

电动商用车系统工程技术体系及关键技术研究

孙逢春, 何洪文

(北京理工大学电动车辆国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 发展新能源汽车是世界共识, 以纯电驱动为特点的新能源汽车被确定为我国的战略性新兴产业和“中国制造 2025”重点领域。本文对我国电动商用车发展的历程和技术路线、特点等进行了综述, 结合北京奥运会“零排放区 24 h 不间断安全运行”的需求背景, 系统提出并明确了“电动商用车系统工程”的内涵, 就其三大核心组成要素“电动商用车平台、充/换电站、运营监控”及其关键技术, 分别进行了研究分析。最后, 针对我国新能源汽车 2020 年 500 万辆级规模应用和 2022 年北京冬季奥林匹克运动会 -25°C 环境下的应用需求, 探讨了电动商用车系统工程体系化升级的抓手, 目标是真正实现纯电动商用车“性能优越、技术无短板、推广应用无禁区”。

关键词: 电动商用车; 充/换电站; 运营监控; 系统工程; 冬季奥林匹克运动会

中图分类号: U4 **文献标识码:** A

Key Technologies for System Engineering of Electric Commercial Vehicles

Sun Fengchun, He Hongwen

(National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The development of new energy vehicles has reached a world consensus. Accordingly, pure electric vehicles have been identified as a national strategic emerging industry in China and a key field of the “China Manufacture 2025”. This study reviews the history, technical route, and characteristic of the development of electric commercial vehicles in China. Combining the requirements of “zero-emission” and “24 h non-interrupted safe operation” in the Beijing Olympics, we propose herein the concept of “system engineering of electric commercial vehicles” with three core components, namely, vehicle platform, swap charging station, and operation monitoring. This study also introduces and investigates the key technologies of the three components. Lastly, this study discusses the main technical measures for upgrading the system engineering of electric commercial vehicles to realize a 5 million-level application of the new energy vehicle in 2020 and satisfy the application in an environment of -25°C in the Beijing Winter Olympics in 2022. The study aims to realize a pure electric commercial vehicle with superior performance, no technical defects, and a forbidden application zone.

Keywords: electric commercial vehicle; charging/charging station; operation monitoring; system engineering; Winter Olympics

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-02-12

通讯作者: 孙逢春, 北京理工大学, 教授, 中国工程院, 院士, 电动车辆国家工程实验室, 主任, 主要研究方向为车辆工程;

E-mail: sunfch@bit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“汽车强国战略研究”(2015-XZ-36)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

发展新能源汽车是世界共识。我国自“十五”计划以来，稳步推进新能源汽车整车和零部件的关键技术攻关，纯电动客车总体技术处于国际先进水平，能耗指标国际领先 [1]。2008年北京奥林匹克运动会（简称北京奥运会）期间，在奥运中心零排放区昼夜不间断运行的 50 辆纯电动公交车，成功完成“零故障运行”的国家目标，为“无与伦比的奥运会”做出了贡献。2010年上海世界博览会期间，在世博园区内运行的 120 辆纯电动客车在半年内经受住了高温、高湿环境的考验，载客 9 018 万人次，车辆完好率为 99.8%。以国家新能源汽车“十城千辆”示范城市项目为牵引，25 个示范城市成功推广应用新能源客车、轿车和城市商用车 3.98 万辆。2014 年，我国新能源汽车应用规模加速提升，该年被称为中国新能源汽车推广元年，当年全国各种新能源车辆销量就达 74 763 辆，其中纯电动汽车占比为 60.3%。截至 2016 年年底，我国新能源汽车保有量达到 109 万辆，其中纯电动汽车保有量为 74.1 万辆，占比达到 67.98%。截至 2017 年 10 月，累计推广纯电动商用车 28.8 万辆，其中纯电动客车 19.4 万辆（大中轻型），纯电动客车规模全球第一。以宇通集团有限公司、比亚迪股份有限公司为代表的中国客车企业，在 50 个国家和 200 个城市实现销售或示范运营，已进入英国、法国、美国、日本、澳大利亚等发达国家的高端市场 [1]。得益于纯电驱动战略的实施，我国新能源汽车和纯电动汽车的应用规模呈几何级数增长，新能源汽车发展已经进入快车道，已成为世界上新能源汽车保有量最大的国家。我国新能源汽车技术达到国际先进水平，纯电动商用车平台成套技术出口欧盟等国家和地区，我国纯电动商用车走出了一条技术特色鲜明的道路。

