

规模运行电动汽车能效与技术成熟度分析评价

能源基金会项目结题报告

北京理工大学

2018 年 1 月 10 日

目 录

摘要	1
一、项目背景	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状	2
1.3 研究目标	5
1.4 研究内容	5
1.5 主要结论	6
1.5.1 数据采集及初步分析	6
1.5.2 能效特性分析	6
1.5.3 交通和驾驶行为对能耗的影响	10
1.5.4 技术成熟度评价	11
二、数据来源与初步分析	15
2.1 数据采集工作流程	15
2.1.1 志愿者征集	15
2.1.2 数据采集设备	16
2.1.3 设备装车方案	17
2.1.4 数据解析与格式转换	19
2.1.5 数据存储与共享服务	20
2.2 数据内容与覆盖面	21
2.3 数据质量示例	22
2.4 使用行为初步分析	23
2.4.1 出行行为分析	24
2.4.2 充电行为分析	25
三、能效特性分析	26
3.1 温度适应性分析	26
3.1.1 不同温度下的电动汽车能耗对比分析	26
3.1.2 不同温度下的电动汽车整车效率对比分析	27
3.1.3 不同温度下的电动汽车制动回收效率对比分析	30
3.2 主要部件技术分析	31
3.2.1 电池分析	31

3.2.2 电机分析	32
3.2.3 冷/热空调分析	34
3.3 车型参数与公告参数的对比	35
3.4 小结	39
四、基于交通和驾驶行为的电动汽车运行特性分析.....	41
4.1 交通状况适应性分析.....	41
4.1.1 工况特征图谱	41
4.1.2 畅通路况适应性分析	43
4.1.3 时走时停路况适应性分析	47
4.1.4 时走时停路况与畅通路况的对比适应性分析.....	48
4.1.5 交通状况适应性分析小结	50
4.2 驾驶行为影响分析	51
4.2.1 踏板操作对驱动效率的影响.....	51
4.2.2 踏板使用习惯对能耗的影响.....	53
4.2.3 电动汽车对驾驶行为的适应性分析	59
4.3 小结	61
五、技术成熟度评价分析.....	62
5.1 电动汽车技术成熟度.....	62
5.2 电动汽车技术成熟度评价体系及方法	63
5.2.1 电动汽车技术成熟度评价指标体系	63
5.2.2 各指标权重确定.....	64
5.2.3 评分标准	66
5.3 电动汽车技术成熟度评价	71
5.3.1 基于现有技术水平的客观评价.....	71
5.3.2 基于用户视角的技术成熟度评价	74
4.3.2 评价结果分析	75
5.4 小结	76
六、基于技术成熟度的政策分析	78
6.1 电动汽车政策现状	78
6.2 基于技术成熟度的政策导向分析.....	80
参考文献	83

规模运行电动汽车能效与技术成熟度分析评价

摘要

纯电动汽车的能耗表现与交通路况、驾驶习惯密切相关。在不同交通路况下，合理的行驶车速及加速、制动踏板使用习惯有助于降低电动汽车的百公里电耗，提高整车经济性。另外，电动汽车的技术成熟度与用户对电动汽车的接纳度密切相关，客观的分析电动汽车的能效特征及技术成熟度现状，有助于为技术改善和推广策略提供依据。本研究旨在通过采集私人用户电动汽车实车运行数据，建立电动汽车能效分析模型和技术成熟度评价方法，提出降低电动汽车能耗的驾驶习惯建议、指导电动汽车系统设计优化、帮助电动汽车有关政策法规的建立和完善，主要工作如下：

实车数据采集及分析。征集了北京市 10 款车型共 52 台私人用户纯电动汽车作为采集样本，开展为期一年的 10Hz 高频运行数据采集工作。数据采集由 OBD 接口或 CAN 总线读取，包括 GPS 数据、驱动电机数据、动力电池数据、驾驶行为数据等。原始数据经过清洗、重构等预处理环节，提取出电动汽车出行特征和充电行为特征，并为后续的能效特征、运行特性、工况分析和驾驶行为分析等研究提供良好的数据基础。样本车辆在采集期内共行驶约 43.7 万公里，单次平均行驶里程 15.43 公里，其出行行为规律与普通汽车基本相似。电动汽车驾驶员基本都会在 SOC 大于 30%时充电，且倾向于选择慢充（夜间）。

能耗特征分析。能耗特征分析针对温度适应性、主要部件（电机、电池和空调）的能效特征两方面展开研究，并最后对公告的能耗参数和实际运行情况进行对比。电动汽车能耗随温度变化明显，常温状态能耗要低于高温和低温状态，电机效率也有类似特征，即常温状态电机效率要高于低温和高温状态。电池在低温状态下的容量衰减值平均约为 4.32%，且各车型之间差异较大，总体上三元锂电池的抗低温容量衰减性能要优于磷酸铁锂电池。电池由于老化引发的容量衰减率平均约为 2.64%/年，磷酸铁锂电池老化优于三元锂电池。电机运行效率 Map 图显示各车型间的高效率区间差异加大，各电机都存在优化空间。空调对整车能耗影响非常显著，制冷和制热都会使能耗增加约 30%以上。最后，通过对比实际运行能耗与公告参数，发现车辆公告运行能耗略低于实际运行能耗。

城市环境下能耗与路况和驾驶行为的适应性研究。通过研究畅通和时走时停两种交通路况下，电动汽车能耗的分布特征，发现畅通路况下电动汽车平均单位

里程能耗随平均速度的增大先减少后增加，能耗最低所对应的速度区间在 25-50km/h；相比于畅通路况，时走时停路况会造成平均单位里程能耗的小幅度增加和较大程度的能耗波动，说明电动汽车对于时走时停路况的适应性有待提升。通过分析驾驶行为对电动汽车能效的影响，发现行驶时加速踏板维持在 30-40% 开度能够获得较高效率和良好能耗表现，制动时轻踩制动踏板可以获得更大的总制动回收效率。

技术成熟度评价指标体系构建及评价方法研究。从技术现状和用户需求两个维度定义电动汽车技术成熟度。分析和研究电动汽车行业相关技术的发展现状，选取关键要素构建电动汽车技术成熟度的评价指标体系。采用层次分析法对评价指标进行赋权，构建技术成熟度评价模型。分别从技术水平现状和用户视角对电动汽车技术成熟度进行评价。技术水平客观评价结果显示各车型在整车性能、电池性能和经济性能方面存在明显差异，主观评价结果显示续航里程、电池容量等几项关键指标仍与用户期望存在较大差距。技术成熟度评价结果能从总体上反映出各车型之间存在的技术差异，也能反映出整体技术进步的趋势。

一、项目背景

1.1 研究背景与意义

电动汽车是解决能源危机和交通排放污染的有效方法^[1]，美国、欧洲、日本和中国自 2000 年以来都推出了电动汽车计划，并投入、启动了大量的科学研究和商业示范运用项目以推动电动汽车的发展。2010 年以来，各国都推出了以推动电动汽车市场化为目标的产业刺激政策。我国新能源汽车研究起步较早，自 2000 年以来，为鼓励新能源汽车产业的发展，陆续出台了一系列的规范和发展扶持政策，促进汽车工业产业结构升级，并取得了一定的效果^[2]。新能源汽车产销量呈现出持续增长的趋势，2017 年新能源汽车产销分别完成 79.4 万辆和 77.7 万辆，比上年同期分别增长 53.8% 和 53.3%。其中纯电动汽车产销分别完成 47.8 万辆和 46.8 万辆，比上年同期分别增长 81.7% 和 82.1%。

私人是对汽车产品的价格、易用性和可靠性最为关注和敏感的群体，因此私人用户数量标志着电动汽车的市场接受度。然而，在电动汽车高速发展的同时，仍然存在着电动汽车私人用户覆盖比例较低，消费者购买电动汽车多为政策诱导，部分消费者对电动汽车仍然持观望态度的一系列问题。

电动车没有在短期内获得大规模推广常被归结为两个原因：一是相比于传统车辆，电动车价格高且可靠性低，续航里程短等；二是充电桩等基础设施建设滞后而导致电动汽车使用的便利性无法得到保障。

电动汽车可靠性相对较低主要表现在储能系统上，即动力电池储能的不确定性，储能数量与环境温度、使用过程和老化密切相关，常导致驾驶员“里程焦虑”（Range anxiety）；动力电池使用的老化、甚至失效会导致用户用车体验进一步恶化，而如果置换电池，又会引发成本的大幅上升。另外，电动汽车可靠性也与驱动电机性能相关，电动汽车电机经常工作在频繁的启动、停止、加速、减速等状态，大大增加了车载电机的故障率。一般而言，驱动电机特性与环境温度密切相关，特性也随着驱动电机老化而发生变化，此时能效就显得非常重要，能效与电机本体及与控制策略密切相关。更重要的是，动力电池与电机一起构成电驱动系统，如何在不降低可靠性的条件下实现能量高效利用是电动车市场化中必须解决的问题。

另一方面，电动汽车的充电便利性问题也需要通过进一步完善充电技术设施来解决，然而充电站和充电桩的建设涉及电网负荷、土地购置与环境等问题，充电站建成后的社会效益必须加以考虑，但是无论如何，足够的充电基础设施已经成为电动车规模应用的先决条件，因此美国、欧洲、日本和中国都在大力推动充电基础设施的建设。相对于车辆本身而言，充电基础设施建设社会成本巨大，如何实现高效率利用成为非常重要的问题。一方面要通过合理布局提升充电设备的使用率，另一方面，通过智能化的管理技术使得电动车用户可以快速找到闲置充电端口，降低用户的充电焦虑(Charge anxiety)。

除此以外，我们注意到，“电动车热”的兴起时间不长，业界对电动车驾驶员行为分析较少，尤其是私家车驾驶员。电动汽车的驾驶过程与传统汽车显著不同，电动汽车驾驶员的自我体验和驾驶行为与能效和可靠性的关系更为密切；反过来，电动汽车续航里程和充电设施的分布也会直接影响到用户的出行特征。电动汽车的推广与普及势必改变驾驶者的出行特征，也会对城市交通运行特征以及能耗时空分布产生重大影响。因此研究私人用户电动汽车驾驶行为特征对电动车的安全和高效运行显得十分必要。

基于以上分析，在“低碳”与“可持续发展”背景下，研究电动汽车技术成熟度以及使用效果，并提出相应的技术提升方向、车辆运用优化策略以加速电动汽车产业发展，提升电动汽车市场认可度是十分必要的。针对当前市场上面向个人用户的主流电动车型，基于实际运行数据，从温度适应性、零部件能效、交通路况和驾驶行为等方面，对现有电动汽车能耗和技术成熟度进行主客观评价，揭示影响电动汽车安全、高效运用的车辆技术因素、驾驶行为因素以及基础设施因素，对于解决电动汽车普及过程中的关键问题具有重要意义。

1.2 研究现状

关于电动车能量效率的研究，文献调研主要包括三个方面：一是对电动汽车能耗值进行综合评定；二是各种类型电池的能量效率；三是综合考虑了电机和控制系统的效率传递，得出电动汽车整体的能量效率评估。电动汽车的能耗是决定电动汽车实际续航里程的关键因素之一，其能耗值的评价多采用单位里程能耗进行计算，但针对不同车型的对比，王震坡等^[3]提出了比能量指标来进行评价。后续研究将能耗的评价指标增加为三个，即续航里程、比能耗、能耗^[4]。囿于能量密度问题，当前电动汽车多采用磷酸铁锂电池和三元材料电池。磷酸铁锂电池，

因其良好的安全性能、长寿命和高性价比而广受欢迎。但是随着技术的不断发展，磷酸铁锂材料的能量密度已遇到瓶颈，已经很难满足未来电动汽车的需求^{[5][6]}。近期发现三元材料（镍钴锰酸锂）电池在低温下的容量效率和能量效率都要比磷酸铁锂高，且随着温度的降低其容量效率和能量效率的下降速率也要比磷酸铁锂慢^[7]。综合考虑电机和控制系统的能量效率研究不是很多。吴正斌等^[8]通过室外道路测试和测功机实验分析了低速电动汽车的动态性能和能量效率，电机及控制系统的效率约为 70%，电池效率一直高于 92%。

当前电动车交通和驾驶行为的研究相对有限，大多数研究人员的采集设备融合了 CAN 总线采集器与惯性测量单元(IMU)^[9-11]。其中 Ly 等人^[9]认为制动和转向行为比加速行为能更好地探测危险驾驶，并且将二者结合会有更好的准确性。Carmona 等人^[10]在分析驾驶行为时，选择加速度绝对值为指标定义 0.3g-0.5g 间为不舒适驾驶行为，大于 0.5g 激进型驾驶行为，而短小时内多次出现不舒适驾驶行为也归类为激进型。此外，Carmona 等人^[11]还应用混合高斯模型（GMM）构建了一个驾驶行为分析工具。除了上述的两种数据采集传感器设备，Kumtepe 等人^[12]利用车载摄像头获得的视觉数据检测道路上的道路和车辆来提取诸如车道偏离率和可能的碰撞时间之类的特征，并训练分类器判别驾驶员在相应的驾驶过程中是否会产生激进型的驾驶行为。Wu 等人^[13]使用卡尔曼滤波消除噪声与自适应时间窗提取数据后，预置的物理模型帮助提取特征以区分加速、制动、变道、转向等驾驶行为中正常与激进的类别，准确率可达 93.75%。针对于不同驾驶行为的划分研究，麻省理工大学的 Michelle^[14]在其学位论文中提出了三个激进性因子来量化驾驶行为中出现的激进性。这些激进性因子为比较驾驶工况和评估现实驾驶模式提供了一种工具。国内对驾驶行为的研究上，黄万友等人^[15]采集了济南市纯电动物流车的实车运行数据，分析不同驾驶员驾驶时的能耗差异即在车辆加速度、车速、能量回馈、行驶工况及电机过载等因素对能耗的影响规律，并据此对一些驾驶参数进行优化，有效减小了不同驾驶员的驾驶行为所造成的车辆能耗波动性。严英等人^[16]以电动公交的实际运行数据为基础，发现能耗的差异主要来自于公交车出站时驾驶员踏板的使用差异，在电机效率图谱上能看出不同驾驶员操作踏板所对应的电机工况路径有明显的不同。

技术成熟度方面主要集中在技术测评以及部件评估方面，电动汽车的性能测试是各个国家比较重视的测试之一，各国家针对测试制定了相关的评价标准。美国对电动汽车的测试评价主要包括两个项目，一是“美国先进车辆测试项目”，二

是“SAE 电动汽车技术标准项目”，两者针对的对象不同，前者为国家层面，后者多针对电动汽车的本身性能。欧洲各国家成立了诸如“欧洲标准化委员会（CEN）”的一系列研究电动汽车标准化的机构和组织。这些组织主要负责纯电动汽车和混合动力汽车领域的标准化工作。日本以电动汽车协会（JEVA）为主进行电动汽车的标准化工作，其制定的电动车辆标准（JEVS）内容涉及车辆本身、试验方法、电机/控制器、电池系统等，除此之外，也采用了与传统燃油汽车“百公里油耗”的指标类似的电动汽车百公里电耗（kWh/100km）进行电动汽车的能耗评价。在国内，科技部从“十五”开始便通过电动汽车的重大项目对电动汽车的测试评价进行了支持，目前在电动汽车整车及零部件等标准方面，已经发布了电动汽车标准项目 42 项。2017 年 5 月中汽研发布了《EV-TEST（电动汽车测评）管理规则》，该项管理规则针对的是已经达到国家准入标准的电动乘用车，针对消费者关注的一些关键性能，从消费者的角度出发，设立评价指标体系。2017 年 8 月，公益智库机构能源与交通创新中心（iCET）发布了基于车主真实驾驶体验的最优电动车（BestEV）评估方法，BestEV 定位于中国首个电动汽车众评体系，其体系包括定量和定性两类指标，1.0 版本将适用于 2016-2017 年度的电动汽车评估过程；2018 年将升级至 2.0 版，更贴近电动汽车市场与用户。除了国家级组织和机构对电动汽车的性能测试评价之外，众多研究者们也对电动汽车的整车及其零部件性能评估做了诸多的研究。Andwari 等^[17]从电动汽车的电池、电池管理系统、电机、电控、车身等主要零部件方面阐述电动汽车的技术准备水平。张恒嘉^[18]从主客观两个方面分析电动汽车的性能指标，通过项目中采集到的道路实际运行数据来分析客观性能指标，以用户在项目中的记录 and 实际使用感受调查来分析主观性能指标，根据分析结果分析了纯电动汽车的普及可能性。乔维德^[19]根据电动汽车驱动电机的性能特点，从电机控制性能、电机本体设计、企业资质能力等维度进行分析，用 AHP 法确定电机性能评价指标及其权重，并对其进行评价。于博等^[20]分析当前国内电动汽车的研发形式，提出五维评价指标体系并对电动汽车进行评价得到我国电动汽车的发展路线。

综上所述，我国目前主要的能耗分析主要集中在实验室或产品研发阶段，有待进一步密切结合实际的运行的工况与大量的驾驶员及交通行为引发的产品适应性分析，在技术成熟度方面的分析有待深化，特别是结合规模运行私人电动车的分析较为欠缺。而私人用户车辆恰恰是电动车辆规模市场化的主动力。现有北京城区电动汽车的规模运行行为基于实际运行数据的系统分析与评估奠定了良好

的数据条件，有必要结合电动汽车规模应用的背景，从系统能效、技术成熟度以及驾驶行为方面进行深入研究，探明私人用户电动汽车运行的特点，以促进电动汽车规模市场化应用。

1.3 研究目标

自 2008 年新能源汽车首次进入中央政府工作报告以来，纯电动汽车成为我国汽车工业转型的主要战略取向。2017 年 6 月发布的《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法（征求意见稿）》，继续引导企业将新能源汽车，尤其是纯电动汽车作为未来重大战略发展领域，因此做好电动车的能效和产品成熟度评估具有基础性意义。

本项目研究目标是：（1）通过抽取北京市城市环境中典型的电动汽车运行数据样本进行建模分析，探明电动汽车运行能耗的主要影响因素以及相互关系；（2）建立适合我国城市环境的电动汽车产品技术成熟度评价方法，从车辆技术因素探讨加速电动汽车推广的策略；（3）揭示驾驶行为受电动汽车使用的影响效果，从驾驶行为的角度分析电动汽车运行效能。

1.4 研究内容

（1）电动汽车能效特性挖掘

基于北京城区私人电动汽车实测样本数据，分析不同环境温度下整车以及各关键部件的能效特征，确定影响电动汽车运行能效的主要因素及其相互关系。

（2）基于交通与驾驶行为的电动车运行特性分析

分析畅通路况、时走时停路况下电动汽车的能耗分布特性；分析驱动与制动能量回收两种状态下，驾驶员油门踏板的操作对电动汽车能效的影响方式；研究电动汽车对驾驶员不同驾驶行为的适应性。

（3）电动汽车技术成熟度评价研究

基于电动汽车主要部件的能效以及交通与驾驶行为相关的运行特性，建立电动汽车关键产品技术可靠性模型，建立电动汽车产品技术成熟度评价指标体系和评价方法，并利用几种代表性电动汽车的实际运行数据进行模型标定和验证，基于评价结果提出电动汽车推广与发展策略。

1.5 主要结论

1.5.1 数据采集及初步分析

本研究在北京地区征集到 10 款车型共计 52 台纯电动车作为采集样本。所有车辆均为私人用户，通过数据采集仪从 OBD 接口或 CAN 总线采集 10Hz 的高频运行数据。数据采集周期为 1 年，从 2016 年 12 月 2017 年 12 月，覆盖春夏秋冬四个季节。采集数据包括 GPS 数据、驱动电机数据、动力电池数据、驾驶行为数据等。原始数据经过清洗、重构等预处理环节，提取出电动汽车出行特征和充电行为特征，并为后续的能效特征、运行特性、工况分析和驾驶行为分析等研究提供良好的数据基础。样本车辆在采集期内共行驶约 43.7 万公里，单次平均行驶里程 15.43 公里，其出行行为规律与普通汽车基本类似。但用户反映“里程焦虑”仍然是制约其出行的首要因素，出行安排受续航里程、充电设施分布影响显著。电动汽车驾驶员基本都会在 SOC 大于 30%时充电，且倾向于选择慢充（夜间）。

1.5.2 能效特性分析

（1）温度适应性分析

不同温度下平均能耗（综合工况百公里电耗）为 16.33 kWh/100km。纯电动汽车能耗受温度影响较大，高温环境能耗较常温环境上升 6.0%，低温环境能耗较常温环境上升 31%。电动汽车平均比能耗为 10.74kWh/100km•t，分布范围为 9.27~12.01 kWh/100km•t。

表 1 不同温度下各车型能耗统计（单位：kWh/100km）

车型	低温（-2~-4℃）	常温(18~20℃)	高温(27℃)	平均值
EV150	19.90	13.52	15.45	16.29
EV160	20.50	13.50	15.17	16.39
EV200	19.16	14.03	15.11	16.10
EU260	19.80	13.80	15.12	16.24

E50	16.17	12.68	13.63	14.16
eQ	13.26	9.63	10.43	11.11
iEV4	15.42	12.79	12.33	13.51
iEV5	15.57	11.54	11.96	13.03
Denza	24.02	18.68	19.31	20.67
e6	26.56	24.99	25.75	25.77
平均值	19.04	14.52	15.43	16.33

其次，分析了温度对能量转化效率的影响（因数据采集内容差异，效率分析仅针对五款车型）。结果显示，同一车型在低温环境下的效率要低于其他温度，因此，低温环境对电动汽车整车效率的影响显著。分别分析电池—电机效率、电机效率、电机—车轮端效率，均存在常温效率>高温效率>低温效率。由此可见低温对各部分效率的影响较大，因此在进行传动系统优化设计时要提高传动系统的低温适应性。

表 1.2 不同温度下整车能量效率分布

总效率	EV150	EV160	EV200	EU260	E50	平均值
低温	56.57%	59.09%	55.70%	49.71%	62.21%	56.66%
常温	59.40%	60.58%	59.69%	57.50%	69.71%	61.38%
高温	57.78%	59.75%	62.59%	53.17%	67.40%	60.14%
平均值	57.92%	59.81%	59.33%	53.46%	66.44%	59.39%

再次，车辆的制动回收效率同能量转换效率一样，也受环境温度的影响。十款车型的制动回收效率如图 1.1 所示。各车型制动回收效率平均为 29.21%，各车型的制动回收效率存在一定差异，但温度对其影响趋势一致，即常温环境回收效率>高温环境>低温环境，分别为 32.55%、29.59%和 25.49%。

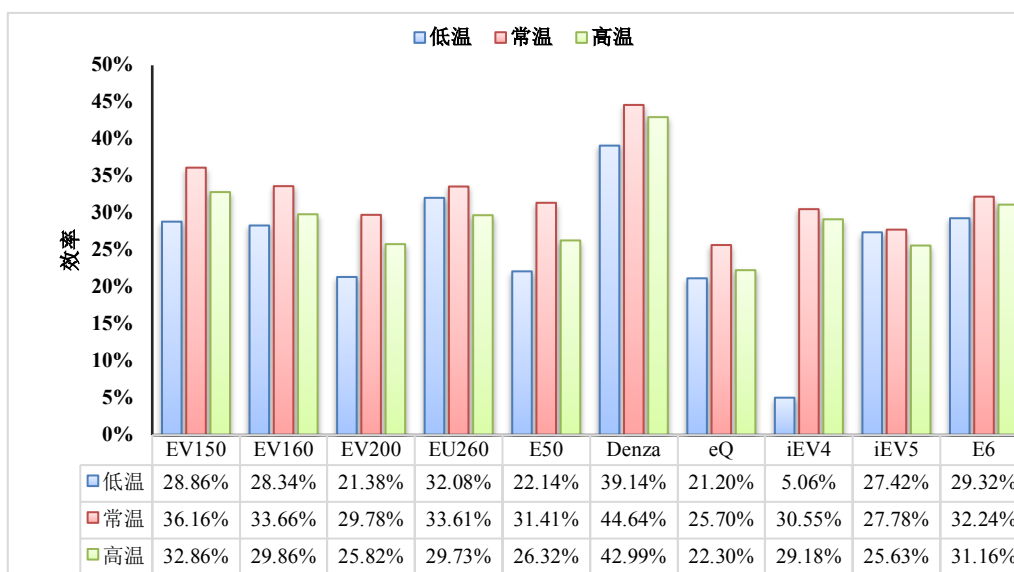


图 1.1 不同温度下各车型的制动回收效率

(2) 各部件技术分析

1) 电池

电池技术分析主要从动力电池的材料、等效欧姆内阻、平均温度极差、低温容量衰减率和劣化容量衰减率。从电池材料看，锂离子电池是目前电动汽车中使用最为广泛的动力电池。

动力电池低温容量衰减率为 4.32%，荣威 E50 的温度适应性最佳，而北汽 EV150 的电池低温性能较差，且三元锂材料电池的低温容量衰减较磷酸铁锂电池低。劣化容量衰减率平均为 2.64%，其中荣威 E50 的抗老化性最佳，奇瑞 eQ 的电池老化较为严重。总体来看，三元锂材料电池的劣化容量衰减较磷酸铁锂电池严重。

