用的轨道交通分类方式.....	1
1.3 我国不同轨道交通方式发展现状.....	2
1.4 小结.....	3
2 不同轨道交通方式主要技术参数.....	4
3 轨道交通能耗影响因素分析.....	4
3.1 技术因素与设施条件分析.....	4
3.2 组织与管理因素分析.....	5
3.3 能耗结构与影响因素.....	5
3.4 能耗影响因素重要度排序.....	7
3.5 小结.....	8
4 客货共线铁路列车单耗影响因素量化分析.....	9
4.1 速度变化对单耗的影响.....	9
4.2 载重(平均满载率)变化对单耗的影响.....	12
4.3 小结.....	14
5 典型客运专线单耗影响因素量化分析.....	15
5.1 最高速度变化对单耗的影响.....	15
5.2 平均满载率变化对单耗的影响.....	17
5.3 停站间距变化对单耗的影响.....	19
5.4 小结.....	20
6 典型地铁线路列车单耗影响因素的量化分析.....	20
6.1 技术速度变化对单耗的影响.....	21
6.2 平均满载率变化对单耗的影响.....	21
6.3 停站间距变化对单耗的影响.....	22
6.4 小结.....	23
7 我国部分轨道交通系统能耗情况.....	23
7.1 客货共线铁路.....	23

7.2 客运专线与磁悬浮.....	23
7.3 典型地铁线路能耗分析.....	24
8 不同轨道交通方式适用性研究.....	25
8.1 线网规模.....	25
8.2 运量规模.....	26
8.3 线路布局.....	27
8.4 衔接(服务)城市规模.....	27
8.5 能耗水平.....	27
8.6 小结.....	28
9 不同类型轨道交通系统的排放研究进展综述.....	28
9.1 客运专线排放研究及发展分析.....	28
9.2 客货共线铁路排放研究及分析.....	29
9.3 城市轨道交通排放及发展分析.....	29
9.4 小结.....	30
10 我国轨道交通建设与发展的政策建议.....	30
附表 1 不同轨道交通主要技术参数.....	33

1 我国轨道交通的发展现状及其分类

1.1 现有轨道交通方式分类

由于所采用的分类依据各不相同，不同的研究角度对于目前各种轨道交通方式所属的类别的界定各不相同，如表 1-1-1 所示。这些界定互相交叉，非常容易造成统计数据的混乱，同时也不能有效地说明不同轨道交通方式的技术差异。

表 1-1-1 对各种轨道交通方式的不同分类

分类依据	类别
按导轨形式	单轨式、双轨式、自动导轨式
按线路纵面结构形式	高架线路、地面线路、地下线路、复合线路
按输送能力	高运量线、中运量线、低运量线
按服务区域	市区级线、市郊级线、区际级线、国家干线
按运行速度	传统铁路、高速铁路
按规划、运营管理主体	大铁路、城际铁路、城市轨道交通
按载运对象	客运专线、货运专线、客货混行

1.2 本研究所采用的轨道交通分类方式

根据各种技术标准，考虑到列车运行速度、行车组织模式、能耗以及线路条件的差异，本研究将目前各种轨道交通方式分为：客运专线、货运专线、客货共线、城市轨道交通，如图 1-2-1 所示。

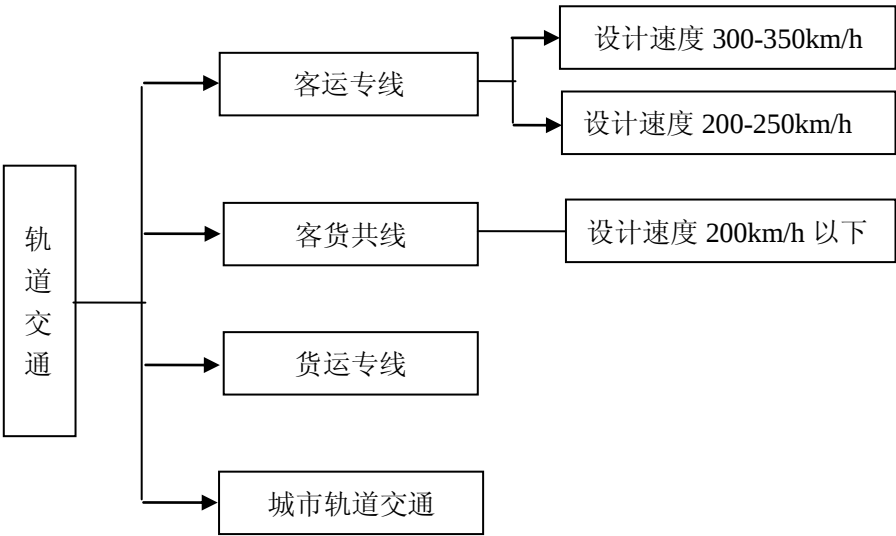


图 1-2-1 本研究对各种轨道交通方式的分类

(1) 客运专线

实际上,通常所说的客运专线与城际轨道交通采用的是相同体系的技术标准与规范,故本研究将客运专线与城际轨道交通归为一类进行分析研究,统称为客运专线。我国客运专线按设计速度一般为 200km/h-250km/h 和 300km/h-350km/h 两个等级。客运专线列车最小行车间隔可达 3min,列车定员可达 1600-1800 人/列,理论上每小时最大输运能力可达 7 万余人次。

(2) 客货共线

客货共线铁路包含既有铁路线以及按照《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》(铁建设函[2005]285 号)新修建的客货混用快速铁路。大部分既有线受到现有条件的限制,旅客列车的设计行车速度达到 160km/h,货物列车的设计行车速度达到 120km/h;在经济发达、客运量较大,又有一定数量货物不可分流的平原或丘陵地区,宜新建以客运为主的客货共线快速铁路,旅客列车的设计行车速度为 200km/h,货物列车的设计行车速度为 120km/h。

(3) 货运专线

货运专线包括以煤炭运输为主的货物列车专用线,以及一些物流公司用自备的货运车辆运送货物至其目的地的企业专用线。目前我国仅有少数几条货运专线。

(4) 城市轨道交通

主要包括地铁和轻轨。地铁旅行速度通常大于 35km/h,高峰小时运量为 2.5-7 万人次;轻轨旅行速度通常大于 25km/h,高峰小时运量在 3 万人次以下(通常在 1 万人次左右)。城市轨道交通由于运行速度较低,站间距较密,列车频繁起停,所以对基础线路的要求远低于其它轨道交通方式。

1.3 我国不同轨道交通方式发展现状

1.3.1 客运专线

(1) “四纵” 客运专线

北京~上海客运专线(简称京沪客运专线)、北京~武汉~广州~深圳客运专线(简称京港客运专线)、北京~沈阳~哈尔滨(大连)客运专线、上海~杭州~宁波~福州~深圳客运专线(简称沪福深客运专线)。

(2) “四横” 客运专线

徐州～郑州～兰州客运专线(简称徐兰客运专线)、杭州～南昌～长沙～贵阳～昆明客运专线(简称沪昆客运专线)、青岛～石家庄～太原客运专线(简称青太客运专线)、南京～武汉～重庆～成都客运专线(简称宁汉蓉客运专线)。

(3) 城际客运系统

在环渤海、长江三角洲、珠江三角洲、长株潭、成渝以及中原城市群、武汉城市圈、关中城镇群、海峡西岸城镇群等经济发达和人口稠密地区建设城际客运系统,覆盖区域内主要城镇。根据铁道部公布信息,截止 2010 年 11 月,我国已开通运营 16 条客运专线,运营总里程约为 4997.27km,在建客运专线近 44 条,建设里程近 15200km。

1.3.2 客货共线铁路

我国的传统客货共线铁路已基本形成以北京为中心,可通达全国各省市区的铁路网。2009 年我国客货共线铁路(含控股合资铁路)营业里程达 8.60 万 km,路网密度为 89.10km/万 km²;电气化里程为 3.60 万 km,电气化率为 41.70%。到 2020 年,全国客货共线铁路营业里程将达到 10.40 万 km 以上,基本形成布局合理、结构清晰、功能完善、衔接顺畅的铁路运输网络,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。

1.3.3 城市轨道交通

2000 年以来,我国城市轨道交通进入高速发展时期。截止 2010 年 11 月,我国已有 12 个城市建成城市轨道交通系统并且投入运营,运营总里程达 1265.50km,另有 14 个城市城市轨道交通系统正在建设中。2010-2014 年我国城市轨道交通线路年均建设里程约为 289.00km。

1.4 小结

目前,我国正进入轨道交通的快速发展时期。接下来的 5 至 10 年,不同类型的轨道交通方式都将会得到飞速发展,尤以客运专线的发展速度最为显著。截至 2015 年,我国将建成客运专线约 23379.00km,每年平均新建线路里程约为 3707.75km;截至 2020 年,全国客货共线铁路营业里程将达到 10.40 万 km 以上;到 2014 年,我国城市轨道交通线路建成总里程将达到 2713.00km。

虽然我国各种类型轨道交通方式的线网规模发展迅速,但与发达国家相比,仍存在很大的差距。2008 年,日本新干线和普通铁路网络密度分别为我国 2010 年客运专线和 2009 年普通铁路网络密度的 14.40 倍和 8.70 倍,美国普通铁路网

密度为我国 2009 年的 3.23 倍。

2 不同轨道交通方式主要技术参数

本部分将主要从速度与运量、线路及相关设施、车站及旅客站台、建筑界限、机车车辆及牵引供电、站间距与发车间隔方面，比较不同轨道交通方式在技术参数上的差异。不同轨道交通方式的技术参数比较如附表 1 所示。

未来我国轨道交通的发展应根据区域经济发展和地理环境等实际情况，综合考虑经济、环境等多方面因素，采取最为合理、有效的多样化综合发展模式；进一步完善客运专线、既有客货共线铁路、城际轨道交通和城市轨道交通的线网布局和其相互间的层次衔接，充分发挥不同类型轨道交通运输网络各自的优势；另外，还要从整个综合交通运输体系角度入手，做好不同层面轨道交通运输系统与公路、民航等其他交通运输方式的整体优化配合。

3 轨道交通能耗影响因素分析

轨道交通能耗是指轨道交通客货运输及相关的调度、信号、机车、车辆、检修、工务等运输辅助活动中产生的能源消耗。

3.1 技术因素与设施条件分析

影响轨道交通能耗的技术因素与设施条件主要包括机车牵引特性、车辆技术速度、机车辅助牵引能耗占牵引能耗的比例、车站动力设备能耗、车站照明设备能耗 5 种因素。

(1) 机车牵引特性

电力机车牵引特性指电力机车以牵引电动机为动力，经齿轮传动驱动机车运行，实现电能到机械能的转换。内燃机车牵引特性是指轮周牵引力与速度之间的关系。

(2) 技术速度

根据铁道部 1999 公布的《铁路线路设计规范》，列车技术速度应根据运输需求、铁路等级、正线数目和地形条件等因素合理选定。

(3) 机车辅助牵引能耗占牵引能耗的比例

轨道交通机车牵引辅助能耗主要指在列车运行过程中，为保证旅客的舒适性、安全性而设计的列车车载辅助设备所消耗的能量。不同类型的轨道交通系统因服务水平标准的差异，其列车车载辅助设备的数量及功能存在一定差异。

(4) 车站动力设备能耗

动力设备系统由降压变电所和动力配电设备系统组成。在轨道交通系统里，动力设备主要包括隧道风机、火灾报警监控系统、信号设备类以及水泵类等用380/220V交流电源的设备。

(5) 车站照明设备能耗

轨道交通系统车站照明一般分为工作照明、节点照明、事故照明、疏散标志照明和广告照明。不同的轨道交通方式由于其服务水平标准、运输距离以及客流规律的差异，其车站照明标准存在很大差异。