二、电动商用车系统工程技术体系

（一）电动商用车系统工程技术体系的内涵

电动商用车产业的发展受到动力电池、成本控制、充电、运营模式等多方面的影响，有必要从系统工程的角度对其进行规划、开发和推广应用。如图 1 所示，电动商用车系统工程体系主要包括三大子系统：电动商用车平台、充 / 换电基础设施以及

运营实时监控与管理系统。三大系统间相互支撑成为综合解决电动汽车“续驶里程、充电时间、安全高效运行”等技术需求的关键。

电动商用车系统工程技术体系总体概念形成于 2008 年北京奥运园区纯电动客车零排放示范运营工程。在奥运中心区（包括国家体育场、国家游泳中心等中心比赛场馆区，奥运村、媒体村等核心区）使用零排放电动车辆是我国对国际奥林匹克委员会的承诺，使用具有自主知识产权的电动客车是“绿色、科技、人文”三大奥运理念的集中体现。北京理工大学电动车辆国家工程实验室带领相关合作单位，主持实施了奥运电动客车的研制、快速智能充 / 换电站的建设以及车辆示范运营监控与管理等方面的技术攻关。团队在整车设计理论与系统集成、核心关键技术、产业化技术和工程实施应用等方面进行了系统创新，通过北京奥运电动客车示范项目的成功实施，以及奥运会之后又将电动公交系统成功推广应用到北京市电动环卫、物流、出租车等电动汽车领域，我国电动商用车系统工程技术体系内涵得到了完善和应用。

如今北京奥运会已经过去将近 10 年，在这期间，我国电动商用车产业得到了快速发展，在系统工程技术的各个方面都取得了新的突破。其中，纯电动商用车平台在自动驾驶技术、轻量化技术、安全技术等前沿或关键技术方面取得进展，产品技术水平与应用规模保持世界领先地位；充 / 换电基础设施建设持续全面推进，各运营商开始在全国范围内布局公共充电设施，同时开始注重相互之间的互联互通和平台融合；车辆运营监控与管理技术不断完善，新能源汽车国家、地方政府、企业三级平台的安全运行监管体系已逐步形成。



图 1 电动商用车系统工程的三大技术子系统

(二) 电动商用车平台技术

近年来,我国纯电动商用车发展持续保持国际领先优势,已形成较为完整的技术链和产业链,电动客车、物流、环卫车、出租车、租赁车和卡车已全面进入产业化发展期。

以电动客车为例,我国电动商用车平台关键技术攻关和突破情况主要表现在以下 5 个方面。

1. 整车设计理论与系统集成技术

奥运电动客车项目团队提出了高效节能的纯电动客车构型方案,如图 2 所示。突破了以改装设计为主的传统思路,建立和完善了纯电动客车设计理论与系统集成体系,构建了整车及关键部件系统开发和动力系统匹配标定技术平台。设计开发出电池箱可更换并分箱底置的电动化低地板底盘,集成了一体化动力传动系统、一体化冷暖空调等系统,解决了整车轻量化、结构和高电压安全、二次绝缘、系统可靠性、电磁兼容等核心技术。总体上形成了我国电动车辆自主创新、正向设计和开发

的技术途径。

作为对上述纯电动客车动力系统构型的补充,近年来,适用于城市公交客车的无变速器单电机直驱动力系统构型以及适用于超低地板客车应用的分布式电机驱动系统构型 [2,3],也在一定范围内得到了行业应用。

2. 整车数字化信息控制技术

国内电动商用车平台已经形成了基于多路控制器局域网(CAN)总线的电动客车通信协议标准,开发了电动客车专用的数字化信息控制系统,如图 3 所示,具体包括整车控制器、车身控制器及智能仪表等核心单元。实现了基于总线技术的信息共享及系统间协调控制,具备整车故障诊断、报警和分级保护等功能。