表 1.3 动力电池技术分析

车型	电池材料	等效欧姆内阻 ($m\Omega$)	平均温度极差 ($^{\circ}C$)	低温容量衰减 率 (%)	老化容量衰减率 (%/年)
EV200	三元锂	65	1.93	3.15	3.66
EV150	磷酸铁锂	104	2.05	6.32	1.30
EV160	磷酸铁锂	102	1.49	5.59	1.79
EU260	三元锂	45	1.13	2.27	4.07

E50	三元锂	144	1.23	2.01	1.20
eQ	三元锂	170	-	5.54	4.38
iEV4	磷酸铁锂	288	2.34	6.10	-
iEV5	三元锂	132	-	3.81	-
Denza	磷酸铁锂	97	2.10	4.13	2.09
e6	磷酸铁锂	-	1.35	-	-
平均值		127.44	1.70	4.32	2.64

注：‘-’表示由于数据原因无法计算或给出可靠值。

2) 电机

对运行数据中电动汽车电机在驱动状态时的转速、转矩数据点进行频率统计，统计结果显示，在实际运行过程中，电动汽车电机转速基本在 6000rpm 以下，转矩基本在 120N.m 以下。各车型的电机高效率区间(大于 80%)分布差异明显，其中 EV150 明显低于其他车型，其他车型虽然高效率区间分布范围相对更大，但极高效率区间仍然集中在高转速区域，为了进一步提高电动汽车电机的效率，必须考虑行驶的工况要求，在所选择的驱动电动机满足最高车速、加速能力等动力性能指标的前提下，使驱动电机在正常行驶工况下效率尽可能的高。如果根据驱动电机的工作特性和整车性能参数重新优化传动比，使电机尽可能多的运行在高效区，对整车性能改善也将会有帮助。

3) 空调

电动汽车动力电池不仅要为电动汽车驱动系统提供驱动能量，还要为电动汽车电动助力转向系统、空调系统等辅助系统提供能量。以 EV150, EV160, EV200 和 EU260 四款车为样本，分析空调系统对整车能耗的影响。以各车型相同时间的运行数据为例，冬季因开启电动空调进行制热，相比于未开启空调时的单位里程能耗，四款车型的单位里程能耗依次上升了 38%，39%，38%，30%。而在夏季行驶状态下开启空调进行制冷，四款车型的整车电耗也有不同程度的上升，依次上升了 34%，37%，38%，29%。由此可见，空调系统的使用会很大程度上降低电动汽车的经济性，进而缩短电动汽车的续驶里程。

(3) 与公告参数对比

将能耗实车结果进行分析并与公告参数进行比对。选取 EV150, EV160, EU260, 奇瑞 eQ 和荣威 e50 进行对比。除了荣威 E50 比公告参数稍大外, 其余车型的实际运行的能耗均比公告参数略小。需要说明的是, 由于公告参数获取方法与项目分析方法不同, 本研究分析方法可能略大于真实值。但从对比结果来看, 实车性能基本与公告保持一致。

1.5.3 交通和驾驶行为对能耗的影响

从交通与驾驶行为两个方面对电动汽车运行特性进行分析, 主要分析其城市工况下的交通状况适应性以及驾驶行为对运行能效的影响。

(1) 交通状况适应性分析

电动汽车交通状况适应性是指常温下电动汽车在不同的城市交通状况下运行特性的分布, 通常以能耗分布为表征。通过对实际行程的分割并提取特征进行聚类分析后得到工况特征图谱, 图谱中不同区域表示不同的交通状况。

首先, 分析不同平均速度下的畅通路况适应性得到, 畅通路况下电动汽车平均单位里程能耗随平均速度的增大先减少后增加, 能耗最低所对应的速度区间在 25-50km/h; 同时, 通过能耗标准差可得低速和高速工况下单位里程能耗波动比中速工况大。综合能耗均值与标准差两项指标说明电动汽车较为适合在城市环境中运行, 尤其适合中等速度的畅通路况。

其次, 分析时走时停路况适应性得到, 相比于相同速度的畅通路况, 时走时停路况会造成平均单位里程能耗的小幅度增加和更大程度的能耗波动, 说明电动汽车对于时走时停路况的适应性有待提升。横向对比不同车型对时走时停路况的适应性得到, 大型车(腾势, E6)的适应性较好而小型车(E50, eQ)的适应性较差, 轿车的新一代产品比老一代在适应性上有所提升(EU260 优于 EV 系列, iEV5 优于 iEV4)。

(2) 驾驶行为对运行能效的影响

驾驶行为的表现形式为不同车速下的踏板操作, 构建驱动效率、制动回收效率与车速和踏板开合度的 map 图, 分析驱动效率 map 图可得特征为油门踩踏深度较小时效率较低, 而踩踏深度较大时效率趋于饱和不再增加, 因此油门踏板踩

踏深度在中等范围内是较优状况。

在相似的起步加速工况、中速工况和高速工况对比不同驾驶行为对能耗的影响，踏板操作忽大忽小的情况会造成更大的能耗，而较为集中的踏板开合度会降低车辆行驶能耗。因此优质能效的驾驶建议为：行驶时踏板维持在 30-40%开合度能够获得较高效率和良好能耗表现，制动时轻踩制动踏板可以获得更大的总制动回收效率。

1.5.4 技术成熟度评价

电动汽车技术成熟度是指电动汽车领域现有技术以及现有技术在车辆上的应用对电动汽车用户相关需求的满足程度。理想状态下，电动汽车领域的相关技术、电动汽车的应用技术以及电动汽车用户需求三者应为包含关系，即实际技术水平及应用程度能够满足用户的需求。当这种包含关系出现变化时，就会出现用户需求无法满足，产品推广受到技术水平制约的问题。

为了对电动汽车技术成熟度进行科学合理的评价，结合系统工程的方法，遵循科学性、全面性、可操作性、关键性、可比性等原则来构建电动汽车技术成熟度评价指标体系。结合文献研究、现状调查、专家咨询等，利用科学的数学工具对各因素进行分析与判断，找出其中的关键性因素，通过分析关键因素来达到由点到面，带动全局的目的。本研究采用能够描述电动汽车技术成熟度的重要性因素作为依据，根据电动汽车实际运行数据内容项及分析项，结合电动汽车行业内关注比较度较高的电动汽车性能，构建电动汽车技术成熟度指标体系，如表 1.4 所示。

表 1.4 电动汽车技术指标体系

	一级指标	二级指标	三级指标
成熟度评价指标体系	整车性能	续航里程	-
		驱动效率	
		制动回收效率	
	电池性能	低温容量衰减率	-
		电池组温度极差	
	经济性能	整车能耗	常温整车能耗 低温整车能耗

	一级指标	二级指标	三级指标
		空调能耗	高温整车能耗
			空调制冷能耗
			空调制热能耗
	动力性能	最大速度	-
		0-100 加速时间(s)	
		最大爬坡度	
	安全性能	涉水安全	-
		人体电磁防护	
		电池系统防水	
		电磁辐射	
	路况适应性	畅通路况适应性	70km/h
			50km/h
			30km/h
		时走时停路况适应性	-
	驾驶行为适应性	28-30km/h 适应性	-
		43-45km/h 适应性	
		58-60km/h 适应性	

本研究中采用电动汽车私人用户实际运行的数据对电动汽车的性能进行客观的分析评价，但由于数据的局限性，无法做到对全部的性能指标项进行分析，故分析仅针对指标体系中的整车性能、电池性能、经济性能、路况适应性以及驾驶行为适应性等可量化、易解读的指标项。

首先采用实际技术参数，从技术水平角度进行技术成熟度客观评价，结果如下表所示。其中，北汽 EU260 的总体评分较高，其次为比亚迪 E6。其中评分最低的车型为北汽 EV150，主要原因在于 EV150 属于较早车型，其续驶里程较短且其驾驶行为适应性评分低。

表 1.5 样本车型评价结果对比表

	整车性能	电池性能	经济性能	路况行为适应性	驾驶行为适应性	总性能
EV150	41	65	84	65	1	58
EV160	45	78	83	84	72	69
EV200	63	88	92	83	32	77
EU260	74	98	95	91	100	89

E50	49	98	99	79	60	78
腾势	76	81	95	96	29	80
eQ	65	45	94	81	67	71
iEV4	40	59	100	78	59	65
iEV5	46	88	94	88	73	73.4
E6	80	93	85	91	68	83

其次，从用户需求与体验角度进行技术成熟度主观评价。考虑到用户对于电动汽车技术水平及成熟度的关注点具有显著差异，同时限于用户的专业水平，不可能掌握全面的指标作为评价依据。因此本研究选取北汽旗下 EV150，EV160，EV200 和 EU260 四款车型作为研究对象，由其车主参与进来对技术成熟度进行主观评分。筛选出的指标包括续航里程、低温容量衰减率、常温整车电耗、低温整车电耗、高温整车电耗、空调制冷电耗、空调制热电耗指标项。用户对车辆的主观评价综合得分如图 1.2 所示。从用户对四款车型的主观评价中可以看出，除低温和高温的整车电耗外，用户对车辆的续驶里程、低温容量衰减率、低温电耗以及空调能耗的评分均较低，说明从用户的角度来看，四款车型在部分技术方面尚未满足用户需求，即相关技术成熟度有待改善。但是横向对比北汽旗下四款车型，EU260 的技术成熟度评分无论是主观评分还是客观评分都是最高的，这也反映出车型更替的同时技术成熟度不断提升，新技术正在逐渐的更好满足用户需求。这也是技术成熟度评价的目的所在，即通过客观、系统评价，寻找技术成熟度改善的关键，推动电动汽车技术发展和市场推广。

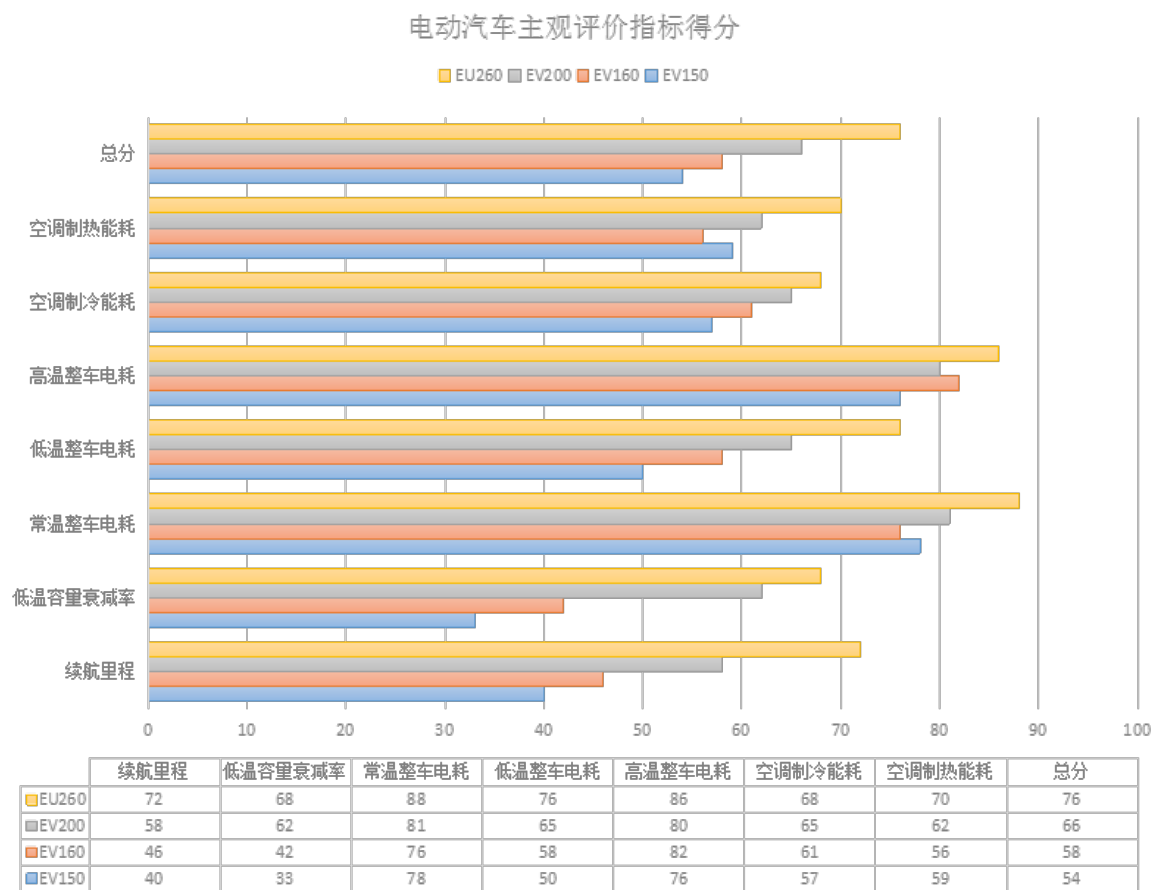


图 1.2 电动汽车主观评价指标得分

二、数据来源与初步分析

数据采集是本研究开展的基础。本研究征集了北京市 10 款车型共 52 台私人用户纯电动汽车作为采集样本，开展为期一年的 10Hz 高频运行数据采集工作。数据采集由 OBD 接口或 CAN 总线读取，包括 GPS 数据、驱动电机数据、动力电池数据、驾驶行为数据等。此次采集数据的样本车辆在采集期内共行驶 52 万公里，每车平均行驶里程 10500 公里。原始数据经过清洗、重构等预处理环节，提取出电动汽车出行特征和充电行为特征，并为后续的能效特征、运行特性、工况分析和驾驶行为分析等研究提供良好的数据基础。

2.1 数据采集工作流程

数据采集是本项目的重要工作，项目数据采集环节流程如图 2.1 所示，分为四个部分完成：志愿者征集与签订协议、数据采集终端安装、数据解析与格式转换、数据存储与共享服务。

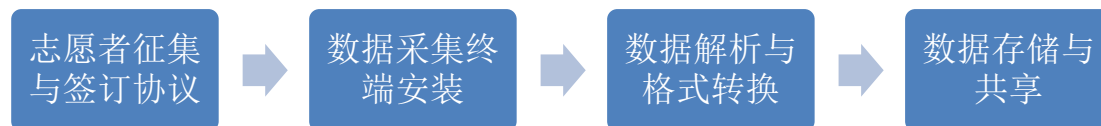


图 2.1 数据采集流程

2.1.1 志愿者征集

在北京市内征集电动汽车私家车主作为项目志愿者，综合考虑了北京市电动汽车各车型市场占有率、典型代表以及项目需要，选定了 10 款主流电动汽车车型（北汽 EV150、EV160、EV200、EU260、荣威 E50、奇瑞 eQ、江淮 iEV4、江淮 iEV5、腾势 Denza、比亚迪 e6）进行私人乘用车志愿者征集以及数据采集工作。志愿者征集途径主要为现场招募、网络征集。现场招募采用发放宣传单和直接向车主介绍项目的方式进行，网络宣传主要通过向各大网站（易车网、汽车之家、爱卡汽车等）发布招募帖以及微信推送等方式进行。对志愿者的招募按照以下要求进行：

- 自愿参加该志愿者招募活动；

- 参与者持有合法驾驶证件；
- 驾驶品质良好，无或极少发生交通事故；
- 参与者拥有指定品牌电动汽车的长期使用权，且车辆处于可行驶状态；
- 周次出行频率不少于 6 次，月行驶里程不少于 1000km。

数据采集过程中，由于数据采集时间较长且进行数据采集过程具有阶段性，所以为了使项目能够顺利进行，同时可以保证数据提供与使用双方的权利与义务的合法化，志愿者与项目组签订数据使用协议。协议中指出了双方所拥有的权利与义务，同时双方需遵守协议内容并对数据进行保密。在测试期内，项目组为每位志愿者提供一定的充电补助。

2.1.2 数据采集设备

数据采集系统安装在志愿车辆上，用以收集电动汽车的使用数据和驾驶信息。数据采集系统所采集的主要信息包括：车辆位置（经纬度和海拔）、车速、驱动电机的转速和转矩、动力电池的电压、充放电电流及荷电状态 SoC 等。

数据收集是本研究的基础，其采集系统如图 2.2。通过安装在车上的数据采集终端收集车辆的运行数据，这些数据的记录器从每个车辆的控制区域网络总线 (CAN) 读取信息并将这些数据存储在内部存储器中。此外，使用全球定位系统 (GPS) 设备收集每个车辆的位置和时间信息，该信息也存储在内部存储器中。GPS 数据和 CAN 总线信息的记录频率均为 10Hz（即数据采样周期为 0.1s）。



图 2.2 数据采集系统结构

项目中采用的数据采集设备分为四个部分：数据采集终端（如图 2.3 所示）、GPS 模块、存储卡、OBD 转接头（用于与车载 OBD 对接）。OBD（On-Board Diagnostic），中文为车载诊断系统，其作用为监控发动机和尾气后处理系统，除

此之外，当车辆出现故障时，OBD 会将故障信息存进存储器并发出警告。数据采集终端处理数据并输出至存储卡 SD 卡，其输出指定格式文件为*.iwdz。GPS 模块输出经纬度、海拔及时间信息。SD 卡安装在数据采集终端内部，大小主要为 4G、8G、32G。



图 2.3 数据采集终端

2.1.3 设备装车方案

项目征集了 10 种不同的车型作为测试车辆，由于不同的车型数据传输位置不同，项目组在进行设备安装时也针对不同的车型制定了相应的设备安装方案。

北汽 EV、EU 系列车型已经安装有数据终端，分别位于副驾驶座下和后备箱隔板顶部，走线均在车身内部完成。其中 EV150 车载 SD 卡存储空间为 4G，其他车型车载 SD 卡存储空间为 8G。除北汽外，荣威 E50 车内也安装有数据采集终端，位于副驾驶座下，走线在车身内部完成，SD 卡存储空间为 4G。

图 2.4 中左侧为北汽 EV 车型和荣威 E50 采集终端安放位置，右侧为北汽 EU 车型采集终端安放位置。

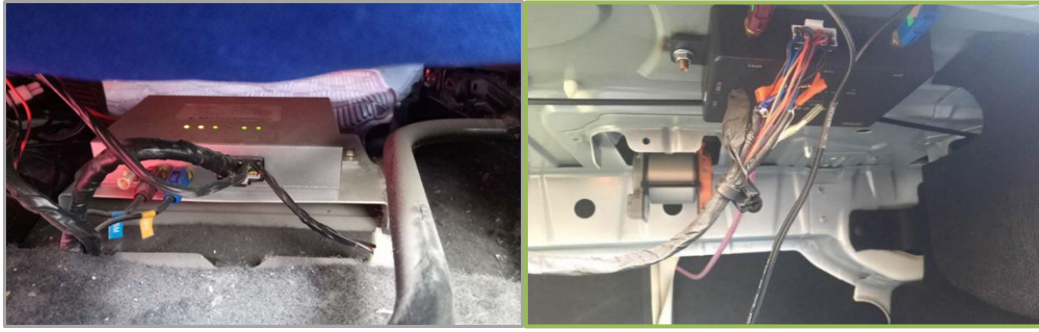


图 2.4 部分车型采集终端安放位置

腾势车型在 OBD 接口处可以输出数据，但接入设备时需要不间断的发送相应的指令才能发送出数据信息，故摒弃较为繁琐的 OBD 接口方案。采用的装车方案为在车辆原有的数据采集终端与传输线的接口处接入我们的设备，设备采集终端所需供电采用车载点烟器进行供电，考虑到点烟器接口的数量，我们为车主接入附加的分线器，确保车主日常需求的满足，走线方式为在副驾驶脚垫下方走线，终端安装在副驾驶座下方，车载 SD 卡存储空间为 32G。该方案可以在不发送任何指令的情况下获得车辆的运行信息。图 2.5 为腾势车型实际装车方案：

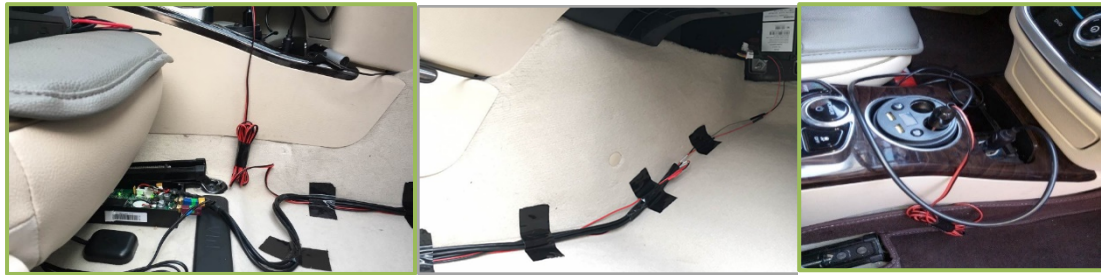


图 2.5 腾势采集终端安装方案

奇瑞 eQ 车型以及江淮 iEV4 和 iEV5 车型在其 OBD 接口处可以采集到项目所需的数据信息，故其装车方案为 OBD 口接线。使用 OBD 转接头，在驾驶座侧面走线，终端安装在驾驶座下方。车载 SD 卡为 32G。图 2.6 为奇瑞 eQ 车型实际安装与调试。



图 2.6 OBD 接口接线方案

比亚迪 e6 的装车方案比较复杂，由于在 OBD 口接收不到信息，项目组采用的方案为通过在电池管理系统（BMS）的接口上测试，找到了 CAN 总线对应的针脚，接入数据采集终端并完成数据调试，从而确定将数据采集终端安装在 BMS 接口的方案。

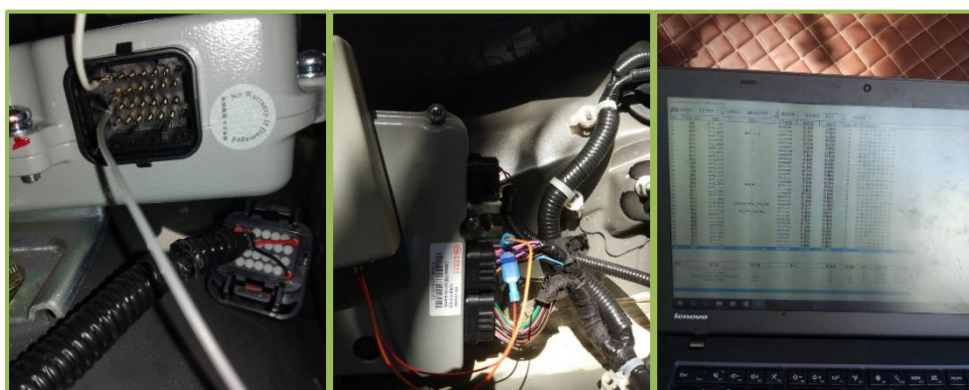


图 2.7 比亚迪 e6 装车方案

2.1.4 数据解析与格式转换

不同车型中取得的原始数据信息格式不同，且取得的原始数据不能直接打开，为了解决这一问题，需要对不同格式的原始数据进行转换。

从 SD 卡中读取的原始数据主要为*.inr、*.inz、*.iwdz 三种格式，*.iwdz 格式的文件在转换过程中需要使用通讯协议才能进行转换，该格式的文件转换需要进行两步操作，首先调入协议文件，将*.iwdz 转换为*.inr 格式，然后将*.inr 格式转换为*.xls 格式。所获得数据中，*.inr、*.inz 两种格式可以通过数据转换软件直接转换为*.xls 格式，转换过程如图 2.8 所示。

