

基于超级电容的双源无轨观光车动力系统匹配设计

李建英, 周恩飞, 刘凯, 张誉, 解文龙, 徐丽鑫

(北京福田欧辉新能源汽车有限公司, 北京 102206)

摘要: 根据市场需求, 提出一种将超级电容作为辅助动力源的双源无轨观光车设计方案, 实现动力总成系统的选型与匹配计算; 基于 AVL_Cruise 软件对观光车性能进行仿真分析, 并与实车试验数据进行对比, 以验证仿真分析的准确性。

关键词: 超级电容; 双源无轨; 观光车; 匹配设计

中图分类号: U462.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)04-0019-05

Match Design of Power System for Dual-source Trackless

Sightseeing Bus Based on Super Capacitors

LI Jianying, ZHOU Enfei, LIU Kai, ZHANG Yu, XIE Wenlong, XU Lixin

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

Abstract: According to the market demand, the authors propose a dual-source trackless sightseeing bus design scheme using super capacitors as an auxiliary power source to realize its calculations for power train system selection and match. They simulate and analyze the sightseeing bus performances based on AVL_Cruise software and verify the accuracy of the simulation analysis by comparing the simulation analysis with the actual vehicle test data.

Key words: super capacitor; dual-source trackless; sightseeing bus; match design

北京的有轨电车高压线网资源丰富, 无轨观光车可合理利用其高压线网资源^[1]。但无轨观光车运行路线中存在高压线网资源缺失的路段, 整车仍需额外配备一定的辅助动力源。由于超级电容具有寿命长、充放电快、充放电效率高、功率密度大等特点, 所以其是双源无轨观光车理想型的辅助动力源。

1 动力系统参数匹配

双源无轨观光车动力系统的参数匹配主要根据整车基本参数(见表1)和整车性能要求(见表2)进行设计。

表1 整车基本参数

结构参数	数值
整备质量/kg	11 600
满载质量/kg	18 000
迎风面积/m ²	7.4
空气阻力系数	0.7
滚动阻力系数	0.007
轮胎滚动半径/m	0.488
汽车旋转质量换算系数	1.05
主减速器传动比	6.29

收稿日期: 2024-01-04。

第一作者: 李建英(1987—), 男, 助理工程师; 主要从事新能源客车动力匹配与控制策略开发等工作。E-mail: 15726359009@163.com。

通讯作者: 周恩飞(1986—), 男, 高级工程师; 主要从事新能源汽车整车控制策略开发与应用工作。E-mail: zzeff27@sina.com。

表2 整车性能要求

性能指标	数值
最高车速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	69
满载车速 10 km/h 时最大爬坡度/%	≥ 15
满载车速 30 km/h 时持续爬坡度/%	≥ 5
0 ~ 50 km/h 加速时间/s	≤ 19

1.1 驱动电机参数匹配

本文选用永磁同步直驱电机作为车辆驱动系统。永磁同步电机具有效率高、功率密度大、控制精度高、运行平稳等优点,既可驱动车辆行驶,又可用于车辆制动能量回收。

1) 电机峰值转速 n_{\max} 。 n_{\max} 是电机恒功率区间可达到的最高转速^[2-4],为满足整车最高车速设计要求,根据式(1)计算得到电机峰值转速应 $\geq 2\ 400\ \text{r}/\text{min}$ 。

$$n_{\max} = \frac{i_0}{0.377r} u_{\max} = 2\ 359.1 (\text{r}/\text{min}) \quad (1)$$

2) 以满足水平路面最高车速匀速行驶和 5% 坡度上 30 km/h 匀速行驶两种最常用工况来计算额定功率和额定扭矩。

最高车速匀速行驶时的扭矩 T_{e1} 、功率 P_{e1} 可根据式(2)、(3)计算:

$$T_{e1} = \left(m_1 g f + \frac{C_D A u_{\max}^2}{21.15} \right) \cdot \frac{r}{\eta_T i_0} = 200.29 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (2)$$

$$P_{e1} = \frac{T_{e1} \cdot u_{\max} \cdot i_0}{3\ 600r} = 49.5 (\text{kW}) \quad (3)$$