3.2 组织与管理因素分析

组织与管理因素主要包括列车停站间距、速度均衡性控制、满载率、编组方案等。

(1) 停站间距

列车在停站间距较短时，要保持较高的运行速度，必须通过推高手柄位的方式来实现；而停站间距比较长时，可以保持在较高速度惰行的工况，。因此，列车停站间距也是影响列车单耗(能源消耗量/旅客周转量或货物周转量)的重要因素。

(2) 速度均衡性控制

速度均衡性是指列车实际运行速度与目标速度的标准差。速度均衡性控制是指使列车在运行过程中速度均衡性达到最佳状态的一系列驾驶操纵控制策略。

(3) 满载率

满载率指某一时刻，旅客列车实际载客人数与列车定员之比。满载率对轨道交通列车单耗的影响主要体现在其直接影响旅客列车单耗。

(4) 编组方案

列车编组方案是指确定组成列车的车种构成和各种车辆的数量。列车编组方案不同将导致列车重量不同，从而使列车运行和制动时的能耗发生变化。

3.3 能耗结构与影响因素

3.3.1 轨道交通单耗构成

单耗是指一定统计时段内轨道交通系统的总能量消耗与所完成的货物或旅客周转量之比。本研究将轨道交通单耗构成分为 2 部分，即机车运行牵引能耗和车站设施能耗，其影响因素构成如图 3-3-1 所示。

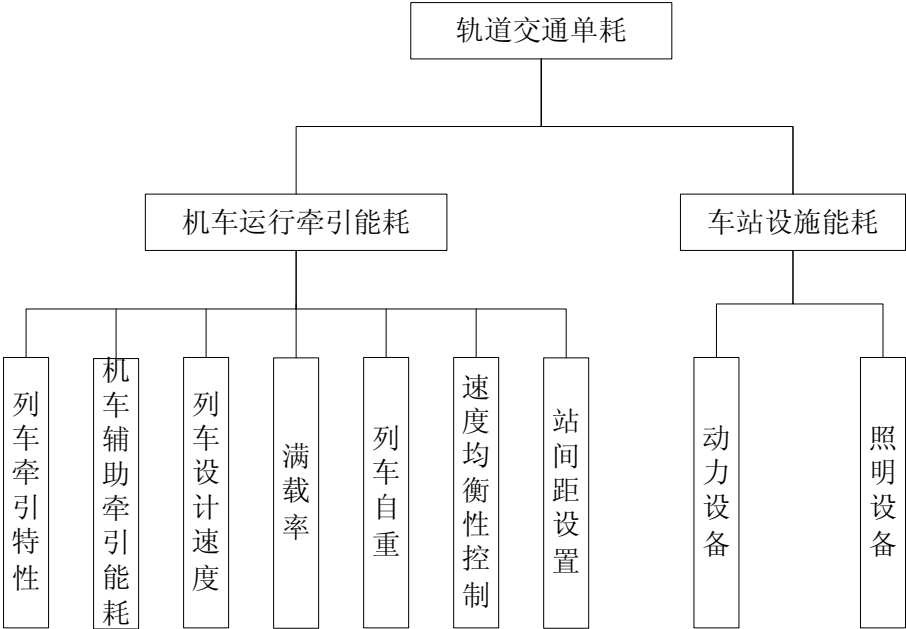


图 3-3-1 轨道交通单耗构成分析影响因素分析指标

3.3.2 轨道交通能耗影响因素分析指标

以 1995-2009 年全国铁路相关统计数据以及相关铁路、客运专线、地铁以及轻轨设计规范标准等为参照，不同类型轨道交通能耗影响因素分析指标如表 3-3-2 所示。

表 3-3-2 轨道交通能耗影响因素分析指标

能耗构成	影响因素	分析指标
机车运行牵引能耗	机车牵引特性	蒸汽、内燃、电力机车单耗
	机车辅助牵引能耗占牵引能耗的比例	车载辅助设备的能耗占总能耗的比例
	技术速度	技术速度值
	满载率	满载率
	编组方案	编组方案下对应牵引自重
	速度均衡控制	速度标准差
	停站间距	平均停站间距
车站设施能耗	动力设备	动力设备占车站设施总能耗的比例
	照明设备	照明设备占车站设施总能耗的比例

3.4 能耗影响因素重要度排序

本节根据轨道交通系统能耗影响因素的特点采用灰色关联层次分析法对各种能耗影响因素的重要度进行了指标分析。

3.4.1 能耗构成结构重要度分析

通过对轨道交通能耗构成以及灰色关联层次分析，客运专线、客货共线以及城市轨道交通 3 类轨道交通单耗构成的重要度如图 3-4-1 所示。

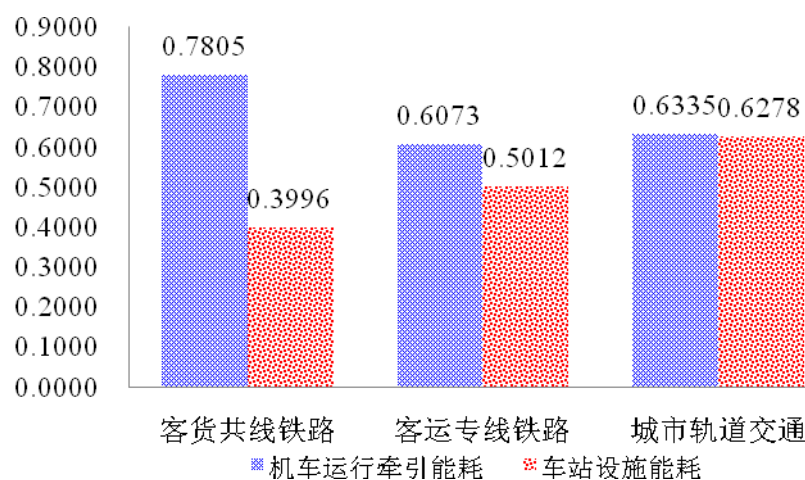


图 3-4-1 不同类型轨道交通单耗结构重要度

从图 3-4-1 中可以看出：客货共线轨道交通系统能耗构成结构影响因素中对其能耗水平影响显著的因素是机车运行牵引能耗比例；对于客运专线铁路而言，机车运行牵引能耗和车站设施能耗与总能耗的重要度差别较大；对于城市轨道交通而言，机车运行牵引能耗和车站设施能耗与总能耗的重要度相差不多。

3.4.2 不同影响因素重要度分析

由于不同类型的轨道交通系统采用的技术规范、服务标准的差别，同一能耗影响因素对于不同类型的轨道交通系统总能耗的影响程度不同，即对控制总能耗水平高低的重要性程度不同。根据灰色层次关联分析，不同的轨道交通能耗影响因素按照其重要度被分为 4 类，分别为重要影响因素(重要度大于 0.8000)、显著影响因素(重要度大于 0.6000)、一般影响因素(重要度大于 0.4000)和轻微影响因素(重要度小于 0.4000)。各种因素在客运专线、客货共线铁路以及城市轨道交通能耗中的重要度如图 3-4-2 所示，从而我们可以得出以下结论：

① 对于客货共线铁路(客运)而言，系统总能耗与编组方案、机车牵引特性、车站动力设备能耗以及速度均衡控制等密切相关。

② 对于客运专线铁路而言，系统总能耗与机车辅助牵引能耗、技术速度、速度均衡控制、满载率等因素密切相关。

③ 对于城市轨道交通系统而言，对系统总能耗影响显著的有技术速度、车站动力设备、速度均衡控制、编组方案 4 个因素，其他影响因素有机车牵引特性、停站间距以及车站照明设备能耗等。

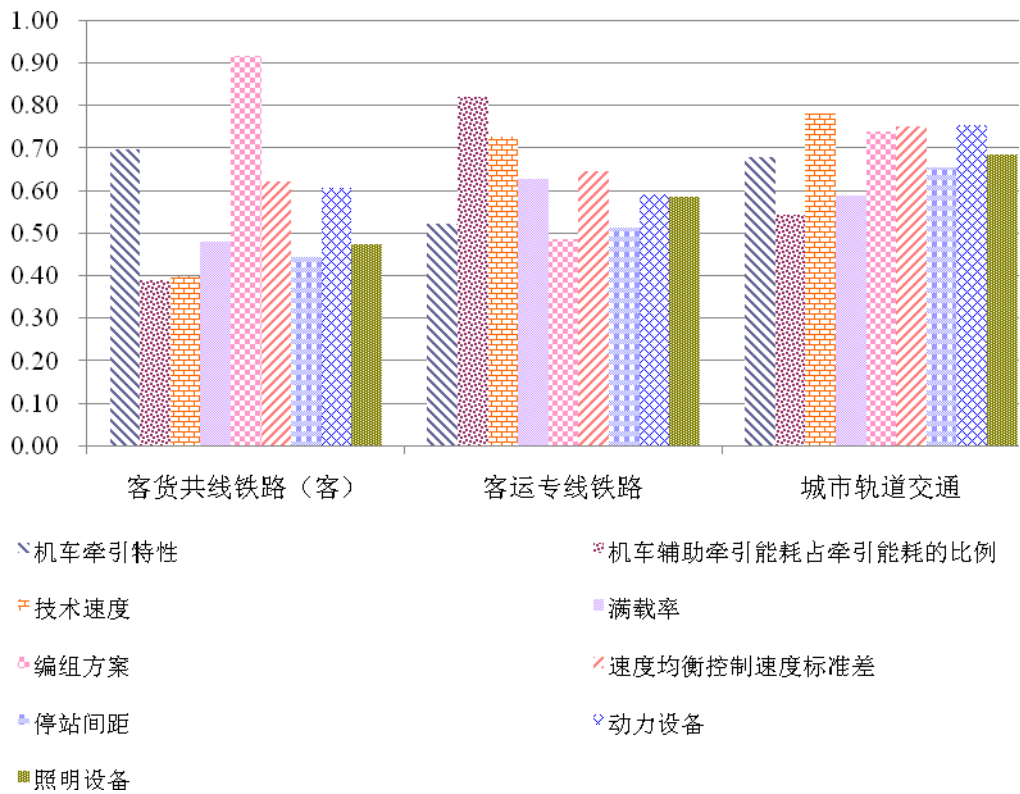


图 3-4-2 轨道交通能耗影响因素重要度

3.5 小结

本节首先从技术因素与设施条件、组织与管理因素两个方面对轨道交通能耗影响因素进行了对比分析，并在此基础上采用灰色关联层次分析法以 9 个能耗分析指标，对不同轨道交通方式的能耗影响因素进行了进一步的量化分析，得出结论：

(1) 对于影响轨道交通单耗的两方面因素而言，技术因素与设施条件主要包括机车牵引特性、列车技术速度、机车辅助牵引能耗占牵引能耗的比例、车站动力设备能耗、车站照明设备能耗等；组织与管理因素则主要包括停站间距、速度均衡性控制、满载率、编组方案等。

(2) 轨道交通总能耗构成分为两部分，即机车运行牵引能耗和车站设施能

耗。机车运行牵引能耗的大小决定着客货共线铁路和客运专线铁路的能耗水平；而对城市轨道交通系统而言，以上两个因素的重要度相差不大。

(3) 由于不同轨道交通系统所采用的技术规范标准不同，其单耗中不同影响因素的重要度存在差异。对于客货共线铁路而言，机车车辆特性以及驾驶策略等影响因素与单耗水平密切相关；对客运专线而言，单耗影响因素主要有机车辅助牵引能耗、技术速度、速度均衡控制和满载率 4 个因素；城市轨道交通单耗水平主要取决于机车辅助牵引能耗、速度均衡控制、停站间距、车站动力设备能耗等。

