

高性能全气候电动客车的关键技术

林程, 田雨*, 于潇, 徐焱, 蒋雄威, 孙逢春

北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

摘要 现有电动客车动力平台不能满足适用于传统燃油客车的最高车速及最大爬坡度的高性能应用需求, 以及严寒环境正常启动、低温环境续航里程不锐减的全气候应用需求。针对以北京理工大学牵头的研发团队研发的高性能全气候电动客车平台, 综述了全气候电池系统、双电机同轴自动变速驱动系统、整车多热源协同热管理系统等面向全气候电动客车关键技术, 分析了全气候电动客车的实验及成果在北京冬奥会的应用。结果表明, 研发的高性能全气候电动客车在严寒环境适应性、爬坡-高速工况动力性等方面, 适用于2022北京冬奥会应用场景, 满足其严苛要求。

关键词 新能源汽车; 电动客车; 全气候电池; 双电机驱动; 整车热管理

2021年在全国两会的政府工作报告中首次提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标, 并提出将优化产业结构和能源结构, 大力发展新能源^[1-3]。其中, 新能源汽车产业是国家战略性新兴产业, 对于优化产业结构和能源结构有着积极而深远的影响。因此推动新能源汽车产业发展不仅能够降低中国碳排放水平, 同时也是实现中国绿色经济可持续发展的重要举措^[4-5]。

但是, 随着新能源汽车规模不断扩大, 环境工况适应性限制了新能源汽车产业进一步发展。通过新能源汽车国家检测与管理平台统计数据发现, 中国新能源汽车保有量的84%分布在长城

以南温暖地区和中心城市以及平原地区, 而广袤的东北和西北地区则几乎成为新能源汽车推广应用的“禁区”^[6]。新能源汽车的低温环境适应性能和复杂工况适应性能是阻碍其规模化应用的重要原因。根据《中国汽车报》发布的《2021新能源汽车冬季续航里程测试报告》显示, 在-20℃环境温度下, 特斯拉Model Y续航里程保持率仅为47%, 大众ID.4 X续航里程保持率仅为51%^[7]。

同时, 2022年北京冬奥会坚持“绿色办奥”理念, 政府承诺所有赛事通勤、运载车辆将全部采用新能源客车。然而冬奥会核心赛区冬季最低气温超过-30℃, 海拔落差高达884 m, 现有新能源客车

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2501900); 国家自然科学基金项目(51975049)

作者简介: 林程, 教授, 研究方向为汽车总体技术及电动客车动力平台, 电子信箱: lincheng@bit.edu.cn; 田雨(通信作者), 博士研究生, 研究方向为全气候动力电池低温热管理, 电子信箱: tianyu@bit.edu.cn

引用格式: 林程, 田雨, 于潇, 等. 高性能全气候电动客车的关键技术[J]. 科技导报, 2022, 40(14): 41-50; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.14.004

无法满足冬奥会运营要求。针对现有动力电池系统低温环境可用容量衰减、现有驱动系统动力性差以及现有热管理系统能耗高等难题,本研究团队提出高性能全气候电动客车关键技术,成功实现了其冬奥会规模化应用,这有助于电动汽车行业突破“禁区”。

1 全气候电动客车平台关键技术研究

1.1 基于电池-加热片堆叠夹层结构的全气候电池系统

新能源汽车低温环境适应性差主要原因为低温条件下锂离子电池性能大幅降低,充电过程可能引发析锂,长期使用寿命出现严重衰减,进而导致车辆续驶里程缩短。锂离子电池最优工作区间为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ ^[8],低于 15°C 时,放电过程中电池内部电化学反应速率及锂离子扩散速度变慢、内阻增加,可用容量减少^[9];充电过程中,低温导致电池负极出现金属锂沉积,活性锂离子损失导致电池容量衰减^[10]。

电池加热技术是突破中国新能源汽车低温应用瓶颈、改善电池低温性能的关键。然而,加热元件在电池模组或箱体外表面的外部加热技术依赖充电桩供电,加热速度慢、效率低,难以实现极速加热^[11-14];利用充放电时电池自身内阻产热的内阻加热技术能量利用效率低、加热电流大,长期加热损伤电池寿命^[15-19]。宾夕法尼亚大学的Wang等^[20]将金属镍片放入锂离子电池单体内部,利用电流通过镍片产生的欧姆热快速加热电池,称为全气候电池

(all climate battery, ACB)。加热片内置的全气候电池加热速度极快、能耗少,但内置加热片的方案存在密封不严、安全及可靠性待完善等问题,难以应用于安全要求极高的新能源汽车。

1.1.1 全气候电池系统自加热原理

为突破上述难题,面向2022年冬奥会新能源汽车应用,全气候客车搭载了基于电池-加热片堆叠夹层结构的全新全气候电池技术。电池系统构型如图1所示,加热片置于电池系统内部、电池单体之间,电池和加热片间隔堆叠布置,组成夹层加热结构。与目前国内外新能源汽车中主流搭载的循环水加热或正温度系数加热片(positive temperature coefficient, PTC)相比,电池-加热片堆叠夹层结构实现加热面积扩大15倍以上,加热距离缩短30倍以上,而且不需要改变电池单体的结构,电池-加热片堆叠夹层结构的全气候电池系统如图2所示。该结构既克服了现有内、外部加热传热路径远、加热效率低的构型本质缺点,又突破了加热片内置的全气候电池构型安全与可靠性差、难以成组的应用瓶颈难题。