5% 坡度上 30 km/h 匀速行驶时的扭矩 T_{e2} 、功率 P_{e2} 可根据式(4)、(5)计算:

$$T_{e2} = \frac{m_1 g f \cos \beta + \frac{C_D A u^2}{21.15} + m_1 g \sin \beta}{\eta_T i_0} \cdot r = 856.14 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (4)$$

$$P_{e2} = \frac{T_{e2} \cdot u \cdot i_0}{3\ 600r} = 91.95 (\text{kW}) \quad (5)$$

式(1)~(5)中: u_{\max} 为最高车速; i_0 为主减速器传动比; r 为轮胎滚动半径; m_1 为满载质量; g 为重力加速度; f 为轮胎滚动阻力系数; η_T 为车传动系统机械效率,取 0.93; C_D 为汽车的空气阻力系数; A 为汽车的迎风面积; β 为坡度角; u 为汽车车速。

比较两种工况下的计算结果,电机额定扭矩应 \geq

857 N·m,电机额定功率应 $\geq 92\ \text{kW}$ 。

3) 根据整车最大爬坡度及 0~50 km/h 加速时间设计要求,确定电机的峰值扭矩和峰值功率。

车辆在 15% 坡度上 10 km/h 匀速行驶时的扭矩 $T_{\max1}$ 、功率 $P_{\max1}$ 可根据式(6)、(7)计算:

$$T_{\max1} = \frac{m_1 g f \cos \beta + \frac{C_D A u^2}{21.15} + m_1 g \sin \beta}{\eta_T i_0} \cdot r = 2\ 286.86 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (6)$$

$$P_{\max1} = \frac{T_{\max1} \cdot u \cdot i_0}{3\ 600r} = 81.88 (\text{kW}) \quad (7)$$

0~50 km/h 加速工况根据电机外特性曲线分为两部分进行:第一部分为恒扭矩区,车速从 0 加速至 u_e (u_e 为电机基速 n_e 对应的车速),对应恒扭矩区加速时间 t_1 ;第二部分为恒功率区,车速从 u_e 加速至 50 km/h,对应恒功率区加速时间 t_2 。 T_{\max} 、 P_{\max} 为车速 u_e 时的扭矩、功率, a 为汽车加速度。根据式(8)~(12),通过 MATLAB 软件编程计算不同基速(步长取 1 r/min)下 0~50 km/h 加速时间。加速时间与基速的关系如图 1 所示。

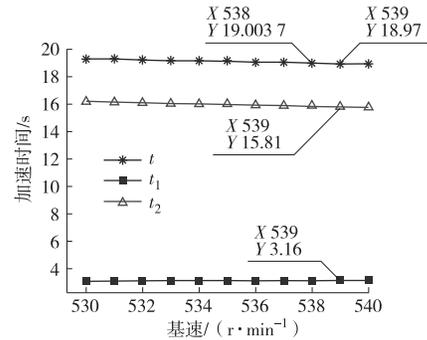


图1 0~50 km/h 加速时间与基速的关系曲线

当基速 $n_e = 539\ \text{r}/\text{min}$ 时,0~50 km/h 加速时间 $t = t_1 + t_2 = 18.97\ \text{s}$,首次小于 19 s,满足设计要求。其他参数见式(8)~(12)的计算结果。

$$u_e = 0.377 n_e r / i_0 = 15.77 (\text{km}/\text{h}) \quad (8)$$

$$T_{\max} = \frac{m_1 g f \cos \beta + \frac{C_D A u_e^2}{21.15} + m_1 g \sin \beta}{\eta_T i_0} \cdot r = 2\ 289.91 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (9)$$

$$t_1 = \int_0^{u_e} \frac{du}{a} =$$

$$\frac{1}{3.6} \int_0^{u_e} \left[\delta m_1 du \left(\frac{T_{\max} i_0 \eta_T}{r} - m_1 g f - \frac{C_D A u^2}{21.15} \right)^{-1} \right] = 3.16 \text{ (s)} \quad (10)$$

$$t_2 = \int_{u_e}^{50} \frac{du}{a} =$$

$$\frac{1}{3.6} \int_{u_e}^{50} \left[\delta m_1 du \frac{u_e}{u} \left(\frac{T_{\max} i_0 \eta_T}{r} - m_1 g f - \frac{C_D A u^2}{21.15} \right)^{-1} \right] = 15.81 \text{ (s)} \quad (11)$$

$$P_{\max} = \frac{T_{\max} \cdot u_e \cdot i_0}{3 \cdot 600r} = 129.29 \text{ (kW)} \quad (12)$$