3. 动力电池成组应用与安全技术

奥运电动客车项目团队提出了动力电池成组应用单体电池间特性不一致性对寿命影响的理论与分析方法 [4],发明并开发了锂离子电池及模块化

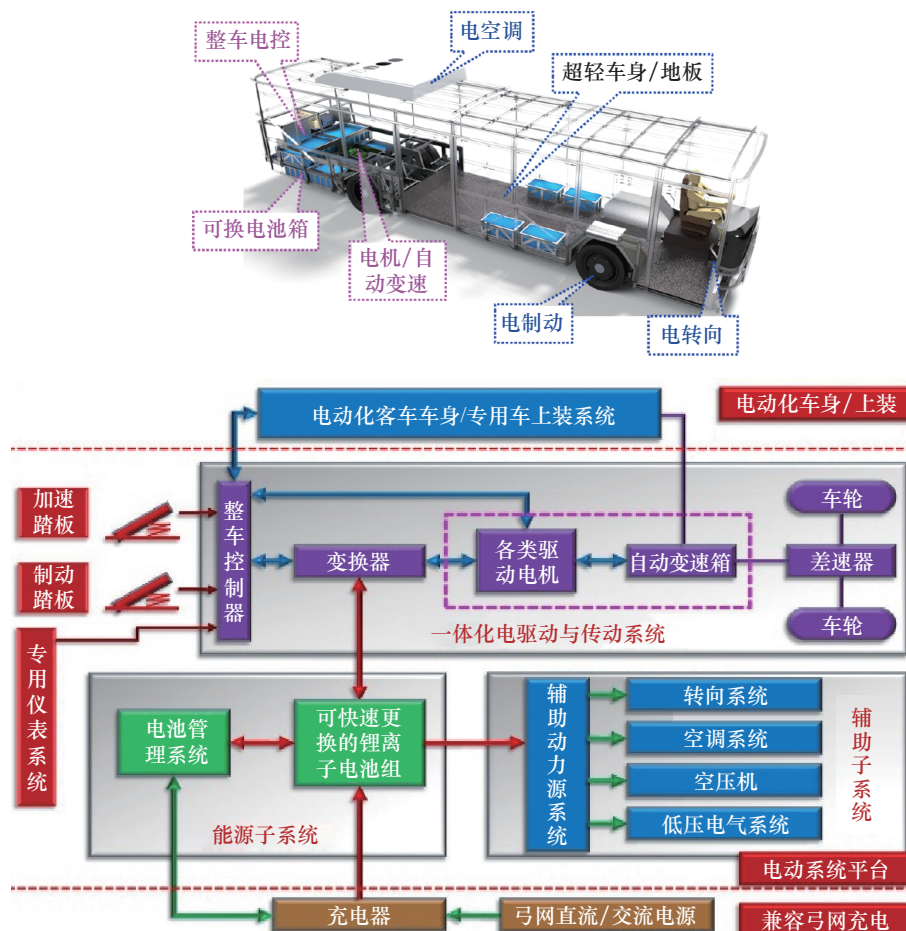


图 2 高效节能的纯电动客车动力系统构型

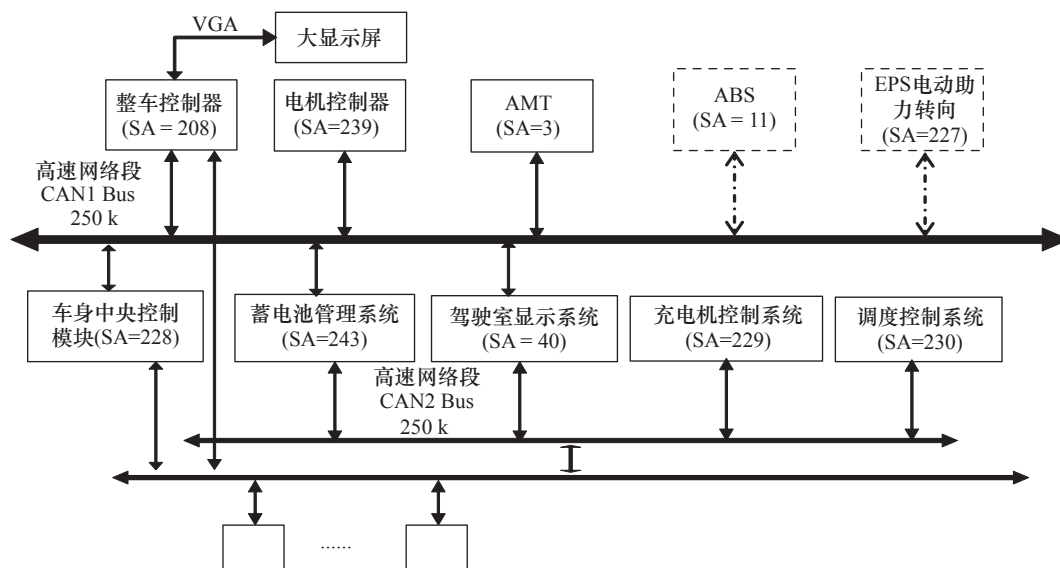


图3 电动客车 CAN 网络拓扑结构图

注：VGA：视频图形阵列；AMT：机械自动变速箱；ABS：制动防抱死系统；EPS：电动助力转向；SA：地址标识符。

封装系统，实现了在电池箱快速更换过程中动力线、通信线的同步自动插接。突破了动力电池在纯电动客车应用中的瓶颈技术，有效提高了续航里程及电池成组使用寿命 [5,6]。动力线插接后接触电阻 $< 0.1 \text{ m}\Omega$ （额定电流 100 A）。在一致性控制方面，通过电池单体容量、能量、电压变化曲线正交化比较方法进行成组电池筛选，可长期保持成组电池一致性在 0.03 V 以内，如图 4 所示。

