

城市轨道交通车辆减重节能技术

曹成鹏¹ 闫俊材² 王兴佳³

(1. 北京城市轨道交通咨询有限公司, 100068, 北京; 2. 金华市轨道交通集团有限公司, 321015, 金华;

3. 河北雄安轨道快线有限责任公司, 071799, 保定)

摘要 [目的] 由于城市轨道交通(以下简称“城轨”)车辆新增的全自动驾驶技术、高冗余性技术等均在不同程度上增加了车载设备的数量,导致城轨车辆的质量越来越大,且由于城轨车辆的总体运量较大,导致其总体耗电量也维持在一个较高的水平。因此,需对城轨车辆的减重节能技术进行研究。[方法] 分别介绍了车体、牵引系统及辅助电源系统、转向架及制动系统、空调系统及车门系统、车钩及贯通道、车辆内装及客室设备的减重措施;分别介绍了牵引系统及辅助电源系统、空调系统和照明系统的节能措施。[结果及结论] 可采用的减重措施主要有:车体采用全铝结构;牵引系统采用永磁同步电动机;辅助电源系统采用高频辅助逆变器;充电机采用高频软开关设计;转向架采用轻量化设计;制动系统采用模块化设计;内装及客室设备采用新型材料。可采用的节能措施主要有:牵引系统采用永磁同步电动机;辅助电源系统采用高频拓扑结构;空调系统采用变频技术;照明系统采用 OLED(有机发光二极管)光源。应用所介绍的减重及节能措施,基本能够达到车辆整体减重 10% 以上、节能 10% 以上的目标。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 减重; 节能

中图分类号 U268.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.047

Urban Rail Transit Vehicle Light-weighting and Energy-saving Technologies

CAO Chengpeng¹, YAN Juncal², WANG Xingjia³

(1. Beijing Metro Consultancy Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 2. Jinhua Rail Transit Group Co., Ltd., 321015, Jinhua, China; 3. Hebei Xiong'an Rail Express Co., Ltd., 071799, Baoding, China)

Abstract [Objective] The increasing use of fully automated driving and high-redundancy technologies in urban rail transit vehicles (hereinafter referred to as 'metro') leads to the increase of on-board device amount to varying degrees, resulting in the increasing mass of metro vehicles. Additionally, due to the significant overall transport capacity of metro vehicles, their overall energy consumption remains at a higher level. Therefore, it is necessary to study the light-weighting and energy-saving technologies for metro vehicles. [Method] Meas-

ures for reducing the weight of carbody, traction and auxiliary power systems, bogies and braking systems, air-conditioning and door systems, couplers and gangways, as well as vehicle interior and compartment equipment, are introduced. Energy-saving measures for the traction and auxiliary power systems, air-conditioning system, and lighting system are presented respectively. [Result & Conclusion] Feasible light-weighting measures include adopting a full aluminum carbody structure for , utilizing permanent magnet synchronous motors for the traction system, employing high-frequency auxiliary inverters for auxiliary power system, implementing high-frequency soft-switching design for chargers, adopting light-weighting design for bogies, modular design for braking system, and new material for interior and compartment equipment. Available energy-saving measures include the adoption of permanent magnet synchronous motor in traction system, the application of high-frequency topological structure for auxiliary power system, the use of frequency converter technology for air-conditioning system, and OLED (organic light-emitting diode) light sources for lighting system. By implementing the described light-weighting and energy-saving measures, the target of vehicle overall light-weighting by over 10% and achieving energy-saving of over 10% can be effectively realized.

Key words urban rail transit; vehicle; light-weighting; energy-saving

目前,随着城市轨道交通(以下简称“城轨”)车辆逐渐向智能化、高可靠性、高舒适性等方向发展,新增的全自动驾驶技术、高冗余性技术、振动检测技术等均在不同程度上增加了车载设备的数量,导致城轨车辆的质量越来越大,甚至出现了部分项目的车辆质量超过合同要求的现象。

车辆的质量越大,其能耗也越大。由于城轨车辆的总体运量较大,导致其总体耗电量也维持在一个较高的水平^[1]。减少城轨车辆运行的能耗及用电总量,已经成为降低城轨运营成本的一个有效途径。据统计,城轨车辆 84% 的能耗集中在车辆系统

和通风空调系统,其分别占总能耗的 53% 和 31%。随着城轨车辆的快速发展,投入运营的城轨车辆越来越多,对车辆能耗的要求也随之越来越高,节能降耗已成为城轨研究的重要内容^[2]。

