插电增程式混合动力客车用动力电池性能分析

孔维峰^{1,2}, 刘继红³, 邵强¹, 刘宝来¹, 黄圣涛¹, 孙鹏¹

(1. 北京公共交通控股(集团)有限公司, 北京 100161; 2. 北京理工大学, 北京 100081;

3. 北京福田欧辉新能源汽车有限公司, 北京 102206)

摘要:以北京城区为运行工况,对插电增程式混合动力客车动力电池的运行温度、充放电性能、循环稳定性、放电时长占比、充放电 SOC 范围进行分析,为动力电池的选型提供参考。

关键词:插电增程式; 混合动力客车; 动力电池; 北京城区

中图分类号:U464.9⁺3; U469.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-3331(2022)04-0025-03

Performance Analysis of Power Battery for Plug-in Extended Range Hybrid Electric Buses

KONG Weifeng^{1,2}, LIU Jihong³, SHAO Qiang¹, LIU Baolai¹, HUANG Shengtao¹, SUN Peng¹

(1. Beijing Public Transportation Group Co., Ltd., Beijing 100161, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Beijing Foton Ouhui New Energy Vehicle Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: Taking Beijing urban area as the running conditions, this paper analyses the operating temperature, charge/discharge performance, cycle stability, proportion of discharge time, and charge/discharge SOC range of the power battery to provide the reference for the type selection of the power battery system of plug-in extended range hybrid electric bus.

Key words: plug-in extended-range; hybrid electric bus; power battery; Beijing urban area

插电增程式混合动力客车(以下简称插增混客车)是在纯电动客车的基础上增加一套发动机和发电机系统作为增程器,当动力电池电量不足而又无法及时外接充电时,增程器能继续为车辆行驶提供电源。插增混客车的发动机与驱动车轮之间没有机械连接,仅用于驱动发电机发电,以补充动力电池电量的不足。因此,合理匹配插增混客车的动力电池系统非常重要^[1-4]。本文针对北京城区运行工况,在增程器等配置相同的情况下,从匹配的不同体系动力电池的运行温度、充放电性能、循环稳定性、放电时长占比及充放电 SOC 范围 5 个维度进行数据分析,为插增混客

车动力电池的选型提供参考。

1 影响动力电池选型的主要因素

1) 运行温度。动力电池的电化学性能受温度影响很大。在高温环境下长期运行,会导致电池内部产气严重,影响动力电池的循环寿命;在低温环境下长期运行,电解液的粘度降低,会导致导电性下降^[5]。北京地区的环境温度变化很大,夏季的最高气温可以达到 35 °C 左右,冬季的最低气温可以达到-17 °C 左右,这就要求动力电池工作的温度范围越宽越好,理论上要求在-20~55 °C 的环境温度下,动力电池具备

收稿日期:2022-04-27。

第一作者:孔维峰(1976—),男,在读博士;高级工程师;主要从事公交客车设计、维护与应用管理工作。E-mail:kongweifeng@sohu.com。

通讯作者:刘继红(1969—),男,正高级工程师;主要从事新能源整车及关键部件系统设计与开发工作。E-mail:liujihong@foton.com.cn。

正常的充放电能力。

2) 充放电性能。北京城区的人流量大,早晚高峰期间车辆拥堵情况较多,车辆需频繁启停。由于整车的制动能量回收过程即是动力电池的充电过程,车辆的加速过程即是动力电池的放电过程,因此在频繁启停工况下,整车的需求电流变化频繁,动力电池的脉冲充放电切换频繁。另外,早晚高峰时,整车的载客量较大,其需求的充放电电流较大,即在动力电池容量相近的情况下,对其充放电倍率要求更高。在北京城区非早晚高峰时,动力电池一般需具备 2 C 左右的充放电能力;在早晚高峰时,动力电池一般需具备 3 C 左右的充放电能力。