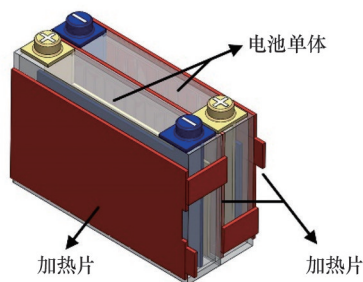


图1 电池-加热片堆叠夹层结构原理

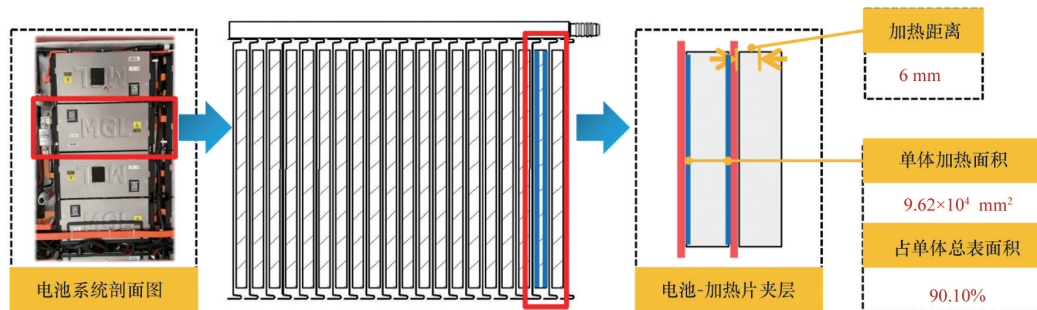


图2 全气候电池系统剖面图

1.1.2 全气候电池系统工程化关键技术

为满足工程化及产业化要求,全气候电池系统采用了基于加热和工作相互独立的双回路架构。加热片经过绝缘处理后,置于箱内电池单体与单体之间,但不与相邻单体电连接,如图3(a)所示。单

体正常成组,加热片之间单独成组,如图3(b)所示。电池组相互连接不受数量限制,实现根据车辆功率和能量需求任意匹配电池组。同时,独立双回路架构实现了全气候电池系统加热过程与充放电过程的解耦,可靠性高。

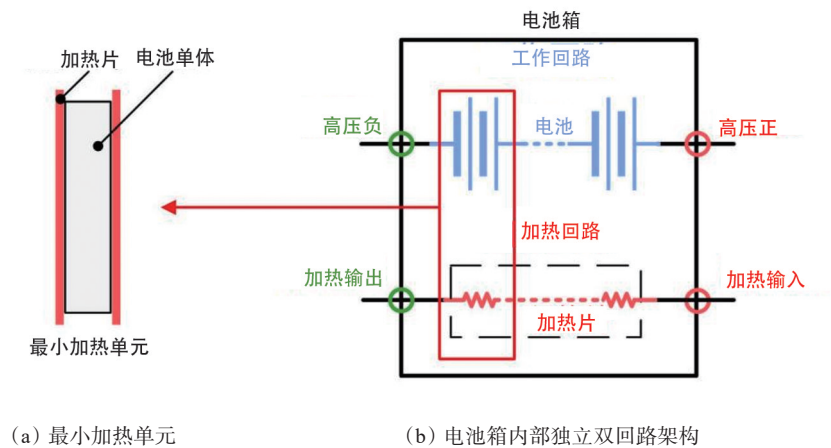


图3 全气候电池系统

加热片设计方面,提出了超薄条栅结构加热片结构设计方法,加热片仅0.1 mm厚,且条栅结构可实现全气候应用。低温加热时,加热片形状拓扑针对电池系统不同区域温度分布单独设计,实现高效均匀加热;高温工作时,条栅结构可实现将电池工作产热快速导出至液冷板,实现全气候应用。同时实际测算表明,在电池系统内布置加热片后,动力电池系统体积增加小于2%、重量增加小于3%,加热片对现有电池系统的结构和能量密度影响很小,可在现有电池系统结构上推广,降低生产成本。

1.1.3 全气候电池系统智能极速加热控制策略

控制策略方面,项目团队提出了全气候动力电池系统智能极速加热控制策略,工作回路与加热回路之间使用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)功率控制开关连接,具有驻车加热和充电加热多种工作模式,并可根据电池当前状态智能调节加热速率,保证了电池系统极速加热过程的安全可靠。同时,智能极速加热控制策略采用软硬件双重触发控制,驾驶员加热控制指令为最高权限,加热接触器与智能车载终端加热开关为软硬件双重触发条件,最终实现整车控制器(vehicle control unit,VCU)与电池管