针对城轨车辆的减重节能问题,本文介绍了采用全铝车体结构、永磁牵引系统、高频辅助逆变器、高频软开关充电机、轻量化转向架、模块化制动系统 and 新材料客室设备等减重措施,以及永磁牵引电动机、高频辅助逆变器、变频空调和照明系统等的节能措施,并对根据称重试验、能耗试验所评估的减重节能效果进行了总结提炼。本文研究可为城轨车辆的设计与技术管理提供工程经验与技术指导。

1 城轨车辆减重技术

1.1 车体减重措施

在车体方面,一般通过使用全铝的牵引梁、枕梁、缓冲梁结构替换常规的钢铝混合结构来达到车体减重的目的。采用全铝型材焊接结构的车体底架示意图如图 1 所示。车体的主要减重措施有:①在保证车体强度的前提下,优化并减薄牵引梁下盖板的厚度;②加大牵引梁下盖板斜度,并减小车钩座处的尺寸;③在车体模态满足要求的情况下,使用最薄的车体铝型材;④车顶可采用等断面设计,空调机组采用跨骑式车顶安装方式,取消专门的空调机组平台;⑤优化车体型材断面,除受力较大的门角所对应的型腔采用厚壁外,其余可采用薄壁设计。当采取上述减重措施后,减重设计后的车体至少可减重 14%。

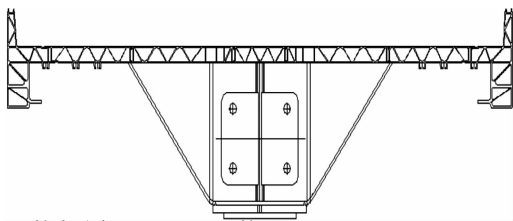


图 1 采用全铝型材焊接结构的车体底架示意图

Fig. 1 Diagram of carbody chassis with full aluminum profile welded structure

1.2 牵引系统及辅助电源系统减重措施

在牵引系统方面,主要可以通过采用永磁同步电动机的方法进行减重。相较于异步电动机,永磁同步电动机的功率密度较大,在省去异步电动机转子励磁线包的同时,还减少了其定子的硅钢用量。

常规额定功率为 190 kW 异步电动机的质量为 620 kg,而额定功率为 190 kW 的永磁同步电动机的质量仅为 530 kg,相当于可以减重 17%^[3]。

辅助电源系统可采用新型高频 DC(直流)/DC 变压器达到减重的目的。采用高频变压器替代传统工频变压器可减重约 200 kg。此外,高频变压器的软开关结构能够降低电力电子器件的功耗,使其散热片质量和风道结构质量也相应有所减小。

充电机采用高频软开关设计,摒弃了传统的低感母排、支撑电容的分立设计思路,采用先进的厚铜 PCB(印制电路板)设计,将焊接式支撑电容、滤波电容、传感器等器件集成在一块 PCB 板上,大大减小了其结构尺寸。和传统方案相比,减重设计后的结构尺寸减小了约 30%,其质量降低了约 20 kg。

在电气结构方面,主要可以通过减小箱体结构尺寸来达到减重的目的。具体减重措施有:①箱体主体结构使用铝合金;②在保证设备安装基础强度的前提下,在主梁及电抗器安装梁上开减重孔;③加强筋厚度方向设计为梯度结构。

牵引箱等牵引系统箱体尺寸为 50 mm × 50 mm,厚度为 5 mm,材质选用 6063T6 铝合金型材。箱体通过全部铆接的形式组合为框架,铆钉为不锈钢材质。采用两根吊耳梁(尺寸为 120 mm(长) × 60 mm(宽),厚度为 10 mm)的型材作为主梁,通过螺栓螺母连接到箱体上,以避免箱体内部采用规格较大的型材,进而达到箱体减重的目的。在完全满足牵引箱箱体强度要求的前提下,箱体的所有蒙皮采用厚为 3 mm 的铝合金板材,通过不锈钢铆钉铆接到框架上。与传统方案相比,减重设计后的箱体可减重约 30%。箱体模型示意图如图 2 所示。