4 客货共线铁路列车单耗影响因素量化分析

4.1 速度变化对单耗的影响

本节从列车牵引计算的角度，测算内燃机车货运、内燃机车客运、电力机车货运、电力机车客运四种机车牵引模式下列车技术速度和载重对其单耗的影响。本节所用内燃机车货运单耗单位为 kg/mtkm (千克/万吨公里)，内燃机车客运单耗单位为 kg/mpkm (千克/万人公里)，电力机车货运单耗单位为 kWh/mtkm (千瓦时/万吨公里)，电力机车客运单耗单位为 kWh/mpkm (千瓦时/万人公里)。

4.1.1 内燃机车货运

内燃机车货运单耗随技术速度的增大而增大，如图 4-1-1 所示。当列车技术速度从 30km/h 提高到 46km/h (全国平均技术速度)时，货运单耗从 $10.54 \text{ kg}/\text{mtkm}$ 增大到 $13.13 \text{ kg}/\text{mtkm}$ ，提高了约 25%。当列车技术速度从 46km/h (全国平均技术速度)提高到 85km/h 时，货运单耗从 $13.13 \text{ kg}/\text{mtkm}$ 增大到 $16.30 \text{ kg}/\text{mtkm}$ ，增幅约为 24%。从 30km/h 到 85km/h ，列车技术速度平均每提高 10km/h ，单耗约增加 8%。

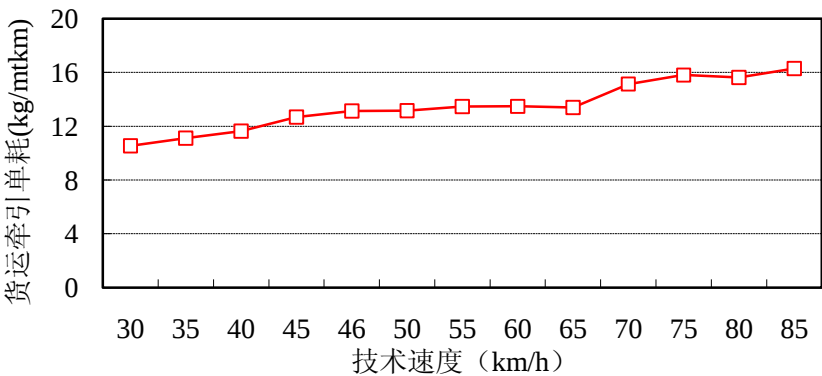


图 4-1-1 不同技术速度下内燃机车货运单耗

4.1.2 内燃机车客运

内燃机车客运单耗随技术速度的变化关系如图 4-1-2 所示。技术速度在 30km/h 的单耗大于技术速度为 35km/h 时的单耗，这是因为当技术速度很小时，机车处于启动阶段，因此耗能较多；当技术速度达从 35km/h 增大到 76.2km/h(全国平均技术速度)时，单耗由 8.71kg/mpkm 提高到 13.21kg/mpkm，增幅约为 52%；当技术速度从 76.2km/h(全国平均技术速度) 提高到 95km/h 时，单耗由 13.21 kg/mpkm 增长到 17.65 kg/mpkm，提高了约 34%。从 30km/h 到 110km/h，列车技术速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 9%。

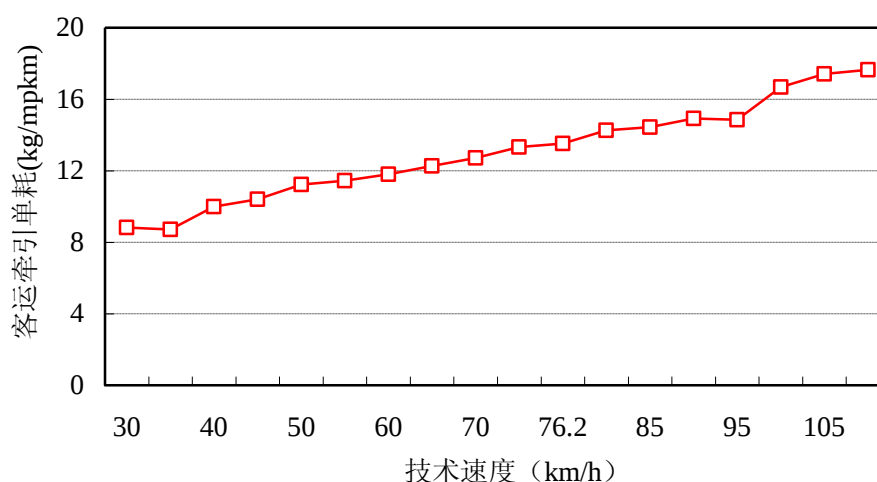


图 4-1-2 不同技术速度下内燃机车客运单耗曲线

4.1.3 电力机车货运

电力机车货运单耗随技术速度的变化关系如图 4-1-3 所示。列车技术速度从 45km/h 提高到 48.8km/h(全国平均技术速度)时，货运单耗由 54.68 kWh/mtkm 提高到了 59.75 kWh/mtkm，提高了约 9%；当技术速度由 48.8km/h(全国平均技术速度)提高到 85km/h 时，货运单耗由 59.75 kWh/mtkm 提高到了 92.06 kWh/mtkm，提高了约 54%，变化趋势较大；当技术速度由 85km/h 提高到 100km/h 时，单耗由 92.06 kWh/mtkm 提高到了 93.74 kWh/mtkm，增幅约 2%，变化较为平缓。列车技术速度由 45km/h 提高到 100km/h 时，平均每提高 10km/h，单耗约提高 10%。

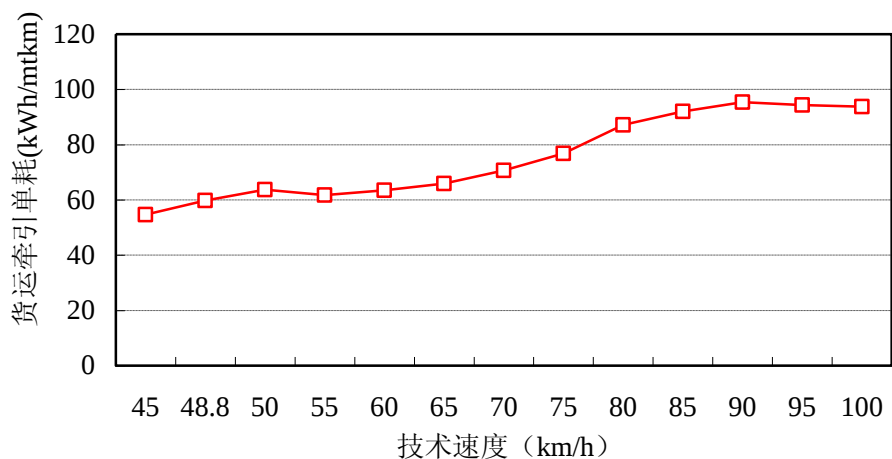


图 4-1-3 不同技术速度下电力机车货运单耗曲线

4.1.4 电力机车客运

电力机车客运单耗随技术速度的变化关系如图 4-1-4 所示。电力机车客运单耗随技术速度的变化关系如图 4-2-8 所示。电力机车客运单耗随着技术速度的增加而增大。但是单耗随着运行技术速度的提高整体变化趋势不大，当技术速度从 45km/h 提高到 85.1km/h(全国平均技术速度)时，单耗由 77.89 kWh/mpkm 增大到 102.51kWh/mpkm，增幅约为 31.61%；当技术速度从 85.1km/h(全国平均技术速度)提高到 100km/h 时，单耗由 102.51kWh/mpkm 增大到 117.11kWh/mpkm，增幅约为 14.24%。列车技术速度由 45km/h 提高到 100km/h 时，速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 7.70%。

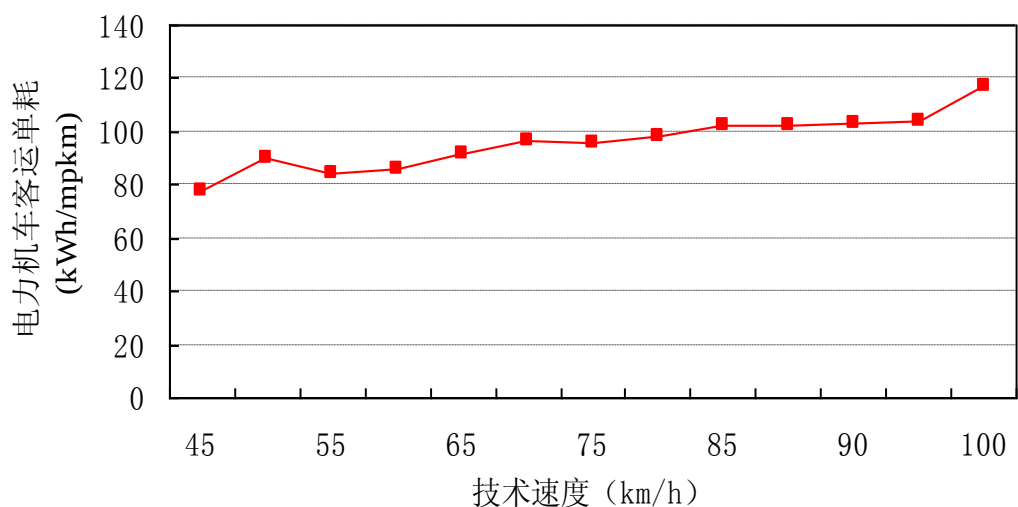


图 4-1-4 不同技术速度下电力机车客运单耗曲线

4.2 载重(平均满载率)变化对单耗的影响

4.2.1 内燃机车货运

当列车平均牵引总重在 3000t 以下时，货运单耗随着平均牵引总重的增加下降速度较快，当牵引总重由 1000t 提高到 3250t(全国平均牵引总重)时，单耗由 16.07 kg/mtkm 下降到 12.49 kg/mtkm，幅度约为 22%；当列车牵引总重由 3250t(全国平均牵引总重)提高到 4000t 时，单耗由 12.49 kg/mtkm 下降到 11.82 kg/mtkm，幅度约为 5.3%，货运单耗随着平均牵引总重的增加下降速度有所减慢。牵引总重由 1000t 提高到 4000t 时，牵引总重平均每提高 100t，单耗约下降 10%。

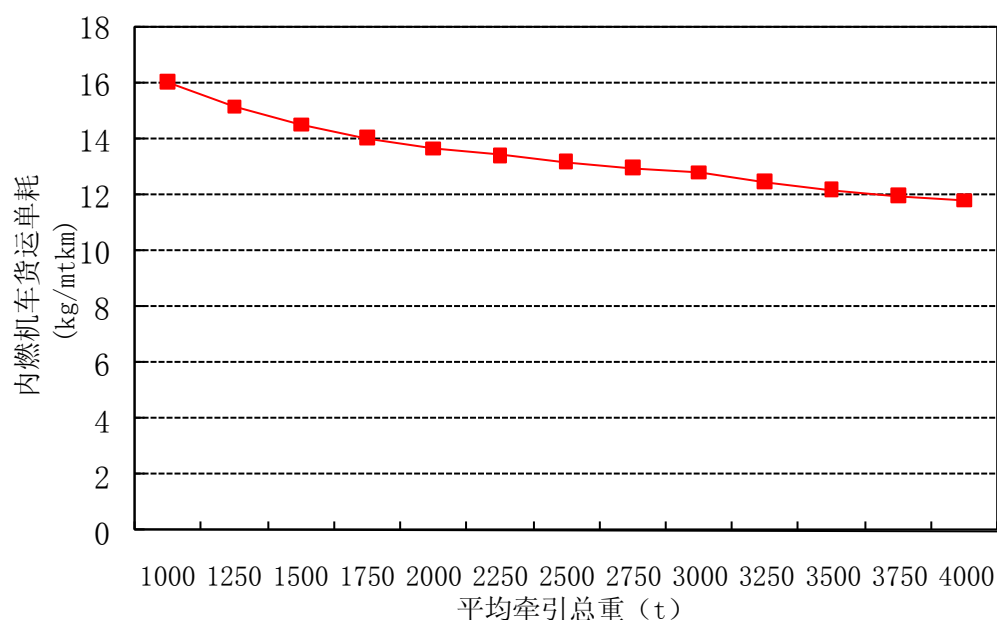


图 4-2-1 不同载重下内燃机车货运单耗曲线

4.2.2 内燃机车客运

内燃机车客运单耗随平均满载率(在多个时刻，列车实际载客人数与列车定员之比的平均值；对于客货共线旅客列车而言，其定员按 1500 人/列计算)的变化关系如图 4-2-2 所示。当载客人数从 300 人(平均满载率 20%)增大到 1500 人(平均满载率 100%)时，单耗由 190.00 kg/mpkm 减少至 87.94 kg/mpkm，即平均满载率平均每增大 10%，单耗也随之下降约 10%。