比较两种工况下的计算结果, 电机峰值扭矩应 $\geq 2\,290 \text{ N}\cdot\text{m}$, 电机峰值功率应 $\geq 130 \text{ kW}$, 电机基速应 $\geq 539 \text{ r/min}$ 。

经上述计算, 最终选择的驱动电机性能参数见表3。

表3 驱动电机性能设计要求

性能指标	数值
额定/峰值扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	1 430/2 800
额定/峰值功率/ kW	135/260
峰值转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
基速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	887

1.2 超级电容参数匹配

超级电容的参数很多, 其中电压与电容是两个最重要的参数^[5]。超级电容的额定电压不得低于电机的额定电压(407 V), 超级电容的容量取决于观光车脱线路段运行所需的电量。通过设备采集观光车从始发站至终点站运行路线的路谱数据, 如图2所示, 运行完整路线需要6 000 s, 4 000~6 000 s时段为脱线路段, 距离为7.2 km, 此时驱动电机的能量全部由超级电容提供。此外, 还需考虑观光车维护时从站点停车场至维修厂的距离(21 km), 此路段驱动电机的能量同样全部由超级电容提供。根据续航里程确定超级电容总电量, 由式(13)、(14)计算:

$$Q_1 = \frac{L_1 \lambda_1}{0.8} = \frac{7.2 \times 1.3}{0.8} = 11.7 \text{ (kW}\cdot\text{h)} \quad (13)$$

$$Q_2 = \frac{L_2 \lambda_2}{0.8} = \frac{21 \times 0.9}{0.8} = 23.625 \text{ (kW}\cdot\text{h)} \quad (14)$$

式中: Q_1 为脱线路段运行能耗; Q_2 为维护路段运行能

耗; L_1 为脱线路段运行距离; L_2 为维护路段运行距离; λ_1 为脱线路段行驶 1 km 能耗, 根据经验值, 取 $1.3 \text{ kW}\cdot\text{h}$; λ_2 为维护路段行驶 1 km 能耗, 根据经验值, 取 $0.9 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

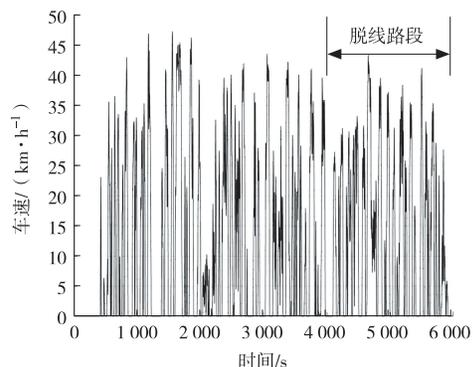


图2 观光车运行路谱

经上述计算, 超级电容总电量应 $\geq 23.7 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 超级电容最大放电电流不得低于电机的最大工作电流(570 A)。综合考虑市场已有产品, 并为超级电容增加一定的裕量, 最终确定超级电容参数: 总电量为 $32.6 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 、总电压为 505 V、最大工作电流为 600 A。

2 仿真分析

本文双源无轨观光车的动力系统架构如图3所示, 包括集电器、超级电容、驱动系统、传动系统^[6]。

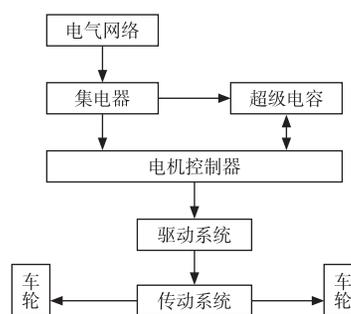


图3 动力系统架构图

2.1 仿真建模

AVL_Cruise 是 AVL 公司开发的一款整车及动力总成仿真分析软件, 可研究整车的动力性、经济性、排放性及制动性。根据车辆基本参数、选用的驱动电机及超级电容参数等建立双源无轨观光车的仿真模型, 其架构如图4所示^[7-9]。