3) 循环稳定性。动力电池在整车质保(10年)范围内都要满足其 2 C 或 3 C 的充放电性能要求。动力电池在不断的充放电循环过程中,其容量会发生衰减。动力电池的循环次数代表电池的容量衰减至某一值前,可以循环充放电的次数。因此,动力电池的容量衰减越快,其循环次数越低,即循环稳定性越差。从动力电池全生命周期循环稳定性匹配上考虑,要求动力电池的实际日平均循环数在质保期 10 年内都要小于所设计的日循环数(动力电池设计日循环数=动力电池全生命周期循环次数/(365天×10年))。

4) 放电时长占比。对于插增混客车,在保证动力电池循环寿命的前提下,减少发动机的工作时长,提高动力电池放电时长占比(一般应>50%,在满足整车需求电流的情况下,可通过增加动力电池的容量、减小动力电池的放电倍率等措施来提高放电时长占比),进而达到更好的节能减排效果。

5) 充放电 SOC 范围。对于插增混客车,控制策略一般将动力电池的充放电 SOC 范围控制在 40%~80%之间,使动力电池长期处于浅充浅放的状态,有利于保障动力电池的安全性能。

2 市区运营工况下动力电池系统数据分析

在北京城区运营路线相同的车型上分别搭载锰酸锂、钛酸锂、磷酸铁锂动力电池,并对其运行数据进行分析。运行时间为 1.5 年,三种电池的容量分别为 96 Ah、70 Ah、157 Ah。钛酸锂电池的倍率性能优异^[6-9],其大倍率充放电时,电池的温升较低,从满足

使用要求、降低成本角度出发,钛酸锂电池采用风冷措施,而其他两种动力电池采用液冷措施。

2.1 电池运行温度分析

表 1 为三种动力电池的运行温度分布情况。表中对温度区间进行了划分,分为高温区(50℃, 65℃]、可接受温度区(35℃, 50℃]、最佳温度区(5℃, 35℃]、低温区(-30℃, 5℃]。

表 1 动力电池系统的温度分布

	温度分布占比/%			
	最佳温度区	高温区	低温区	可接受温度区
锰酸锂	99.55	0.01	0.00	0.44
磷酸铁锂	85.93	0.00	0.00	14.07
钛酸锂	61.26	3.38	0.00	35.36

从表 1 中可以看出,在全温度范围内(环境温度-17~35℃),采用液冷的锰酸锂和磷酸铁锂电池均无高温和低温现象产生^[10-11],采用风冷的钛酸锂电池运行温度在高温区的占比为 3.38%。理论上在-20~55℃环境温度内,锰酸锂和磷酸铁锂电池的脉冲充放电能力可以达到 3 C,钛酸锂电池的脉冲充放电能力可以达到 5 C。三种动力电池均可以满足北京城区全温度范围内的使用要求,其中锰酸锂和磷酸铁锂电池的温度分布最佳,钛酸锂电池由于充放电倍率较大并且采用风冷装置进行冷却,导致高温区、可接受温度区占比较高。

2.2 电池充放电电流分析

表 2 中的数据是整车运营过程中三种电池的实际充放电电流分布情况。表中:充放电电流处于 200 A 及以上区域的主要是早晚高峰时段,锰酸锂、钛酸锂、磷酸铁锂电池的充放电倍率分别可以达到 4.17 C、5.71 C、2.55 C,前两者具备 3 C 以上的充放电能力,而磷酸铁锂电池的充放电能力低于 3 C;非早晚高峰下,充放电电流一般处于 200 A 以下区域,锰酸锂、钛酸锂、磷酸铁锂电池对应的充放电倍率最高可以分别达到 2.08 C、2.86 C、1.27 C,前两者具备 2 C 以上的充放电能力,磷酸铁锂电池的充放电能力低于 2 C。相对而言,匹配钛酸锂电池的车辆在城区早晚高峰的运营特性更为明显:其充放电电流在大于 200 A 的电流范围内分布更多,分别占比 8.95%、13.47%,而锰酸锂电池分别占比 3.01%、3.64%,磷

酸铁锂电池分别占比 8.49%、8.09%。三种动力电池均满足整车的电流需求,但是在相同的电流需求下,钛酸锂电池的倍率性能更加优异,能更好地满足城区工况下整车频繁启停的需求。