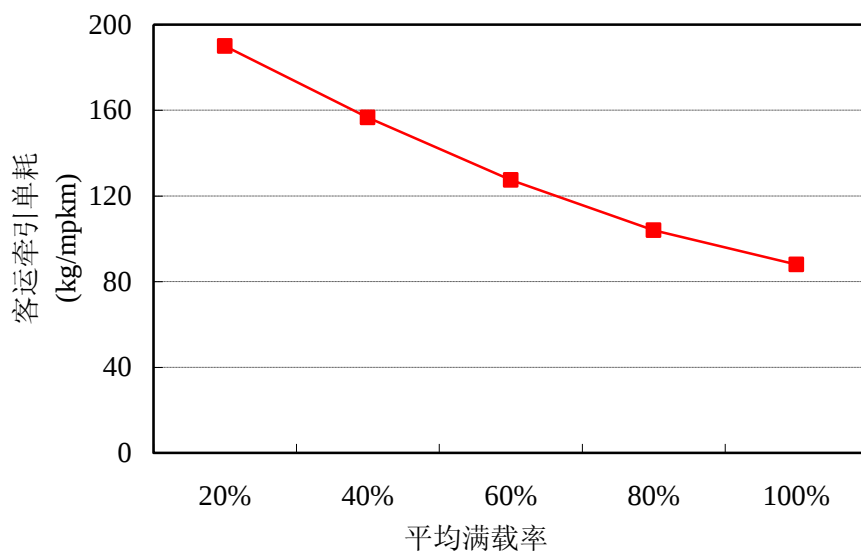


图 4-2-2 不同平均满载率下内燃机车客运单耗曲线

4.2.3 电力机车货运

电力机车货运单耗随载重的变化关系如图 4-2-3 所示。整体上电力机车货运单耗随着牵引总重的增大而减少。当列车平均牵引总重从 1000t 提高到 3750t(全国平均载重)时，货运单耗由 101.74 kWh/mtkm 下降到 68.75kWh/mtkm，幅度约为 32%；当列车牵引总重由 3750t(全国平均载重)提高到 4000t 时，货运单耗由 74.33 kWh/mtkm 下降到 56.44 kWh/mtkm。牵引总重由 1000t 提高到 4000t 时，牵引总重平均每增加 100t，单耗约下降 10%。

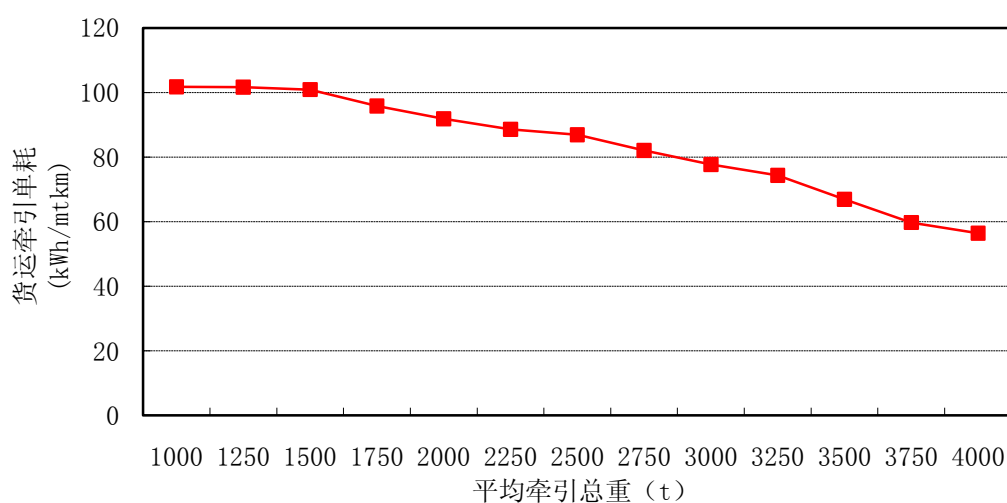


图 4-2-3 不同载重下电力机车货运单耗曲线

4.2.4 电力机车客运

电力机车客运单耗随平均满载率的变化关系如图 4-2-4 所示。当载客人数从 300 人(平均满载率 20%)增大到 1500 人(平均满载率 100%),单耗由 284.00kWh/mpkm 减少至 168.00kWh/mpkm,即平均满载率平均每增大 10%,单耗随之下降约 6.8%。

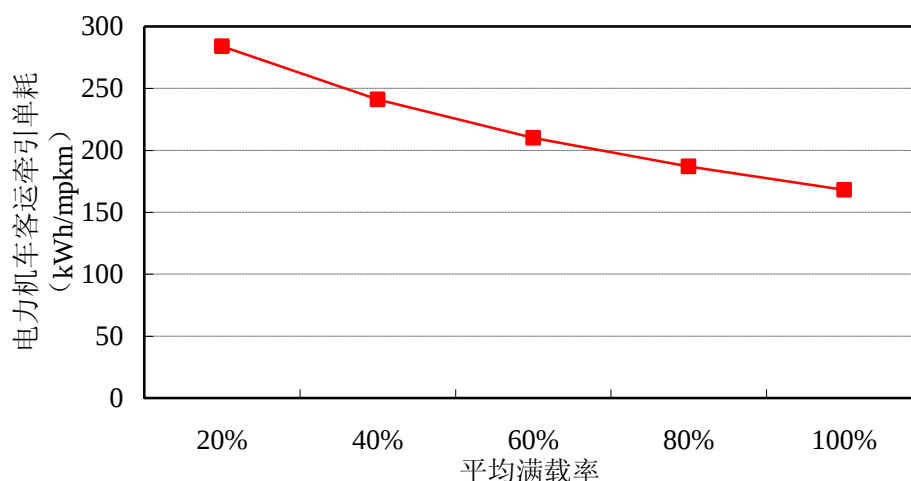


图 4-2-4 不同平均满载率下电力机车客运单耗曲线

4.3 小结

本节研究了速度、载重(超员率)变化对客货共线铁路内燃和电力机车客运以及货运四种状态下列车单耗的影响，主要结论如下：

(1) 列车牵引单耗随着技术速度的提高而增大。在非高速运行情况下，内燃机车货运，技术速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 8%；内燃机车客运，技术速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 9%；电力机车货运，技术速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 10%；电力机车客运，技术速度平均每提高 10km/h，单耗约提高 8%。总体而言，客货共线铁路列车技术速度每提高 10km/h，单耗大约提高 8%-10%。

(2) 列车牵引单耗随着载重水平的增大而降低。内燃和电力机车货运牵引总重由 1000t 提高到 4000t 时，牵引总重平均每提高 100t，单耗均下降约 10%；内燃客运列车平均满载率从 20%至 100%平均每增大 10%，单耗随之下降约 10%。；电力客运列车平均满载率从 20%至 100%平均每增大 10%，单耗随之下降约 6.8%。

(3) DF11、SS7 型机车无论是牵引客运还是货运情形下，在相同技术速度或者相同载重水平下时其能耗均低于其他类型机车。但是，目前这两种机车在我国

铁路机车中比例较小(DF11 占 5.67%，SS7 占 7.82%)。

5 典型客运专线单耗影响因素量化分析

本研究主要以我国已开通的客运专线为研究对象，采用仿真的手段研究动车组单耗(单位：千瓦时/万人公里，kWh/mpkm)。动车组CRH3以短距离的京津(北京-天津)城际和长距离的武广(武汉-广州)客运专线作为典型线路，动车组CRH5以石太(石家庄-太原)客运专线为典型线路，研究最高速度、平均满载率(在线路不同断面上列车实际载客人数与列车定员之比的平均值；对于客运专线动车组列车而言，其定员按坐席计算)以及停站间距变化对单耗的影响。

5.1 最高速度变化对单耗的影响

5.1.1 京津城际(CRH3)和武广客专(CRH3)

CRH3型动车组运行的单位基本阻力方程为速度的一元二次函数形式($F = 0.42 + 0.0016v + 0.000132v^2$ ，单位为N/kN)。

在直达方案下，列车平均满载率100%时，京津城际CRH3型动车组在不同最高速度下的单耗情况如图5-1-1所示。CRH3动车组随着最高速度的增加，单耗呈二次函数式的增长，且增长趋势与单位基本阻力的增长趋势基本保持同步。

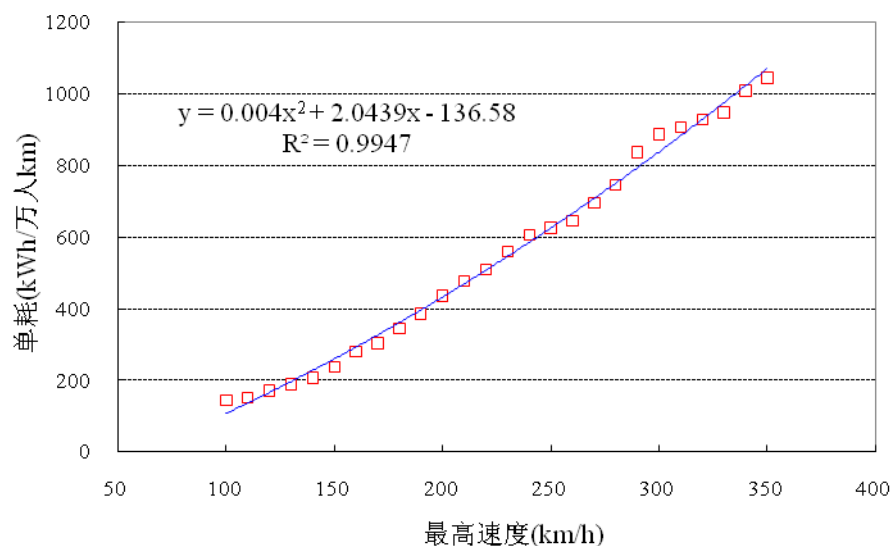


图 5-1-1 京津城际CRH3不同最高速度下的单耗

设置平均满载率为100%、中间站只停长沙南的停站方案下，武广客运专线CRH3型动车组在不同最高速度下的总能耗和单耗如图5-1-2所示。随着最高速度

的增加，武广客运专线CRH3的单耗也呈二次函数式的增长趋势。

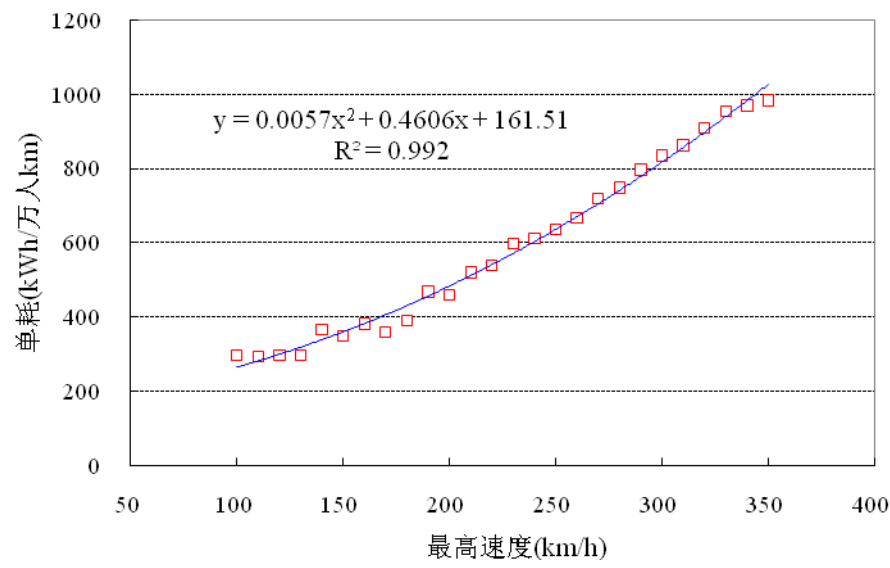


图 5-1-2 武广客运专线CRH3不同最高速度下的单耗

5.1.2 石太客专(CRH5)