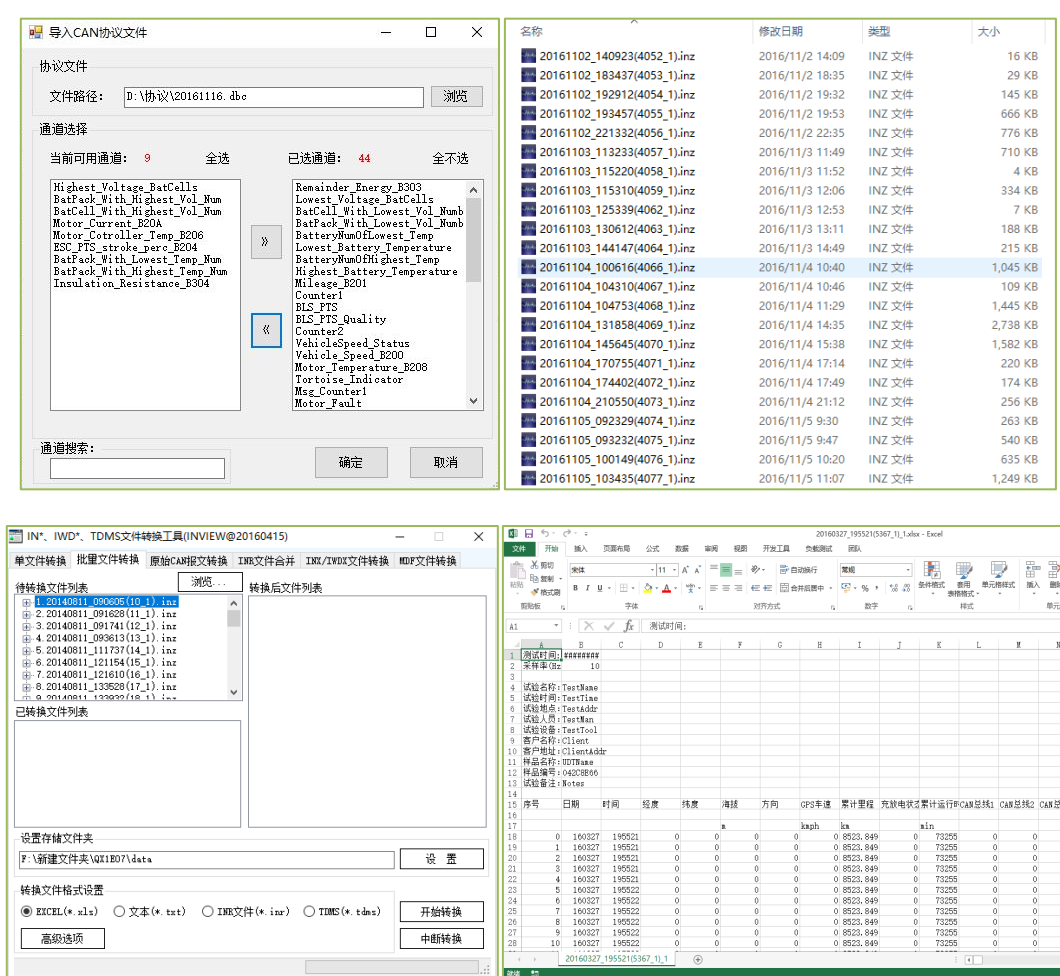


图 2.8 数据解析与格式转换

此外，对数据文件的存储格式进行优化，将数据格式从 excel 转化为 mat，大大降低了数据存储占用空间，为数据的备份、传输提供可行性条件。调整后数据服务器上的文件存储系统，以“车型—车牌—原始数据、mat 数据、excel 数据”的树状系统存储数据，同时记录数据格式的升级日志。

2.1.5 数据存储与共享服务

由于数据采集过程中数据量较大，且需要同时满足多个客户端的数据上传与数据下载，项目组搭建 FTP 数据服务器。服务器采用 FileZilla 提供的 FTP 构建方案。目前服务器中已经存储 10 种车型，共计 52 辆车的的历史数据。图 2.9 为数据服务器的结构示意图。

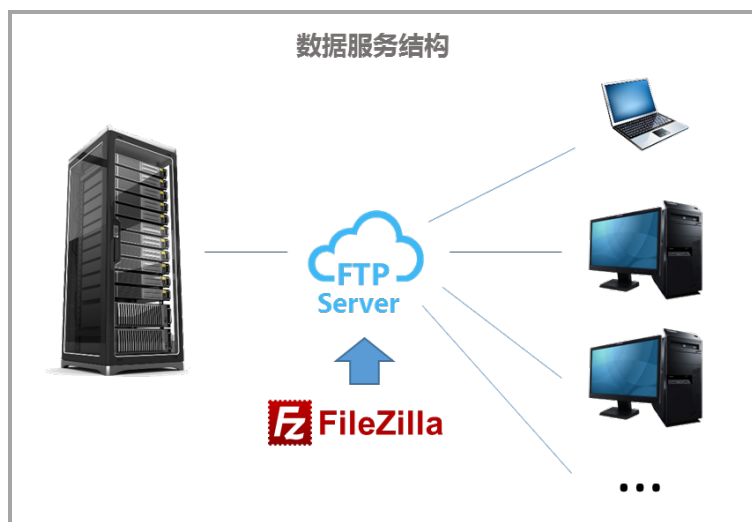


图 2.9 数据服务器结构示意图

2.2 数据内容与覆盖面

目前服务器上存有的车型数据如表 2.1 所示

表 2.1 总体数据描述

序号	品牌	型号	样本车数	时间跨度
1	北汽	EV150	6	2015.06-2017.06
2	北汽	EV160	6	2015.07-2017.06
3	北汽	EV200	6	2016.06-2017.06
4	北汽	EU260	6	2016.03-2017.06
5	上汽荣威	E50	5	2015.01-2016.10
6	比亚迪-戴姆勒	Denza	5	2016.12-2017.12
7	奇瑞	eQ	5	2016.12-2017.12
8	江淮	iEV4	5	2017.03-2017.12
9	江淮	iEV5	5	2017.03-2017.12
10	比亚迪 e6	e6	3	2017.03-2017.12

采集到的数据内容包括车辆的电池、电机、驾驶行为信息以及 GPS 信息。详细数据内容见图 2.10。



图 2.10 数据收集内容

2.3 数据质量示例

根据上节中数据内容，分四个方面对数据的微观形式进行展示，节选行程记录中的一小段数据样本，如图 2.11-2.14 所示。

(1) GPS 数据



图 2.11 GPS 数据示例

(2) 驾驶行为

车速的分辨率在 $\pm 0.5\text{km/h}$ ，踏板开合度的分辨率在 $\pm 0.4\%$ 。

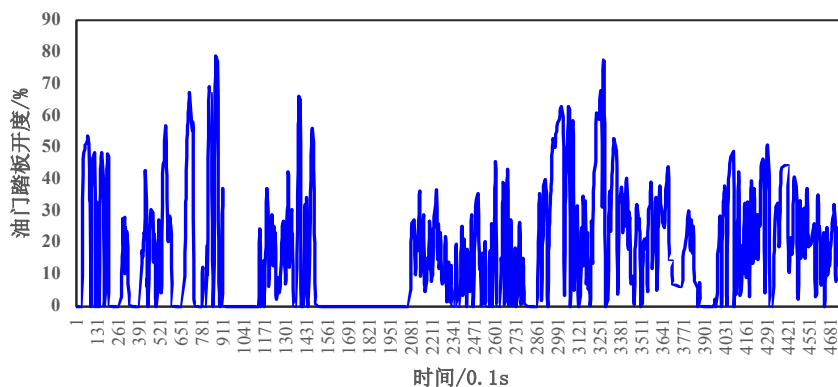


图 2.12 驾驶行为数据示例

(3) 动力电池

电压的分辨率在 $\pm 0.065\text{V}$ ，电流的分辨率在 $\pm 0.01\text{A}$ ，SOC 的分辨率在 $\pm 0.2\%$ ，电池剩余可用容量的分辨率在 $\pm 0.2\text{Ah}$ 。

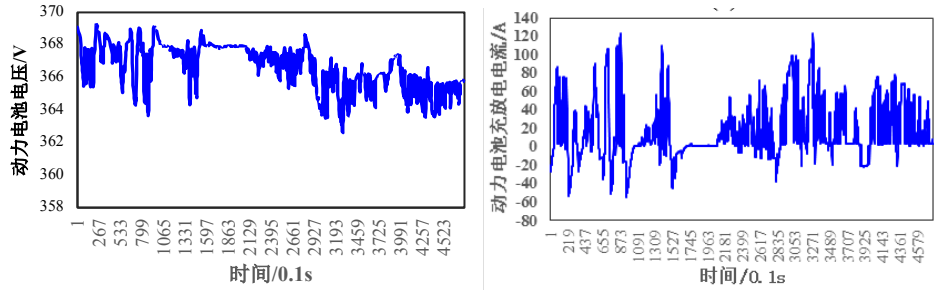


图 2.13 电池数据示例

(4) 驱动电机

电压的采样分辨率在 $\pm 0.5\text{V}$ ，电流采样分辨率在 $\pm 0.5\text{A}$ ，转速的采样分辨率在 $\pm 0.5\text{rpm}$ ，转矩的采样分辨率在 $\pm 0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。

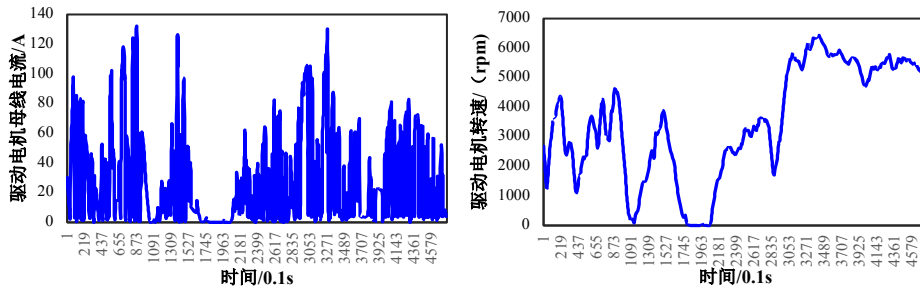


图 2.14 电机数据示例

2.4 使用行为初步分析

基于采集到的实车运行数据进行电动汽车的使用行为分析。一方面，对电动汽车用户进行行为分析可以为后续电动汽车技术成熟度评价提供一定的借鉴，另一方面，电动汽车的使用行为是用户对电动汽车体验的直观反映。研究中对使用行为的分析分为两个方面，一是对电动汽车出行行为的分析；二是对电动汽车充电行为的分析。对电动汽车出行行为的分析可以作为电动汽车用户对里程的需求的判断依据，从而设计和优化电动汽车的参数；对电动汽车充电行为的分析可以建立相关模型，分析和预测电动汽车的充电需求，进而合理引导充电行为，优化电网运行。

2.4.1 出行行为分析

驾驶员的出行行为反映了城市的交通状况和车辆的使用规律。出行行为不仅为政府部门进行交通规划和管理提供了支持，而且为企业和科研机构进行车辆设计和开发提供了科学依据。在这一部分中，研究分析了几种重要的出行行为。

1. 电动汽车出行时间分布

对选取的所有车辆的数据进行了出行起止时间的分析。本研究中，汽车启动后行驶距离超过 1 公里的出行定义为一次有效出行。电动汽车出行的出发时间分布如图 2.15 所示。从图中可以看出，电动汽车的出发时间在一天中有两个明显的峰值，分别为上午 7:00-9:00 和下午 17:00-19:00。其出行结束时间分布与出发时间分布类似，区别在于结束时间要更晚。

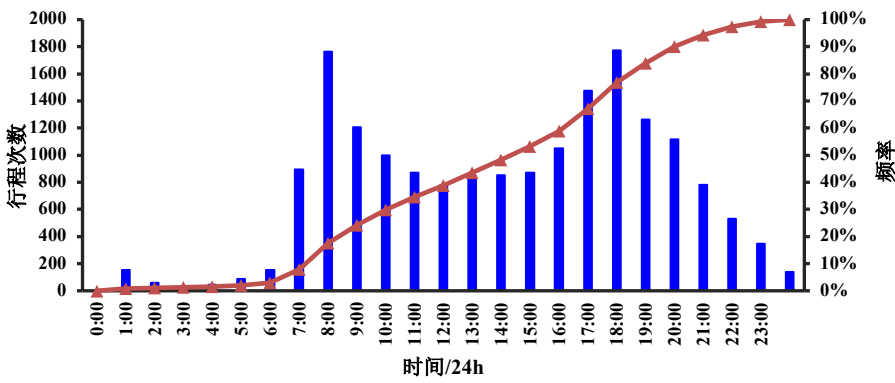


图 0.15 电动汽车出发时间分布

2. 电动汽车出行距离分布

除对电动汽车的出发时间分析之外，研究还分析了电动汽车的日出行次数与出行距离。具体结果如下图所示。

表 2.2 部分出行行为特征

	日均出行次数	单次出行里程（km）	平均行驶里程（km）*
EV150	2.77	13.55	8886
EV160	3.36	11.93	12288
EV200	3.21	17.73	12136
EU260	3.06	16.1	12896
E50	2.26	14.3	7281

腾势	1.86	17.2	11975
eQ	2.41	13.6	6017
iEV4	2.32	16.1	11265
iEV5	1.88	18.4	12068
E6**	-	-	-
平均值	2.57	15.43	10534

注：*平均总里程为每款车型在采集时间内总里程的平均值；

**E6 因数据量较少，无法进行详细分析

2.4.2 充电行为分析

本研究中分析电动汽车的初始充电状态（SoC）数据，对电动汽车进行充电前的电池剩余 SoC 和充电后的电池 SoC 进行分析，得到电动汽车充电前后 SoC 的分布，如图 2.16 所示。从图中得出，电动汽车充电前剩余 SoC 的分布趋于正态分布，其中 53%的充电事件发生在电池剩余 SoC 百分比大于 50%时，只有 8.1%的充电事件发生在电池剩余 SoC 值为 20%或者更低。最值得注意的是，在所有的充电事件中有 12.3%的充电事件发生在电池剩余 SoC 百分比大于 80%时，造成这一现象最可能的原因是用户对电动汽车的续驶里程存在焦虑心理。在实际充电过程中，绝大部分的车辆充电后的 SoC 值为 100%。

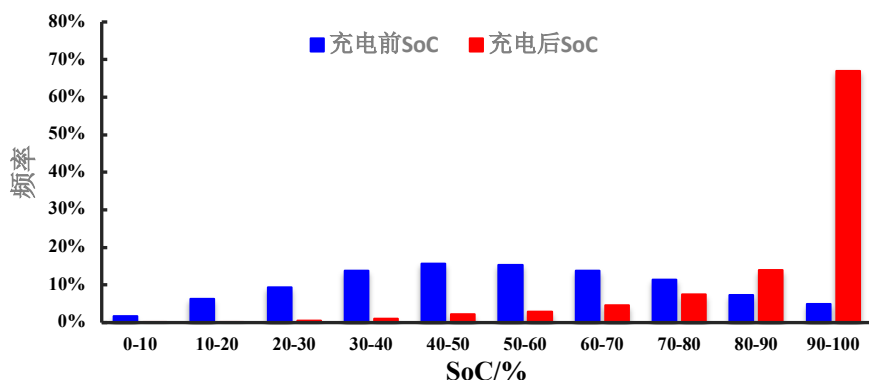


图 2.16 充电前后 SoC 变化

三、能效特性分析

在电动汽车的发展过程中，电动汽车的续航里程始终是影响电动汽车发展的重要因素。而在动力电池容量一定的前提下，电动汽车续航里程主要受行驶时的电耗影响。在行驶时尽可能的降低车辆的能耗，提高车辆的运行效率，可以有效的提高电动汽车的续驶里程。因此，对电动汽车各部分的能效进行分析进而优化电动汽车来降低电动汽车的能耗，提高各部件的效率，是提高电动汽车续驶里程的有效途径。影响电动汽车能效的因素较多，例如环境气温、行驶工况、道路状况和驾驶行为等。本章利用实测数据，对电动汽车能耗的温度适应性、主要部件能耗特征进行分析，并将能耗实测数据与公告参数进行对比。

3.1 温度适应性分析

纯电动汽车动力电池受温度影响显著，尤其在低温环境下，充电效率和电池容量都与常温环境具有明显差异。加之冬夏季节空调运行需要耗费额外电量，直接导致续航里程降低。因此，温度适应性是电动汽车用户较为关心的问题，也是本研究重点关注的内容。

3.1.1 不同温度下的电动汽车能耗对比分析

单位里程能耗被经常用来评价电动汽车的经济性，但是不同车型的纯电动汽车总质量相差很大，通常，电动汽车的质量越大，其能耗值就会越高。因此，为排除质量对电动汽车能耗的影响，方便进行不同车型间的能耗对比，采用比能耗对电动汽车的能耗进行量化。本研究对实车数据中的电池电压、电池放电电流、行车速度数据以及各车型的质量参数进行计算，得到不同温度下各车型的比能耗分析结果。

图 3.1 和表 3.1 为所有车型在不同温度下的比能耗对比。从数据统计结果可以看出，样本车型比能耗平均为 $10.82\text{kWh}/(100\text{km}\cdot\text{t})$ ，在 9.27 至 12.3 之间分布；电动汽车的能耗受温度的影响较大，低温和高温环境下都会增加电动汽车的能耗，以常温环境比能耗为基准，高温和低温环境比能耗将分别增加 8% 和 33%。温度

对比能耗的影响主要是受空调耗能以及不同环境温度下电动汽车传动部件效率变化等因素的影响。另外，各车型的比能耗分布随温度的分布特征基本一致，但车型之间存在一定差异，腾势车型的比能耗最低，荣威 E50 的比能耗要高于其他车型。

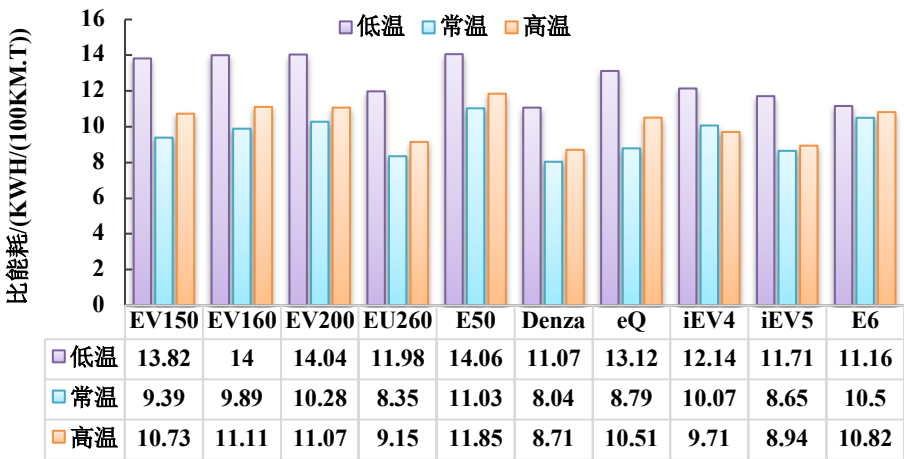


图 3.1 不同温度下各车型的比能耗

表 3.1 不同温度下各车型的比能耗统计

	低温	常温	高温	平均值
EV150	13.82	9.39	10.73	11.31
EV160	14	9.89	11.11	11.67
EV200	14.04	10.28	11.07	11.80
EU260	11.98	8.35	9.15	9.83
E50	14.06	11.03	11.85	12.31
eQ	11.07	8.04	8.71	9.27
iEV4	13.12	8.79	10.51	10.81
iEV5	12.14	10.07	9.71	10.64
Denza	11.71	8.65	8.94	9.77
e6	11.16	10.5	10.82	10.83
平均值	12.71	9.5	10.26	10.82

图中红色表示车型在不同温度环境中比能耗最大值，浅绿色表示最小值，黄色表示中间值。

3.1.2 不同温度下的电动汽车整车效率对比分析

电动车辆动力系统由电池组、逆变器、电动机、机械传动系统构成。当电动车充电时，电能通过充电桩为电池组充电，而当能量最终转化为机械能到车轮处

推动车辆前行时，在以上各个环节都会出现能量损失，如图 3.2 所示。提高电动车的工作效率，可通过对比实际运行数据中各个部件工作效率情况和实验室实验结果进而得到各部件节能潜力。数据中没有充电桩数据、逆变器数据及传动系统数据，但可以根据数据中的电池充放电电流、电池电压、电机母线电流、电机母线电压、电机转速和转矩以及车辆的行驶速度，得到样本车辆从电池到电动机工作效率、电动机工作效率及从电动机到车轮的工作效率。

图 3.3 为电动车辆从电池组到电动机能量传递效率的分析结果，从图中可以看出，在电池组到电机的能量转换过程中，常温环境下各车型从电池组到电机的能量传递效率最高，低温与高温环境下效率要稍低一些，其主要原因为低温和高温环境下空调等辅助系统的耗能增加。

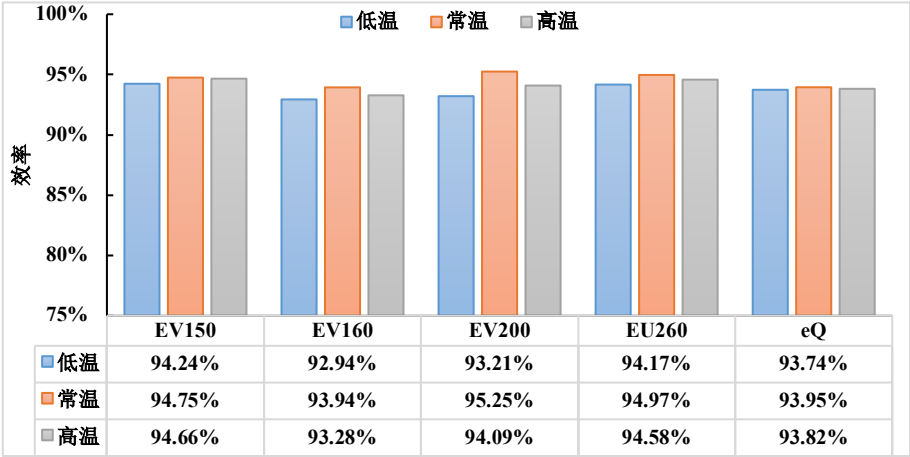


图 3.3 不同温度下电池到电机的能量效率

图 3.4 为电动车辆电动机的能量传递效率分析结果。从图中可以看出，在电动机的能量传递效率中，不同的环境温度下各车型的电机转换效率存在较大差异，eQ 车型的电机效率最高。同一车型在不同的环境温度下的电机效率不同，在常温环境下的电机效率要大于低温和高温环境。

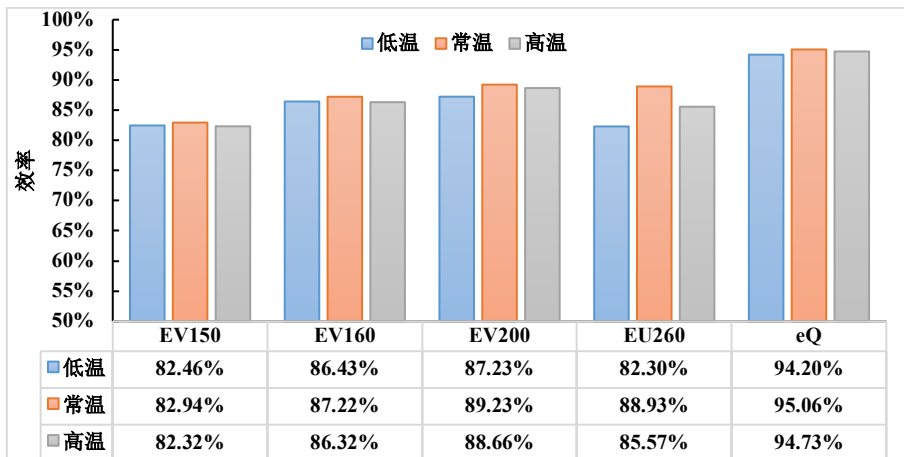


图 3.4 不同温度下各车型的电机效率

图 3.5 为电动车辆从电机输出端到电动汽车轮端的能量传递效率分析结果。从图中可以看出，在从电机输出端到电动汽车轮端的能量传递效率中，腾势的能量传递效率最高。同时，各车型在不同的环境温度下从电机输出端到电动汽车轮端的能量传递效率大致情况为低温环境下从电机端到轮端的效率下降幅度最高，高温环境下会有所下降，但幅度不大。因此，电动汽车的机械传动系统对低温的敏感性较高，在电动汽车的整车设计过程中可以优化电动汽车的机械传动系统。

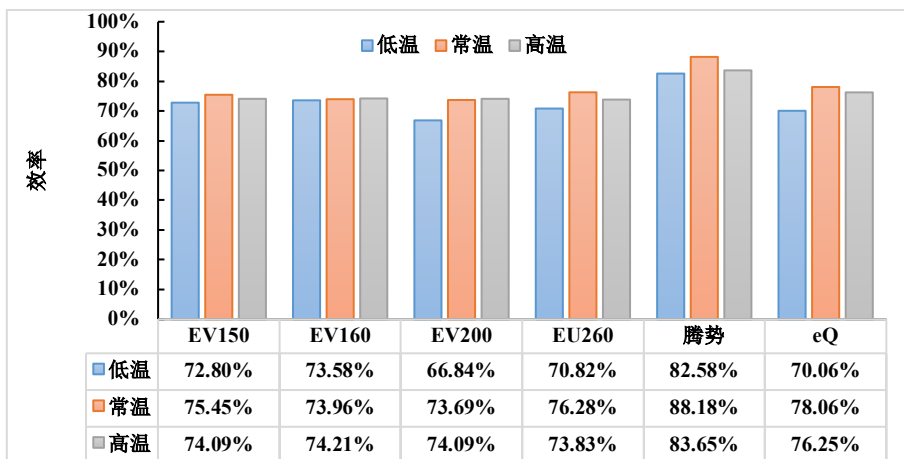


图 3.5 不同温度下各车型的电机到轮端效率

图 3.6 为电动汽车整车效率图。从图中可以看出，同一车型在低温环境下的效率要低于其他温度，因此，低温环境对电动汽车整车效率的影响较大。由整车效率计算公式可得，电动汽车的整车效率主要取决于三部分，一是电池到电机的能量传递效率，二是电机的效率，三是电机到车轮的能量传递效率，在进行传动系统优化时，要针对三个部分分别进行优化，且针对三者的分析可以得到，低温