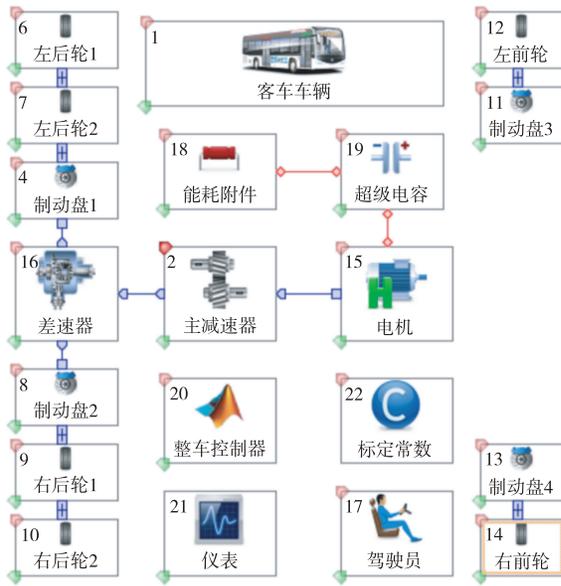


图4 观光客车仿真模型

2.2 仿真结果及实车验证

2.2.1 仿真结果

通过 AVL_Cruise 软件设置最高车速、最大爬坡度、0~50 km/h 加速时间等任务工况分析整车的动力性^[10],结果如图5和图6所示。

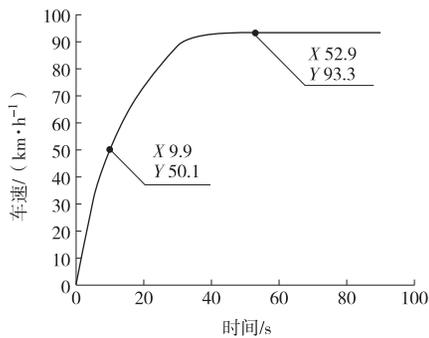


图5 观光车最高车速

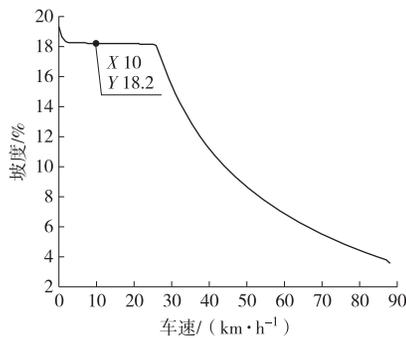


图6 观光车最大爬坡度

图中结果显示,整车满载所能达到的最高车速约

为 93 km/h、最大爬坡度约为 18%、0~50 km/h 加速时间为 9.9 s,均满足设计要求。通过 AVL_Cruise 软件设置整车 65% 载荷 40 km/h 等速、CCBC 循环工况分析整车的经济性。仿真结果如下:40 km/h 等速工况百公里能耗为 54.35 kW·h,CCBC 循环工况百公里能耗为 71.19 kW·h。

通过 AVL_Cruise 软件设置观光车脱线路段运行工况,计算满载极限负荷下观光车在脱线路段运行时超级电容 SOC 变化,如图7所示。设置初始 SOC 为 80%,观光车运行通过脱线路段 SOC 从 80% 降至 50%,超级电容的 SOC 始终处在合理的范围内。

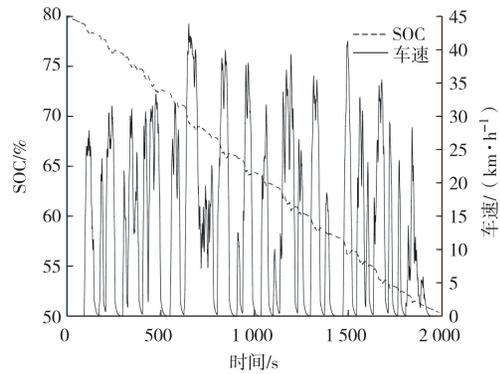


图7 观光车脱线运行工况 SOC 变化曲线

2.2.2 实车验证

实车试验结果与仿真分析结果的对比见表4,实车试验无 SOC 数据。仿真结果与实车试验结果偏差在可接受范围内,因此基于 AVL_Cruise 软件进行的观光车仿真分析是准确可行的。