4. 一体化动力传动控制系统

奥运电动客车项目团队开发了无离合器多挡电控机械自动变速箱（AMT）动力传动系统，如图 5 所示，实现了基于 CAN 总线的一体化动力传动效率最优控制，有效提高了整车的经济性和动力性能 [7~10]。该团队还提出了基于空间矢量脉宽调制（SVPWM）控制的逆变器死区补偿方法，开发出高效全数字矢量控制交流电机驱动系统，提高了动力传动的系统效率。攻克了系统悬浮状态下二次绝缘、电磁兼容和静电释放等技术难题，并采用冗余控制和故障诊断技术提高了系统的可靠性。

5. 一体化冷暖电动空调技术

在国际上首次成功研制出采用涡旋式压缩机的电驱动空调，如图 6 所示，该空调通过直交逆变电源的模块控制，实现电动涡旋式压缩机无级变频启动、基频制冷和降频保持等过程，彻底改变了传统大客车的空调控制模式，节能效果显著；应用全封闭式涡旋压缩机，采用全焊接连接方式组成整体全

封闭式无漏点系统，彻底解决了车用空调的制冷剂泄漏和轴封技术难题，同时简化了安装，实现了大客车空调的一体化集成设计；应用热泵循环原理，通过增加四通换向阀及调整相应的控制方式，方便地进行制冷、制热模式切换，实现车用空调的冷暖一体化；采用两台“涡旋式压缩机”、两套冷凝器和蒸发器构成两个独立系统，可以同时启动也可以单独启动，实现了空调效果与节能的有机结合。

（三）充 / 换电基础设施

电动车辆充电时间长、车辆利用效率低、充电安全等问题长期以来都是电动车辆产业发展的瓶颈。目前主要有快速充电和电池箱快速自动更换两种技术方案。

1. 充电和更换兼容的充 / 换电站

2008 年，北京奥运会使用了当时国际上首创的规模最大的电动客车充 / 换兼容充电站，如图 7 所示。在奥运会期间为 50 辆电动客车提供 24 h 充电、动力电池更换服务以及相应的整车和电池维护保养服务 [11]，取得了巨大成功。车辆在快速更换区域通过自动更换机械实施电池分箱组合式快速更换，5 min 左右可完成一辆车的电池更换工作。根据电动汽车的特点和奥运会的应用需求，设计了续航时间和充电时间约束的车辆调度理论模型和方案，在充电站设置了调度监控中心。