表2 动力电池的充放电电流及倍率分布

充放电电流/A	电池体系	充放电倍率/C	充/放电占比/%
[0,100)	锰酸锂	[0,1.04)	83.76/81.83
	钛酸锂	[0,1.43)	53.92/48.58
	磷酸铁锂	[0,0.64)	55.72/76.11
[100,200)	锰酸锂	[1.04,2.08)	13.23/14.53
	钛酸锂	[1.43,2.86)	37.13/37.95
	磷酸铁锂	[0.64,1.27)	35.79/15.8
[200,300)	锰酸锂	[2.08,3.13)	2.59/2.74
	钛酸锂	[2.86,4.29)	8.87/13.37
	磷酸铁锂	[1.27,1.91)	6.42/4.73
[300,400]	锰酸锂	[3.13,4.17]	0.42/0.9
	钛酸锂	[4.29,5.71]	0.08/0.1
	磷酸铁锂	[1.91,2.55]	2.07/3.36

2.3 电池循环稳定性分析

在动力电池全生命周期内,供应商提供的锰酸锂、磷酸铁锂和钛酸锂电池的循环次数分别为 9 964 次、9 125 次、20 002 次(SOC 变化范围 40%~80%),则其设计日循环数分别为 $9\ 964/3\ 650 = 2.73$ 次、 $9\ 125/3\ 650 = 2.5$ 次、 $20\ 002/3\ 650 = 5.48$ 次。车辆经过 1.5 年的实际运行,根据实时监测的数据,锰酸锂、磷酸铁锂和钛酸锂电池的实际平均日循环数分别为 1.85 次、2.26 次、2.62 次(SOC 实际变化范围 40%~80%),都小于各自的设计日循环数。由于车辆在质保期内(10 年)的运营线路和运营场景可以认为基本不变,因此动力电池的实际日循环次数也可认为基本不变,所以可以认为三种电池都能满足整车质保范围内的运营要求。

从上述数据可以看出,磷酸铁锂电池的设计日平均循环次数最小,是因为其电子电导率和扩散系数相对最小,严重影响其循环性能^[9]。钛酸锂电池的设计日平均循环次数最大,其原因是:一方面钛酸锂电池是尖晶石型三维框架结构,嵌锂前后两种晶格参数非常接近,锂离子脱嵌过程尖晶石结构的结构变化率 < 0.3%^[10],结构变化率几乎为零,被称为“零应变”材料;另一方面钛酸锂电池的嵌锂电位为 1.55 V,相比

其电解液中锂离子的还原电位高很多,且高于电解液分解电压,不会产生 SEI 膜,不进行副反应,因此其循环稳定性优异^[12-13]。

2.4 电池放电时长占比分析

根据车辆运行的实时状态,锰酸锂、磷酸铁锂、钛酸锂三种电池的放电时长占比分别为 54.23%、73.99% 和 64.79%,其中磷酸铁锂电池的放电时长占比最高,主要原因是:在整车需求电流相同的情况下,由于磷酸铁锂电池的容量最高,且其提供的倍率最低,从而对应的放电时间最长,因而其节能减排效果最显著。

2.5 电池充放电 SOC 分析

三种动力电池的充放电 SOC 分布见表 3,绝大多数在 40%~80% 之间,与充放电 SOC 的设计范围基本保持一致。三种动力电池都能长期处于浅充浅放的状态。此外,由于城区车辆平均车速较低,启停频繁,为了能持续为整车输出功率,部分动力电池出现了 SOC 低于设计要求的情况。

表3 不同动力电池的 SOC 范围占比 %

	[0,40)	[40,50)	[50,60)	[60,70)	[70,80)	[80,100]
锰酸锂	0.10	3.02	33.33	34.11	29.44	0
磷酸铁锂	0.02	3.98	19.49	33.34	43.17	0
钛酸锂	0.01	10.16	35.40	32.80	21.63	0

3 结束语

动力电池是评价电动客车性能的最重要的部件。对于插电混客车,应综合考虑电池运行温度、充放电性能、循环稳定性、放电时长占比、充放电 SOC 范围等因素,并结合产品的使用场景,进行动力电池选型,以达到最佳的匹配效果。

参考文献:

- [1] 杨红斌. 用于新能源汽车的锂离子动力电池研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(1): 79-86.
- [2] 张怡南, 刘哲, 岳子枫. 锂离子电池产业发展现状及市场前景分析[J]. 中国高新科技, 2021(4): 111-113.
- [3] 李凌云. 中国新能源汽车用锂电池产业现状及发展趋势[J]. 电源技术, 2020, 44(4): 628-630.