对各部分效率的影响较大，因此在进行传动系统优化设计时要提高传动系统的低温适应性。

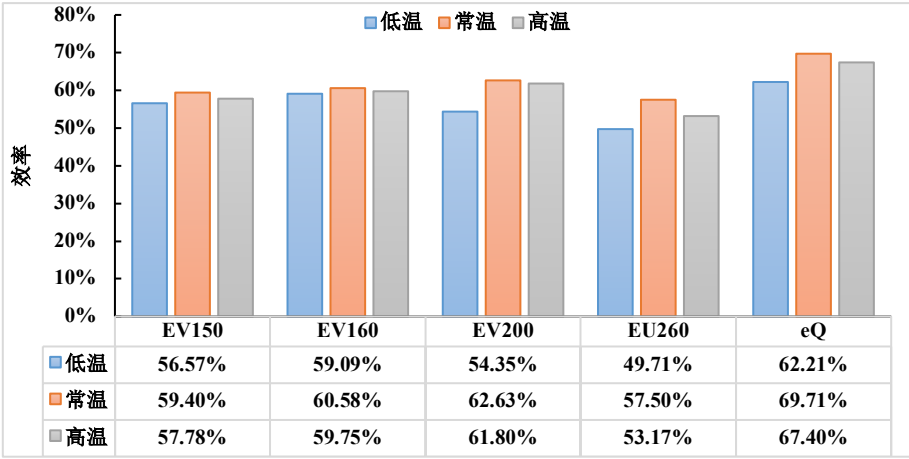


图 3.6 不同温度下各车型的平均效率

3.1.3 不同温度下的电动汽车制动回收效率对比分析

再生制动是电动汽车在保证制动效能的前提下，通过能量转换装置把一部分的能量转化为电能存储起来，从而达到回收制动能量的一种技术。电动汽车在运行状态时，其速度和加速度不停地变化，制动功率也在不停变化。当车辆处于制动状态时，能量从电动汽车的轮端流向电机。车辆的制动回收效率同传动效率一样，也受环境温度的影响。十款车型的制动回收效率如图 3.7 所示。各车型制动回收效率为 29.21%，各车型间的制动回收效率存在一定差异，但温度对其影响趋势一致，即常温环境回收效率>高温环境>低温环境，分别为 32.55%、29.59%和 25.49%。横向对比来看，iEV4 车型在低温环境下制动回收效率极低，与用户进行沟通发现该车型在低温环境下需进行一段里程的预热后才会进行制动回收。

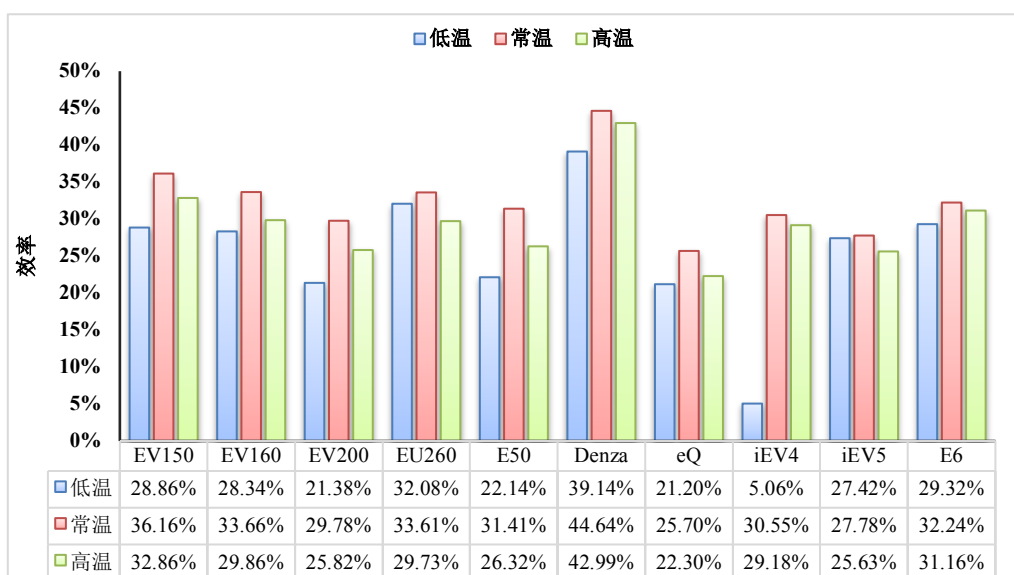


图 3.7 不同温度下各车型的制动回收效率

3.2 主要部件技术分析

纯电动汽车电量消耗的主要部件是电机，由电能转化为动能供车辆行驶。同时其他部件也因热散失或者其他功能消耗电能，如空调、逆变器等。本节将重点对电池、电机和空调系统三个关键部件进行能耗分析。

3.2.1 电池分析

动力电池作为纯电动车辆的唯一动力来源，其特征参数（如内阻、容量）直接决定着汽车的驾驶性能及使用寿命。通过对实车动力电池运行数据（电压、电流、温度、荷电状态）的分析，可以揭示实际应用环境下电池组的内阻水平、温度场分布及容量随温度的变化情况，对电池组的优化控制及能量管理具有重要指导意义。

表 3.1 中列出了所有车型动力电池的材料、等效欧姆内阻、平均温度极差、低温容量衰减率和劣化容量衰减率。需要说明的是：在计算等效欧姆内阻时，使用的是在-5~35℃区间的等效均值，它一方面反映了动力电池的内阻水平，另一方面也涵盖了温度对欧姆内阻的影响，是较为全面、综合的内阻评价指标。

从电池材料看，锂离子电池是目前电动汽车中使用最为广泛的动力电池。

从等效欧姆内阻角度看，EU260、EV200 的内阻较低，仅分别为 45 $m\Omega$ 和 65 $m\Omega$ 。EV150、EV160、E50、iEV5、Denza 内阻水平在 95~150 $m\Omega$ 区间。eQ 和

iEV4 的等效欧姆内阻较高，其中 iEV4 最高，高达 288 mΩ。

从平均温度极差角度看，所有车型的动力电池温度管理系统的热均衡性都较好，平均温度极差都在 2.5℃ 以下，其中 EU260 的热均衡性最优，平均温度极差为 1.13℃。而江淮 iEV4 的平均温度极差最大，达到 2.34℃。

从低温容量衰减率看，荣威 E50 的温度适应性最佳，低温下的容量衰减仅为 2.01%，而北汽 EV150 的电池低温性能较差，低温容量衰减达 6.32%。总体来看，三元锂材料电池的低温容量衰减较磷酸铁锂电池低。

从劣化容量衰减率看，荣威 E50 的抗老化性最佳，1 年的容量衰减仅为 1.20%，而奇瑞 eQ 的电池老化较为严重，劣化容量衰减达 4.38%。总体来看，三元锂材料电池的劣化容量衰减较磷酸铁锂电池严重。

表 3.1 动力电池内阻及温度极差对比

车型	动力电池材料	等效欧姆内阻(mΩ)	平均温度极差(℃)	低温容量衰减率(%)	劣化容量衰减率(%/年)
EV200	三元锂	65	1.93	3.15	3.66
EV150	磷酸铁锂	104	2.05	6.32	1.30
EV160	磷酸铁锂	102	1.49	5.59	1.79
EU260	三元锂	45	1.13	2.27	4.07
E50	三元锂	144	1.23	2.01	1.20
eQ	三元锂	170	-	5.54	4.38
iEV4	磷酸铁锂	288	2.34	6.10	-
iEV5	三元锂	132	-	3.81	-
Denza	磷酸铁锂	97	2.10	4.13	2.09
e6	磷酸铁锂	-	1.35	-	-

注：‘-’ 表示由于数据原因无法计算或给出可靠值。

3.2.2 电机分析

电机作为电动汽车传动系统的关键部件之一，其效率性能指标对电动汽车的合理有效使用具有重要的意义。应用于电动汽车的驱动电机工作负荷和工作转矩变化范围大且变化剧烈，因此，高效电机要求之一是在较宽的转矩和转速范围内都有较高的工作效率。故研究电动汽车电机在驱动工作区的效率具有重要的意义。

电机在测试过程中已经得到其效率 map 图，但测试时电动汽车处于测试工况，对于实际运行过程中电机的效率并不完全适用，因此，根据电动汽车实际运行工况得到电机的实际运行效率 map 是很有必要的。根据数据中的电机输入电流与电压，电机转速与转矩信息，得到电动汽车电机在实际运行效率 map 图。图 3.10 为四种车型的实际运行效率 map 图，其中(a)(b)(c)(d)分别为 EV150、EV160、EV200 和奇瑞 eQ 的驱动效率 map 图。

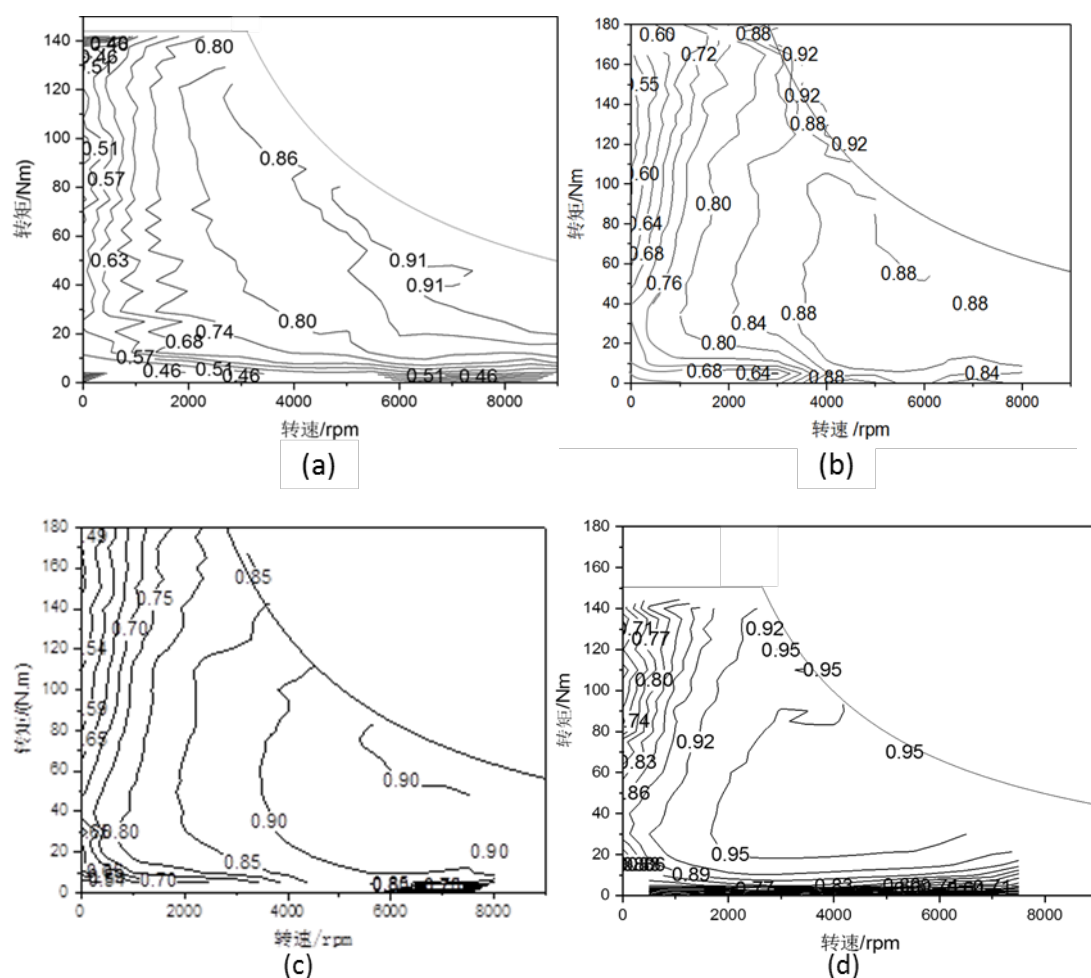


图 3.10 不同车型的驱动效率 map 图

对运行数据中电动汽车电机在驱动状态时的转速、转矩数据点进行频率统计，统计结果显示，在实际运行过程中，电动汽车电机转速基本在 6000rpm 以下，转矩基本在 120N.m 以下。从图 3.10 可以得到，EV150 的高效率区间(大于 80%)要明显小于其他车型，结合电动汽车在实际运行过程中的转速转矩分布，其电机参数可以进一步进行优化，提高电机的实际运行效率。其他车型的高效率区间分

布较大，但极高效率区间仍然集中在高转区域，为了进一步提高电动汽车电机的效率，必须考虑行驶的工况要求，在所选择的驱动电动机满足最高车速、加速能力等动力性能指标的前提下，使驱动电机在正常行驶工况下效率尽可能的高。如果根据驱动电机的工作特性和整车性能参数重新优化传动比，使电机尽可能多的运行在高效区，对整车性能也将会有极大的帮助。

3.2.3 冷/热空调分析

电动汽车的能量来源只有车载动力电池，而动力电池不仅要为电动汽车驱动系统提供驱动能量，还要为电动汽车电动助力转向系统、空调系统等辅助系统提供能量。但动力电池的容量是有限的，而空调系统功耗占电动汽车总辅助系统功耗的 60%~75%，由此直接导致了电动汽车续航里程的降低。为了研究空调系统对电动汽车整车电耗的影响，对四款车型的空调电耗进行分析。

四款车型的电动汽车均采用电动压缩式制冷—电加热采暖空调系统，其中，电动压缩式空调制冷的基本原理是电池组的直流电经逆变器为空调压缩机驱动电机供电，空调电机带动压缩机旋转，从而形成制冷循环，产生制冷效果。对于纯电动汽车来说，电加热采暖空调系统没有能够利用的发动机余热，其制热只能通过 PTC 和电热管加热实现。利用运行数据中的动力电池充放电电流、动力电池电压、运行速度、PTC 加热电流以及电动压缩机转速等数据项内容计算得到电动汽车空调系统对电动汽车能耗的影响。

图 3.11 和图 3.12 分别为电动汽车空调系统制冷能耗分析和制热能耗分析结果图。选取四款车型同一月份的数据，分别计算电动汽车在实际运行过程中开启空调状态下的单位里程能耗和未开启空调状态下的单位里程能耗。电动汽车在冬季行驶状态下开启电动空调进行制热，四款车型的整车电耗均上升，相比于未开启空调时的单位里程能耗，四款车型的单位里程能耗依次上升了 38%，39%，38%，30%。而在夏季行驶状态下开启空调进行制冷，四款车型的整车电耗也有不同程度的上升，依次上升了 34%，37%，38%，29%。由此可见，空调系统的使用会很大程度上降低电动汽车的经济性，进而缩短电动汽车的续驶里程。对比四款车型的能耗上升率可以发现，空调系统工作时，EU260 的能耗上升率相对较低，针对采集到的数据项分析，其可能的原因为 EU260 对其控制系统进行了优化，且

在制热条件下，动力电池会对 PTC 进行加热，减少 PTC 的耗能量。

单位里程能耗的增加直接导致的是续驶里程的减少，而续驶里程是电动汽车一项十分重要的性能，因此，为电动汽车配备高效节能的空调系统有助于电动汽车续航里程的稳定，对电动汽车的发展推广具有重要的意义。

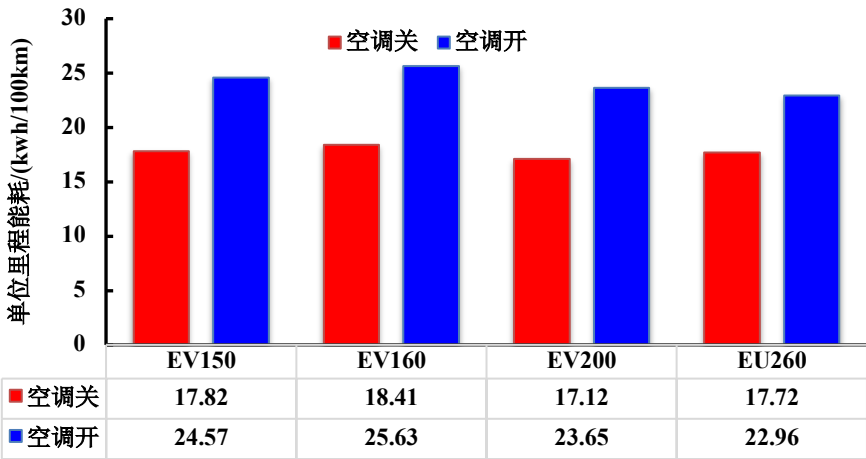


图 3.11 电动空调制热能耗分析

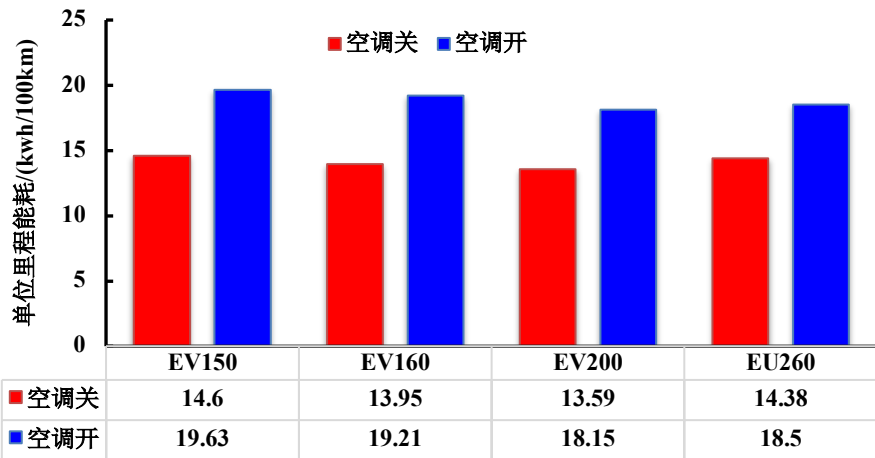


图 3.12 电动空调制冷能耗分析

3.3 车型参数与公告参数的对比

根据国标 GB/T 19596-2004 《电动汽车术语》，能量消耗率的定义如下：电动汽车经过规定的试验循环后对动力蓄电池重新充电至试验前的容量，从电网上得到的电能除以行驶里程所得的值。根据国标 GB/T 18386-2005 《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法》，确定能量消耗率和续驶里程应该使用相同的试验程序，试验程序包括以下 4 个步骤：

- 1) 对动力蓄电池进行初次充电，测量来自电网的能量；

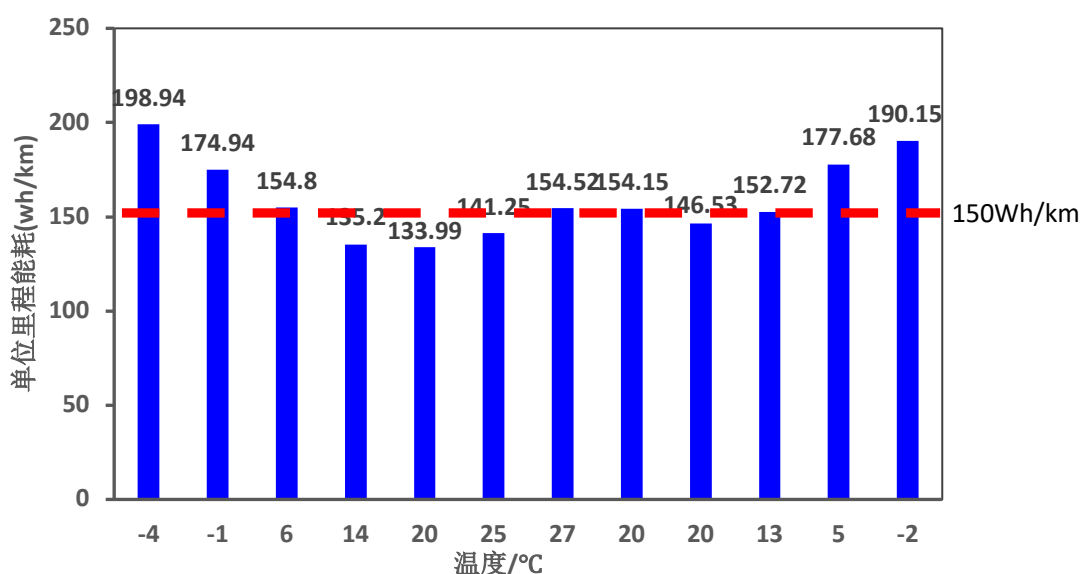
- 2) 进行工况或等速条件下的续驶里程试验;
- 3) 试验后再次为动力蓄电池充电, 测量来自电网的能量;
- 4) 计算能量消耗率。

在每两个步骤执行之间, 如果车辆需要移动, 不允许使用车上的动力将车辆移动到下一个试验地点 (不允许使用制动能量回收)。

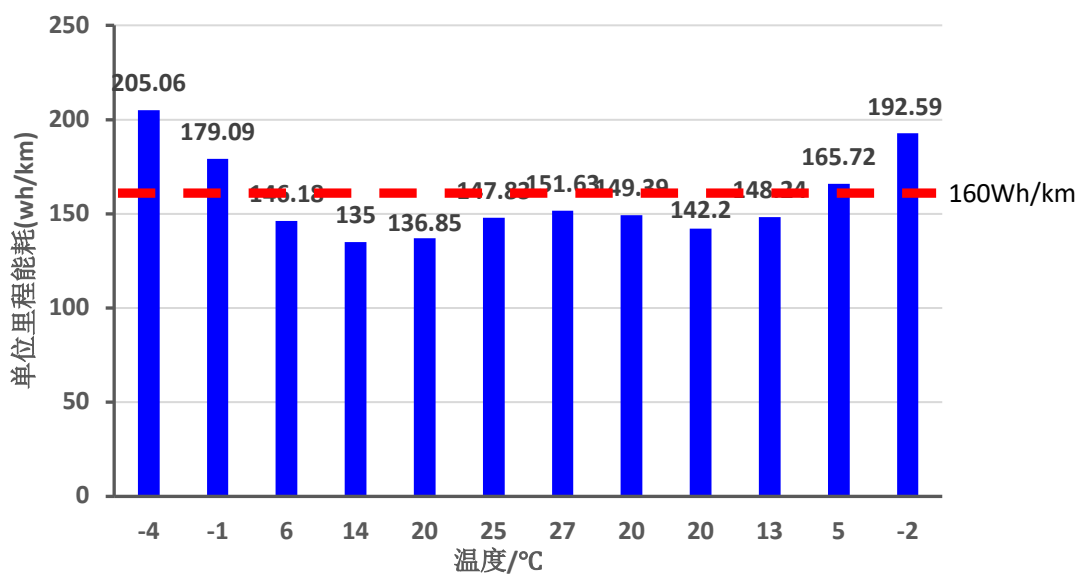
续驶里程测试分为两种方法: 一种是利用底盘测功机和试验循环曲线进行的工况法, 一种是在试验道路上进行的等速法。其中工况法所使用的试验循环曲线, 每个国家根据自己的实际情况会有所不同, 我国和欧洲采用的是 NEDC (New European Driving Cycle) 工况: 即四个城市工况加上一个市郊工况。依据《北京市示范应用新能源小客车符合性验证实施方案》, 续驶里程测试的环境温度为常温 (20°C - 30°C), 试验方法为工况法。

而在北京地区的实际工况下, 一年内的环境温度变化范围通常会在大于 20 - 30°C , 因此在实际运行过程中的实际能耗与公告参数会有所区别。下面以几个车型为例对比公告中的能耗数据与实际测试数据。

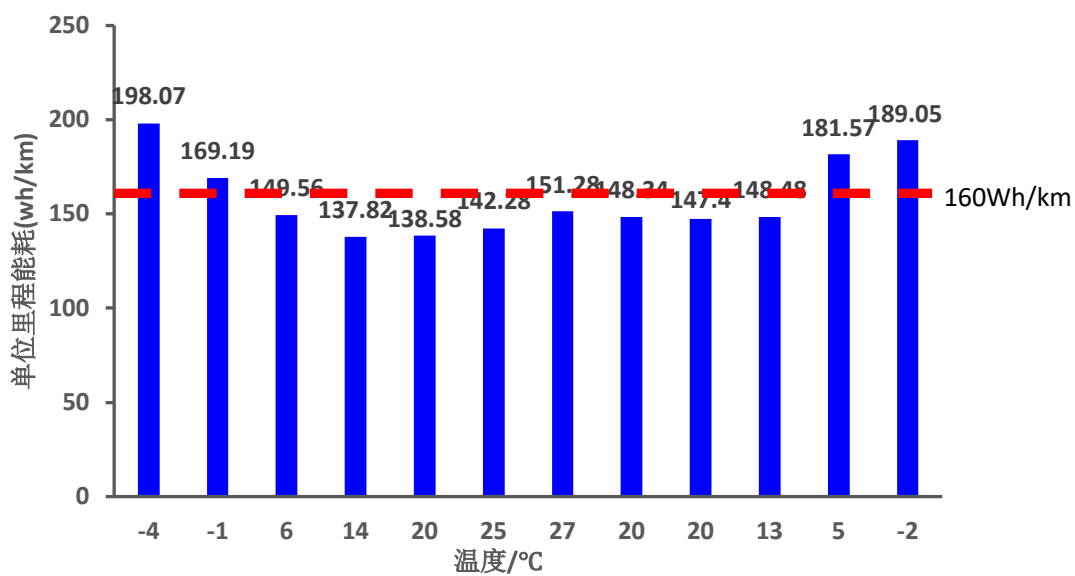
本项目数据条件中具备了计算电池端输出能量的累积, 以此作为能量消耗率计算的分子, 但由于实际车辆运行在非等速工况, 与国标的测试标准有所出入, 且电动车辆在频繁加减速过程中的经济性比等速工况要差, 故实际中的单位里程能耗均大于或接近公告值。