理系统(battery management system,BMS)协同控制的全气候电池系统智能加热逻辑。

第三方检测结果显示,工程化的全气候电池系统在 -25°C 下静置不少于16 h后,由 -25°C 加热至 0°C 用时仅167 s,加热速率达 $9^{\circ}\text{C}/\text{min}$,自加热能耗不超过电池系统的5%。基于电池-加热片堆叠夹层结构的全气候电池技术,加热速率快、效率高、均匀性好、仅利用电池自身能量加热,将成为电池加热技术的重要发展趋势之一。

1.2 适用于宽工况条件下的双电机同轴自动变速驱动系统

1.2.1 双电机同轴自动变速驱动系统构型

北京冬奥会的宽工况运行环境对电动客车的驱动系统性能提出了更严苛的要求。在目前面向电动客车开发的驱动系统构型中,无变速装置的单电机直驱构型无法同时实现高车速和大爬坡度^[21];单电机与多挡变速器耦合构型又存在动力中断、换挡控制复杂、坡道安全性差等难题^[22]。

为此,发明了一种新型双电机同轴自动变速驱动构型(图4)。在传动结构方面,为了进一步提高总成布置的紧凑程度以及传动效率,主电机(trac-

tion motor, TM)与驱动桥直连,采用了基于行星排的两挡变速装置替代了原有的箱体式机械式自动

变速箱(automated mechanical transmission, AMT)结构^[23]。

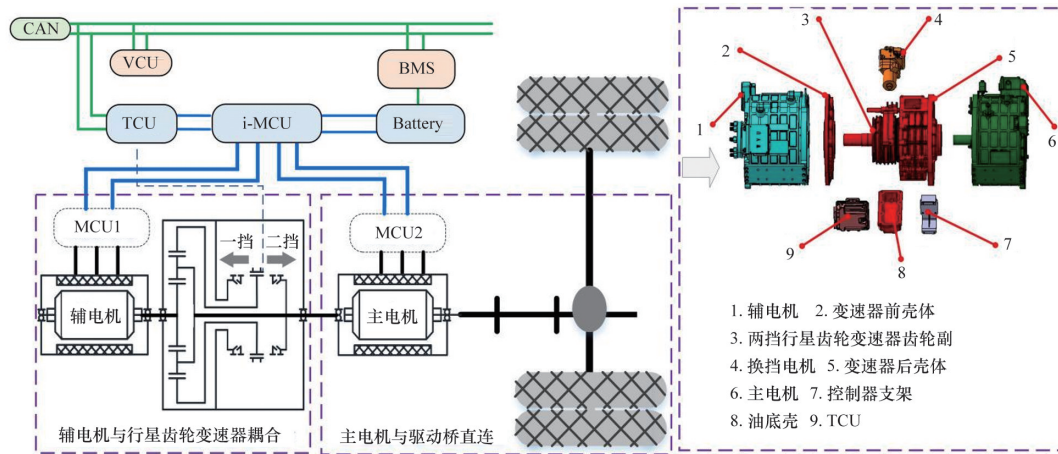


图4 双电机同轴自动变速驱动系统构型

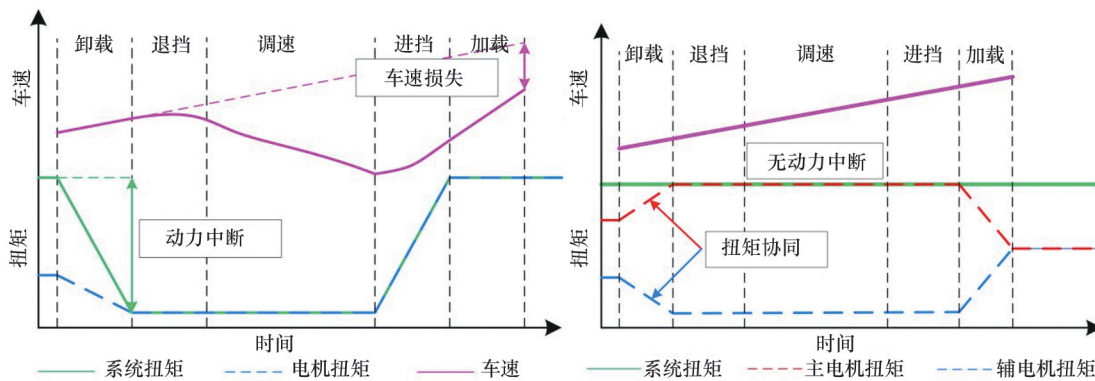
其中辅电机(auxiliary motor, AM)的输出轴与行星排太阳轮连接,动力经行星架输出并与主电机同轴扭矩耦合;在齿圈上设置有接合套和同步装置,可以分别在换挡电机的作用下与行星排壳体连接、与行星架连接或悬置于自由状态,相应地分别可作为一个挡、二挡以及空挡进行工作。

双电机同轴自动变速驱动系统具有多种工作模式,通过准确的转速和扭矩调节实现高效运行,在具有较高行驶舒适性的同时提升整车经济性。在扭矩模式下,齿圈连接壳体,辅电机扭矩经行星排变速后与主电机耦合,系统最大扭矩可达到4577 N·m,此模式适用于大扭矩需求的起步和坡