图 2 箱体模型示意图

Fig. 2 Diagram of box model

1.3 转向架及制动系统减重措施

在保证转向架构架强度的基础上,对转向架的构架进行轻量化设计,主要通过优化电动机吊座等

结构,以及减少构架质量来达到减重的目的。转向架牵引梁、齿轮箱体、牵引拉杆杆体、轴箱前盖等结构采用铝合金材质,相比于原材质(铸钢或铸铁),其可减重超过 50%。转向架可通过采用空心车轴设计达到减重的设计目标。相对于球磨铸铁材质轴箱盖,采用铸造铝合金材质的轴箱前盖可减重约 50%。与常规转向架相比,减重设计后的动车转向架可减重约 500 kg,拖车转向架可减重约 300 kg。

制动系统可采用模块化设计达到减重的目的。将缸体单元和控制单元模块化,以减少固定吊架。制动模块吊架材质可采用铝合金来替代传统的钢板材质。目前,城轨车辆制动盘的常规盘体材质主要有铸铁和钢。随着材料技术的发展,盘体材质可采用质量小、导热性能好的铝合金。与传统铸铁材质制动盘相比,铝合金制动盘减重效果明显,外径为 640 mm 的铸铁制动盘质量为 92 kg,同样尺寸的铝合金制动盘质量仅为 38 kg。减重设计后的制动盘可减重约 58%。

1.4 空调及车门系统减重措施

空调机组的壳体材料可由原来的不锈钢材料改为碳纤维增强复合材料,风道材料可由铝板+隔热材料改为厚度为 10 mm 的复合材料。车内座椅下的电热器采用碳纤维电热板,代替原来的不锈钢电热器。减重设计后,每辆车能够减重约 130 kg。

客室车门采用内藏密闭门系统,以达到与城轨车辆密封性最好的塞拉门系统同等的密封性能。单个客室车门与传统客室车门相比,减重设计后的车门质量减小约 40 kg,以地铁 B 型车为例,每辆车可减重约 320 kg。

1.5 车钩及贯通道减重措施

在橡胶缓冲器、胶泥缓冲器、气液+环簧缓冲器、胶泥+环簧缓冲器这几种可用车钩缓冲器中,对比其性能和质量因素,优选胶泥+环簧缓冲器。在满足性能要求的同时,胶泥+环簧缓冲器的价格适中,质量最小。相比于常规方案的胶泥缓冲器,采用胶泥+环簧缓冲器可使车钩减重约 25 kg。取消中间车钩的垂向橡胶支撑,可使其减重约 40 kg。

贯通道的渡板和踏板,可选用 7 系铝合金材质替代常规方案的不锈钢材质。在踏板表面进行硬化处理,增加其耐磨性,可使贯通道的渡板和踏板减重约 30 kg。相比于常规方案,减重设计后的贯通道可减重约 9.5%。采用铝合金渡板和踏板的贯通道模型示意图如图 3 所示。

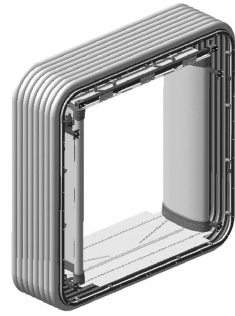


图 3 采用铝合金渡板和踏板的贯通道模型示意图
Fig. 3 Diagram of gangway model using aluminum alloy crossover plates and pedals

1.6 车辆内装及客室设备减重措施

在车辆内装及客室设备方面,可通过优化侧顶和侧墙的安装结构、座椅端部扶手结构及尺寸、采用非凸出侧墙的立罩板结构等措施达到减重的目的。车辆内装可采用的新型材料与传统材料如表 1 所示。若车辆内装全部使用新型材料,每辆车内装质量预计可由 3.2 t 减重为 2.2 t。例如:采用新型材料的六人座椅总重为 42 kg,较常规项目玻璃钢材质的六人座椅减重约 50%,即能够实现减重 252 kg/车。

表 1 车辆内装可采用的新型材料与传统材料
Tab.1 New and conventional materials available for vehicle interior

序号	结构部位	传统材料	新型材料
1	中顶板	铝蜂窝	玻璃纤维预浸料 酚醛发泡板
2	侧顶板	铝型材	碳纤维
3	侧墙板	铝蜂窝或玻璃钢	玻璃纤维预浸料 酚醛发泡板
4	端墙+间壁	铝蜂窝或玻璃钢	玻璃纤维预浸料 纸蜂窝
5	座椅面板	玻璃钢或不锈钢	碳纤维
6	座椅骨架	铝型材或普通钢板	高强度薄钢板
7	扶手	不锈钢或铝合金	镁铝合金
8	挡风板	铝蜂窝或铸铝	镁铝合金