与CRH3型动车组类似，CRH5型动车组运行的单位基本阻力方程也为速度的一元二次函数形式($F = 1.65 + 0.0001v + 0.000179v^2$ ，单位为N/kN)。

设置平均满载率为100%，在中间站停站一次(阳泉北站)的方案下，石太客运专线CRH5型动车组单耗随最高速度的变化情况如图5-2-1所示。随着最高速度的增加，石太客运专线CRH5的单耗呈二次函数增长趋势。

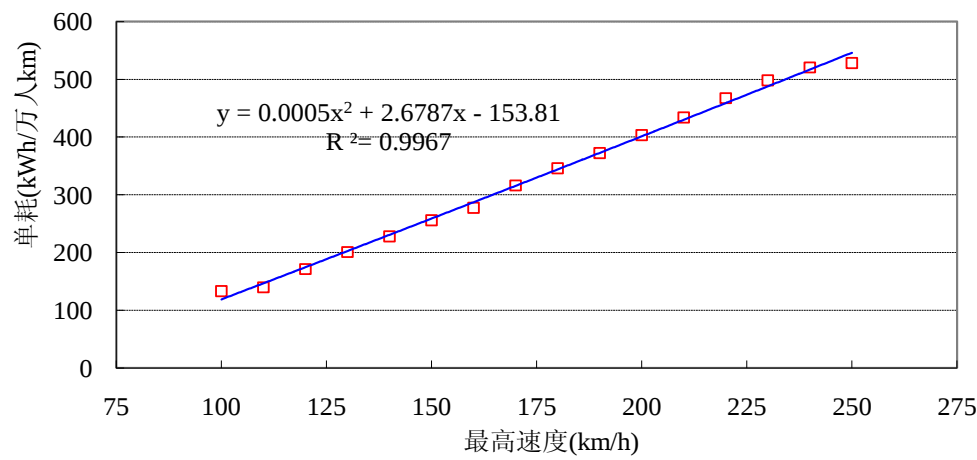


图5-2-1 石太客运专线CRH5不同最高速度下的单耗

5.2 平均满载率变化对单耗的影响

5.2.1 京津城际(CRH3)

在最大速度同为350km/h的直达方案下，采用仿真手段得出京津城际不同平均满载率的单耗情况如图5-2-1所示。动车组CRH3的总能耗随着平均满载率的增加呈缓慢增长趋势，当平均满载率从20%增加到120%时，总能耗仅增加了3.1%；单耗随着平均满载率的增加而递减，当平均满载率分别为20%和120%时，单耗分别为5064.19和869.54kWh/mpkm，前者比后者高4.8倍。

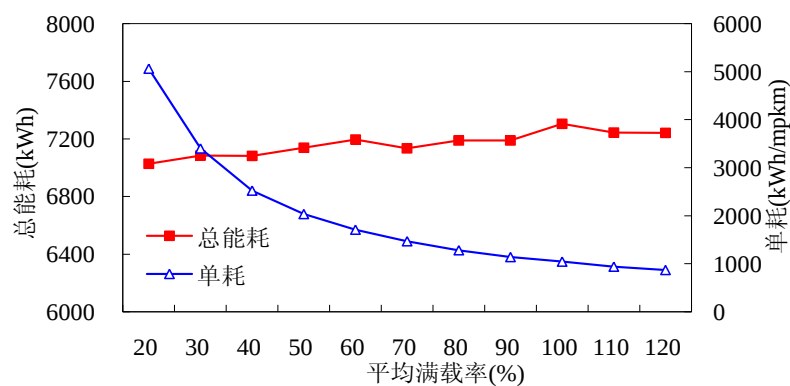


图5-2-1 京津城际CRH3不同平均满载率下的总能耗和单耗

5.2.2 武广客专(CRH3)

采用仿真手段得出武广客运专线CRH3在最大速度同为350km/h，只停长沙南站的停站方案下，列车单耗随平均满载率的变化情况如图5-2-2所示。武广客运专线CRH3的平均满载率从20%增加到120%时，总能耗仅增加了2.7%；而列车的单耗呈现比较明显的下降趋势，平均满载率从20%到120%，平均每提高10%，列车单耗平均下降16.2%，但随着平均满载率的提高，单耗下降趋势逐渐变缓，平均满载率从20%提高到30%时，单耗下降了33.4%，平均满载率从110%提高到120%时，单耗仅下降7.2%。

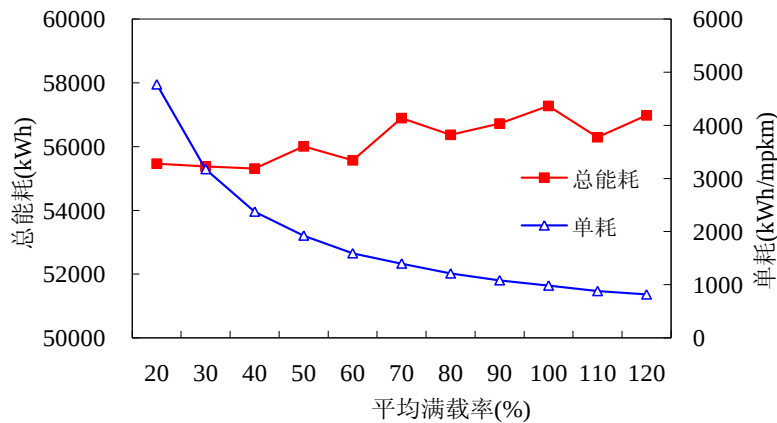


图5-2-2 武广客运专线CRH3不同平均满载率下的总能耗和单耗

5.2.3 石太客专(CRH5)

设置最大速度同为250km/h，在中途停站一次(阳泉北站)的停站方案下，利用仿真手段计算出石太客运专线CRH5在不同平均满载率下的单耗情况如图5-2-3所示。随着平均满载率的增加，石太客运专线CRH5的总能耗呈缓慢上升趋势，但平均满载率从20%提高到120%时，CRH5的总能耗仅增加了5.3%，说明列车的总能耗受平均满载率的影响不大，但是CRH5单耗的下降趋势较为显著，从20%起至120%，平均满载率平均每提高10%，单耗下降270.96kWh/mpkm，约17.8%，说明平均满载率的影响主要表现在对旅客周转量的影响上，但是随着平均满载率的提高，这种影响幅度逐渐变小。

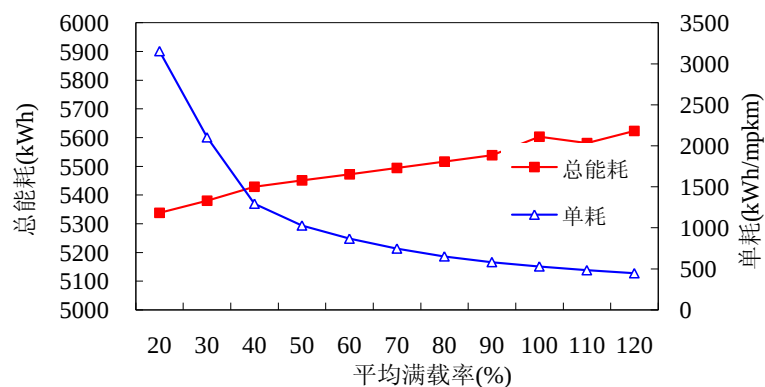


图5-2-3 石太客运专线CRH5不同平均满载率下的总能耗和单耗

5.3 停站间距变化对单耗的影响

5.3.1 京津城际(CRH3)

根据列车时刻表，北京-天津每天发送城际高速动车60列，采用两种停站方案。第一种是直达方案，共46列；第二种是中间站(武清站)停站一次的方案，共14列。利用仿真系统进行模拟，在满载率100%的情况下，得出京津城际的能耗情况如表5-3-1所示。多停站一次导致CRH3的单耗提高了约6.32%，并且停站方案下旅行时间增加了5min。

表5-3-1 京津城际不同停站方案下的单耗

停站方案	技术指标				
	旅行时间 (min)	平均停站间距 (km)	最大速度 (km/h)	总能耗 (kWh)	单耗 (kWh/mpkm)
直达方案	30	115	350	7305.45	1044.25
停站方案	35*	58	350	7787.50	1110.21

注：*包含武清站停站时间1min.

5.3.2 武广客专(CRH3)

根据列车时刻表，武广客运专线武汉至广州方向每天共开行50列车，45种停站方案。按停站次数可分为4种方案：中间停站1次(6列)、中间停4次(7列)、中间停站5次(27列)和中间停站6次(10列)，对应的平均站间距分别为535km、214 km、178 km和154 km。在最大速度同为350km/h，满载率100%的情况下，利用仿真系统进行模拟得到的结果如图5-3-1所示。在四种平均站间距下，最小平均站间距(153km)下列车的单耗仅比最大平均站间距(535km)下的单耗高3.2%。

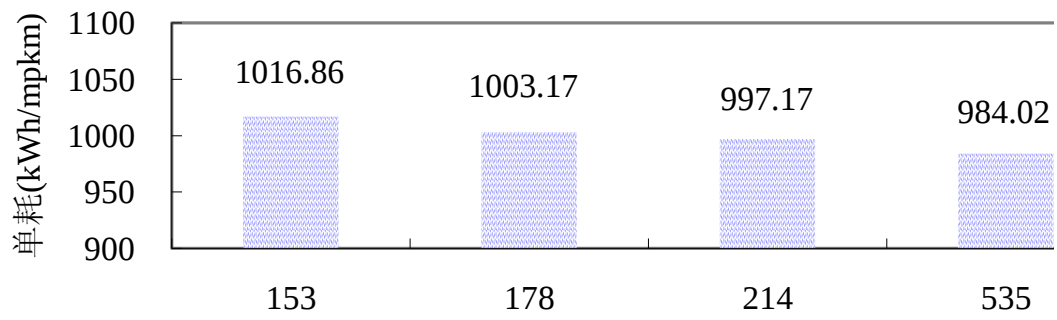


图 5-3-1 武广客运专线 CRH3 不同平均站间距下的列车平均单耗

5.3.3 石太客专(CRH5)

根据列车时刻表,实际运营中石太客运专线石家庄-太原每天开行动车13列,采用两种停站方案,第一种是不停中间站的直达方案,共3列,第二种是中间站(阳泉北站)停站的方案,共10列。利用仿真系统进行模拟,得出石太客运专线的能耗情况如表5-3-2所示。在相同最大速度(250km/h)情况下,直达方案比中间站(阳泉北站)停站的方案单耗降低7.72%。

表5-3-2 石太客运专线CRH5动车组不同停站方案下的能耗情况

停站方案	技术指标				
	旅行时间 (min)	平均停站间距 (km)	最大速度 (km/h)	总能耗 (kWh)	单耗 (kWh/mpkm)
直达方案	73	190	250	5016.34	487.49
停站方案	78*	95	250	5245.39	528.27

注: *包含阳泉北站停站时间2min.