道行驶状态。在功率模式下,齿圈与行星架链接,行星齿轮变速器处于整体回转状态;主电机和辅电机在转速上保持一致,该模式适用于高速行驶状态,最高车速可达126 km/h。在效率模式下,齿圈处于自由状态,主电机单独提供驱动力;在40 km/h定速巡航状态下,驱动系统综合效率达到94.5%^[24]。

1.2.2 无动力中断协同换挡技术和挡位位置在线计算方法

在双电机同轴自动变速驱动构型的基础上,设计了双电机协同换挡控制策略,如图5所示。以升挡为例,行星排变速系统的换挡过程主要涉及驱动电机的扭矩响应与换挡执行机构的位移动作,这与



(a) 单电机4挡AMT驱动构型

(b) 双电机同轴自动变速驱动构型

图5 换挡过程示意

传统 AMT 换挡过程并无主要区别,主要分为卸载、退挡、调速、进挡和加载 5 个阶段。其中,调速又可细分为电子同步调速和机械同步调速。电子同步负责率先将转速差“粗调”到一定范围内,而后再通过同步器将转速差“精调”至目标转速。

传统 AMT 为了避免冲击、打齿等问题,在挡位切换的同时显然不能够施加驱动扭矩,便会出现系统输出扭矩中断的现象。如图 5(a)所示,在单电机进行调速时,无法响应总成需求扭矩,因而出现了较长时间的动力中断问题。这就需要通过机械器件被动摩擦或电机主动转速控制在极短时间内协调输入、输出轴转速使得整个换挡过程尤其是同步调速过程尽量在瞬时完成^[25]。

双电机协同换挡控制策略如图 5(b)所示,在辅电机进行调速时,主电机可以同步地提高输出扭矩,使得总成输出扭矩始终贴合总需求扭矩,而在进挡阶段完成后,主电机又逐步降低了扭矩,仍与辅电机协同输出扭矩,实现了换挡过程无动力中断。同时,在卸载和加载阶段,电机的扭矩变化是直接作用于驱动桥上产生换挡冲击,所以传统的单电机 AMT 构型需要平衡扭矩和冲击。双电机同轴自动变速驱动构型可以通过主电机和辅电机的扭矩协同,实现快速的扭矩变化,缩短换挡时间,实现无感换挡。

挡位位置信号是整个双电机系统换挡控制中最重要的参数,若控制器写入值和实际机械位置存在较大偏差会造成换挡失败,影响车辆运行。为此,针对双电机同轴自动变速驱动系统,设计了基于强化学习的挡位位置在线计算方法,通过对结构参数的准确辨识在线更新最优位置值^[24],为换挡控制提供实时精准的目标信号,改善换挡品质,避免了恶劣环境中因执行机构变形、磨损等引起的换挡失效问题,实现了宽工况等复杂场景下最优挡位位置自适应识别,提升系统的环境适应性及可靠性。

1.2.3 基于公交大数据的策略优化方法

实际应用过程中,驱动系统的效率和性能严重依赖能力管理策略^[26-27],所以,双电机同轴自动变速驱动系统面向复杂工况的最优控制难题需要通过优化规则策略解决。如图 6 所示,面向宽工况应

用环境提出一种离线提取在线应用的全局最优控制方法^[28]。

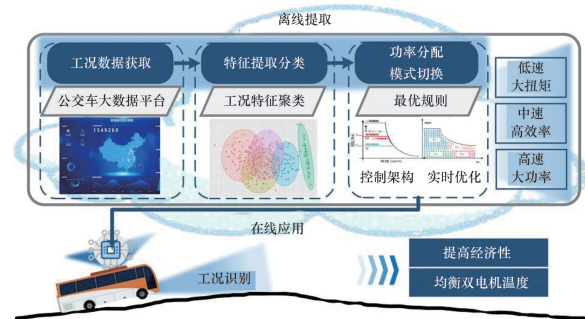


图6 离线提取在线应用的最优控制方法

根据北京城市公交道路宽工况的应用场景,建立了基于物联网、大数据的全数据采集、多场景监测公交数字化监控平台。从高速、旅游客运、山区等工况中离线提取车速、加速度、坡度等信息进行数据聚类分析,生成典型工况及特征参数。

在典型工况的基础上,进行考虑换挡频次、动力性能及能量损失的离线全局优化,并采用支持向量机算法从最优工作数据中迭代计算出最佳换挡规律曲线以满足在线应用需求;基于特征参数进行实车工况识别,依据不同工况实时优化双电机功率分配策略,并采用自适应惩罚因子使得优化问题在微观与宏观时间尺度上解耦,实现了以总成效率为主,兼顾扭矩突变、温升平衡、动力中断等特性的综合优化,解决了山路连续爬坡等恶劣工况下行车时动力总成的低效、循环换挡、过温等难题^[29]。