2 城轨车辆节能技术

2.1 牵引系统及辅助电源系统节能措施

永磁同步电动机具有高功率因数和高效率特性。与异步电动机相比,永磁电动机无需无功励磁电流^[4],故其功率因数和效率均高于异步电动机。永磁电动机的相关参数数据如表 2 所示。永磁电动

机的额定工作效率超过 95%,功率因数超过 0.88。而传统异步电动机的额定工作效率为 93%,功率因数为 0.86。相比于同规格的异步电动机,永磁电动机的额定工作效率提高了 2%~4%。

表 2 永磁电动机相关参数数据

Tab.2 Relevant parameter data of permanent magnet motor

定子频率/Hz	转速/(r/min)	功率因数	额定工作效率/%
81	1 215	0.89	95.4
111	1 665	0.90	96.6
141	2 115	0.95	97.6
171	2 565	0.99	98.2
201	3 015	0.97	95.5

辅助电源系统可采用高频 DC/DC 拓扑结构替换原来的高耗能工频变压器。在满载工况下,采用高频 DC/DC 拓扑结构的辅助电源系统输入电流为 105 A,线网电压为 724 V,输出有功功率为 70.1 kW。经计算可知,其逆变器输出效率为 92.21%^[3],相比于辅助电源系统的输出效率提高了约 2%。此外,还可通过降低开关器件的电压等级、采用全软开关技术等措施降低器件开关的损耗,提高系统效率,进而达到节能的目的。

2.2 空调系统节能措施

1) 减少空调开关损耗。定速空调机组通过不断开停压缩机来维持客室温度,变频空调机组通过低频低功率运行来维持客室温度^[2]。变频空调机组不仅减少了压缩机的开停次数,还降低了开关损耗,有利于达到节能的目的。定速空调机组的启动电流是常态载荷电流的 5~10 倍(突发跳跃),变频空调机组能够实现真正的软启动(零电流线性启动),同时变频空调机组较低的起动电流对电源电流的冲击较小,可以提高电源可靠性。

2) 提高低频空调能效比。①当达到空调设定温度后,空调压缩机会在低频率持续运行,减少制冷剂流量,增加相对换热面积,以提高系统效率,达到节能的目的。本文在考虑压缩机可靠性的基础上,根据压缩机规格书中规定的频率适用范围,设定压缩机最低频率点为 30 Hz。②在提高低频压缩机的容积效率方面,降低压缩机低频下的压缩比、减小制冷剂压缩过程中的制冷剂泄漏量、提高压缩机容积效率、增加制冷量等措施,均能增加压缩机

的能效比,有利于达到节能的目的。③在提高空调季节能效比方面,采用热力学自动优化控制、在任何工况下均保证空调始终以最高效率运行等措施均能提高空调季节能效比,有利于达到节能的目的。④根据其他项目的节能统计数据,采用变频节能技术能够节能约 15%~20%。

3) 冬季采用热泵制热方式。在冬季,普通车辆空调机组通常采用电加热器通电发热的方式为车辆提供热量,但这种加热方式能耗比较大,加热量与能耗基本一致。因此,可采用热泵加热技术,以变频压缩机作为空气源热泵的核心,其能够实现-15℃环境温度下的有效制热。相比于电加热器制热方式,热泵制热方式在低温环境下仍能具备良好的加热效果,能够达到节能的目的。结合以往项目的实际情况,变频热泵机组在 0℃环境温度下,空调机组能效比可达 2;-10℃环境温度下,空调机组能效比为 1,与电加热器相当。相比于电加热器制热方式,采用热泵制热方式能够节能约 40%。

4) 根据乘客负载情况调节客室目标温度。常规车辆的车内温度根据 UIC 553—2004《客车车厢的通风、供暖和空调》标准的温度曲线进行调节,空调系统可根据车辆提供的载客量信息,自动调整客室目标温度,达到节能的目的。由于车厢定员约为 250 人,可以 85 人或 170 人作为划分依据,并根据人体质量进行设计计算和控制。当载客量一定时,室外温度越高,制冷目标温度也越高^[5]。在控制逻辑上,当车厢人数超过 170 人、室外温度超过 35℃时,目标温度设定为 26℃且不再继续升高,即当空调机组达到全冷状态时,不会出现由于室外温度继续上升而导致的车内温度相应上升的情况。预计通过调节客室目标温度的方法可以实现约 8%的节能效果。