我国“十三五”新能源汽车重点专项规划

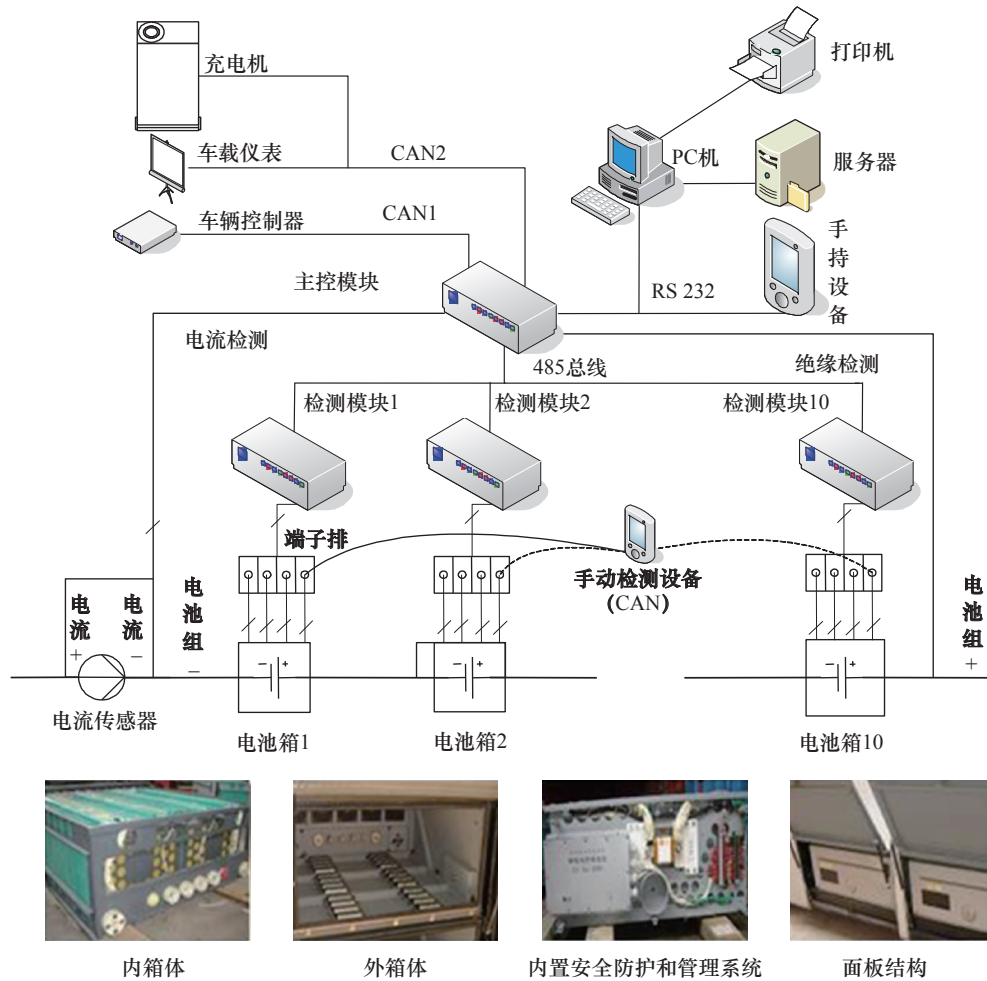


图4 动力电池成组运用技术及系统

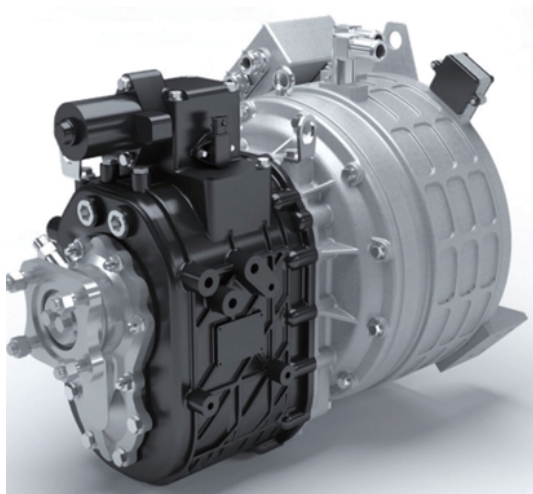


图5 一体化自动变速电驱动部件

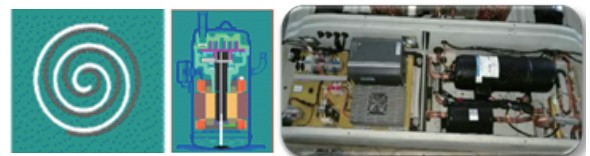


图6 一体化冷暖电动空调系统

了整车技术指标，对所有新能源汽车提出了比能耗和续航里程指标。合理的电/车质量比应该是15%~20%，特斯拉电动车因为电池系统能效比不

高而在新加坡被罚款。新能源车辆续驶里程、充电时间与电池比能量或电池装载多少有关，北京等大城市70%以上的车辆用户没有固定车位来安装充电桩。这一系列的问题导致换电模式成为新能源车推广应用的技术路线之一。

2010年前后，国家电网提出以换电为主、充电为辅的充换电基础设施建设技术路线。为了解决用地问题，我们对充换电站实施小型化，开发集装箱式的充换电站。将奥运会占地5000 m²左右的充换电站缩减至300 m²左右。我国出口波兰的充换电站就是集装箱模式（见图8）。同时乘用车充换电站