1.3 整车多热源协同热管理系统

全气候电动客车在极端环境下的制热量(严寒环境)、制冷量(高温环境)需求较大,但目前的热泵空调技术的能效较低,不仅难以满足冷热需求,无法保证车舱的舒适性,还会使得系统功耗显著提升,从而降低全气候电动客车的续航里程^[30]。同时,整车一体化热管理系统管理对象多、协同难度大,其性能直接影响着整车经济性和电源系统的安全性。

1.3.1 基于余热利用的喷射补气型热泵空调

热泵空调技术通过从空气源中吸收热量,是电动客车解决低温制热问题的有效方案^[31],国外知名

汽车零部件供应商如电装、法雷奥、博世等研发的热泵空调系统已在纯电动乘用车上成熟应用,但在电动客车上应用较少^[32]。一般来说,传统热泵空调工作温区在 -10°C 以上,当环境温度低于 -10°C 时,需采用正温度系数热敏加热器(positive temperature coefficient, PTC)进行加热补偿,然而PTC加热方式由电能直接转化为热能,制热能效比小于1,能耗大^[33]。而崇礼奥运核心区的冬季最低气温为 -30°C 左右,全气候电动客车在冬奥期间需长时间运行在严寒环境,因此传统热泵空调+PTC加热补偿的方案不再适用。

为解决空调的高能耗对全气候电动客车续航里程的影响,拓宽热泵空调的工作温区,本团队研发了基于余热利用的喷射补气型热泵循环冷暖空调系统,如图7所示。

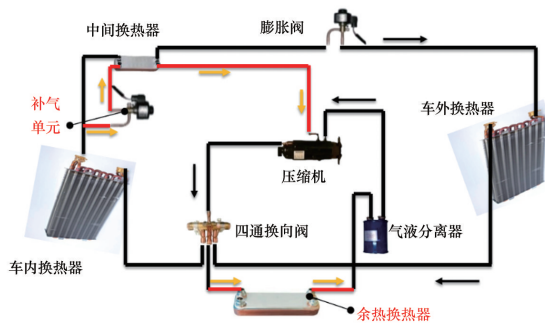


图7 基于余热利用的喷射补气型热泵循环

低温环境下压缩机吸气压力较低造成制热量不足,且压比过大还会造成排气压力过高引发安全隐患。因此喷射补气的涡旋压缩机通过中间补气准二级压缩支路引入中间压力的低温制冷剂,不仅增大制冷剂循环流量,而且降低了排气温度。通过合理设计补气支路与主路流量分配特性可大幅提升制热性能。由于低温环境下传统热泵空调本身制热量不足,若在满足电池/电驱动系统的冷却散热要求的同时,对其余热进行充分回收,可增加热泵系统的制热量。因此在热泵的蒸发端串联余热换热器成为电动客车的低温性能提升重要解决方案。通过余热换热器的换热结构优化、与热泵的耦合关系及智能控制,热泵空调的制热效率显著提高。基于上述技术方案,本团队进行了热泵机组的

性能测试,测试装置如图8所示。实验结果表明,所研发的热泵空调工作温区可拓宽至 $-25\sim 50^{\circ}\text{C}$;且在车外 -20°C 、车内 20°C 的工况下,制热能效比可达1.84;在车外 35°C 、车内 27°C 的工况下,制冷能效比可达3.23。



图8 热泵机组性能测试

1.3.2 纯电动客车余热回收式整车液冷综合热管理方案

动力电池的高效安全工作范围为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$,其热特性是影响电池安全、寿命和使用安全的重要因素,因此其温控的合理设计是实现电动客车最佳功率性能和最长使用寿命的重要前提。针对纯电动客车,本团队创新地提出了以动力电池为核心的余热回收式整车液冷综合热管理方案,如图9所示。热泵空调的冷媒回路和动力电池的冷却水回路通过电池换热器进行热交换,为了实现制冷剂流动方向和流量大小的完全可控,基于电子膨胀阀和单向阀设计的余热回收组合阀方案可实现热量的按需搬运。通过解决制冷剂流量最优分配问题和模式切换时系统压力波动问题,进而实现充电模式、制冷模式和制热模式等多种热管理换热模式。在充

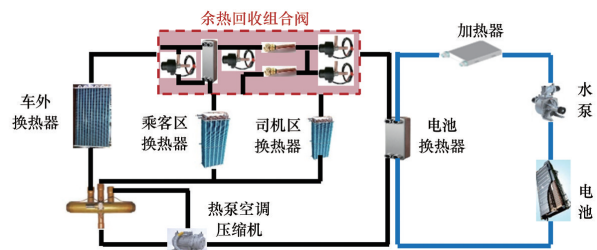


图9 纯电动客车余热回收式整车液冷综合热管理

电模式下,电池发热产生的热量通过高温冷却水带入电池换热器与低温冷媒进行热交换,从而起到对电池充电时进行冷却的效果。在制冷模式下,余热回收组合阀中将低温冷媒分为2个支路,分别流向车外换热器给车舱制冷和流向电池换热器给电池冷却。在制热模式下,带有电池余热的冷却水与冷媒进行热交换后,其热量流入热泵空调回路,用于车舱的制热。通过整车性能测试,与国外同类电动客车相比,采用本方案的全气候电动客车热管理系统功耗平均下降30%以上。