5.4 小结

本节以京津城际、武广客运专线和石太客运专线为例,研究了不同技术参数下CRH3和CRH5的能耗情况,主要得出了以下结论:

① 在平均满载率和列车最大目标行驶速度相同的情况下,客运专线单位旅客周转量的能耗(单耗)随列车平均停站间距增大而减小;当列车平均停站间距从小于100km增大到大于100km时,单耗的减小趋势较为明显;当列车平均停站间距从大于100km开始增大时,单耗的减小趋势减弱。在平均满载率和列车最大目标行驶速度相同的情况下,京津城际(全长115km)上运行的直达CRH3列车比中途停站一次的CRH3列车单耗减少6.6%,石太客运专线(全长190km)上运行的直达CRH5列车比中途停站一次的CRH5列车单耗减少8.4%,而武广客运专线(全长1068km)上运行的中途只停站一次的CRH3列车比停站6次的CRH3列车单耗仅减少3.2%。

② 在停站方案相同和最大目标行驶速度相同的情况下,CRH3和CRH5的单耗随着平均满载率的提高而下降。京津城际和武广客运专线上的CRH3型动车组平均满载率每提高10%,单耗平均下降16.2%;石太客运专线上的CRH5型动车组单耗随平均满载率每提高10%平均下降17.8%。

6 典型地铁线路列车单耗影响因素的量化分析

本节以广州地铁1号线为例,采用仿真的手段,研究地铁列车平均满载率(在

线路不同断面上列车实际载客人数与列车定员之比的平均值；对于广州地铁列车而言，其定员按 6p/m^2 计算)、技术速度以及停站间距对列车单耗的影响。

6.1 技术速度变化对单耗的影响

假定列车平均满载率取 25%，目标速度从 15km/h 到 100km/h 按 5km/h 递增，广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗仿真结果如图 6-1-1 所示。当技术速度小于 30km/h 时，列车的单耗随着技术速度的增加而降低，但降低的幅度很小；当技术速度高于 30km/h 时，列车的单耗随着技术速度的提高而增加，且增长的幅度较大。

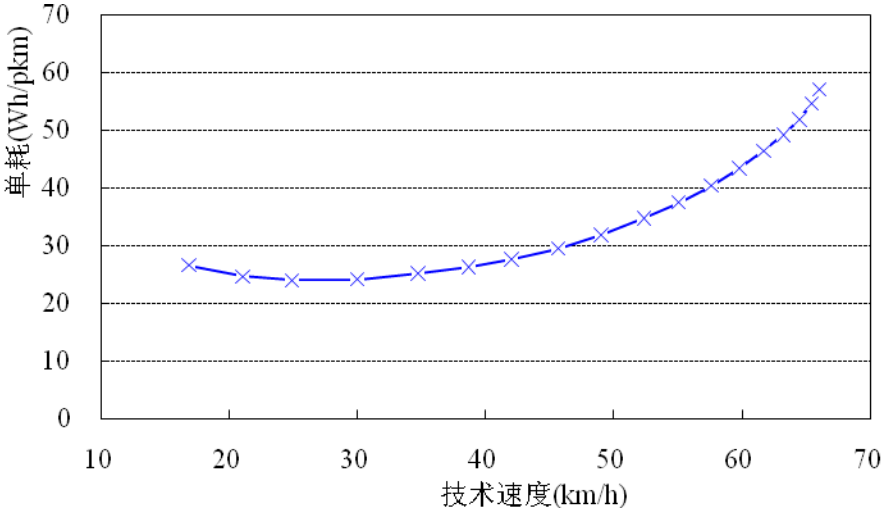


图 6-1-1 广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗随技术速度的变化曲线

对于广州地铁 1 号线 Modular 列车而言，从图 6-1-1 可以得到以下结论：

6.2 平均满载率变化对单耗的影响

广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗随平均满载率的变化曲线如图 6-2-1 所示。随着满载率的增加，列车单耗呈负指数降低趋势，特别是平均满载率小于 25% 时，单耗随满载率的降幅较大。当平均满载率在 5%(平均载客为 93p)、10%(平均载客为 186p)、15%(平均载客为 279p)和 20%(平均载客为 372p)情况下，后者单耗分别比前者减少了 48.3%、32.0%和 23.1%。

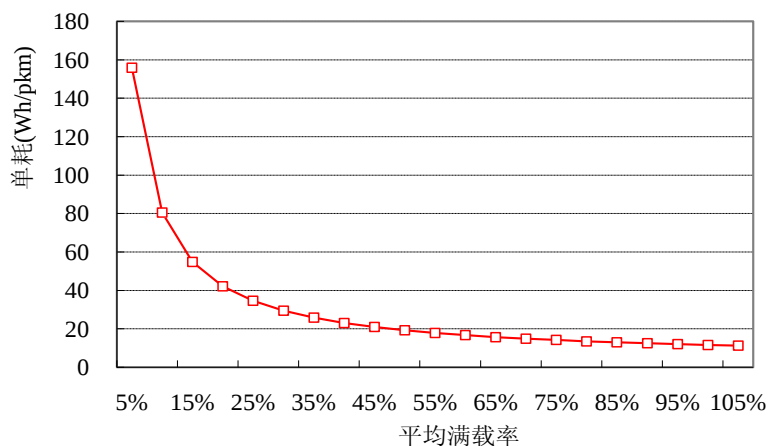


图 6-2-1 广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗随平均满载率的变化曲线

6.3 停站间距变化对单耗的影响

假定列车的平均满载率为 25%，技术速度同为 45km/h，则广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗随停站间距的变化曲线如图 6-3-1 所示。城市轨道交通列车的单耗随着线路站间距的增加而降低。当线路的站间距小于 2000m 时，列车的单耗随站间距的增加而降低较快；当站间距增加到 2000m 后，单耗的下降趋势变得不明显。

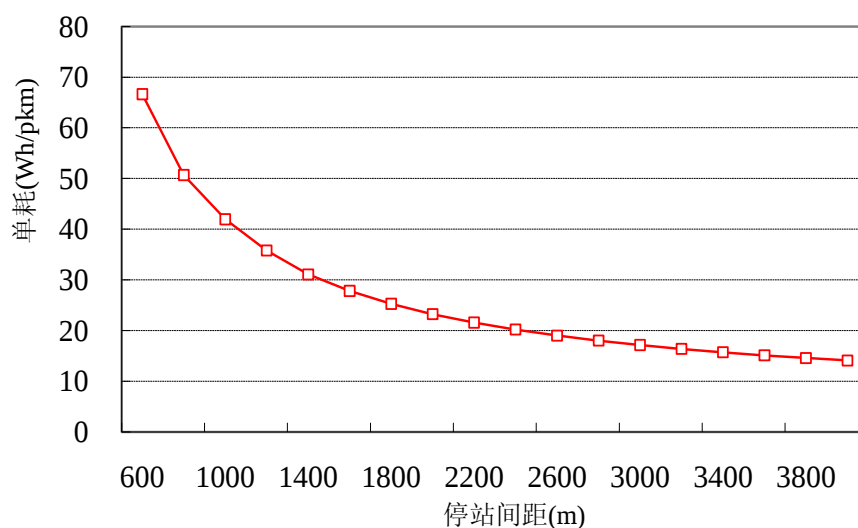


图 6-3-1 广州地铁 1 号线 Modular 列车单耗随停站间距的变化曲线

6.4 小结

本节以广州地铁 1 号线为例，对 Modular 列车的平均满载率、技术速度和停站间距对列车单耗的影响进行了定量分析，得出了以下主要结论：

① 在平均满载率和停站间距一定的情况下，当技术速度小于 30km/h 时，列车单耗随着速度的提高有微幅下降；当技术速度大于 30km/h 时，单耗随着速度的提高而呈比较明显的上升趋势。

② 在技术速度和停站间距一定的情况下，地铁列车的单耗随着平均满载率的上升呈下降趋势，而且这种下降趋势在技术速度较大和停站间距较小的情况下尤为显著。

③ 平均满载率和技术速度一定时，列车单耗随着停站间距的增加而下降，特别是停站间距小于 2000m 时，列车单耗随停站间距增加的下降幅度更大。

7 我国部分轨道交通系统能耗情况

7.1 客货共线铁路

如表7-1-1所示，全国平均水平客货共线铁路的单耗测算值低于广深客货共线铁路单耗实际值。造成这一差异的原因首先在于广深铁路3、4线技术速度高于全国平均水平客货共线铁路，而且全国平均水平的内燃机车货运单耗本身很低。

表7-1-1 实际运营能耗数据与模型测算数据比较

牵引种类		万吨公里能源消耗(kWh/mtkm 或 kg/mtkm)	
		广深铁路实际运营数据	模型测算全国平均水平客货共线铁路 能耗数据
客 运	电力	175	171*
	内燃	40	23*
货 运	电力	77	60
	内燃	23	13

注：*客运单耗由kg/mpkm转换成kg/mtkm的数值，转换系数为1.7

7.2 客运专线与磁悬浮

按照最高速度 350km/h，在 100%满载率下，仿真计算得到京津城际 CRH3 型动车组的平均单耗水平为 1059.64kWh/mpkm，武广客专 CRH3 型动车组的平均单耗水平为 1002.73kWh/mpkm。按照最高速度 250km/h，在 100%满载率下，仿真计算得到石太客专 CRH5 型动车组的平均单耗水平为 518.86kWh/mpkm。

磁悬浮交通目前在世界范围内的实际运营线路较少，我国虽然开展磁悬浮交

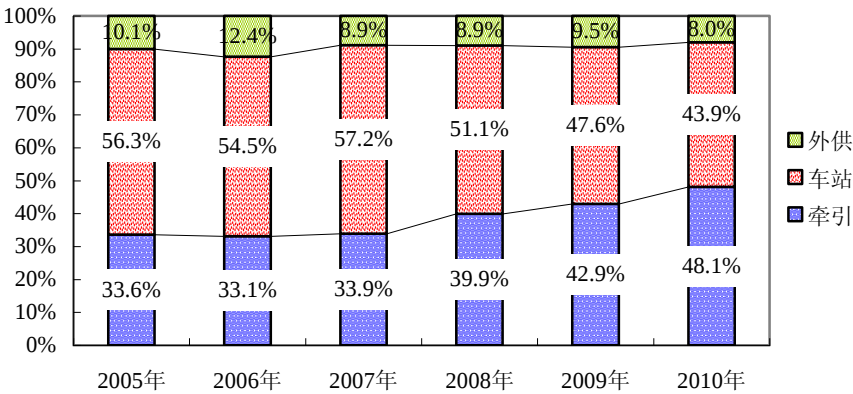
通的研究较晚,但是却拥有世界上第一条示范运营线路,即上海磁浮示范运营线,正线线路总长 29.898 公里。表 7-2-1 为 2008 和 2009 年上海磁浮示范运营线实际运营能耗。从表 7-2-1 可以看出,磁悬浮交通单耗较大,单耗在 5000kWh/mpkm 以上,高于武广客运专线 CRH3 动车组单耗 4770.33kWh/mpkm 和京津成际 CRH3 动车组单耗 3894.9kWh/mpkm (平均满载率 20%, 最高时速 350km/h)以及石太客运专线 CRH5 动车组单耗 3155.04 kWh/mpkm (平均满载率 20%, 最高时速 250km/h)。