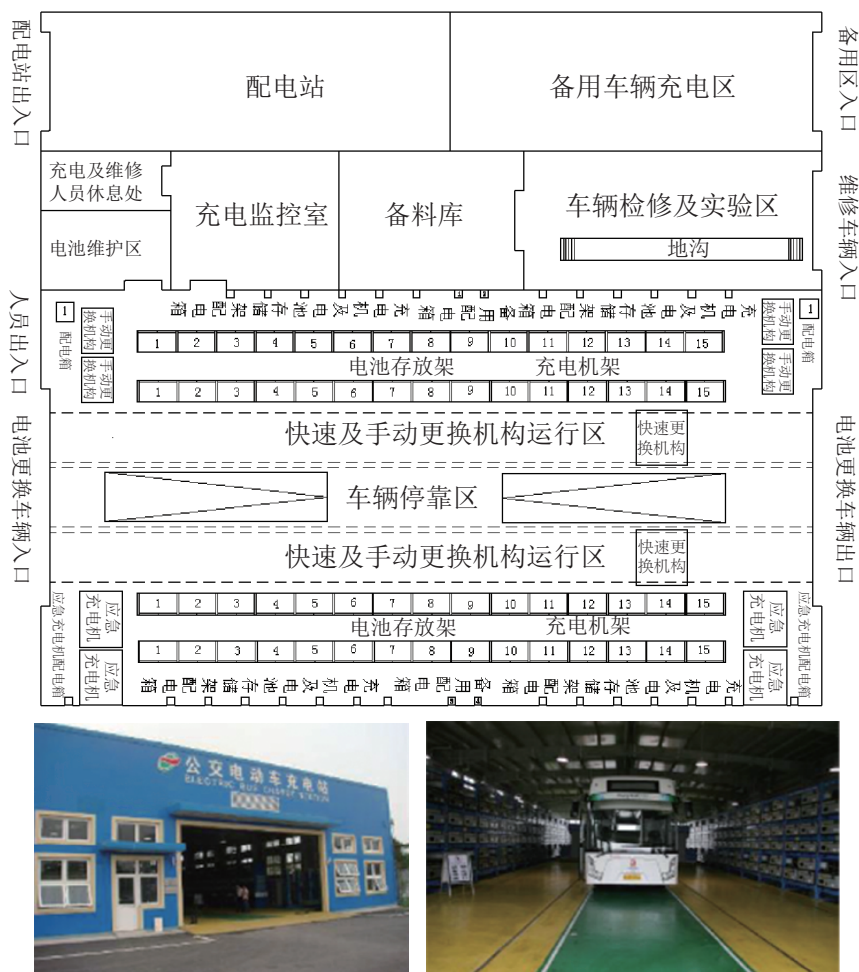


图7 北京奥运电动客车自动快速充/换电站

只需占地 120 m² 就可以服务 120 辆电动出租车或 1000 辆私家乘用车。换电模式的技术关键，首先是规划和建设，其次是互联共享，然后是自动定位和交汇桥接，最后就是锁紧技术。

2. 大功率充电

为了极大缩短动力电池的充电时间，目前很多大型跨国车企都提出了 350 kW、1000 V 的大功率充电。电动商用车用户对于大功率充电有着强烈需求，因为快速充电在贴合用车习惯、提高充电效率，降低车桩比等方面优势明显。然而，大功率充电模式在我国的发展仍然在讨论和探索中，选择适合我国国情的充电功率十分重要。大功率充电对电动汽车的安全性、电网高效稳定运行等都会造成一定影响，权衡功率和安全性之间的平衡是需要解决的难题之一；另一方面，高压大功率的使用对于电池系统、高压保护、高压接口、电控单元、高压传输回路等部件的耐压与过流能力有了更高的要求，对成本控制会造成影响，预估会比当前成本增加约 3 倍。



图8 集装箱模式的充换电站

随着技术的进步，电池的充电倍率特性、电池容量、续驶里程会逐渐增加，因此大功率快速充电需要谨慎探索，应该仔细分析和对比电动商用车快速充电与电池箱快速自动更换的优势及互补性。

(四) 运营监控与管理技术

随着新能源汽车运行规模的不断扩大，在工业和信息化部等国家相关部委的领导下，启动建设了新能源汽车运行国家、地方政府和企业三级监控与

管理体系,以实现“车辆运行安全可监测,企业主体责任可监管,车辆运行里程可追溯,财政补贴效益可评估,产品质量电耗可调查”等国家监管目标。

根据自奥运会以来北京电动车辆运行实时监控与管理的实践与经验,在国家工业和信息化部、财政部和北京市政府的领导和支持下,由北京理工大学牵头建设了“北京市电动汽车运行监控与服务中心”以及“新能源汽车国家监测与管理中心”,并对地方政府监管平台、新能源汽车企业监控平台的开发和建设提供技术支撑。由国家、地方政府、企业三级平台组成的新能源汽车安全运行监管体系正在逐步形成。截至目前,约有400家新能源汽车生产企业申请接入国家监控平台,4000多种新能源车型通过了标准体系符合性测试,并可按国家要求随时接入国家监测平台。

三、电动商用车技术展望

当前,新一代通信技术、新能源、新材料等技术与汽车产业正在加快融合。2022年北京冬季奥林匹克运动会即将到来,电动商用车将在冬季奥林匹克运动会的交通服务保障中再次承担重要角色。面对冬季奥林匹克运动会 -25°C 环境下的应用需求,电动商用车平台的系统技术升级至关重要。