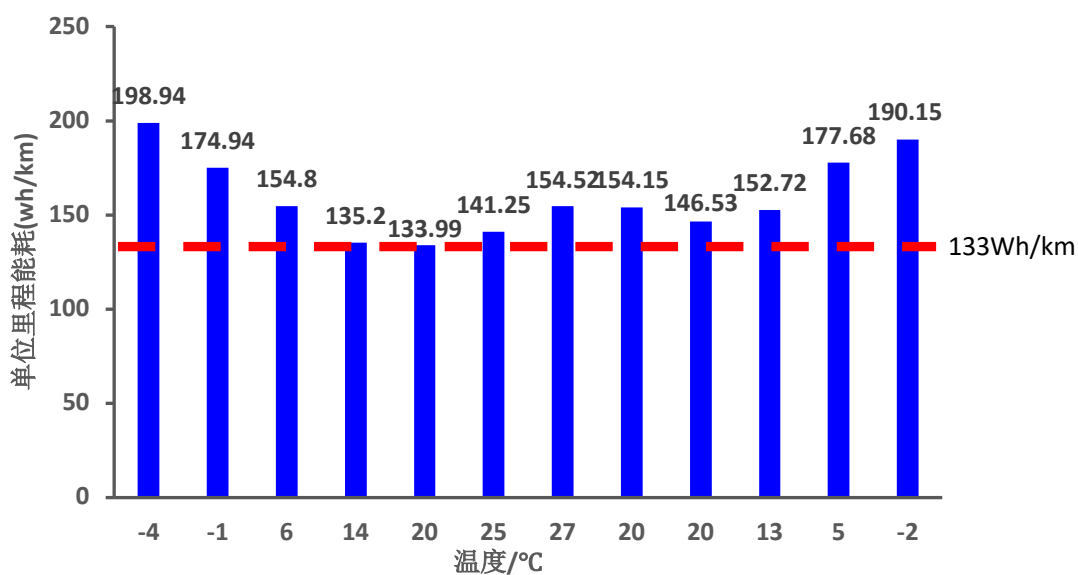
(a) EV150 车型



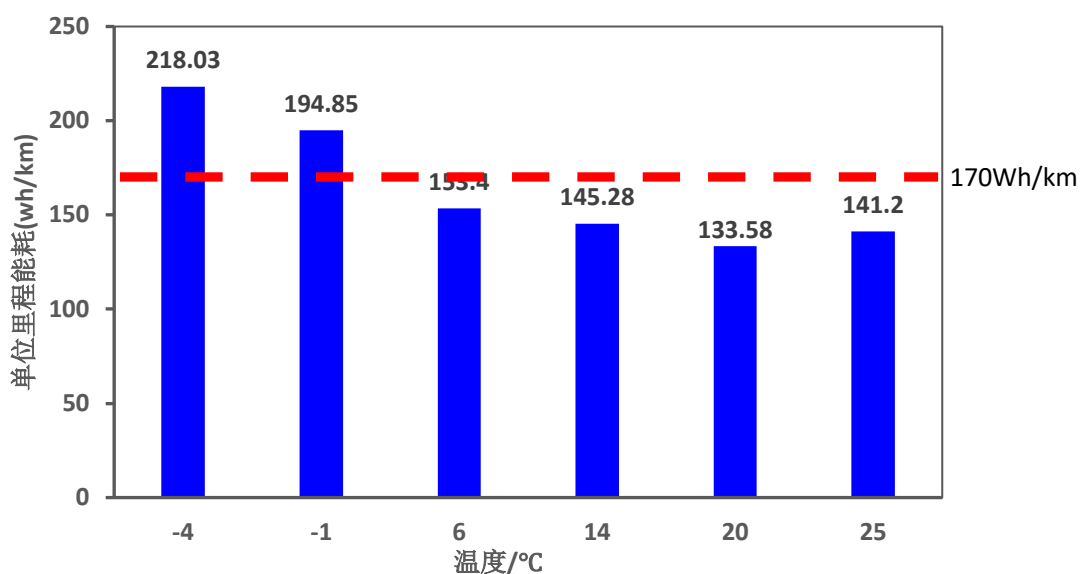
(b) EV160 车型



(c) EU260 车型



(d) 荣威 E50 车型



(e) 奇瑞 eQ 车型

图 3.18 实际运行能耗数据与公告能耗数据对比

由图 3.18 可知，在与公告温度范围内，除了荣威 E50 比公告参数稍大外，其余车型的实际运行的能耗比公告参数稍小，由于公告参数与项目分析中采用的方法不同，故存在一定的差距。表 3.7 给出了图 3.18 中未涉及到车型的实际运行能耗与公告能耗间的数值对比。

表 3.7 iEV4 实际运行能耗参数与公告能耗参数的对比(公告能耗：133Wh/km)

	14℃	20℃	25℃	27℃
1	109.73	119.43	110.88	117.91

2	127.17	120.82	113.17	104.84
3	132.94	133.36	11.47	119.44
4	141.43	137.96	130.57	139.32

3.4 小结

本章节主要从电动汽车的温度适应性、主要部件对电动汽车的能效特征进行分析，相关结论如下：

1. 电动汽车温度适应性

(1) 电动汽车的能耗受温度的影响较大，低温和高温环境下都会增加电动汽车的能耗(其中包含空调耗能以及不同环境温度下电动汽车传动部件效率变化等因素的影响)。其中，高温环境中能耗较常温环境上升 8%，低温环境中能耗较常温环境上升 33.8%。

(2) 能量转化效率受温度影响。低温环境对电动汽车整车效率的影响显著；分别分析电池—电机效率，电机—轮端效率及电机效率，均存在常温效率>高温效率>低温效率，可知低温对各部分效率的影响较大。因此在进行传动系统优化设计时要提高传动系统的低温适应性。车辆的制动回收效率也受环境温度的影响，各车型的制动回收效率存在一定差异，但温度对其影响趋势一致，即常温环境回收效率>高温环境>低温环境。

2. 主要部件分析

主要部件分析从电池、电机以及空调三个方面进行分析，主要结论如下：

(1) 电池技术分析。主要从动力电池的材料、内阻、平均温度极差、低温容量衰减率和劣化容量衰减率等角度。从电池材料看，锂离子电池是目前电动汽车中使用最为广泛的动力电池；从内阻看，动力电池内阻随温度的降低呈指数关系增长，导致低温电动车效率下降，其中 EU260 的等效欧姆内阻最低，iEV4 的内阻水平较高；从平均温度极差看，所有车型的动力电池热管理系统均效果优良，其中 EU260 的电池温控系统性能最佳；从低温容量衰减率看，动力电池低温容量衰减率平均为 4.32%，三元锂材料电池的低温容量衰减较磷酸铁锂电池低，其中荣威 E50 的温度适应性最佳，而北汽 EV150 的电池低温性能较差；从劣化

容量衰减率看，劣化容量衰减率平均为 2.64%，三元锂材料电池的劣化容量衰减较磷酸铁锂电池严重，其中荣威 E50 的抗老化性最佳，奇瑞 eQ 的电池老化较为严重。

（2）电机分析。主要对运行数据中电机在驱动状态时的转速、转矩数据点进行频率统计。统计结果显示，在实际运行过程中，电动汽车电机转速基本在 6000rpm 以下，转矩基本在 120N.m 以下。各车型的电机高效率区间（大于 80%）分布差异明显，其中 EV150 明显低于其他车型，其他车型虽然高效率区间分布范围相对更大，但极高效率区间仍然集中在高转速区域，为了进一步提高电动汽车电机的效率，必须考虑行驶的工况要求，在所选择的驱动电动机满足最高车速、加速能力、爬坡能力等动力性能指标的前提下，使驱动电机在正常行驶工况下效率尽可能的高。

（3）空调分析。冬季因开启电动空调进行制热，相比于未开启空调时的单位里程能耗，四款车型的单位里程能耗上升了 30%-39%；而在夏季行驶中开启空调进行制冷，四款车型的单位里程能耗也上升了 29%-38%。由此可见，空调系统的使用会很大程度上降低电动汽车的经济性，进而缩短电动汽车的续驶里程。

3. 与公告参数对比

本项目将能耗实车结果进行分析并与公告参数进行比对。选取 EV150，EV160，EU260，奇瑞 eQ 和荣威 e50 进行对比。除了荣威 E50 比公告参数稍大外，其余车型的实际运行的能耗与公告参数略小。需要说明的是，由于公告参数获取方法与项目分析方法不同，本研究分析方法可能略大于真实值。但从对比结果来看，实车性能基本与公告保持一致。

四、基于交通和驾驶行为的电动汽车运行特性分析

在对电动汽车实车数据进行采集和预处理后,形成了分析电动汽车城市工况下运行特征的良好数据基础。现有的研究在进行工况分析时主要以工况生成为目的,采用人工提取统计学特征的方式,在对特征进行聚类后从每一类中抽取工况进行组合。本研究将提出一种融合特征提取与生成的模型结构开展工况分类识别。此后根据工况特征对电动汽车能耗及适应性做进一步分析。最终形成基于交通路况和驾驶行为的电动汽车能耗特征分析,从适应性角度研究路况和驾驶行为对电动汽车能耗的影响机理和结果。

4.1 交通状况适应性分析

汽车作为城市交通的参与者,与城市交通状况间具有很强的交互性,不同的交通状况会对汽车运行特性产生很大的影响。相应地,电动汽车在不同的交通状况下会有不同的运行特性,因而会产生对不同的交通状况是否适应的问题。因此,这里基于实车运行数据对电动汽车在不同交通状况下的适应性展开研究,主要以工况特征图谱为研究工具提取不同的交通状况。首先,给出电动汽车交通状况适应性的定义:常温下电动汽车在不同的城市交通状况下运行特性的分布,通常以能耗分布为表征。

4.1.1 工况特征图谱

可解释型工况特征图谱是作为交通状况适应性分析的数据分析工具。在构建工况特征图谱前,将每一段行程记录分割为 360s 的行程片段,统计速度曲线以及加速度曲线在指定区间内的频率分布,其中速度曲线按照 10km/h,从 0-100km/h 分为 10 个区间,加速度曲线按照 0.4m/s^2 ,从 -2 至 2m/s^2 分为 10 个区间,再加上平均速度,从而每个行程片段都提取出一个 20 维的特征。对所有行程片的特征使用 PCA 方法降至 2 维,从而形成可解释型工况特征图谱并进行可视化。

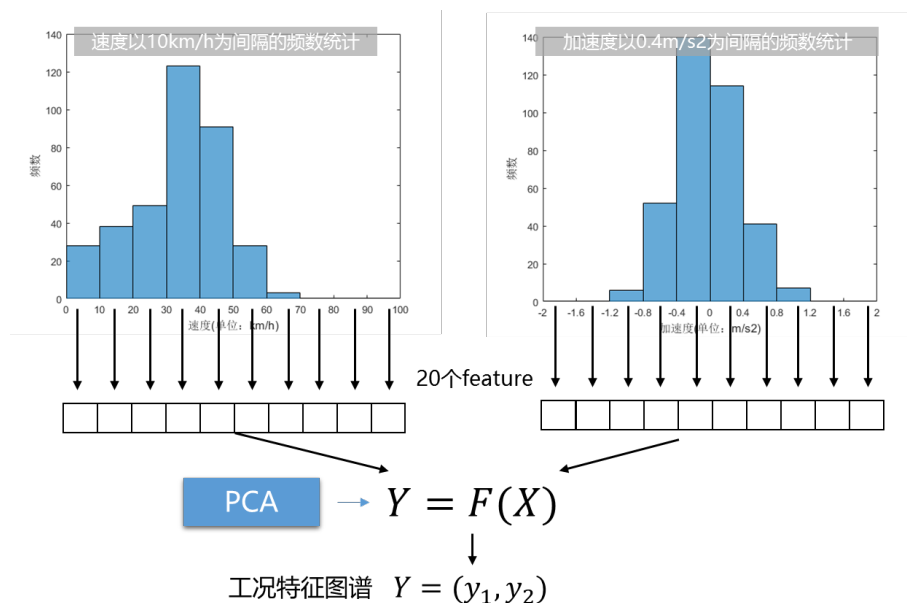


图 4.1 工况特征图谱构建过程

分析路况（交通状况）对能耗的影响时，主要选取4月份或9月份温度适中的行驶记录，一方面排除温度的影响，另一方面排除使用空调造成的额外能耗。

典型的工况特征图谱如图4.2所示，并且存在以下几个特点：

- （1）V1方向主要反映行程片段的平均速度；
- （2）V2方向主要反映怠速时间占比；
- （3）相近的点所代表的行程片段处于相似的交通状况。

根据工况特征图谱的特性，在不同的区域选取行程片段分析该车型对交通状况的适应性。

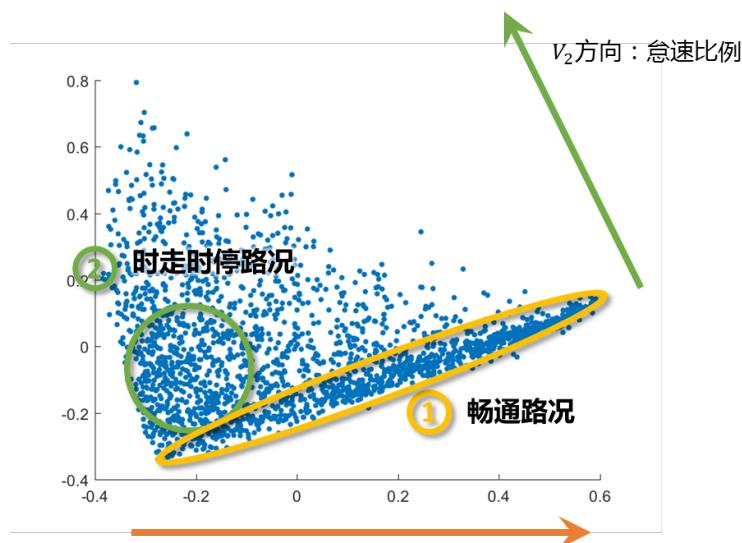


图 4.2 典型的可解释型工况特征图谱

4.1.2 畅通路况适应性分析

畅通路况下各车型单位里程比能耗与平均速度的关系拟合曲线如图 3.15 所示，将 10 款车型按照其功能划分为小型车组、SUV 与 MPV 组和轿车组。其中小型车组包括荣威 E50 和奇瑞 eQ，SUV 与 MPV 组包括腾势和比亚迪 E6，轿车组包括北汽 EV150、EV160、EV200、EU 和江淮 iEV4、iEV5。在不同的分组内对比单位里程能耗，得出以下结论：

- (1) 轿车组中，较高车速下，北汽系列车型能耗比江淮系列车型高；
- (2) 小型车组中，较低车速下 eQ 能耗较低，而较高车速下 eQ 能耗较高；
- (3) SUV 与 MPV 组中，E6 能耗比腾势高。

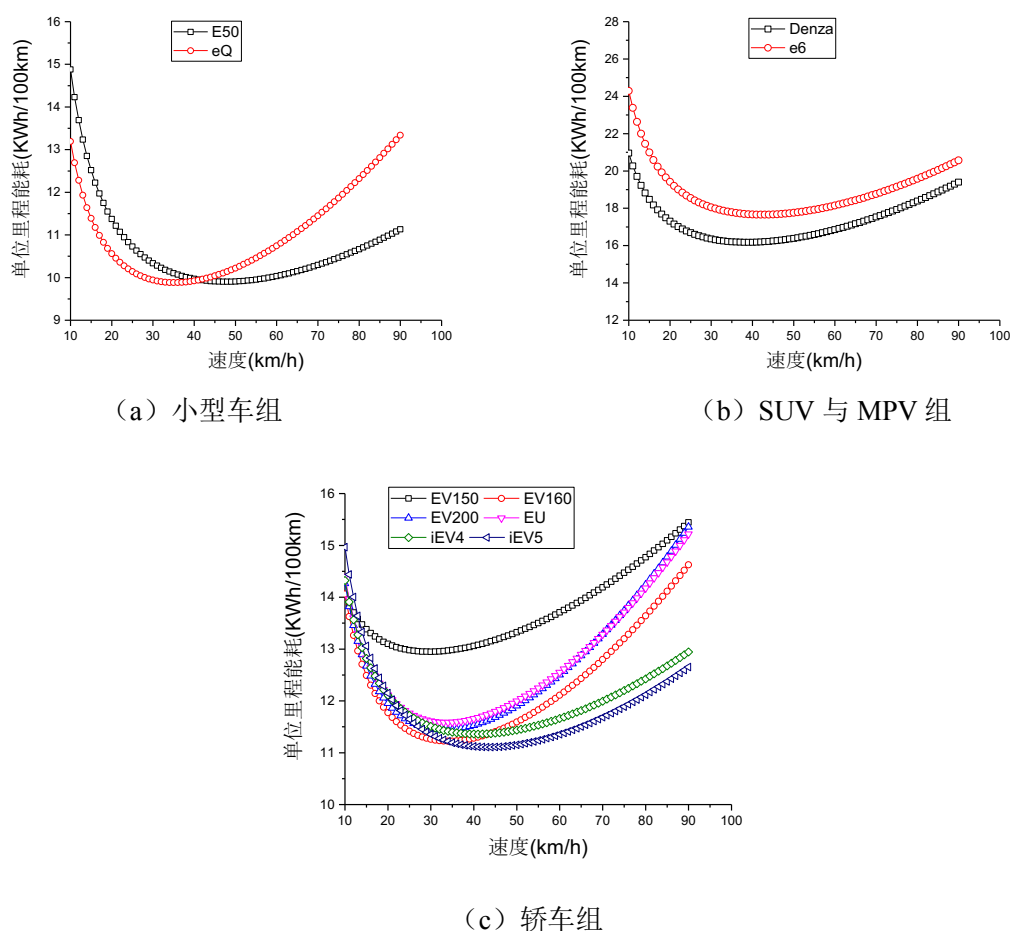


图 4.3 不同车型单位里程能耗随平均速度的变化关系

从图 4.3 可以看出，研究中所选取的所有电动车型的能耗曲线均有一个共同的趋势：随着平均速度的增加，单位里程能耗先减小后增大，因而电动车存在一

个最低单位里程能耗所对应的速度区间，从曲线中可以得到各车型的最优速度区间：

表 4.1 各车型最低单位里程比能耗对应的速度区间

车型	最优能耗速度区间 (单位: km/h)
EV150	25-35
EV160	30-40
EV200	30-40
EU260	30-40
E50	50-60
eQ	25-35
Denza	35-45
E6	40-50
iEV4	40-50
iEV5	40-50

对于各车型对不同平均速度的畅通路况的适应性，本研究将用均值和方差进行表示，选择 30km/h、50km/h 和 70km/h 的路况，结果如下：

(1) 平均速度为 30km/h

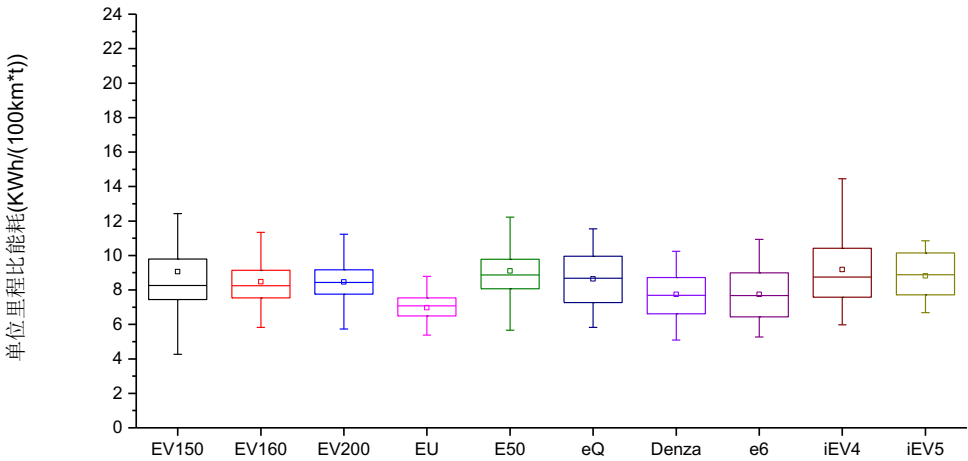


图 4.4 各车型对均速为 30km/h 的畅通路况的适应性

从相线图 4.4 的分布以及表 4.2 中的方差可以看出，在平均速度为 30km/h 的连续行驶路况下，EV150、iEV4 的适应性较差，而 EU260、EV160、EV200 的适应性最好，其他车型对于此种路况的适应性类似。

表 4.2 各车型对均速为 30km/h 的畅通路况的比能耗均值与标准差(单位:KWh/(100km*t))

	均值	标准差
EV150	9.06	3.37
EV160	8.48	1.49
EV200	8.47	1.15
EU260	6.97	0.94
E50	9.10	1.91
eQ	8.64	1.54
Denza	6.44	1.36
e6	8.27	1.57
iEV4	8.55	2.16
iEV5	8.30	1.40

(2) 平均速度为 50km/h

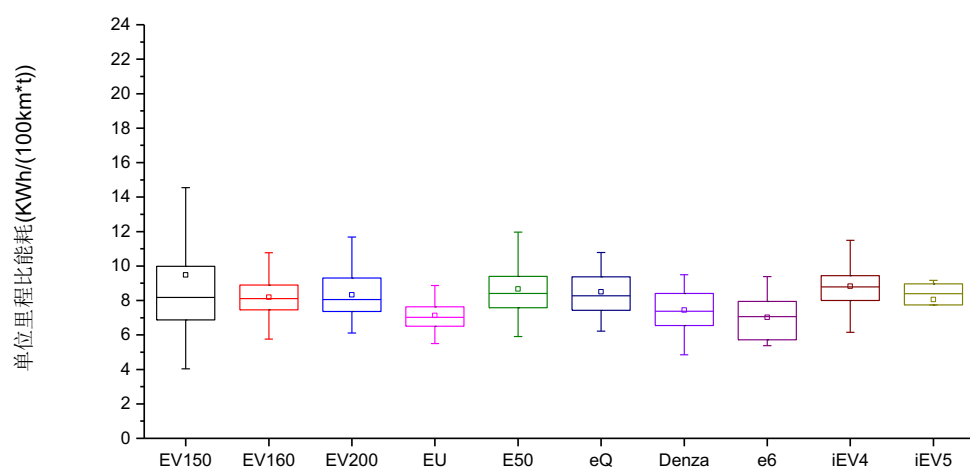


图 4.5 各车型对均速为 50km/h 的畅通路况的适应性

从图 4.5 相线图分布以及表 4.3 中的方差可以看出, 在平均速度为 50km/h 的连续行驶路况下, EV150、荣威 E50 的适应性较差, 而 EV160、EU260、iEV5 的适应性较好, EV150、EV200、iEV4 可能出现偏高或偏低的能耗表现, 但大部分比较集中。

表 4.3 各车型对均速为 50km/h 的畅通路况的比能耗均值与标准差(单位:KWh/(100km*t))

	均值	标准差
EV150	9.49	4.18
EV160	8.19	1.21
EV200	8.33	1.24
EU260	7.14	0.85
E50	8.66	1.53
eQ	8.59	1.57
Denza	6.47	1.25
e6	8.04	1.23
iEV4	7.31	1.30
iEV5	6.91	1.27

(3) 平均速度为 70km/h

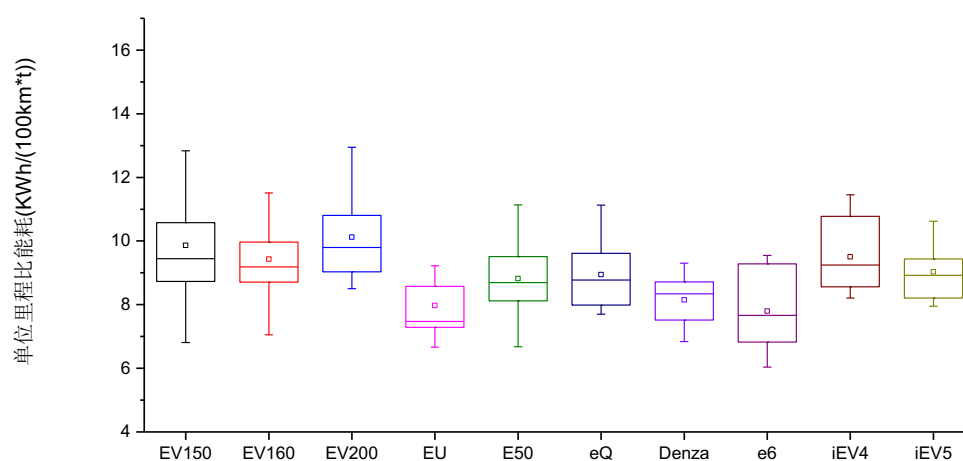


图 4.6 各车型对均速为 70km/h 的畅通路况的适应性

从图 4.6 的相线图分布以及表 4.4 中的方差可以看出, 在平均速度为 70km/h 的连续行驶路况下, 相比于 50-60km/h 均速的路况, 各电动车型的适应性均有所降低, EV150、EV160、E6、iEV4 的适应性较差, 而 EU260、iEV5 的适应性较好。