1.3.3 燃料电池客车余热回收式整车液冷综合热管理方案

燃料电池电堆维持正常电化学反应所需的工作温区窄,一般为70~80℃^[34],且冷却水的进出口温差需维持在10℃以内,因此燃料电池客车的整车综合热管理目前受到国内外科研人员的广泛关注。不过目前大部分研究侧重点在燃料电池的水热管理,如国外同类电动客车,通过节温器实现燃料电池大小散热循环的切换,仅满足电堆散热需求。而燃料电池电堆产热量较大,设计整车级热管理系统利用电堆余热对提升能源利用率十分重要。本团队针对燃料电池电动客车,提出多热源耦合式整车一体化热管理方案,如图10所示。考虑到燃料电池电堆对冷却液的低电导率和低流阻的要求,二通道完全隔离的铝制板翅式余热交换器方案满足了燃料电池系统和车舱环境间的高效换热需求,并实现了余热利用量的自适应控制及可余热供暖模式的智能切换,从而同时保障了车舱采暖的舒适性与燃料电池系统运行高效性的均衡。实验测试表明,所设计的板翅式余热换热器在严格控制冷却液离子析出和保证高流量低压降的前提下,可实现在

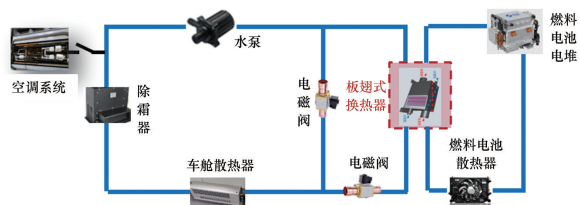


图10 燃料电池客车多热源耦合式整车一体化热管理方案

15℃温差下,换热量 ≥ 20 kW的效果。第三方检验报告显示,采用此方案后,全气候电动客车实际工况氢气消耗量降低11.6%。

2 全气候电动客车的实验及成果冬奥应用

2.1 全气候电动客车实验效果

1) 低温冷启动效果。搭载全气候电池系统的全气候电动客车可实现-40℃严寒环境下不借助外部能源自激活启动。从2018年起到2020年,搭载全气候电池系统的全气候客车连续3年被运往海拉尔及牙克石冬季实验场等严寒地区进行冬季实验,验证全气候电池系统可靠性。实验时将全气候电动客车在-37℃左右严寒环境中静置72 h以上,确保车辆与环境达到完全热平衡,如图11(a)。静置时打开电池舱门,确保全气候电池系统完全冻透,内部温度与环境温度相同,如图11(b)。之后,启动一键加热,全气候电动客车实现不依赖外界能源冷启动仅需6 min。



(a) -37℃作用严寒环境下整车72 h静置



(b) 静止时打开电池舱门,确保全气候电池系统完全冻透

图11 全气候电动客车冬季实验

2) 宽工况运行效果。本团队研发的双电机同轴自动变速驱动系统结构精简紧凑,特性完备优良,尤其适合纯电动公路客车应用需求,其扭矩密度达到14.44 N·m/kg,功率密度达到1.07 kW/kg,最高转速超过4500 rpm。搭载双电机系统的电动公路客车能同时满足大扭矩爬坡和高速行驶的宽工况应用需求,在兼顾动力性能和环境适应性的前提下,具有更高的舒适性和可靠性。

3) 低温续驶里程提升效果。本团队研究的全气候电池、双电机驱动系统和整车一体化热管理方

案应用于全气候电动客车上能显著提升整车低温续驶里程。图 12 展示了在 -25°C 环境下电动客车的续驶里程损失分析。对于普通电动客车而言,开启空调后,空调能耗损失占比高达 27%,普通低温加热方案电池低温容量损失高达 16%,整车续驶里程保持率仅为 53%;而对于采用本团队研究的创新成果的电动客车,开启空调后,空调能耗占比降低为 15%,虽然电池低温加热会消耗 4% 的能量,但是电池低温容量损失降为 1%,综合而言,整车续驶里程率可以达到 76%。虽然提高低温续驶里程的最有效途径是动力电池的技术突破,但在动力电池高能量密度与高安全性难以兼得的技术瓶颈下,通过全气候电池低温加热技术、双电机高效驱动系统和整车一体化热管理方案的协同发力,电动客车的低温续驶里程保持率也将大幅提升。