5) 使用 DC 1 500 V 或 DC 750 V 逆变电源。常规地铁车辆一般采用 DC 1 500 V 或 DC 750 V 电源供电,车辆辅助逆变系统将高压直流电源逆变为三相 AC 380 V 电源,为地铁车辆空调系统供电,车辆辅助逆变器的效率一般超过 90%。空调机组可采用 DC 1 500 V 或 DC 750 V 电源直接供电,内部配置的逆变电源模块可直接将 DC 1 500 V 或 DC 750 V 的电源转化为三相可交交流电源,为空调压缩机和风机供电。空调内部的小型逆变电源效率超过 95%,具有更优的转换效率,同时更能节省能源。

综上所述,根据变频空调的使用经验,相比于常规空调系统,采用综合节能技术的空调系统,其制冷节能率预估约为 25%~30%,制热节能率预估约为 40%。

2.3 照明系统节能措施

1) 照度自动调节。每辆车可配备 2 个光感传感器,以实现照明自动无级调光功能。根据车内空间与外界自然光的实际情况,对灯具的亮度进行动态调节,以实现车厢照度平衡(车厢照度可预设),进而达到节能的目的。

2) 多种节能工作模式。根据车厢外界自然光对车内照度补偿的变化,动态调整照明灯具的发光强度,以达到车厢照明平衡,进而达到节能的目的。例如:在地铁人流低谷时段,当车厢没人时,可以降低车厢照明等级(如降低至额定照明等级的 50% 左右)。

3) 采用 OLED(有机发光二极管)作为照明光源。OLED 光源是典型的面光源,而 LED(发光二极管)光源是点光源。所以 LED 光源需要外加灯罩、散热装置或光线散射装置等,灯具设计较为复杂。OLED 光源的平面光源特性除了能够与各种形态的灯具设计匹配之外,其散热特性也较好,无需额外加装散热元件,从而降低了灯具制造成本^[6]。此外,相对于 LED 光源,OLED 光源的驱动电压更低,当电压为 5.0~7.5 V、电流为 30~350 mA 时,即可正常工作。由于 OLED 光源是冷光源,其可以把几乎所有电能都转化成光能,具有功率小、效率高的优点,更能满足节能的目标。

3 结语

目前,我国城轨车辆在减重、节能领域方面的研究还处在发展阶段,对新材料的研究和应用技术还有待提高。本文介绍了城轨车辆在车体、牵引系统、辅助供电系统、空调系统、车门系统、转向架系统、车钩系统、贯通道及内装等方面的设备减重及节能措施。若应用这些减重、节能措施,基本能够

达到车辆整体减重 10% 以上、节能 10% 以上的目标,更好地满足日益增长的城轨车辆运营需求。

参考文献

- [1] 于雪松. 城市轨道交通列车节能优化及能耗评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 1.
YU Xuesong. Energy-saving optimization and energy evaluation of train in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 1.
- [2] 赵乐. 基于再生制动的地铁列车时刻表优化模型与算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 1.
ZHAO Le. Research on metro timetable optimization model and algorithm based on regenerative braking[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 1.
- [3] 于青松. 下一代地铁列车节能型牵引及辅助变流系统[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 128.
YU Qingsong. Energy-saving traction converter system for next generation metro train[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 128.
- [4] 张露, 邓福军. 永磁同步电机直接转矩控制系统的研究[J]. 变频器世界, 2016(10): 65.
ZHANG Lu, DENG Fujun. The research on direct torque control system of permanent magnet synchronous motor[J]. The World of Inverters, 2016(10): 65.
- [5] 苗勃, 陈兴华. 地铁车辆变频空调系统节能方案分析[J]. 低温与超导, 2017, 45(6): 73.
MIAO Bo, CHEN Xinghua. Analysis of energy saving scheme for air conditioning system of metro[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2017, 45(6): 73.
- [6] 王义星. 深蓝光材料在荧光磷光混合式白光 OLED 中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 4.
WANG Yixing. The application of deep blue fluorescent materials in F&P hybrid WOLED[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 4.

· 收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-09-27 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-19 Revised:2021-09-27 Published:2024-02-10
· 通信作者:曹成鹏,高级工程师,18611102365@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 241 页)

ZHANG Bangli. Influence factors on the first cover plate height of property development of metro depot[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11): 155.

Received:2022-12-15 Revised:2023-02-03 Published:2024-02-10
· 通信作者:房烁,工程师,fs2541@21cn.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

· 收稿日期:2022-12-15 修回日期:2023-02-03 出版日期:2024-02-10