表 4.4 各车型对均速为 70km/h 的畅通路况的比能耗均值与标准差(单位:KWh/(100km*t))

	均值	标准差
EV150	9.86	2.27
EV160	9.43	1.32
EV200	10.12	1.46
EU260	7.97	1.21
E50	8.82	1.10
eQ	8.95	1.16
Denza	6.67	0.76
e6	8.25	1.13
iEV4	8.05	1.07
iEV5	7.39	1.28

通过对比可以发现,畅通路况下 EV150 车型对各平均速度的适应性均较差,而 EU260 车型的适应性最好,能耗表现较为集中。

4.1.3 时走时停路况适应性分析

时走时停路况选取的是怠速时间占比在 20%-30%区间内,平均速度在 20-24km/h 区间内的行驶片段。结果如图 4.7 所示,可以看出各车型对均速 20-24km/h 的时走时停路况下单位里程能耗均存在较大波动,适应性不佳。其中腾势的适应性评价最好, EV160 和 EV200 能耗相近,荣威 E50 车型 EV150 车型以及 eQ 车型在时走时停路况下的能耗表现明显不如其他车型。此处 EV150 车型的比能耗高于荣威 E50 车型,参照畅通路况下 20-24km/h 时荣威 E50 能耗高于 EV150,可见 EV150 车型对时走时停路况的适应性比荣威 E50 要还差一些。

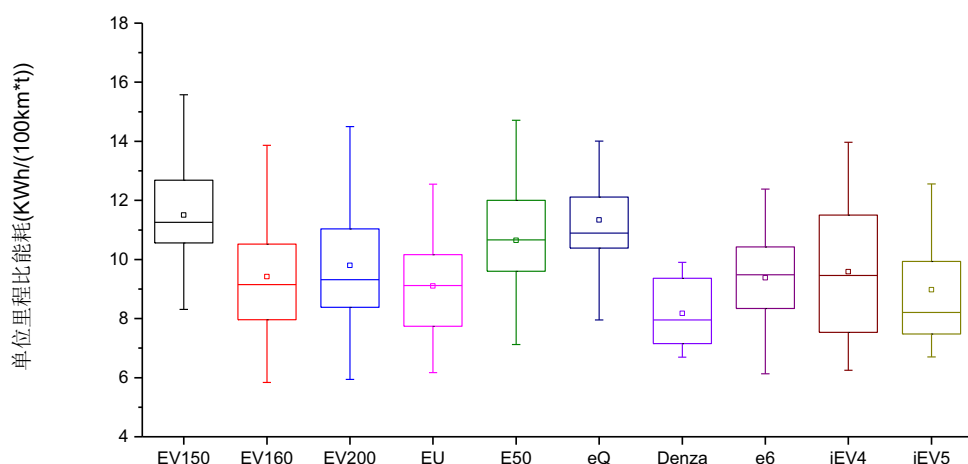


图 4.7 20-24km/h 的时走时停路况下各车型能耗情况

表 4.5 各车型对均速为 70km/h 的时走时停路况的比能耗均值与标准差(单位:kWh/(100km*t))

	均值	标准差
EV150	11.51	1.93
EV160	9.42	1.91
EV200	9.80	1.97
EU260	9.11	1.67
E50	10.65	1.81
eQ	11.33	2.20
Denza	7.18	1.18
e6	9.59	2.27
iEV4	8.98	2.33
iEV5	9.38	1.78

综上所述，电动汽车对于时走时停路况的适应性较畅通路况要差一些，呈现出较为明显的波动。尤其是如荣威 E50、eQ 这样的小型车对时走时停路况的适应性更差，而如腾势、e6 这样的大型车对于此种路况的适应性较好。车辆的更新迭代也会优化对于时走时停路况的适应性，例如 EU260 系列就明显优于 EV200、EV160，而 EV160、EV200 也明显优于 EV150，还有 iEV5 优于 iEV4。

4.1.4 时走时停路况与畅通路况的对比适应性分析

此处针对路况进行分析的主要目的是探究时走时停与畅通行两种典型路况下所造成的电动汽车能耗差异，从而评价电动车辆对于两种城市典型路况的适应性。换言之，当已知电动车辆在畅通行路况下的能耗表现后，想探究其在

时走时停等拥堵特征下的能耗表现是否与畅通路况的情况相一致或相类似,若有差异,则具体量化处差异的体现。

基于此种目的,我们先从理论上给出一个假设:在相近的平均速度下,时走时停和畅通路况所导致的电动车的能耗服从高斯分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。分布的参数可以通过已有数据样本进行估计。从而,定量地分析两种路况造成的能耗差异即为求出能耗分布的差异,数学上可量化为两个分布的距离。表达式如下

$$A_{tc} = D(tc_1, tc_2) \tag{4.1}$$

很显然,此距离的值越小表示电动汽车对于这两种路况的适应性越好。

(1) 分布距离的计算过程

筛选所有车型时走时停以及连续行驶路况的能耗样本数据,统计所有数据的最大值与最小值,根据最大值与最小值划分频数区间。

通过一种车型时走时停以及连续行驶路况的能耗样本数据估计两种路况下能耗的高斯分布参数分别为 μ_1, μ_2 和 σ_1, σ_2 。

分别构造参数为 (μ_1, σ_1) 和参数为 (μ_2, σ_2) 的两个高斯分布,采样出 200 个样本点后按照步骤 1 中的频数区间统计频率,得到频率向量 V_1 和 V_2 。

计算 V_1 和 V_2 的 JS 散度作为时走时停和连续行驶路况的能耗分布差异值。

进行 50 次计算取平均值以消除随机误差的影响。

表 4.6 各车型在时走时停路况与连续行驶路况下的比能耗均值与标准差(单位:KWh/(100km*t))

车型	时走时停路况		畅通行駛路况	
	均值	标准差	均值	标准差
EV150	11.51	1.93	9.42	3.01
EV160	9.42	1.91	9.08	1.55
EV200	9.80	1.97	9.23	1.63
EU260	9.11	1.67	8.27	1.10
荣威 E50	10.65	1.81	9.40	2.02
奇瑞 eQ	11.33	2.20	9.42	1.90
腾势	7.18	1.18	6.56	1.33
E6	9.59	2.27	9.01	2.27
iEV4	8.98	2.33	8.60	1.51
iEV5	9.38	1.78	8.95	1.56

(2) 时走时停和连续行驶路况的能耗分布距离计算结果

根据对比适应性的定义,该计算结果反映了时走时停与畅通行駛两种典型路

况下所造成的电动汽车能耗差异，从而据此评价电动车辆对于两种城市典型路况间切换的适应性。根据该指标的性质为值越小表示对比适应性越好，从而而确定评价标准为

- (1) 小于 0.05：较好；
- (2) 介于 0.05 至 0.1 之间：一般；
- (3) 大于 0.1：较差。

从而根据此标准给出各车型在时走时停和连续行驶路况的对比适应性指标及评价如表 4.7 所示。

表 4.7 各车型对时走时停和连续行驶路况的对比适应性指标

	适应性指标	评价
EV150	0.1156	较差
EV160	0.0374	较好
EV200	0.0426	一般
EU260	0.0922	较差
荣威 E50	0.0735	一般
奇瑞 eQ	0.123	较差
腾势	0.034	较好
E6	0.0329	较好
iEV4	0.0586	一般
iEV5	0.0343	较好

4.1.5 交通状况适应性分析小结

(1) 使用离散化速度区间频率作为特征，PCA 降维后可视化得到特征工况图谱，同时以欧氏距离作为测度量化行驶片段间的交通状况相似程度。

(2) 根据工况特征图谱上的不同区域将行驶片段划分为畅通路况与时走时停路况，其中畅通路况下按照平均速度的不同进一步细化。

(3) 通过对畅通路况下不同平均速度的电动汽车能耗分析得出每款车型的最佳能耗速度区间，总体上而言电动车在 30-50km/h 的连续行驶路况下能耗最低。

(4) 电动汽车对于畅通路况的适应性使用能耗标准差进行刻画，按照不同的平均速度分别统计。总体而言，电动汽车在最优能效对应的速度区间内能耗标准差较小，适应性较好；而对于速度较低或较高的路况适应性相对较差。

(5) 通过对平均速度在 20-24km/h 的时走时停路况下电动车辆的能耗统计

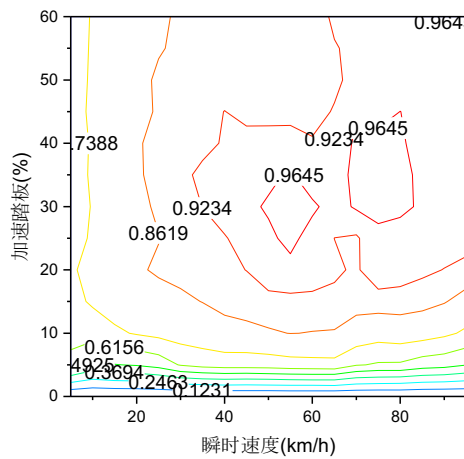
分析，得到电动汽车在该路况下的能耗波动较大，适应性不佳。

4.2 驾驶行为影响分析

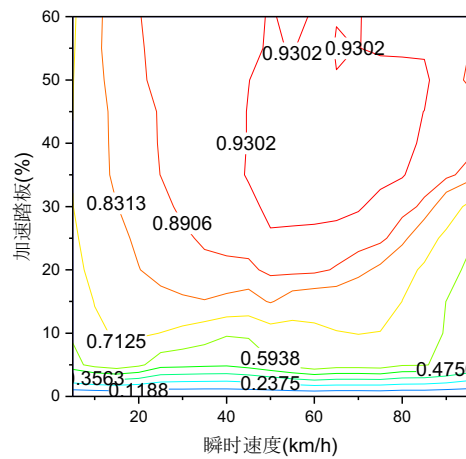
本次分析所涉及的驾驶行为主要集中在加速踏板的操作与使用习惯上，分析内容为两个部分，一是驾驶行为对驱动效率的影响，在特定速度下操作加速踏板的行程所对应的实时电机输出总效率；二是在相似的路况下加速踏板的操作习惯对能耗的影响。其中效率的情况主要考虑电机输出总效率与瞬时速度和踏板开合度的关系。

4.2.1 踏板操作对驱动效率的影响

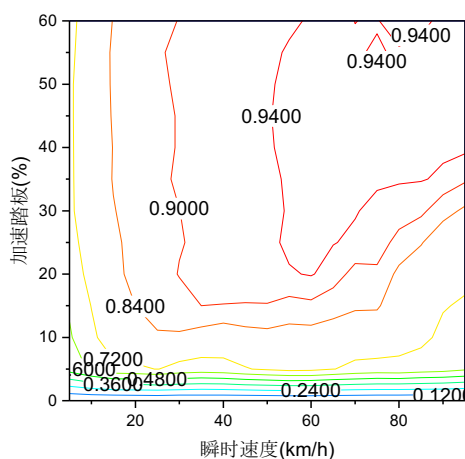
定义驱动效率为实时电机输出总效率，即电机输出功率与电池输出功率之比，数据采用方面为电机转速与转矩计算得出电机输出功率，电池组电压与电流计算得出电池输出功率。行程数据中在不同速度与加速踏板开合度下采样并计算对应的实时电机输出总效率。



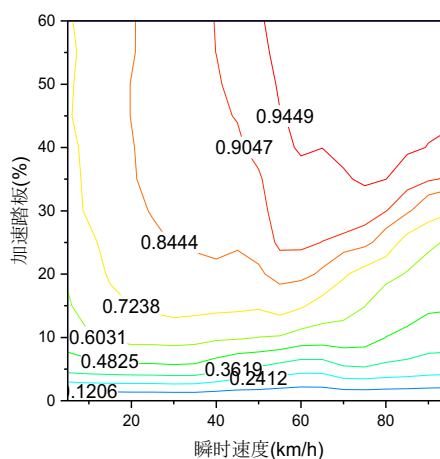
(a) EV150



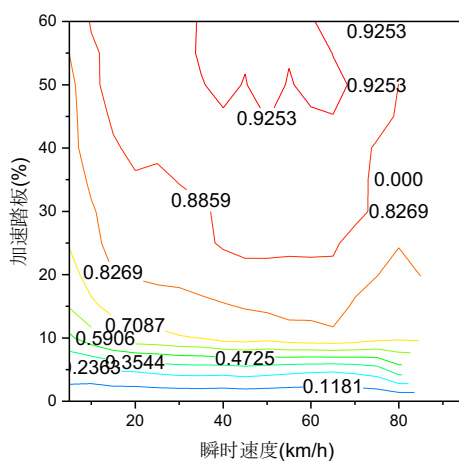
(b) EV160



(c) EV200



(d) EU260



(d) iEV4

图 4.8 五款车型电机实时输出总效率与瞬时速度、加速踏板的关系

可以看出该效率 map 图呈现出的特点主要如下：

- (1) 效率随加速踏板开合度、瞬时速度的增大而增大；
- (2) 在给定一个速度的情况下存在一个饱和效率与对应的加速踏板临界值，加速踏板开合度在低于临界值时，驱动效率随加速踏板的增大而升高，但在加速踏板开合度高于临界值后，驱动效率几乎不发生变化，增长十分缓慢；
- (3) 第 2 点特性中所提及的饱和效率加速踏板临界值与瞬时速度存在一定的变化关系，基本趋势为临界值随瞬时速度的增大而增大，即较高速度下需要更大的踏板行程才能达到最大饱和效率。

实际上该效率 map 图与电机本身的效率 map 图在本质上是相同的，原因在于瞬时速度与电机转速直接相关，而加速踏板开合度则是与电机转矩相关，但结

合实际在城市道路上行驶的情况，该效率 map 图可以认为是电机效率 map 图的截取。

4.2.2 踏板使用习惯对能耗的影响

本研究以同一车型（北汽 EU260）三个不同驾驶员的行驶记录中各选取了 1 段持续时间较长的工况，一方面能对比不同的驾驶行为对能耗的影响，另一方面在一定程度上探究踏板使用习惯上的差异所造成的能耗差异。

三段工况的基本情况如表 4.8 所示。时间上均持续 600s，平均行驶速度均在 40-45km/h 之间。可以看出，驾驶员 3 有最优的能耗表现。三段工况的速度曲线如图 4.9 所示，加速踏板开合度的分布如图 4.10 所示。

表 4.8 三个不同驾驶员中速巡航工况的基本情况

	时间 s	行驶里 程 km	平均速 度 km/h	电池总能 耗 Wh	电池驱动 能耗 Wh	制动回 收能量 Wh	单位里程能 耗 KWh/100km
驾驶员 1	600	7.10	42.80	840.14	948.25	108.1	11.83
驾驶员 2	600	6.70	40.21	908.55	1101.77	193.22	13.54
驾驶员 3	600	7.54	45.25	706.42	1021.04	314.61	9.36

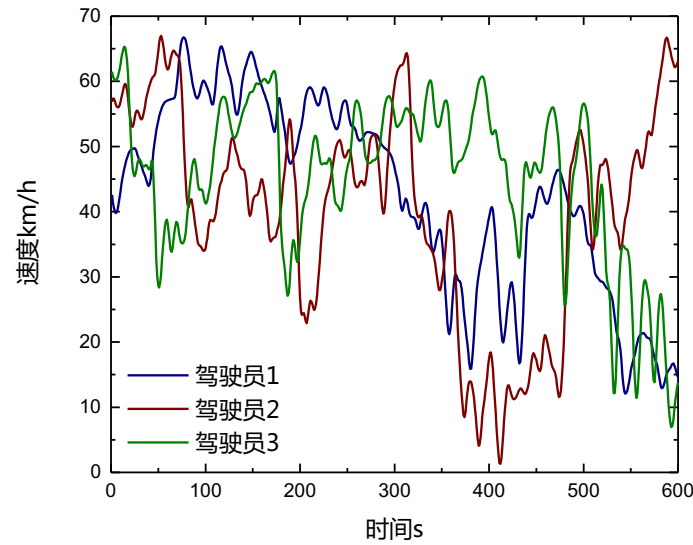


图 4.9 三个不同驾驶员中速巡航工况的速度曲线

中速巡航工况中加速时间与减速时间均占总时间相当一部分的比例，因而在

实际分析的过程中分为驱动状态和制动回收状态两个方面进行。

1. 驱动状态的驾驶行为

针对驱动状态下的驾驶行为，本研究重点关注加速踏板踩下的情形，即加速踏板开合度不为 0 的情况。因而本研究筛选出所有在驱动状态下的加速踏板开合度与对应的瞬时速度数据对并将其绘制于驱动效率 map 图上，结果如图 4.14 所示。

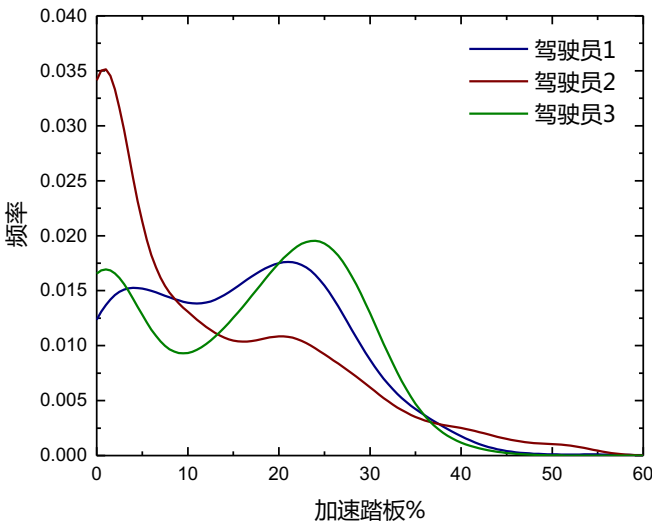


图 4.10 三个不同驾驶员中速巡航工况的加速踏板开合度分布

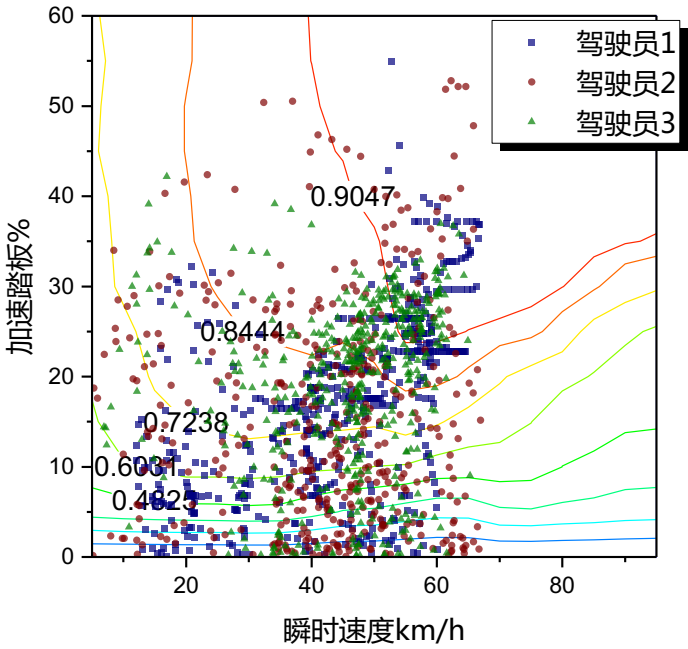
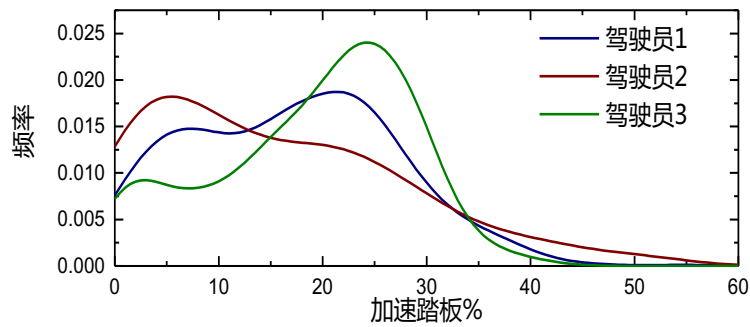
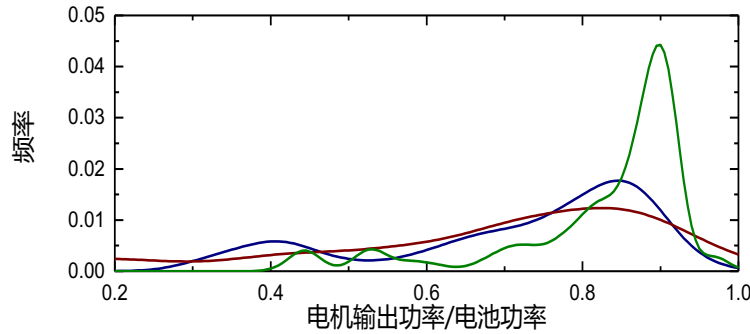


图 4.11 驱动状态下三个驾驶员速度-加速踏板在驱动效率 map 图上的分布

从图 4.11 中可以直观看出，驾驶员 3 的速度-加速踏板散点分布比驾驶员 1 和 2 要更集中，这一点在图 4.12 (1)加速踏板开合度分布中也得到了印证。同时，我们可以从图 4.12 (1)中看出驾驶员 3 对于加速踏板的操控更稳定，其开合度更为集中地分布在 20%-35%区间内，相比之下，驾驶员 1 和驾驶员 2 的加速踏板分布就相对较为分散。因而我们可以从驱动状态的驱动效率分布（图 4.12(2)）中得到驾驶员 3 的驱动效率更多地集中在高效率区间（驱动效率高于 80%）。与驾驶员 3 相比，驾驶员 1 和 2 的驱动在高效率区间的占比较少，而驾驶员 2 甚至有特别低的效率出现（驱动效率低于 30%）。



(a) 加速踏板开合度大于 0 的加速踏板值分布



(b) 驱动工况下的驱动效率分布

图 4.12 驱动状态下三名驾驶员的加速踏板分布及对应的驱动分布

事实上，在驱动效率 map 图中，瞬时速度在 40-60km/h 的区间中，饱和效率对应的加速踏板临界值大约在 20%左右，换言之，加速踏板开合度高于 20%时，效率就不会再有太大的变化，保持在 80%以上。又考虑到电池的输出功率由踏板开合度控制，因而 20%-35%的踏板区间在实现较高的能量效率的同时，也能保证一定的输出功率。

表 4.9 统计了三名驾驶员中速巡航工况的能量消耗和能量效率指标。可以看到驾驶员 3 的加速踏板开合度在 20%-35%区间内的占比为 42.2%，因而驱动高于

80%的占比达到了 42.3%。相比之下，驾驶员 2 在 20%-35%区间内的加速踏板值占比很少，驱动高效率区间的占比也少，从而导致相同的时间内电池放电能耗大但行驶路程不多，平均速度较小。

综上所述，可以得出结论，对于 40-45km/h 的中速巡航工况，在主动控制电动汽车进行加速时（以 EV200 车型为例），加速踏板的控制尽可能集中在 20%-35%的区间内或完全松开，减少轻踩踏板和重踩踏板的次数，从而能获得较好的能效表现。

表 4.9 驱动状态下三名驾驶员的能量消耗和能量效率

	平均速度 km/h	电池驱动能耗 Wh	加速踏板 20%-35%时间 占比	驱动在 80%以 上的时间占比
驾驶员 1	42.80	948.25	34.3	22.0
驾驶员 2	40.21	1101.77	19.5	16.0
驾驶员 3	45.25	1021.04	42.2	42.3

2. 制动回收状态的驾驶行为

EU260 车型默认开启制动回收，用户也可以通过档位的选择关闭制动回收。本章所使用的工况片段中均为开始制动回收的状态。在实际行驶过程中，只要速度超过 15km/h，驾驶员松开加速踏板后，电动汽车就进入制动回收状态。

三名驾驶员在制动回收状态的驾驶行为以及能效表现列于表 4.10 中。从图 4.10 中可以看出驾驶员 2 释放加速踏板的时间占比比驾驶员 1 和 3 多，从而制动状态的总时间也较多，然而驾驶员 2 制动状态下的回收能量却比驾驶员 1 少很多。从表 4.10 中可以看出造成这种差异的主要原因为驾驶员 2 在加速踏板的使用上出现多次的轻踩后松开的情况，持续 1s 以上的有效制动回收状态的总时间仅为 133s，占加速踏板松开时间的 46.1%，远小于驾驶员 1 和 3 的有效制动回收时间占比（分别为 100%和 91.1%）。因而驾驶员 2 的制动回收能量相比于驾驶员 3 而言少很多。

对比驾驶员 1 和驾驶员 3 的制动回收状态，虽然驾驶员 1 的有效制动回收状态的总时间占比为驾驶员 3 的一半，但其制动回收能量仅为驾驶员 3 的约三分之一。从图 4.13 中可以看到驾驶员 1 有较多的制动回收过程均处于低效率区域，总效率约为 69%，小于驾驶员 3 的 81%，从而最终的制动回收能量较少。