表 7-2-1 2008-2009 年上海磁浮运营数据(数据来源: 上海磁浮交通发展有限公司)

年份	载客人数 (mp)	客运周转量 (mpkm)	耗电量 (mkWh)	单耗 (kWh/mpkm)	平均满载率 (%)
2008	427	12450	6864	5513.25	21.3%
2009	474	13800	6742	4885.51	23.6%

7.3 典型地铁线路能耗分析

2005-2010 年广州地铁能耗构成比例变化如图 7-3-1 所示。从图中可以看出:牵引能耗和车站能耗占据主要地位,其中车站能耗主要集中在车站内的电力消耗上,环控、动力、照明等设施的用电量较大。由于新线路的开通及直线电机车辆投入运营,牵引能耗所占比例呈逐年上升趋势,车站能耗所占比例呈下降趋势,外供能耗不到 10%。



注：数据来源于广州市地下铁道总公司，2010 年为 1-9 月份数据之和

图 7-3-1 2005-2010 年广州城市轨道交通系统各部分能耗比例

图 7-3-2 所示为广州地铁 1 号线 2008-2010 年各月的车站能耗。从图中可以看出,季节因素对于广州地铁能耗的影响十分显著。图 7-3-3 所示为空调季节和非空调季节广州地铁 1 号线车站能耗各部分的比例构成,在空调季节,车站能耗

的空调消耗所占比例提高了近 20%，这也正是图 7-3-2 所示的广州地铁 1 号线在空调季节车站能耗较高的原因。

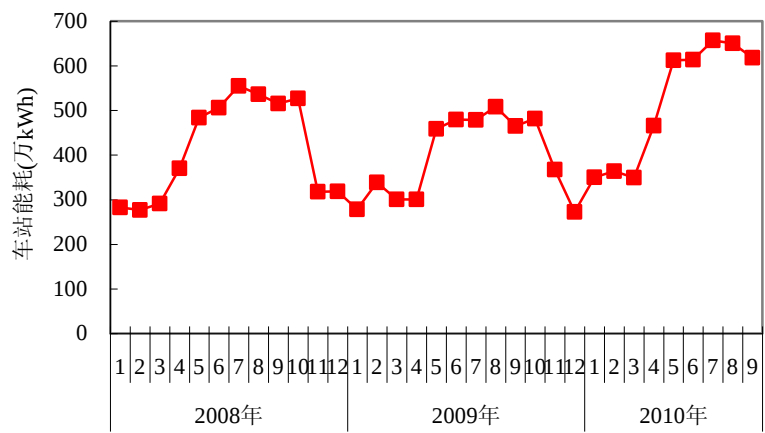


图 7-3-2 广州地铁 1 号线 2008-2010 年的车站总能耗

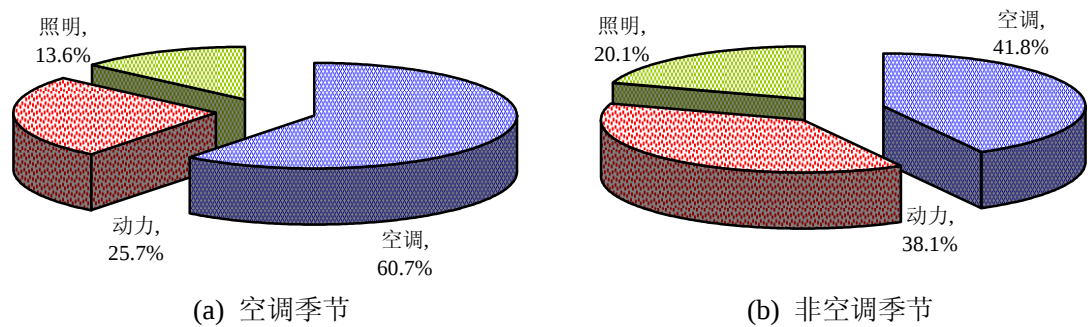


图 7-3-3 广州地铁 1 号线车站能耗各部分比例构成

2009 年广州地铁 1 号线全年牵引耗电 4457.52 万 kWh，共完成旅客周转量 13.48 亿人公里，单耗为 33.07Wh/pkm。根据系统仿真得到的广州地铁 1 号线列车牵引单耗为 31.92Wh/pkm，误差为-3.5%。

8 不同轨道交通方式适用性研究

本节从市场适用性角度出发，通过研究不同轨道交通方式的线网规模、布局特征、运量特征、所衔接城市(区域)特征以及能耗情况等指标来分析不同轨道交通方式的适用性。

8.1 线网规模

目前我国已建成的客运专线长度不尽统一，大部分在 200-500km 范围内，而武广客运专线达到 1068.60km。“四纵四横”客运专线大部分线路规划长度超过

1000km。

城际轨道交通线路长度一般在 100-300km 之间。城际轨道交通覆盖范围相对较小，适合相邻城市间 100-300km 范围内的旅客运输。

客货共线铁路线路长度大部分在 800km 到 2000km 之间，但我国仍有相当数量的铁路线路长度在 800km 以内，比如贵昆铁路(639km)、京秦铁路(290km)。营业里程在 500km 以内线路总长度约为 2.60 万 km，营业里程在 500-1000km 范围内的线路总长度约为 1.60 万 km，营业里程在 1000 公里以上线路总长度约为 2.10 万 km。由此可见，客货共线铁路覆盖范围最广，既可以承担长距离的重要运输通道客货运输，亦可以承担近距离的较小客货量运输。

城市轨道交通线路主要为某一个城市内部旅客运输服务，各城市轨道交通线路的运营总长度各不相同。截至 2010 年 11 月，国内各城市中城轨运营总长度达到 200km 以上的共有 3 个，分别是上海(410km)，广州(236km)，北京(228km)。

8.2 运量规模

《新建时速 300-350 公里客运专线铁路设计暂行规定》中规定，客运专线短编组(8 节编组)列车的定员按 600 人/列计算；长编组(16 节编组)列车定员可按 1200 人/列计算；200km/h 及以上跨线旅客列车定员可按客运专线长编组列车的定员计算。以发车间隔 4min 计算，扣除维修“天窗”的 4 小时，则一条客运专线每天可以开行的旅客列车约为 280 对，因此，短编组和长编组两种模式下的运量规模分别为 16.80 万人次/天和 33.60 万人次/天。

城际轨道交通运量规模同客运专线一致。

客货共线铁路对于列车运量没有具体技术标准规范，需要视实际运营情况而定。现行大部分区段旅客列车开行对数已经超过 50 对(何邦模，1999)。考虑到列车提速以及运输组织优化等因素，假定每天开行的旅客列车对数为 52 对，按每列编组 5 节硬卧车(每节定员 66 人)和 10 节硬座车(每节定员 118 人)，则每列车定员为 1510 人。根据铁道部规定(人民网，2007)，特快列车始发站和中途站均不允许超员；普快始发站列车超员率不得超过 20%，途中站超员率不超过 30%；空调列车始发站不允许超员、途中超员率不得超过 20%。结合列车实际情况，超员率按 40%计算，则客货共线旅客列车日运输能力约为 11.0 万人次/天。

《城市轨道交通工程项目建设标准》(北京城建设计研究总院，2008)对各种车型的定员以及运输能力做了规定：地铁 A 型车定员 310 人，列车单向运能为 4.50-7.00 万人次/h；地铁 B 型车定员 230-250 人，单向运能为 2.50-5.00 万人次/h；C 型车单向运输能力为 1.50-3.00 万人次/h；单轨交通列车定员为 151-165 人，单向运能为 1.50-3.00 万人次/h。

8.3 线路布局

根据《中长期铁路网规划(2008 年调整)》，到 2020 年，我国将建成客运专线 1.60 万 km 以上。规划的客运专线均以既有的普通铁路干线运输通道为基础。从布局上看，“四纵四横”客运专线主要以国家铁路网“四纵、三横、三网和关内外”三线中部分或全部路段为依托，覆盖我国中东部地区主要客运通道。

根据中长期铁路网规划，我国 2020 年前建设的城际轨道交通将主要存在于环渤海经济圈、长江三角洲地区、珠江三角洲地区、长株潭(长沙、株洲、湘潭)城市群、成渝(成都、重庆)经济区以及中原城市群、武汉城市圈、关中城镇群、海峡西岸城镇群等经济发达和人口稠密地区。从布局上来看，城际轨道交通的建设以经济发达地区为依托，覆盖我国主要经济圈，将满足经济发达地区的日益增长的旅客运输需求。

我国普通铁路已经形成以北京为中心，以四纵、三横、三网和关内外三线为骨架，联接着众多的支线、辅助线、专用线，可通达全国省市区的铁路网。由于各地区自然条件、经济社会发展状况差异较大，我国不同地区线网布局也有一定差异：我国东中部地区，特别是东部沿海经济发达区域，线网分布比较紧凑，线路密度达到了 $190.10\text{km}/\text{万 km}^2$ ；西部地区地广人稀，铁路线主要分布在重要的运输通道上，连接主要经济据点，线路密度只有 $40.30\text{km}/\text{万 km}^2$ 。

8.4 衔接(服务)城市规模

客运专线所衔接的城市常住人口大部分在 800 万以上(2008 年)，GDP 大部分在 4000 亿元以上。绝大部分客运专线衔接城市人均 GDP 均超过 40000 元。

城际轨道交通衔接的城市的人口数量大部分在 800 万以上(2008 年)，GDP 大部分在 4000 亿元以上。人均 GDP 大部分在 40000-80000 元范围内。

客货共线铁路线经过的城市人口数量为 200-1900 多万不等，GDP 在 800.00 亿元到 15046.00 亿元之间，人均 GDP 在 20000-80000 元范围内。

目前我国已开通城市轨道交通的城市人口规模大部分在 500 万人以上，人口密度基本在 $1000\text{人}/\text{km}^2$ 以上，日出行总量在 1000 万人次以上。

8.5 能耗水平

根据测算，在平均满载率 100%，最高速度 350km/h 的情况下，武广客运专线 CRH3 型动车组的单耗水平在 $1002.73\text{kWh}/\text{mpkm}$ ；在平均满载率 100%，最高速度 250km/h 的情况下，石太客运专线 CRH5 型动车组的能耗水平在 $518.86\text{kWh}/\text{mpkm}$ ；在平均满载率 100%，最高行驶速度 350km/h 的情况下，京津城际 CRH3 型动车组的能耗水平为 $1059.64\text{kWh}/\text{mpkm}$ 。

客运专线列车单耗随平均满载率的上升而减少,如武广客运专线和京津城际 CRH3 型动车组平均满载率从 20%至 120%每提高 10%,单耗约下降 16%。

2009 年客货共线铁路的单耗水平为:内燃机车货运 13.13kg/mtkm;内燃机车客运 13.53kWh/mpkm;电力机车货运 59.75kg/mtkm;电力机车客运 102.51kWh/mpkm。客货共线铁路列车牵引单耗随技术速度的提高而增大,随载重的增大而降低。对于客货共线铁路上运行的货运内燃机车和客运电力机车来说,仍有提升技术速度的空间。

2009 年地铁 1 号线 Modular 列车的牵引单耗为 330.70kWh/万人 km。广州地铁 1 号线 Modular 列车的技术速度从 30km/h 至 65km/h 每提高 10km/h,其客运单耗增大 9%;平均满载率从 5%至 105%每提高 10%,单耗下降约 23%。高满载率能够保证城市轨道交通的单耗在较低水平。