表4 整车仿真数据与实车试验数据结果

性能指标	仿真值	试验值
最高车速/(km·h ⁻¹)	93	91
最大爬坡度/%	18	18
0~50 km/h 加速时间/s	9.9	11.5
40 km/h 等速工况百公里能耗/kW·h	54.35	52.95
CCBC 循环工况百公里能耗/kW·h	71.19	69.92

3 结束语

本文根据市场需求提出了一款基于超级电容的双源无轨观光车动力系统的设计方案,采用 AVL_Cruise 仿真软件进行了观光车整车性能的仿真分析,

并通过实车试验验证了仿真分析的准确性, 为该类型车辆的开发设计提供参考。

参考文献:

- [1] 孙鹏. 北京公交双源无轨电车电力电子绝缘隔离技术应用分析[J]. 城市公共交通, 2017(11): 24-25.
- [2] 余志生. 汽车理论: 第5版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 2-17.
- [3] 隗海林, 王泽钊, 张家祯, 等. 基于 AVL_Cruise 的燃料电池汽车传动比及能量管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(9): 2119-2129.
- [4] 程相. 双源纯电动客车动力系统匹配和能量管理策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [5] 刘玺斌, 马健, 方红卫, 等. 超级电容纯电动重型牵引车参数匹配与控制策略[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 170-175.
- [6] 程啸宇, 张炳力, 李傲伽, 等. 基于 Cruise/Simulink 氢燃料电池混合动力客车能量管理策略研究[J]. 客车技术与研究, 2020, 42(3): 8-11.
- [7] 孙国庆, 孟建军, 叶建伟, 等. 基于 Cruise 的越野车动力匹配技术研究[J]. 汽车科技, 2018(5): 29-33.
- [8] 可尚基, 钱晓东. 基于 AVL CRUISE 的客车经济性仿真分析及验证[J]. 客车技术与研究, 2021, 43(2): 32-34.
- [9] 岳凤来, 张俊红, 周能辉, 等. 基于 Cruise 的纯电动轿车性能仿真与试验研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(6): 669-672.
- [10] 朱路生, 潘家保, 王世强. 基于 Cruise 的轻卡动力性经济性仿真与试验分析[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(3): 39-44.

《客车技术与研究》征稿启事

《客车技术与研究》创刊于1979年, 双月刊, 是目前国内唯一一本公开发行的客车领域学术期刊。本刊由重庆市交通局主管, 重庆交通科研设计院、重庆车辆检测研究院和中国公路学会客车分会主办, 现已被国内外多家检索机构收录, 包括中国核心期刊(遴选)数据库、万方数据——数字化期刊群、中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、中国学术期刊综合评价数据库、JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)(2018)等, 是《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。在“中国知网”收录的与汽车相关的近70种学报和期刊中, 本刊的复合影响因子位列前十, 具有较高的学术影响力。

本刊主要刊登国家科技政策及国内外客(汽)车技术等方面的学术论文, 包括科研成果和实践经验, 标准, 新技术、新工艺及新材料, 客车市场, 客车检测, 使用和维修, 经营与管理等。欢迎相关领域的专家、学者赐稿。

本刊重点关注的研究方向:

- | | | |
|------------|-----------|----------|
| ◆智能网联客(汽)车 | ◆新能源客(汽)车 | ◆节能与排放 |
| ◆安全与碰撞 | ◆振动与噪声 | ◆新工艺与新材料 |
| ◆客(汽)车电子 | ◆设计与计算 | ◆标准解读 |

E-mail: btreq@163.com

Q Q: 1711088150

微信公众号: 客车技术与研究

网址(在线投稿): <http://bus-in.cmvr.com.cn/>(中交客车网)

地址、电话: 重庆市高新区新金大道9号 023-62653044