综上所述，在 40-45km/h 的中速巡航工况中，减少轻踩后松开加速踏板的频

率，尽可能多地保证松开踏板的状态在 1s 以上，并且适当加以轻踩制动踏板的操作，可以获得较良好的制动回收能效表现。

表 4.10 制动回收状态下三名驾驶员的能效表现

	单位	驾驶员 1	驾驶员 2	驾驶员 3
加速踏板为 0 时间	s	288.7	155.0	72.7
制动回收持续时间大于 1s 次数	-	44	32	23
制动回收持续时间大于 1s 总时间	s	133.0	141.3	72.7
制动回收总能量	Wh	193.22	314.61	108.1
制动回收总效率	%	87.98	81.51	68.97

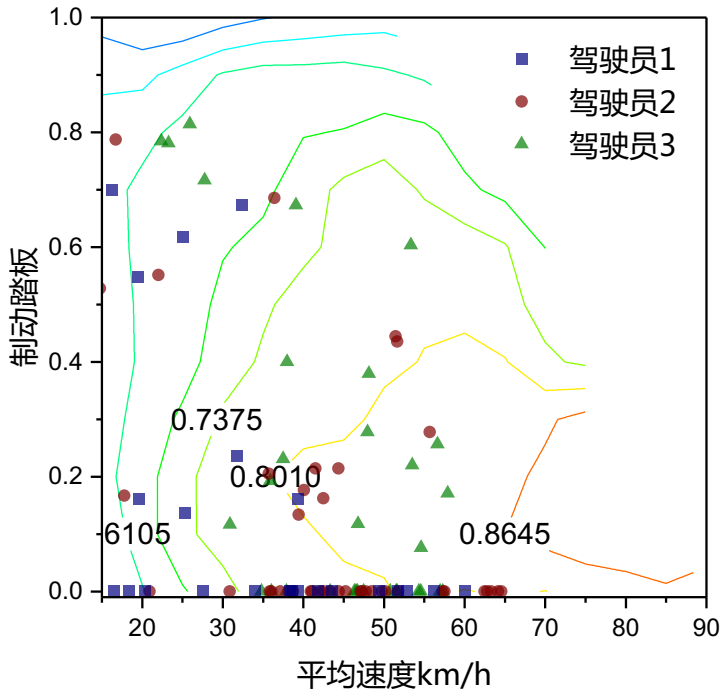


图 4.13 制动回收状态下三名驾驶员的制动回收过程在制动回收效率 map 图上的分布

3. 驾驶行为分析总结

在中等平均速度下，驱动状态和制动回收状态的时间段占比较多，而最终在总体工况下有良好的能效表现是由驱动状态下和制动回收状态下的良好表现所共同造就的。对实车运行数据中能效表现较好和较差的驾驶员进行分析得到的通用性结论为：（1）对于特定的速度区间，需要加速时稳定操控加速踏板在驱动饱和和效率的踏板开合度临界值附近的区间内（如 40-45km/h 时 EU260 车型的踏板范围为 20%-35%），不需要加速时完全松开踏板，减少轻微踩踏板的时间，将能

获得良好的驱动能效表现；(2) 减少轻踩后松开加速踏板的频率，尽可能多地保证松开踏板的状态在 1s 以上，并且适当加以轻踩制动踏板的操作，可以获得良好的制动回收能效表现。在两种状态下的良好能效表现将最终导致整个行驶过程有较好的能量效率和较低的能量消耗。

上面的踏板分布图以特例的形式直观反映不同的驾驶行为对能耗造成的影响，以及在连续行驶的路况下不同平均速度所对应的最佳踏板分布。为进一步验证驾驶行为对能耗的影响，我们将量化不同行驶片段的驾驶行为分布间的距离，并探究其与对应的行驶片段间的能耗差的关系。

本研究将驾驶行为定量化为加速踏板与瞬时速度的离散化分布，实际计算操作中瞬时速度从 5 至 95km/h 按照 5km 分段，加速踏板从 0 至 60%按照 5%分段，在这些区间内统计速度与加速踏板数据点的频率，示例图如图 4.14 所示。

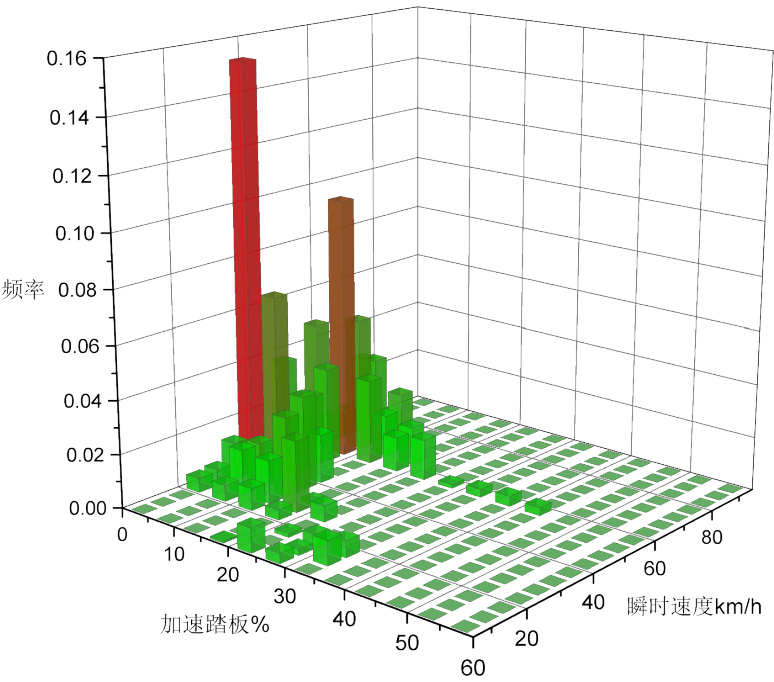


图 4.14 瞬时速度与加速踏板联合分布

在得到此二维分布后，使用 JS 散度作为两个不同驾驶片段间的分布距离。从而得到不同驾驶对能耗差的关系如图 4.15 所示，以平均速度为 28-30km/h 的连续行驶路况下的行驶片段为例。可以看出散点图所反映的趋势，行驶片段间的驾驶行为差异越大，则其能耗差也越大。多款车型均反映出了这样的趋势，从而一定程度上说明了驾驶行为对电动汽车能效的影响。

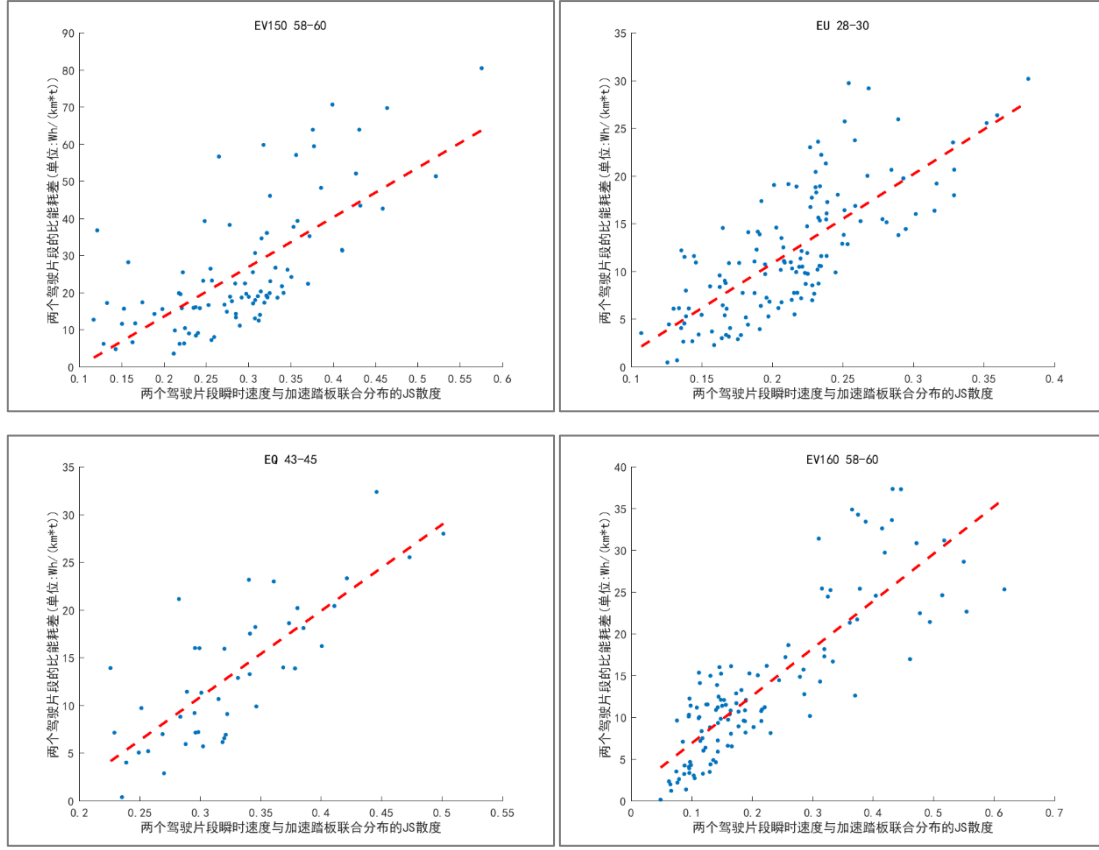


图 4.15 驾驶行为差异与能耗差异的关系

4.2.3 电动汽车对驾驶行为的适应性分析

在独立一种路况的适应性分析环节中,我们认为能耗的波动是由于交通状况造成的。考虑到驾驶员与交通车流间的相互影响,驾驶员的驾驶行为也会在一定程度上导致相同或相似路况下的能耗差异。

因此,电动车辆对驾驶行为的适应性就是,分析相同或相似路况下驾驶行为的差异所导致的能耗变化程度。其一般计算公式如下:

$$A_{ab} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - \bar{E}|}}{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i D(db_i, db_j)} \Bigg|_{\text{same } tc} \quad (4.1)$$

其中, n 为同交通状况下的驾驶片段数, E_i 为每一个片段的单位里程能耗, $D(db_i, db_j)$ 为两个驾驶片段的驾驶行为间的距离。

适应性的公式可以简化为计算最小差异驾驶行为对应的能耗差, 即

$$A_{ab} = \frac{|E_i - E_j|}{D(db_i, db_j)} \quad (4.2)$$

其中

$$i, j = \operatorname{argmin} D(db_i, db_j)$$

需要说明的是，驾驶行为间差异的计算公式 $D(db_i, db_j)$ 为 JS 散度，即将驾驶行为看成离散分布，计算两个分布间的距离。

对相同或相似交通状况下的所有驾驶片段，计算其两两间的驾驶行为分布的距离与单位里程能耗之差的绝对值。得到所有结果后根据分布距离排序，选择分布距离最小的三个结果，计算能耗差之和与距离之和的比值作为该车型在此种路况下的驾驶行为适应性定量指标。与之前的适应性分析类似，车辆在此种交通状况下对不同驾驶行为的适应性越好，则该指标越小。反之亦然。

在三种不同平均速度的连续行驶路况下，对驾驶行为的适应性指标计算结果如下表 4.11。

表 4.11 不同均速的路况下车辆对驾驶行为的适应性指标

车型	28-30km/h	43-45km/h	58-60km/h
EV150	68.80	127.17	105.22
EV160	50.61	44.10	46.59
EV200	51.42	73.46	56.91
EU260	34.26	31.83	30.66
荣威 E50	83.56	37.90	44.94
奇瑞 eQ	75.73	30.39	37.23
腾势	103.51	65.04	44.80
E6	80.68	42.80	42.86
iEV4	-	51.26	36.11
iEV5	53.82	56.19	48.52

说明：iEV4 缺少符合筛选条件的数据，无法给出适应性值。

表 4.12 驾驶行为适应性指标的评判标准

数值范围	0-40	40-50	50-70	>70
评价	优秀	较优	一般	较差

4.3 小结

本章节重点从交通状况以及驾驶行为两方面对电动汽车的适应性进行分析，相关结论如下：

1. 交通状况适应性

电动汽车交通状况适应性是指常温下电动汽车在不同的城市交通状况下运行特性的分布，通常以能耗分布为表征。通过对实际行程的分割并提取特征进行聚类分析后得到工况特征图谱，图谱中不同区域表示不同的交通状况。电动汽车适合在 25-50km/h 平均速度的路况下运行，此时能耗处于最佳区间；以能耗分布的均值与方差衡量适应性，EV150 在各路况下的适应性最差，其余车型在低速和高速时适应性较差，中等速度下适应性较好；各车型对时走时停路况的适应性均较差，能耗显著增加并且波动较大。

2. 驾驶行为

驾驶行为的表现形式为不同车速下的踏板操作，构建驱动效率、制动回收效率与车速和踏板开合度的 map 图，分析驱动效率 map 图可得特征为踏板开合度较小时效率较低，而踏板开合度较大时效率趋于饱和不再增加，因此踏板开合度在中等范围内是较优状况。

行驶时踏板维持在 30-40%开合度能够获得较高效率和良好能耗表现，制动时轻踩制动踏板可以获得更大的总制动回收效率；优质能效的驾驶行为：（1）在驱动过程中保持加速踏板稳定在一定的区间范围内；（2）该区间范围为能效 map 图中临界值区域时获得良好的动力性和优质能效表现。

五、技术成熟度评价分析

目前，新能源汽车的发展势头强大，其中电动汽车因其低污染、高效率、低噪声的优势越来越受到人们的青睐。随着电动汽车的快速发展，我国电动汽车逐步进入了寻常百姓家，但电动汽车在使用过程中出现的问题也让消费者望而却步。因此，在电动汽车高速发展的大背景下，如何将消费者的需求与电动汽车的性能设计相结合，为电动汽车厂家进行电动汽车的研发和生产提供指导意义是亟待解决的问题。目前，对电动汽车的评价大多基于试验数据评价，本次项目基于北京市私人用户的实际运行数据进行研究，在充分借鉴其他评价系统经验的基础上，结合实际采集得到的用户运行数据项及分析数据项，构建基于用户视角的电动汽车技术评价体系。

该体系关注用户在电动汽车在实际使用过程中关注的各项性能，通过对电动汽车用户实际运行数据的多维度客观分析，对电动汽车的整车性能进行综合评价，为消费者提供基于北京市实际运行状况的电动汽车综合评价结果。该技术评价体系主要从电动汽车的整车能耗、关键部件性能（空调、电池组、电机）、路况的适应性进行技术评价。

5.1 电动汽车技术成熟度

技术成熟度(Technology Readiness Level)，即技术完备等级，由于本土化的原因，技术成熟度又称为“技术就绪水平”、“技术准备度”。主要的含义可以概括为：

相对于某个具体系统或者项目而言，单项技术或技术系统在研发过程中所处的发展状态或者可用程度，另一方面也反映了技术对于项目预期目标的满足程度。其包含科技成果的技术水平、工艺流程、配套资源、技术生命周期等方面。

本研究中，定义电动汽车的技术成熟度为电动汽车领域现有技术以及现有技术在车辆上的应用对电动汽车用户相关需求的满足程度。理想状态下，电动汽车领域的相关技术、电动汽车的应用技术以及电动汽车用户需求三者应为包含关系，即应用到电动汽车的技术满足用户在现阶段的需求，其示意图如图 5.1(a)所示。但实际上，电动汽车车辆已应用的技术并不能完全满足用户对电动汽车相关技术

的需求，甚至于现有的电动汽车领域的技术都不能够满足用户的相关需求。其示意图如图 5.1（b）所示。其中黑、蓝、红三个颜色的圆分别代表电动汽车领域的现有技术、已应用到现有电动汽车的技术以及电动汽车用户对电动汽车相关技术的需求。在图 5.1（b）中，A₁ 部分代表用户有需求但在实际的电动汽车产品尚未应用的技术；A₂ 部分为现有的电动汽车技术已经能够满足用户需求，但还未实际应用到已有产品中；A₃ 部分即现应用的电动汽车技术且能够满足用户需求的部分，该部分所占比例越大说明电动汽车的技术越成熟；A₄ 部分表示现有技术已经应用到实际产品中，但该部分技术对用户来说暂无需求；A₅ 部分在研发中的技术尚未应用到实际产品中，且用户也没有表示出明确的需求，但这部分技术代表着未来技术趋势。

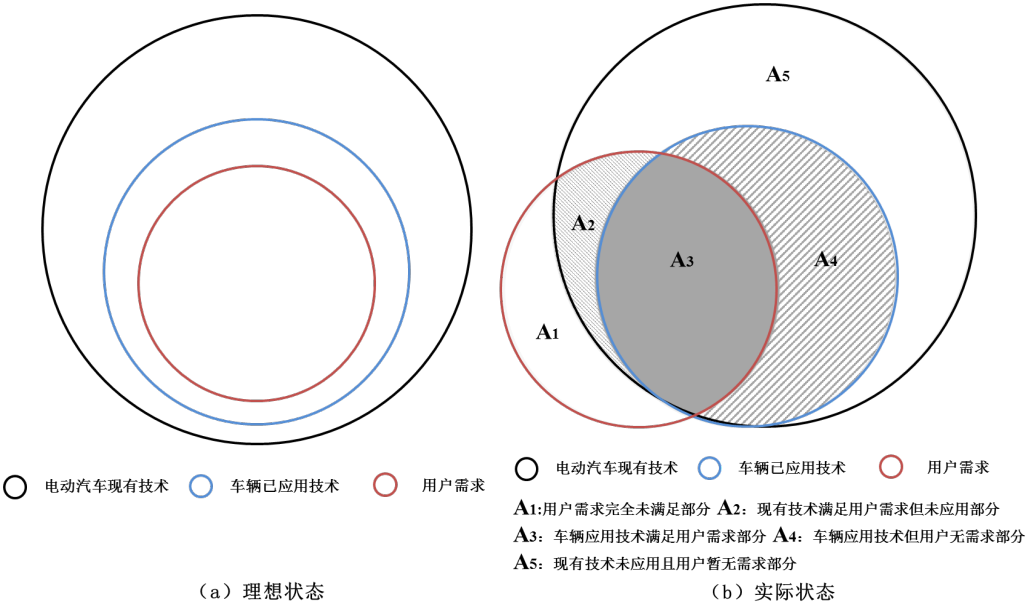


图 5.1 电动汽车技术成熟度示意图

5.2 电动汽车技术成熟度评价体系及方法

5.2.1 电动汽车技术成熟度评价指标体系

为了对电动汽车的技术成熟度进行科学合理的评价，结合系统工程的方法，遵循科学性、全面性、可操作性、关键性、可比性等原则来构建电动汽车技术成熟度评价指标体系。结合文献研究、现状调查、专家咨询等，利用科学的数学工具对各影响因素进行分析与判断，找出其中的关键性因素，通过分析关键因素来

达到由点到面，带动全局的目的。因此采用重要性因素为切入点进行整体的分析和判断。根据电动汽车实际运行数据内容项及分析项，结合电动汽车行业内关注比较度较高的电动汽车性能，构建电动汽车技术成熟度指标体系。完整的技术成熟度指标体系如表 5.1 所示。

表 5.1 电动汽车技术指标体系

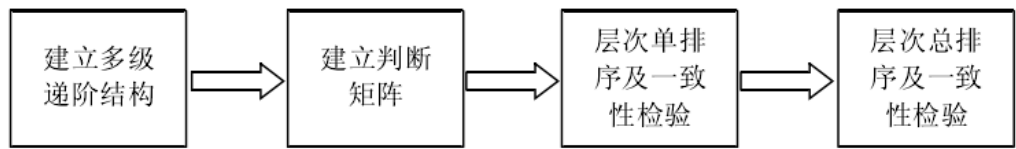
	一级指标	二级指标	三级指标
电动汽车技术成熟度评价指标体系	整车性能	续航里程	-
		驱动效率	
		制动回收效率	
	电池性能	低温容量衰减率	-
		电池组温度极差	
	经济性能	整车能耗	常温整车能耗
			低温整车能耗
			高温整车能耗
		空调能耗	空调制冷能耗
			空调制热能耗
	动力性能	最大速度	-
		0-100 加速时间(s)	
		最大爬坡度	
	安全性能	涉水安全	-
		人体电磁防护	
		电池系统防水	
		电磁干扰	
	路况适应性	畅通路况适应性	70km/h
			50km/h
			30km/h
		时走时停路况适应性	-
	驾驶行为适应性	28-30km/h 适应性	-
		43-45km/h 适应性	
		58-60km/h 适应性	

本研究中采用电动汽车私人用户实际运行的数据对电动汽车的性能进行客观的分析评价，但由于数据的局限性，无法做到对全部的性能指标项进行分析，故分析仅针对指标体系中的整车性能、电池性能、经济性能、路况适应性以及驾驶行为适应性指标项，表 5.1 中其他性能指标以待后续相关研究进行完善。

5.2.2 各指标权重确定

使用层次分析法对各电动汽车发展因素指标的权重进行确定，具体的过程可

分为 4 步：



(1) 建立多级递阶矩阵

根据电动汽车关键部件进行的分析，我们构建了三级指标模型，第二级由整车电耗、空调能耗、电池组特性、电机特性及路况适应性五个影响因子组成。第三级指标则是对二级指标的进一步细分，其中整车电耗指标可分为低温整车电耗、常温整车电耗、高温整车电耗，空调能耗可分为空调制冷能耗和空调制热能耗，电池组特性可分为电池组等效欧姆内阻、温度极差，电机特性可分为电机平均效率和电机高效率区间，路况适应性可分为畅通路况适应性和时走时停路况适应性。

(2) 建立判断矩阵

建立判断矩阵主要进行本层次因素与和它相关的上一层因素之间重要性的比较，为了定量描述判断矩阵，用层次分析法进行用户需求优化分析，判断矩阵中需求元素比较的判断尺度如表所示。

用户需求优化分析的步骤为：①构造用户需求的层次分析模型；②对同层次中元素进行两两比较，构造判断矩阵，判断矩阵依据相关专家的评分以及用户调查数据进行构造。这种评价方法具有科学性和有效性的特点，它既可以表征评价的最终结果，其评价体系的建立和评价结果的获得也十分具有说服力。

利用业内专家和电动汽车用户对于各级指标的评价情况，通过一致性检验等计算和验证过程，可得到评价指标的权重值，如表 5.2 所示。需要说明的是，本研究重点探讨建立技术成熟度的评价指标体系及方法的应用，采用的权重计算方法为通用方法，且该权重仅为此次研究所选取专家和用户对指标的赋权情况，实际情况发生变化可能导致权重的改变。

表 5.2 指标体系权重分配表

	一级指标		二级指标		三级指标	
	项目	权重	项目	权重	项目	权重
电动汽车技术成熟度评价指标体系	整车性能	34%	续航里程	21%	-	-
			传动效率	8%		
			制动回收效率	5%		
	电池性能	20%	低温容量衰减率	13%	-	-
			温度极差	7%		
	经济性能	34%	整车能耗	23%	常温整车能耗	11 %
					低温整车能耗	6%
					高温整车能耗	6%
			空调能耗	11%	空调制冷能耗	5.5%
					空调制热能耗	5.5%
	路况适应性	6%	畅通路况适应性	2%	70km/h	1%
					50km/h	0.5%
					30km/h	0.5%
			时走时停路况适应性	4%	-	-
	驾驶行为适应性	6%	28-30km/h 适应性	2%	-	-
			43-45km/h 适应性	2%		
			58-60km/h 适应性	2%		

5.2.3 评分标准

各评价指标的评分标准依据车辆实际技术指标以及专家和用户对于该指标的实际预期，通过综合评定确定各指标的评分标准。该指标可能受到主观性的影响，但是能够从技术现状和用户预期两个角度反映出技术成熟度的评价情况。

(1) 续航里程评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
续航里程	≤ 100	0
	200	60
	≥ 400	100
注： 1) 续航里程 >100 且 <300 ，得分 0~60 分，区间内线性插值； 2) 续航里程 >300 且 <400 ，得分 60~100 分，区间内线性插值；		

(2) 常温传动效率评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
常温传动效率	≤ 50	0
	60	80
	≥ 70	100
注： 1) 常温传动效率 $>50\%$ 且 $<60\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 常温传动效率 $>60\%$ 且 $<70\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(3) 常温制动回收效率评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
制动回收效率	≤ 20	0
	30	80
	≥ 50	100
注： 1) 制动回收效率 $>20\%$ 且 $<30\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 制动回收效率 $>30\%$ 且 $<50\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(4) 低温容量衰减率评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
低温容量衰减率	≤ 10	0
	5	80
	≤ 2	100
注： 1) 衰减率 >2 且 <5 ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 衰减率 >5 且 <10 ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(5) 温度极差评分表

指标名称	计算值 (°C)	得分
温度极差	≥ 3	0
	2	80
	≤ 1	100
注： 1) 极差 >2 且 <3 ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 极差率 >1 且 <2 ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(6) 常温整车电耗评分表