参考文献:

- [1] E. BRANLARD, M. SHIELDS, B. ANDERSON, et al. Super-element reduction of substructures for sequential load calculations in OpenFAST[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1452(1):012033.
- [2] 韩森哲. 基于超单元法对总振动经验公式修正[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [3] 郑若瑜. 基于超单元法的地铁车辆铝合金车体轻量化研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [4] 李昂, 刘初升. 基于超单元技术的大型复杂结构的拓扑优化设计[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(20):2467-2474.
- [5] 何洁. 基于超单元法的整车振动与噪声研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- [6] 赵东伟, 王正超, 尹怀仙. 基于变密度法的城市客车车架拓扑优化设计[J]. *客车技术与研究*, 2019, 41(4):1-3.
- [7] 孙斌, 吴长风, 于国飞, 等. 纯电动客车底架的拓扑优化设计[J]. *客车技术与研究*, 2019, 41(5):27-30.
- [8] 王童, 那景新, 徐梓雯, 等. 基于拓扑优化的某客车空气弹簧支座改进研究[J]. *汽车工程*, 2013, 35(9):827-831.
- [9] 王登峰, 毛爱华, 牛妍妍, 等. 基于拓扑优化的纯电动大客车车身骨架轻量化多目标优化设计[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2):136-143.
- [10] 高云凯, 周晓燕, 余海燕. 城市公交客车车身结构拓扑优化设计[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(9):155-158.
- [11] 王亮, 余英俊, 余健. 纯电动客车轻量化设计方法研究[J]. *客车技术与研究*, 2016, 38(5):4-7.
- [12] ZHE. ZHANG, YING CHAO. ZHANG, JING MEI. JIN, et al. Topology Optimization Design of Pure Electric Unitized Body[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3296(1148):167-172.
- [4] GOODENOUGH B J. Energy storage materials: A perspective. [J]. *Energy Storage Mater*, 2015(1):158-161.
- [5] 王记磊, 杨坤, 刘庆新, 等. 新能源汽车用锂离子动力电池单体选型方法[J]. *机械设计与制造*, 2020(4):278-281.
- [6] 刘源. 磷酸铁锂/石墨烯复合材料的组织结构与电化学性能研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
- [7] 汪涛, 于维珂. 高镍三元材料匹配钛酸锂负极电池的性能[J]. *电池*, 2021, 51(5):498-501.
- [8] 张利辉, 徐宇兴, 刘振法, 等. 钛酸锂/石墨烯复合负极材料的制备及电化学性能[J]. *化工进展*, 2019, 38(2):949-955.
- [9] 宋宏明, 刘秀庆, 邢恩福, 等. 钛酸锂电池的低温特性研究[J]. *电源技术*, 2018, 42(6):818-820.
- [10] 周兰, 李旺, 廖文俊. 界面化学对镍锰酸锂正极材料电化学性能影响的研究现状及分析[J]. *无机盐工业*, 2021, 53(11):17-24.
- [11] 冯晓晗, 孙杰, 何健豪, 等. 磷酸铁锂正极材料改性研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(2):467-486.
- [12] 冯余庆, 谢兴华, 张良杰, 等. 钛酸锂负极材料的研究进展[J]. *广东化工*, 2019, 46(2):119-122.
- [13] 钱丽, 刘正耀, 孙小嫚, 等. 长寿命高能量密度钛酸锂电池设计[J]. *电源技术*, 2020, 44(10):1425-1427.

~~~~~
(上接第 27 页)