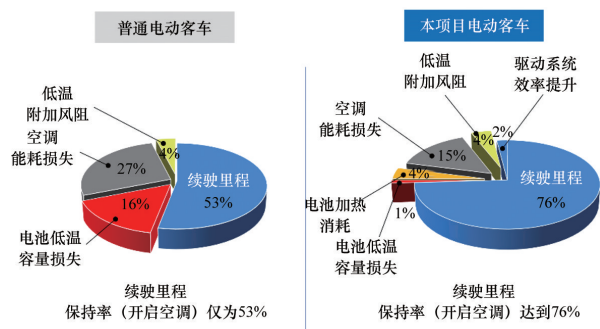


图 12 整车低温续驶里程提升效果

2.2 全气候电动客车平台北京冬奥会应用

2022年北京冬奥会冬残奥会核心赛区冬季最低气温低于 -30°C ,海拔落差达到 884 m。为实现绿色办奥理念,北京市政府承诺所有赛事通勤、运载车辆将全部采用新能源客车。2022年2月4日至3月13日北京冬奥会冬残奥会期间,搭载基于电池-加热片堆叠夹层结构的全气候电池系统、适用于宽工况条件下的双电机同轴自动变速驱动系统和整车多热源协同热管理系统的全气候高性能电动客车,在环境温度 -30°C 、连续坡道超过 7.5 km 的工况下累计行驶里程超过 60 万 km,累计运送旅客超过 10 万人次,并实现了极寒低温环境下快速启动,达到零失误、零路障、零风险的三“零”目标(图 13)。



图 13 北京冬奥会应用

3 结论

汽车产业电动化是全球新一轮产业变革的重中之重,以电动汽车为代表的新能源汽车已被列入中国战略性新兴产业。经过 20 年的发展,中国电动客车技术已处于世界领先地位,然而现有电动客车动力平台不能满足适用于传统燃油客车的最高车速及最大爬坡度的高性能应用需求,以及严寒环境正常启动、低温环境续驶里程不锐减的全气候应用需求。2022北京冬奥会作为典型的应用场景,对电动客车的严寒环境适应性、爬坡-高速工况动力性提出严苛要求。面向电动客车向复杂工况、全气候应用发展趋势及北京冬奥重大需求,以北京理工大学牵头的技术团队研发了高性能全气候电动客车平台,突破国内外现有电动客车平台电池系统、驱动系统、热管理系统的三大核心技术难题。

北京理工大学联合荣盛盟固利新能源科技股份有限公司研发了基于电池-加热片堆叠夹层结构的全气候电池系统,实现了全气候电池系统严寒环境冷启动、智能极速加热控制及工程化;联合北京理工华创电动车技术有限公司研发了适用于宽工况条件下的双电机同轴自动变速驱动系统,实现了无动力中断协同换挡及基于公交大数据的策略优化;联合中国科学院理化技术研究所和湖南华强电气股份有限公司研发了整车多热源协同热管理系统,开发了基于余热利用的喷射补气型热泵空调,以及纯电动和燃料电池电动客车整车热管理方案;联合北京公交集团、福田汽车、宇通客车、安凯客车实现了批量化及推广应用。应用本项目成果的高性能全气候电动客车成功服务于 2022 年北京

冬奥会,核心技术也可推广至乘用车等电动汽车平台,有助于中国电动客车乃至电动汽车产业的技术水平和国际竞争力。

参考文献(References)

- [1] 冯浩,熊兆钦.“双碳”背景下新能源汽车产业机遇及发展战略思考[J]. 决策与信息, 2022(5): 68-76.
- [2] 尹宗义. 绿色低碳背景下“双积分政策”对新能源汽车行业的影响分析[J]. 汽车与新动力, 2022, 5(1): 11-15.
- [3] 孔德轩,朱劲波,储备.“双碳”目标下新能源调控智慧管理研究[J]. 数字化用户, 2021(35): 49-51.
- [4] 张艳,郑贺允,葛力铭. 资源型城市可持续发展政策对碳排放的影响[J]. 财经研究, 2022, 48(1): 49-63.
- [5] 潘苏楠,李北伟,聂洪光. 中国新能源汽车产业可持续发展综合评价及制约因素分析——基于创新生态系统视角[J]. 科技管理研究, 2019, 39(22): 41-47.
- [6] 王文伟,孙逢春. 全气候新能源汽车关键技术及展望[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 47-55.
- [7] -20℃能跑多远? 最大规模新能源车冬测结果公布[EB/OL]. (2021-12-16)[2022-06-28]. <https://www.dongchedi.com/article/7042105838638514720>.
- [8] Lin C, Kong W F, Tian Y, et al. Heating lithium-ion batteries at low temperatures for onboard applications: Recent progress, challenges and prospects[J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5(1): 3-17.
- [9] Zhang J Y, Shao D, Jiang L Q, et al. Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112207.
- [10] Tian Y, Lin C, Li H L, et al. Detecting undesired lithium plating on anodes for lithium-ion batteries—A review on the in-situ methods[J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117386.
- [11] Wang T Z, Wu X G, Xu S B, et al. Performance of plug-in hybrid electric vehicle under low temperature condition and economy analysis of battery pre-heating[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 401: 245-254.
- [12] Min H, Zhang Z, Sun W, et al. A thermal management system control strategy for electric vehicles under low-temperature driving conditions considering battery lifetime[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115944.
- [13] Huang Y, Tang Y, Yuan W, et al. Challenges and recent progress in thermal management with heat pipes for lithium-ion power batteries in electric vehicles[J]. *Science China(Technological Sciences)*, 2021, 64(5): 919-956.
- [14] Jin H Z, Han X F, Radjenovic P M, et al. Facile and effective positive temperature coefficient (PTC) layer for safer lithium-ion batteries[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(3): 1761-1766.
- [15] Guo S S, Xiong R, Wang K, et al. A novel echelon internal heating strategy of cold batteries for all-climate electric vehicles application[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 256-263.
- [16] Shang Y L, Liu K L, Cui N X, et al. A sine-wave heating circuit for automotive battery self-heating at subzero temperatures[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3355-3365.
- [17] Zhu C, Shang Y L, Lu F, et al. Core temperature estimation for self-heating automotive lithium-ion batteries in cold climates[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3366-3375.
- [18] Shang Y L, Zhu C, Lu G P, et al. Modeling and analysis of high-frequency alternating-current heating for lithium-ion batteries under low-temperature operations[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 450: 227435.
- [19] Li Y L, Gao X L, Qin Y D, et al. Drive circuitry of an electric vehicle enabling rapid heating of the battery pack at low temperatures[J]. *iScience*, 2021, 24(1): 101921.
- [20] Wang C Y, Zhang G S, Ge S H, et al. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures[J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 515-518.
- [21] de Santiago J, Bernhoff H, Ekegard B, et al. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(2): 475-484.
- [22] Lin C, Zhao M J, Pan H, et al. Blending gear shift strategy design and comparison study for a battery electric city bus with AMT[J]. *Energy*, 2019, 185: 1-14.
- [23] Zhao M J, Shi J H, Lin C. Optimization of integrated energy management for a dual-motor coaxial coupling propulsion electric city bus[J]. *Applied Energy*, 2019, 243: 21-34.
- [24] Lin C, Yu X, Zhao M J, et al. Collaborative control of novel uninterrupted propulsion system for all-climate electric vehicles[J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5: 18-28.
- [25] Lin C, Yi J, Yu X, et al. Gearshift control in engagement process of dual-motor coaxial propulsion system