(一) 突破低温禁区,研究全天候动力电池及电动商用车系统技术

提升动力电池的能量密度、循环使用寿命、安全性及降低成本是关键。锂离子动力电池的能量密度和功率性能在低温下大大降低,严重限制了其在低温环境中的应用。作为2022年北京冬季奥林匹

克运动会举办地之一的河北省张家口地区,冬季平均温度处于 -10°C 左右,而崇礼室外赛区在极寒时温度将降至约 -23°C 。全气候动力电池作为一种全新的电池技术(如图9所示),革命性地突破了电池在低温下的性能局限。全气候电池通过在内部插入了一片镍片,用很少量的电池能量能够在低于 0°C 时进行电池“自加热”,当电池温度上升到可用范围后,它又会自动停止加热,以免造成更多的能量损失[12]。此项技术能将锂离子动力电池在 -30°C 下的功率提高10倍以上,同时不减弱电池在常温下的性能和寿命。北京理工大学、中信国安盟固利动力科技有限公司和美国EC Power公司,合作开发了超低温区域应用带自加热技术的锂离子动力电池系统产品并进行产业化量产,成功实现动力电池系统自加热每分钟升温 10°C 以上且总加热能耗不超过5%。“全气候电池”将使得新能源汽车的推广应用再无禁区。

(二) 突破低温禁区,研究高效热泵空调技术

在冬季和夏季,车内空调系统是电动商用车主要的耗能部件之一。提高空调系统的制冷/制热效率是整车节能和提升续航里程的重要举措。低温增焓技术具有高效、节能的优势,并能在严寒条件下使性能得到提升,是新一代电动商用车平台技术升级的一项关键技术。通过宽温区变工况空气源热泵高效制冷/制热循环理论、低温环境下高制热能效热泵空调系统等技术突破以及采用低温增焓、高效换热器、高效的风扇电机、优化的风罩设计等技术,低温增焓空调低温制热能效比预期能达到1.6,在 -15°C 下制热能力预期提高近20%~50%,在 -25°C 时也能正常工作,能完全满足在严寒地区使用时的高效供暖需求。

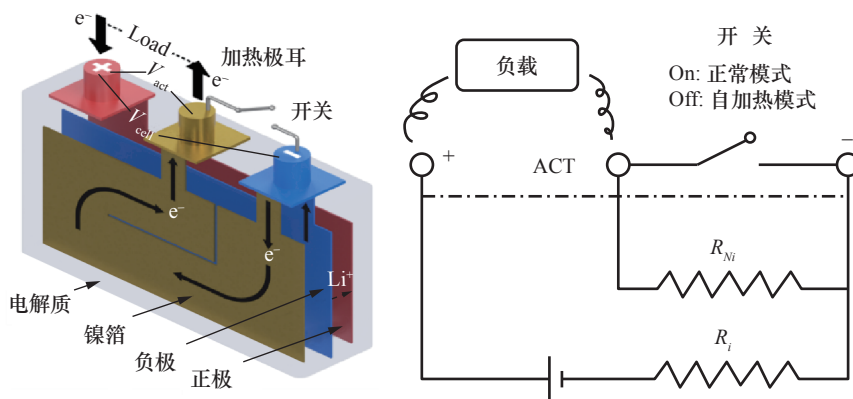


图9 全气候动力电池

(三) 提升整车动力性，研发高效电驱动系统

进一步提升整车的动力性能、降低能耗，对电机、电机控制器以及电驱动总成化集成提出了更高的要求。技术关键包括高效高密度电机和控制器、电机与传动高密度一体化集成以及高压集成控制器等，双电机耦合无动力中断自动变速电驱动系统、高效高集成度分布式电驱动系统成为可行的技术方案，如图 10 所示。另外研发效率达双 90%（效率 $\geq 90\%$ 的工作区域占整个工作区域的百分比达到 90% 以上）的电机驱动系统也成为技术攻关的重点。

(四) 提升整车的智能化水平，研究网联整车控制器及整车智能驾驶技术

智能化是新一代电动汽车的主要技术特征，也成为提升整车综合性能的主要技术抓手。技术关键包括整车线控底盘 [13]、整车网联控制电气架构、网联整车控制器及信息安全、基于云端多源信息的融合/决策/控制标定、整车智能辅助驾驶等。北京冬季奥林