纯电动乘用车产品，按整备质量 M 不同，拟合得出工况条件下百公里耗电量划分线 $Y = 0.006 \times M + 8$ ，将此作为 80 分基准， $0.8Y$ 作为 100 分基准， $1.2Y$ 作为 60 分基准， $1.4Y$ 作为 0 分基准，得分保留至小数点后一位。评分方法如表所示：

指标名称	计算值 (kwh/100km)	得分
常温整车电耗	$\geq 1.4Y$	0
	$1.2Y$	60
	$\leq 0.8Y$	100
注： 1) 整车电耗 $<1.4Y$ 且 $>1.2Y$ ，得分 0~60 分，区间内线性插值； 2) 整车电耗 $<1.2Y$ 且 $>0.8Y$ ，得分 60~100 分，区间内线性插值；		

(7) 低温整车电耗评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
低温整车电耗上升率	≥ 60	0
	40	80
	≤ 30	100
注： 1) 上升率 $<60\%$ 且 $>40\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 上升率 $<40\%$ 且 $>30\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(8) 高温整车电耗评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
高温整车电耗上升率	≥ 45	0
	25	80
	≤ 15	100
注： 1) 上升率 $<45\%$ 且 $>25\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 上升率 $<25\%$ 且 $>15\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(9) 暖空调电耗评分

指标名称	计算值 (%)	得分
暖风开启整车电耗上升率	≥ 50	0
	35	80
	≤ 25	100
注： 1) 上升率 $<50\%$ 且 $>35\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 上升率 $<35\%$ 且 $>25\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(10) 冷空调电耗评分表

指标名称	计算值 (%)	得分
冷风开启整车电耗上升率	≥ 50	0
	30	80
	≤ 20	100
注： 1) 上升率 $<50\%$ 且 $>30\%$ ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 上升率 $<30\%$ 且 $>20\%$ ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(11) 畅通路况适应性评分表

车辆畅通路况的适应性采用车辆在 30km/h、50km/h 和 70km/h 的平均速度下的比能耗标准差进行评价。

畅通路况适应性		比能耗均值		
		≥ 120	80	≤ 60
比能耗标准差	≥ 40	0	30	60
	20	40	80	90
	≤ 10	20	50	100
注： 区间内线性插值；				

(12) 时走时停路况适应性

时走时停路况选取的是怠速时间占比在 20%-30%区间内，平均速度在 20-24km/h 区间内的行驶片段的比能耗标准差进行评价。

指标名称	标准差	得分
时走时停路况适应性	≥ 30	0
	20	80
	≤ 10	100
注： 1) 适应性标准差 >20 且 <30 ，得分 0~80 分，区间内线性插值； 2) 适应性标准差 <20 且 >10 ，得分 80~100 分，区间内线性插值；		

(13) 驾驶行为适应性评分表

指标名称	比值	得分
驾驶行为适应性	≥ 70	0
	50	60
	≤ 40	100
注： 1) 比值 >50 且 <70 ，得分 0~60 分，区间内线性插值； 2) 比值 <50 且 >40 ，得分 60~100 分，区间内线性插值；		

5.3 电动汽车技术成熟度评价

由于现有技术水平和用户的关注重点以及实际体验存在一定差异，既有重合又有区别，因此在进行技术成熟度评价时，将分别从现有技术水平和用户体验角度两方面进行评价。从现有技术水平角度进行客观评价，重点针对当前电动汽车的技术参数进行分析评价，以能效分析结果作为评价依据；从用户体验角度开展评价，主要针对用户对技术的期望程度以及满意程度，以用户问卷调查方式获得数据基础。从主客观两个角度评价，互为补充又有所区别。

5.3.1 基于现有技术水平的客观评价

前述章节对选定的十款车型进行了能效分析并获得其相应参数指标，结合其他关键指标，能够反映出电动汽车当前的技术水平，从而作为技术成熟度的客观评价依据。首先选取能够量化且评判相对简单的指标，将其实际值（厂商标称或者测试获得）对应到提出的百分制模型中的评分标准，根据评分标准计算得到每项指标的实际得分值。最终得分低于 60 分视为该方面技术不成熟，60-80 为技术有待发展，高于 80 分为技术基本成熟。按照该种方式计算得到的电动汽车客观评价指标得分如表 5.3 所示。

表 5.3 各车型二级指标得分表

项目		EV 150	EV 160	EV 200	EU 260	E50	腾 势	eQ	iEV 4	iEV 5	E6
续航里程	-	30	36	60	72	42	71	31	31	42	80
传动效率	-	75	81	80	75	-	-	99	-	-	-
制动回收效率	-	86	84	78	83	81	95	46	81	62	82
低温容量衰减 率	-	59	71	92	98	100	86	71	62	88	-
电池组温度极 差	-	76	90	81	97	95	72	-	53	-	93
整车电耗	常温整 车电耗	97	92	93	99	98	96	100	100	100	69
	低温整 车电耗	46	48	82	82	100	86	89	100	88	100
	高温整 车电耗	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
空调电耗	空调制 冷能耗	64	52	48	82	-	-	-	-	-	-
	空调制 热能耗	64	57	64	90						
畅通路况适应 性	70km/h	69	80	75	100	86	96	88	82	90	92
	50km/h	10	90	89	97	80	95	83	70	87	95
	30km/h	25	85	88	100	80	93	89	56	82	85
时走时停路况 适应性	-	76	84	83	87	78	96	78	80	88	84
28-30km/h	-	4	58	56	100	0	0	0	0	-	39
43-45km/h	-	0	84	0	100	100	5	100	89	46	31
58-60km/h	-	0	74	39	100	80	81	100	89	100	66

注：‘-’表示由于数据原因无法计算或给出可靠值。

依据计分方法对电动汽车的基础指标进行加权计算，得到影响电动汽车技术成熟度的一级指标得分，如表 5.4 所示。

表 5.4 北汽车型一级指标得分表

	整车性能	电池性能	经济性能	路况行为 适应性	驾驶行为 适应性	总性能
EV150	49	65	78	65	1	60
EV160	54	78	74	84	72	69
EV200	67	88	80	83	32	75
EU260	74	98	92	91	100	88

除北汽四款车型外，其他车型均存在数据缺失项，为有效的进行所有车型之间的对比，故剔除缺失数据指标项，将剩余指标进行归一化处理得到其他六款车型的最终评分表，评分结果如表 5.5 所示。

表 5.5 其他车型评分结果表

	整车性能	电池性能	经济性能	路况行为 适应性	驾驶行为 适应性	总性能
E50	49	98	99	79	60	78
腾势	76	81	95	96	29	80
eQ	65	45	94	81	67	71
iEV4	40	59	100	78	59	65
iEV5	46	88	94	88	73	73.4
E6	80	93	85	91	68	83

为了便于更好的对比各车型的性能，将指标中无法一致统一评分的指标剔除后对所有车型进行评分，得到结果如表 5.6 所示。

表 5.6 十款车型评价结果对比表

	整车性能	电池性能	经济性能	路况行为 适应性	驾驶行为 适应性	总性能
EV150	41	65	84	65	1	58
EV160	45	78	83	84	72	69
EV200	63	88	92	83	32	77

EU260	74	98	95	91	100	89
E50	49	98	99	79	60	78
腾势	76	81	95	96	29	80
eQ	65	45	94	81	67	71
iEV4	40	59	100	78	59	65
iEV5	46	88	94	88	73	73.4
E6	80	93	85	91	68	83

从表中可以看出，北汽 EU260 的总体评分较高，总体技术相对较成熟，其次为比亚迪 E6。其中评分最低的车型为北汽 EV150，主要原因在于 EV150 续驶里程较短且其驾驶行为适应性评分低。

5.3.2 基于用户视角的技术成熟度评价

考虑到用户对于电动汽车技术水平及成熟度的关注点具有显著差异，同时限于用户的专业水平，不可能掌握全面的指标作为评价依据，因此本研究通过前期调研，掌握了电动汽车私家用户对电动汽车技术参数的认知情况，并设计相应的问卷。问卷中将技术成熟度评价指标体系中针对于电动汽车用户能够直接感受到率、常温整车电耗、低温整车电耗、高温整车电耗、空调制冷电耗、空调制热电耗指标项。评定标准采用五级量表，即采用非常满意、满意、一般、不满意以及非常不满意五项，五级评价分别对应百分制为 100、80、60、40、0 分。该部分选取北汽四款客观评价结果完整的车型进行用户主观评价，便于进行主客观评价的对比分析，为后续车型的评价方式提供参考。

用户对于指标体系中指标的主观评价不够全面，为将用户的主观评价与基于现有技术水平的客观评价进行合理的比较，故将评价结果进行归一化处理，从而得到用户对于车辆的主观评价综合得分情况，得分结果如表 5.7 所示。筛选出的指标包括续航里程、低温容量衰减、不同温度的整车电耗等，这些指标都是普通用户最为关心同时不受专业技术知识影响的评价指标，能够直接反映出用户的技术预期。

表 5.7 电动汽车主观评价指标得分

项目	EV150	EV160	EV200	EU260	权重
续航里程	40	46	58	72	34%
低温容量 衰减率	33	42	62	68	11%
常温整车 电耗	78	76	81	88	18%
低温整车 电耗	50	58	65	76	9.5%
高温整车 电耗	76	82	80	86	9.5%
空调制冷 能耗	57	61	65	68	9%
空调制热 能耗	59	56	62	70	9%
总分	53.68	57.77	66.32	75.61	

从用户对四款车型的主观评价中可以看出，除低温和高温的整车电耗外，用户对车辆的续驶里程、低温容量衰减率、低温电耗以及空调能耗的评分均较低，说明从用户的角度出发，四款车型的电动汽车在这几个方面的技术尚未达到用户满意的程度，即相关技术成熟度相对较低。由此也能反映出用户角度对技术成熟度的评价情况，特别是用户最为关注的技术指标的成熟度和应用水平，同时也成为影响消费者选择的直接参考因素。

4.3.2 评价结果分析

从用户视角和现有技术水平两个角度进行技术成熟度评价，可以发现同款车型的主客观评分存在一定差异程度，及现实技术水平与用户需求之间的差异。表 5.8 为北汽新能源四款车型的两种评价方法的结果。可以看出，基于车辆的现有技术水平的客观评价与基于用户视角的主观评价两种评价方式的评分结果存在一定的差异，即主观评分结果都小于客观评分，对比表 5.4 和表 5.6 中的详细

指标评价得分发现，在电动汽车续航里程评价方面，用户的主观评价得分要低于客观评价得分，这主要是由于用户对于电动汽车的续航里程期望值较高，从问卷中发现超过 60%的用户期望电动汽车的续驶里程超过 400km，因此，用户对于现有车型的续驶里程评分要低一些；对于电池低温容量的衰减率，用户对其评分要远低于客观评价得分，用户对电池容量的评价主要基于低温时车辆续驶里程的减少量，根据车辆的能效分析发现，在实际应用过程中，电动汽车在低温条件下续驶里程的降低除受电池性能的影响外，其整车电耗的增加也是重要的影响因素。

表 5.8 评分结果对比表

	EV150	EV160	EV200	EU260
客观评价得分	60	69	75	88
主观评价得分	53.68	57.77	66.325	75.61

5.4 小结

本研究将电动汽车技术成熟度定义为电动汽车领域现有技术以及现有技术在车辆上的应用对电动汽车用户相关需求的满足程度。为了对电动汽车技术成熟度进行科学合理的评价，结合系统工程的方法，遵循科学性、全面性、可操作性、关键性、可比性等原则，采用能够描述电动汽车技术成熟度的重要性因素作为依据，根据电动汽车实际运行数据内容项及分析项，结合电动汽车行业内关注比较度较高的电动汽车性能，构建了电动汽车技术成熟度指标体系。

由于数据的局限性，本研究中针对指标体系中的整车性能、电池性能、经济性能、路况适应性以及驾驶行为适应性等可量化、易解读的指标项进行赋权，构建起电动汽车技术成熟度百分制评价模型。

根据提出的模型，首先采用实际运行数据分析结果，从技术水平角度进行技术成熟度客观评价。评价结果显示，北汽 EU260 的总体评分较高，其次为比亚迪 E6。其中评分最低的车型为北汽 EV150，主要原因在于 EV150 属于较早车型，其续驶里程较短且其驾驶行为适应性评分低。另外，基于用户的调查问卷数据对其中四款车型进行基于用户视角的主观评价，从用户对四款车型的主观评价中可以看出，除低温和高温的整车电耗外，用户对车辆的续驶里程、低温容量衰减率、

低温电耗以及空调能耗的评分均较低，说明从用户的角度来看，四款车型在部分技术方面尚未满足用户需求，即相关技术成熟度有待改善。

六、基于技术成熟度的政策分析

6.1 电动汽车政策现状

我国电动汽车产业经过多年的发展,已经由技术研发阶段进入产业化发展阶段。从汽车工业“十一五”规划期间“863 计划”电动汽车重大专项项目启动之后,我国确立了“三纵三横”的电动汽车研发布局,取得了一系列技术创新成果。“十一五”期间“863 计划”节能与新能源汽车重大项目则致力于电动汽车动力系统技术平台的建立和关键零部件的研发。通过两个五年计划的项目实施以及北京奥运会、上海世博会和“十城千辆”等示范运营工程的践行,我国电动汽车在核心零部件、整车集成技术以及相关技术标准等方面都取得了重大进展,初步形成了电动汽车的技术体系。目前,我国电动汽车产业的利好政策频出,其扶持性政策具体如下表 6.1 所示。

表 6.1 近年来电动汽车产业相关的扶持性政策

补贴政策名称	发布部门	发布日期	实施日期	主要内容
关于开展新能源汽车示范推广试点工作通知	财政部 科技部	2009 年 1 月 23 日	2009 年 1 月 23 日	在北京、深圳等 13 个城市开展节能与新能源汽车示范退关试点工作,基于资金补贴
节能与新能源汽车示范推广财政补助资金管理办法	财政部	2009 年 2 月 6 日	2010 年 1 月 1 日	对示范城市公共服务用电动汽车补贴 6 万元,电动公交车补贴 50 万元
关于开展私人购买新能源汽车补贴试点工作的通知	财政部 科技部 工信部 发改委	2010 年 5 月 31 日	2010 年 5 月 31 日	规定纯电动汽车最高可享受 6 万元补贴
关于节约能源使用新能源车船车船税政策的通知	财政部 税务局 工信部	2012 年 3 月 6 日	2012 年 1 月 1 日	自 2012 年 1 月 1 日起,对电动汽车,免征车船税
关于继续开展新能源汽车推广应用	财政部 科技部	2014 年 1 月 28 日	2015 年 1 月 1 日	按续航里程对电动汽车最高补贴 6 万元,2014 年和 2015 年,电动汽车

用工作的通知	工信部 发改委			补助标准在 2013 年基础上分别下降 10%和 20%
关于进一步做好新能源汽车推广工作的通知	财政部 科技部 工信部 发改委	2014 年 1 月 28 日	2015 年 1 月 1 日	对电动汽车补贴标准调整为：2014 年在 2013 年标准基础上下降 5%，2015 年在 2013 年标准基础上下降 10%
关于 2016-2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知	财政部 科技部 工信部 发改委	2015 年 4 月 22 日	2016 年 1 月 1 日	2017-2020 年电动汽车补贴标准适当退坡，其中：2017-2018 年补贴标准在 2016 年基础上下降 20%，2019-2020 年补贴标准在 2016 年基础上下降 40%
乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法	工信部 财政部 商务部 海关总署 质检总局	2017 年 8 月 16 日	2018 年 4 月 1 日	乘用车企业新能源汽车正积分可以依据本办法自由交易。新能源汽车正积分不得结转，但 2019 年度产生的新能源汽车正积分可以等额结转一年。

可以从政策上看出，现阶段国家从技术性、实用性与可操作性方面对新能源汽车中的纯电动汽车的评判标准是通过工况法测得的续航里程的大小，以此为基础制定不同车型的补贴或积分标准，以《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》（以下简称“双积分政策”）为例，其新能源汽车积分的计算如表 6.2 所示。

表 6.2 “双积分政策”积分计算规则

车辆类型	标准车型积分	备注
纯电动乘用车	$0.012 \times R + 0.8$	(1) R 为电动汽车续驶里程（工况法），单位为 km。 (2) P 为燃料电池系统额定功率，单位为 kW。 (3) 标准车型积分上限为 5 分。 (4) 车型积分计算结果按四舍五入原则保留两位小数。
插电式混合动力乘用车	2	
燃料电池乘用车	$0.16 \times P$	
1. 对纯电动乘用车 30 分钟最高车速不低于 100km/h，电动汽车续驶里程（工况法）不低于 100km，且按整备质量（m，kg）不同，纯电动乘用车工况条件下百公里耗电量（Y，kW•h/100km）满足条件一、但是不满足条件二的，车型积分按照标准车型积分的 1 倍计算；满足条件二的，按照 1.2 倍计算。其余车型按照 0.5 倍计算，并且积分仅限本企业使用。 条件一：m≤1000 时， $Y \leq 0.014 \times m + 0.5$ ；1000<m≤1600 时， $Y \leq 0.012 \times m + 2.5$ ；m>1600 时，		

$$Y \leq 0.005 \times m + 13.7。$$

条件二： $m \leq 1000$ 时， $Y \leq 0.0098 \times m + 0.35$ ； $1000 < m \leq 1600$ 时， $Y \leq 0.0084 \times m + 1.75$ ； $m > 1600$ 时， $Y \leq 0.0035 \times m + 9.59$ 。

不同于当前补贴政策（如“双积分政策”）仅以续航里程为单一标准，本课题基于实测电动汽车运行数据，得出了各关键部件能耗与效率的分析结果，配合电动车志愿者的使用感受，可以形成一套技术成熟度评价体系用于衡量市面上电动汽车综合性能的优良情况。该体系将用户在电动汽车实际使用过程中关注的各项性能纳入评价指标，通过对电动汽车用户实际运行数据进行多维度客观分析，对电动汽车的整车性能进行综合评价，为消费者提供基于北京市实际运行状况的电动汽车综合评价结果。该技术评价体系主要从电动汽车的整车能耗、关键部件性能（空调、电池组、电机）、路况的适应性进行技术评价。

6.2 基于技术成熟度的政策导向分析

本研究所构建电动汽车技术评价体系可以作为电动汽车能效技术分类的一个补充考虑要素，从而更多地从技术层面去引导电动汽车厂家生产更节能环保的电动汽车以及引导和方便消费者在众多车型中选择适合自己需求的电动汽车。

2017 年我国新能源汽车产销量创出历史新高，在世界汽车工业界也名列前茅，我国已成为全球最大的新能源汽车制造国和销售国。在购车补贴逐步退坡的大背景下，新能源汽车销售再创新高，也折射出消费者购买新能源汽车的主导因素已经开始从经济补贴转向对技术成熟度和使用便利性。只有不断提高技术成熟度，完善基础设施，才能提升消费者信心，形成新能源汽车产业稳固的发展基础。

基于技术成熟度的评分可以发现，在技术水平角度的客观评价中电动汽车的整车性能整体评价不高，主要原因在于电动汽车的续驶里程评分较低，且在用户的主观评价中，用户对于电动汽车续驶里程的主观评分同样较低，结合用户对于电动汽车续驶里程的期望值可以发现，续驶里程是影响电动汽车技术发展的重要因素。此外，影响电动汽车发展的因素还包括气温环境、充电设施、充电时长以及电动汽车的售价。其中与续航里程相关的电动汽车技术对电动汽车的发展具有重要的意义，增加动力电池的容量以及降低车辆的耗能，提升车辆的效率以及可靠性均有助于提升电动汽车续航里程。基于制约电动汽车发展的因素，结合电动汽车能效的分析，得到以下推动电动汽车发展的策略：

（1）提高电动汽车用动力电池的技术水平

电动汽车的售价较高，其中最主要的成本来源于动力电池，据相关人员的粗算知电动汽车电池组成本占据整车售价的 10%~40%左右。在技术成熟度的评价中可以发现，客观评价角度对于电池低温容量衰减率的评价大部分车型较低，而用户角度对于动力电池的低温容量衰减率评分相较于客观评价分值更低，说明动力电池的温度适应性技术有待加强。因此，要想提高电动汽车的续航里程、降低电动汽车的售价从而满足用户的需求，电动汽车动力电池技术就必须有所突破，尤其在电池的温度适应性技术方面。尽可能快的研究出高能量密度、高适应性、低成本的电池，推动电动汽车发展。

（2）优化电动汽车的主要部件

电动汽车的电池在低温环境下会出现容量衰减、充电截止 SoC 降低的现象，从现有技术水平的评价结果中可以发现大部分车型的电池低温容量衰减评分较低，因此优化电动汽车的电池系统，可通过研究电池的自加热系统等方式降低环境气温对电池的影响从而优化电池的性能；提高电动汽车的效率可以有效的保证电动汽车的实际续驶里程，而在技术成熟度的评价结果中发现部分车型的总传动效率评分较低，车辆的制动回收效率评分普遍较低，因此优化车辆的传动系统和制动回收系统各部件，从而提高车辆的传动效率以及制动回收效率，保证车辆的有效续驶里程；从实际运行工况的角度对电动汽车电机参数进行优化，增加实际运行工况下的电机高效率运行区间；研究高效的空调系统，降低空调系统的能耗，进而达到提高电动汽车续驶里程的目的。

（3）提升电动汽车的充电技术

基于对电动汽车用户充电行为的分析与调查发现，用户多倾向于使用慢充方式进行充电，而使用慢充的充电时长较长，使用户对充电性能感到不满，因此，需要加大研究电动汽车充电桩以及车载充电机的力度，研究出快速的充电方式并进行普及，解决用户在充电方面的困扰。同时完善基础设施建设，充分考虑用户对于充电基础设施的需求，科学、合理的规划电动汽车基础设施建设。

（4）完善电动汽车发展政策

政府在纯电动汽车的发展过程中起到关键性的作用，积极完善电动汽车的相关政策体系。政府应在电动汽车的研发、生产以及消费方面给予支持，积极引导电动汽车产业的发展，促进“政府、企业、高校”等多部门的协同创新。

当前对纯电动乘用车，“双积分”政策单一以续航里程作为积分指标，缺少对其他消费者较为关心的电动汽车性能指标的考虑（如低温电耗、电池低温容量衰减率、空调能耗等），政府部门可将有关指标一同纳入积分规则，引导电动汽车生产商制造出高性能的汽车产品，契合消费者的实际用车需求，促进电动汽车的规模化应用与健康长远发展。

参考文献

- [1] Lieven T, Mühlmeier S, Henkel S, et al. Who will buy electric cars? An empirical study in Germany [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(3): 236-243.
- [2] Kimble C, Wang H. China's new energy vehicles: value and innovation [J]. Journal of Business Strategy, 2013, 34(2): 13-20.
- [3] 王震坡, 孙逢春. 电动汽车能耗分配及影响因素分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(4):306-310.
- [4] 何洪文, 孙逢春, 余晓江. 电动公交车BJD6100-EV市区行驶能耗分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(3):222-225.
- [5] 夏顺礼, 秦李伟, 赵久志等. 某纯电动车电池可靠性性能分析[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(3): 215-220.
- [6] 夏顺礼, 秦李伟, 赵久志等. 某纯电动车型电池热管理系统设计分析与验证[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(2):140-146.
- [7] 秦李伟, 徐爱琴, 梁荣荣, 吴飞驰, 赵久志, 夏顺礼. 某电动车用三元材料锂离子电池低温性能研究[J]. 汽车科技, 2015, 9(2): 34-36.
- [8] 吴正斌, 胡坚耀, 李程宇. 低速电动汽车的性能研究[J]. 集成技术, 2015(1):8-15.
- [9] Ly M V, Martin S, Trivedi M M. Driver classification and driving style recognition using inertial sensors[C]// Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2013:1040-1045.
- [10] Carmona J, García F, Martín D, et al. Data Fusion for Driver Behaviour Analysis[J]. Sensors, 2015, 15(10):25968-91.
- [11] Carmona J, Miguel M A D, Martin D, et al. Embedded system for driver behavior analysis based on GMM[C]// Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2016:61-65.
- [12] Kumtepe O, Akar G B, Yuncu E. On vehicle aggressive driving behavior detection using visual information[C]// Signal Processing and Communications Applications Conference. IEEE, 2015:795-798.
- [13] Wu M, Zhang S, Dong Y. A Novel Model-Based Driving Behavior Recognition

- System Using Motion Sensors[J]. Sensors, 2016, 16(10):1746.
- [14] Michelle I. The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [15] 黄万友, 程勇, 纪少波,等. 驾驶员的驾驶品质对纯电动汽车能耗的影响[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(2).
- [16] 严英, 庄继晖, 谢辉. 纯电动公交客车司机驾驶行为差异对能耗的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014(3):231-236.
- [17] Andwari A M, Pesiridis A, Rajoo S, et al. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 78:414-430.
- [18] 张恒嘉. 基于实证的纯电动汽车性能评估方法和普及可能性研究[D]. 武汉理工大学, 2014.
- [19] 乔维德. 一种电动汽车用驱动电机系统性能评价方法[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7):115-121.
- [20] 于博, 王思婧, 李志远,等. 基于 AHP 的电动汽车模糊综合评价模型[J]. 科技创新导报, 2017(11):179-180.