- for electric bus[J]. IEEE Access, 2022, 10: 43351–43366.
- [26] Xu N, Kong Y, Yan J Y, et al. Determination of vehicle working modes for global optimization energy management and evaluation of the economic performance for a certain control strategy[J]. Energy, 2022, 251: 123825.
- [27] Li W H, Cui H, Nemeth T, et al. Cloud-based health-conscious energy management of hybrid battery systems in electric vehicles with deep reinforcement learning[J]. Applied Energy, 2021, 293: 116977.
- [28] Yu X, Lin C, Zhao M J, et al. Optimal energy management strategy of a novel hybrid dual-motor transmission system for electric vehicles[J]. Applied Energy, 2022, 321: 119395.
- [29] Yu X, Lin C, Xie P, et al. A novel real-time energy management strategy based on Monte Carlo Tree Search for coupled powertrain platform via vehicle-to-cloud connectivity[J]. Energy, 2022, 256: 124619.
- [30] 张文超, 邹慧明, 韩欣欣, 等. 电动客车用余热回收型热泵的换热器优化及性能实验研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(1): 91–99.
- [31] Qin F, Liu H Z, Zou H M, et al. Experiment investigation and control strategies on two-phase refrigerant injection heat pump system for electric vehicle in start-up stage[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(3): 828–839.
- [32] 蒋亚东. 电动汽车热泵空调系统现状及发展趋势[J]. 制冷, 2021, 40(3): 40–44.
- [33] 王从飞, 曹锋, 李明佳, 等. 碳中和背景下新能源汽车热管理系统研究现状及发展趋势[J]. 科学通报, 2021, 66(32): 4112–4128.
- [34] Xu J M, Zhang C Z, Wan Z M, et al. Progress and perspectives of integrated thermal management systems in PEM fuel cell vehicles: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111908.

Key technologies of high-performance all-climate electric bus

LIN Cheng, TIAN Yu*, YU Xiao, XU Yao, JIANG Xiongwei, SUN Fengchun

School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The new energy vehicles represented by the electric vehicles are included in China's strategic emerging industries. After 20 years of development, China's electric buses are now in the leading position in the world. However, the existing powertrain platform of the electric bus cannot meet the high-performance application requirements for the maximum speed and the best grade ability of the traditional fuel-powered buses, as well as the all-climate application requirements for startup in severe cold environments and without a sharp reduction in the cruising range in low temperature environments. For the high-performance all-climate electric bus platform developed by the technical team led by Beijing Institute of Technology, this paper analyzes the key technologies of the all-climate electric bus, including the all-climate battery system, the dual-motor coaxial propulsion transmission system, and the vehicle multi-heat source collaborative thermal management system, as well as all-climate electric bus experiments and applications in the Beijing Winter Olympics. It is shown that the developed high-performance all-climate electric bus is suitable for the application scenarios of the 2022 Beijing Winter Olympics and meets its stringent requirements in terms of adaptability to severe cold environments and dynamic performance under climbing and high-speed conditions.

Keywords new energy vehicles; electric bus; all-climate battery; dual-motor transmission system; vehicle thermal management ●



(责任编辑 王志敏)