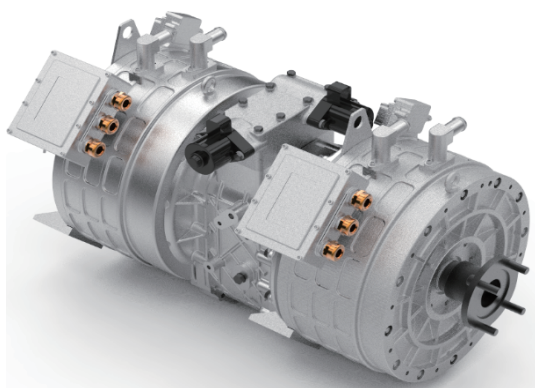
匹克运动会河北赛区地形主要为山区，进入冬季，道路坡度与冰雪路面等将导致车辆行驶工况十分复杂，对整车智能辅助驾驶提出了更高的要求。急需对智能网联控制技术、驱动电机与自动变速控制技术、系统智能控制技术等重新设计和开发，使整车达到更高的可靠性、安全性等综合性能。

四、结语

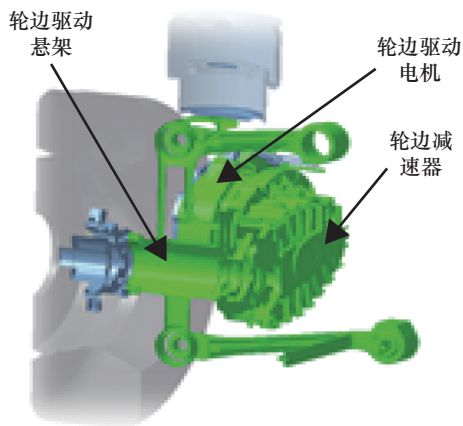
本文提出并明确了“电动商用车系统工程”的内涵，就其三大核心组成要素“电动商用车平台、充/换电站、运营实时监控”及其关键技术，分别进行了研究分析和讨论。面对 2022 年北京冬季奥林匹克运动会 -25°C 环境下的应用需求，突破目前纯电动商用车的低温应用禁区和提升整车动力性能、安全性等综合性能至关重要，从自加热全气候锂离子动力电池、低温增焓高效空调、高效电驱动系统、整车智能控制四个方面讨论了电动商用车平台技术升级的途径和关键技术。

参考文献

- [1] 欧阳明高. 中国新能源汽车的研发及展望 [J]. 科技导报, 2016, 34(6): 13-20.
Ouyang M G. New energy vehicle research and development in China [J]. Science and Technology Review, 2016, 34(6): 13-20.
- [2] Liu W, Khajepour A, He H W, et al. Integrated torque vectoring control for a three-axle electric bus based on holistic cornering control method [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017 (99): 1.
- [3] Liu W, He H W, Sun F C, et al. Integrated chassis control for a three-axle electric bus with distributed driving motors and active rear steering system [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 601-625.
- [4] Sun F C, Xiong R, He H W. Estimation of state-of-charge and state-of-power capacity of lithium-ion battery considering varying health conditions [J]. Journal of Power Sources, 2014 (259): 166-176.
- [5] Sun F C, Chen K, Lin C, et al. Experimental study on heat generation and dissipation performance of PEV Lithium-ion battery [J]. High Technology Letters, 2010, 16(1): 1-5.
- [6] He H W, Xiong R, Zhang X W, et al. State-of-charge estimation of lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1461-1469.
- [7] 林程, 陈国强, 孟祥, 等. 电动大客车传动系统控制技术研究 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(1): 25-28.
Lin C, Chen G Q, Meng X, et al. Strategies of control for electric bus transmission [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(1): 25-28.



(a)



(b)

图 10 高效电驱动系统部件

- [8] Zhang S, Xiong R, Zhang C N, et al. An optimal structure selection and parameter design approach for a dual-motor-driven system used in an electric bus [J]. *Energy*, 2016 (96): 437–448.
- [9] 林程, 王文伟, 孙逢春. 纯电动公交客车结构与设计 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 25–29.
Lin C, Wang W W, Sun F C. Pure electric city bus structure and design [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 25–29.
- [10] 高玮, 邹渊, 孙逢春. 纯电动公交车AMT 双参数换挡最优控制 [J]. *汽车工程*, 2016, 38(3): 344–349.
Gao W, Zou Y, Sun F C. Two-parameter optimal shifting control for the AMT of a battery electric bus [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(3): 344–349.
- [11] Sun F C, He H W. Industrialization of electric vehicles and key technologies [C]. *International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. Hong Kong, IEEE, 2011.
- [12] Wang C Y, Zhang G S, Ge S H, et al. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures [J]. *Nature*, January 20, 2016. dx.doi.org/10.1038/nature16502.
- [13] Sun F C, Liu W, He H W, et al. An integrated control strategy for the composite braking system of an electric vehicle with independently driven axles [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(8): 1031–1052.