8.6 小结

本节通过分析不同轨道交通方式的线网规模、运量规模、线路布局、衔接(服务)城市规模以及能耗水平,对不同轨道交通方式的适用性得出如下结论:

(1) 在年均 GDP 在 4000 亿元以上、常住人口在 800 万以上、距离在 1000km 以上的处于经济发达地区的城市之间宜开通客运专线;列车在沿线发达城市设停站,但建议其停站间距不小于 100km。

(2) 在年均 GDP 在 4000 亿元以上、常住人口在 800 万以上、距离在 100-300km 以上的经济发达城市之间,尤其是处于相同经济圈的两之间宜使用城际轨道交通衔接,并推荐开行直达列车。

(3) 为保证城市的通达性以及考虑交通服务均等化的需要,对于年均 GDP 在 800 亿元以上、常住人口在 200 万人以上的各主要城市之间宜以客货共线铁路进行衔接,同时加快推行其线路电气化改造以及重载运输,以降低运输单耗水平。

(4) 对于日出行总量在 1000 万人次以上的大型城市,建议其根据具体情况修建适当规模的城市轨道交通系统来缓解城市道路交通压力,但需要适当调整城市轨道交通列车运行的技术速度和停站间距并保证高满载率以降低单耗水平。

9 不同类型轨道交通系统的排放研究进展综述

9.1 客运专线排放研究及发展分析

张建平(2007)认为在各种运输方式中,铁路是污染物排放强度较低的运输方式。根据经济合作与发展组织(OECD)对前联邦德国交通运输污染物排放研究,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。

高田等(2003)对各种运输方式在市内、市郊、城市间高速运行时的环境负荷

(每单位重量 距离的CO₂排放量)进行了比较,证明在城市间,以新干线(300系:希望号及光明号列车的平均值)为比较基准,高速公共汽车的环境负荷为新干线的3倍,飞机的环境负荷为其10倍左右。

9.2 客货共线铁路排放研究及分析

9.2.1 客货共线铁路内燃机车排放

目前我国铁路运输污染排放主要是由内燃机车牵引造成的,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,一般 NO_x 占 60%以上,CO 占 10-20%,其余污染物所占比例较小。

另外,值得注意的是,何吉成等(2010)在我国铁路行业逐年统计数据的基础上对机车排放的温室气体 CO₂ 进行了估算,这在一定程度上弥补了一直以来我国在这方面工作的不足。

9.2.2 客货共线铁路电力机车排放

电力机车主要依靠接触网传送的清洁电能获得动力,自身没有原动力,不需燃料,本身不产生有害气体和温室气体。根据王天宁和丁巍(2009)的测算结果,以电代油后,上海铁路局每年可减少机车用柴油 4 万余吨;按经验法计算,每年可减少氮氧化物排放约 760 吨,减少二氧化硫排放约 128 吨,减少烟尘排放约 608 吨。

9.3 城市轨道交通排放及发展分析

诸多研究表明,城市轨道交通是一种符合低碳发展、可持续发展观念的交通运输方式。孙小丽(2008)在介绍轨道交通节能环保功能中提到:按人均二氧化碳排放量计算,轨道交通是小汽车的 21.7%。

赵敏等(2009)以上海市居民出行方式为研究对象,利用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)“温室气体排放计算指南”中关于交通能源消费碳排放量的计算方法,研究了 2002-2006 年上海市居民出行方式选择的不同对 CO₂ 排放的影响和规律。对于不同的公共交通方式,出租车的 CO₂ 年排放量和人均 CO₂ 排放量都最大,轨道交通的 CO₂ 年排放量和人均 CO₂ 排放量最小。

陈静和张景秋(2010)在计算各种交通方式碳排放强度的基础上,得出轨道交通的碳排放最少,小汽车的碳排放最高,认为发展快速公交系统和轨道交通可以

降低碳排放强度，最后提出了北京发展低碳交通方式的对策。

城市交通是交通行业节能减排潜力最大、机会最多，但同时难度最大的领域(中国节能投资公司，2009)。余凌曲和张建森(2009)重点分析了我国城市轨道交通发展与低碳城市建设之间的关系，认为构建以城市轨道交通为骨干的城市交通体系将大幅降低城市排放强度、有效提升城市交通效率和促进城市低碳经济发展，是我国大城市建设低碳城市的必由之路。

9.4 小结

通过对不同类型轨道交通系统的排放进行比较分析，我们可通过以下措施来发挥轨道交通低排放的优势：

(1) 根据各种运输方式的技术经济特征，合理配置运输资源，优化运输结构，建设低碳型综合运输体系；

(2) 继续加快铁路电气化线路建设和既有线路电气化改造，加快淘汰老旧铁路机车，从铁路系统内部整合既有资源；

(3) 进行城市交通结构调整，优先发展城市轨道交通系统，并通过科学规划公共交通行驶线路来增大轨道交通、公共交通在整个出行模式选择中的比例，从而达到提高城市交通系统运行效率、节能减排目的。

10 我国轨道交通建设与发展的政策建议

虽然近年来我国各种类型的轨道交通系统发展迅猛，但与发达国家相比，在线路总里程、路网密度、线路布局上仍存在较大差距。这充分反映了我国各类型轨道交通建设规模的需求空间依然很大，同时说明了我国继续加大轨道交通基础设施建设力度的必要性。在未来一段时间内，我国各类型轨道交通的发展从节能、环保的角度应参考以下原则：

(1) 建立以高效协作、衔接顺畅的多层次综合交通运输网络体系。

结合不同区域和城市的经济发展状况和客观地理环境，做好客运专线、既有客货共线铁路、城际轨道交通线路和城市轨道交通网络的层次衔接，充分发挥不同类型轨道交通网络各自的优势；另外，从整个综合交通运输体系角度入手，做好不同层面轨道交通系统与公路、民航等其他交通运输方式的整体优化配合。

在年均 GDP 在 4000 亿元以上、常住人口在 800 万以上、距离在 1000km 以上的处于经济发达地区的城市之间宜开通客运专线；在年均 GDP 在 4000 亿元以上、常住人口在 800 万以上、距离在 100-300km 以上的经济发达城市之间，尤其是处于相同经济圈的两城市之间宜使用城际轨道交通衔接；在年均 GDP 在 800 亿元以上、常住人口在 200 万人以上的各主要城市之间宜以客货共线铁路进行衔

接；对于日出行总量在 1000 万人次以上的大型城市，建议其根据具体情况修建适当规模的城市轨道交通系统来缓解城市道路交通压力。

(2) 增加 DF11 和 SS7 型机车的比例。

DF11、SS7 型机车无论是牵引客运还是货运情形下，在相同技术速度或者相同载重水平下时其能耗均低于其他类型机车。但是，目前这两种机车在我国铁路机车中比例较小(DF11 占 5.67%，SS7 占 7.82%)。

(3) 提高客货共线铁路货物列车净载重和提高旅客列车平均满载率。

内燃和电力机车货运牵引总重由 1000t 提高到 4000t 时，牵引总重平均每提高 100t，单耗均下降约 10%；内燃客运列车平均满载率从 20%至 100%平均每增大 10%，单耗随之下降约 10%。；电力客运列车平均满载率从 20%至 100%平均每增大 10%，单耗随之下降约 6.8%。

(4) 通过合理的运营组织办法，保证地铁列车适当的技术速度和最小停站间距。

在平均满载率和停站间距固定的情况下，当技术速度小于 30km/h 时，地铁列车单耗随着速度的提高有小幅下降；当技术速度大于 30km/h 时，地铁列车单耗随着速度的提高呈较为明显的上升趋势，速度平均每提高 10km/h 时，单耗上升 9.12Wh/pkm (21.8%)。在地铁列车停站间距较小和平均满载率较小的情况下，这种增加趋势表现尤为突出。

当平均满载率和技术速度一定时，地铁列车单耗随着其停站间距的增加而下降，特别是停站间距小于 2000m 时，停站间距平均每增加 200m，单耗降低 7.77kWh/pkm (16%)。在平均满载率较小和技术速度较大的情况下，地铁列车单耗随其停站间距增加的下降幅度更大。

(5) 当城际客运专线列车停站间距应小于 100km 时，列车最高速度不宜大于 200km/h。

京津城际(全长115km)上运行的直达CRH3列车(最大目标行驶速度为350km/h)比中途停站一次的CRH3列车单耗减少6.6%；石太客运专线(全长190km)上运行的直达CRH5列车(最大目标行驶速度为250km/h)比中途停站一次的CRH5列车单耗减少8.4%；而武广客运专线(全长1068km)上运行的CRH3列车(最大目标行驶速度为350km/h)中途只停站一次(平均停站间距大于500km)比停站6次(平均停站间距大于150km)的CRH3列车单耗仅减少3.2%。

(6) 城际客运专线及城市客运列车可通过采取小编组的运输组织方式来增大列车平均满载率，从而降低单位旅客周转量的运输能耗。

在最大目标行驶速度和停站间距一定的情况下，CRH3 和 CRH5 动车组的单耗随着平均满载率的提高而下降。京津城际和武广客运专线上的 CRH3 型动车组平均满载率每提高 10%，单耗平均下降 16.2%；石太客运专线上的 CRH5 型动车

组单耗随平均满载率每提高 10%平均下降 17.8%。

在技术速度和停站间距一定的情况下，地铁列车的单耗随着平均满载率的上升呈下降趋势，平均满载率平均每提高 10%(平均载客提高 186p)，单耗下降 10.46Wh/pkm(23.1%)，而且这种下降趋势在列车技术速度较大和停站间距较小的情况下尤为显著。

(7) 加强基础数据统计工作，建立相关指标体系，并完善指标的统计、分析与研究制度。

我国的交通行业还没有一个完整的指标评价体系，国家统计局部门的能源统计工作没有进行具体的分类。至今开展的较为系统的交通能效研究工作大部分为国际机构或国外基金会提供资金赞助，且多是从交通对环境影响角度分析能耗问题。由于缺乏基础性的信息来源，相关研究工作开展难度较大，决策者难以得到准确全面的信息。

(8) 建立适应市场经济环境要求的节能管理、监测和服务机制。

由于政府管理体制变革，原有的节能减排管理机构能力不足以应对我国迅猛发展的交通现状。相对于公路和水运行业来讲，我国各种轨道交通系统的节能体系相对完整，但未来发展必须通过建立完善的节能法规体系，通过法律和经济手段并用开展节能工作，依法管能、依法用能，并依靠市场运作的节能服务体系来推进节能工作，而不能单纯依靠行政手段来实现。

附表 1 不同轨道交通主要技术参数

		客运专线		客货共线	城市轨道交通	单位
		300-350	200-250	<200	20-80	速度:km/h
牵引供电		AC25KV	AC25KV	AC25KV	DC750V 或 DC 1500V	——
总牵引功率		8000-9000	4800-5500	2400-6400	1200-2200	kW
运输能力		16.8-33.6	16.8-33.6	7.9-11.0	45.0-126.0	万人/天
行车间隔		3-4	3-4	>10	>5	min
站间距		20-100	20-100	10-80	1-2	km
轨距		1435	1435	1435	1435	mm
正线间距		4.8-5.0	4.6	4.0-4.4	——	m
旅客站台	长度	450	500	550	200	m
	宽度	7.5-12.5	——	6.0-20.0	>8.0	
	高出轨面	1.25	1.25	1.25	1.25	
最小曲线半径		5000-7000	2200-4000	3500-7000	300-550	m
正线最大纵坡		20	20	6-15	30	‰
最小坡段长度		900	800	600	——	m
隧道横断面积	单线	70	58	50	——	m ²
	双线	100	90	80	——	
车站到发线长度		650	700	1050\850\750\650	——	m