景区摆渡车动力系统参数匹配与仿真

宋金龙

（厦门大学嘉庚学院机电工程学院，漳州 363105）

摘要：本文以某款电动汽车为参考模型，以景区摆渡车的特殊运行工况为设计依据，对其动力系统进行参数匹配，使用 AVL CRUISE 整车仿真软件搭建摆渡车模型并进行仿真分析。结果表明，动力系统参数匹配合理有效。

关键词：景区摆渡车；参数匹配；仿真分析

1 引言

中国是旅游大国，并且景观资源非常丰富。据统计数字显示，截至 2019 年，中国境内 5A 级景区有 259 个，4A 级景区有 3 034 个，总的景区景点已经超过 3 万个 [1]。在中国旅游景区中红色主题旅游景区有 300 个，国家级旅游度假区 26 个，达到旅游休闲水准的城市多达 10 个，国家生态旅游示范地区达到 110 个 [2-3]。根据中国旅游研究院公示的《2019 年中国旅游市场基本情况》指出，国内 2019 年旅游人次达 60.06 亿，以 8.4 % 的增速增长 [4]。

国内广阔的旅游市场，促使相应的配套设施的发展，景区摆渡车就是一个非常重要的将游客从景区门口带到景点的环节，现阶段较大的景区都配备有景区摆渡车。得益于我国汽车工业的自主创新力度不断加大和应用市场的拓展，很多大型汽车制造厂商开始涉足景区用摆渡车，这进一步规范了景区摆渡车的标准。由于很多景区以自然资源为主，甚至景区生态环境非常的脆弱，环境较为特殊，因此对于环保的要求较高，新能源汽车是景区摆渡车的首选。随着全世界范围内的环境污染问题和能源不足危机加重，各个国家、汽车企业以及高校对新能源汽车的开发与研究高度重视，促使新能源汽车技术得到快速发展，从而使新能源景区摆渡车的发展成为可能 [5-7]。

本文以某款纯电动汽车为参考车型，以景区摆渡车的特殊运行工况为设计条件，对景区摆渡车的动力系统进行参数匹配计算，并通过整车仿真软件搭建的整车仿真模型进行整车性能的仿真验证。

2 动力系统参数匹配计算

本文选取的参考车型的整备质量为 1 260 kg，设计载客量为 10 人，满载质量 m 为 2 460 kg，风阻系数 C_D 为 0.6，滚动阻力系数 f 为 0.014，迎风面积 A 为 2.9 m^2，主减速器传动比 i_0 为 7.58，滚动半径 r 为 0.254 m。由于景区摆渡车属于特种用车，对最高车速的要求比较低，但是对爬坡度以及加速性能要求比较高，因此本文设计的景区摆渡车的整车设计指标如表所示。

表 整车设计指标

项目	指标	
动力性	最高车速 Vmax（km/h）	≥ 80
	0 到 50 km/h 加速时间 ta（s）	≤ 10
	30 km/h 的最大爬坡度 imax（%）	≥ 40
经济性指标	续驶离程（km）	≥ 50

2.1 驱动电机参数匹配

驱动电机是景区摆渡车的唯一动力源，并且其转速范围较宽，因此本车型没有设计变速箱只有主减速器，即驱动电机直接与驱动桥相连经主减速器后将动力传递给驱动轮驱动整车行驶，所以在对驱动电机进行参数匹配时，需要在较宽的转速和转矩范围内都具备较好的输出特性。以保证满载时整车的起步、爬坡和加速性能。除此之外，新能源汽车的另一个特性就是能量回收，因此选取的驱动电机还必须能够反转，从而保证整车减速过程中可以拖动驱动电机进行能量回收。

驱动电机是景区摆渡车的重要组成部分，也是景区摆渡车研究的关键，现在常用的驱动电机可以分为两类：

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

同步电动机和异步电机。异步驱动电机的成本低，可靠性高，但是控制比较困难，无法快速达到预期目标。矢量控制原理被用于解决异步驱动电机的控制问题[8]，但是成效不大。永磁铁同步电机相比于励磁绕组同步电机结构更简单，价格低廉，不需要电刷、集电环以及励磁绕组[9]。但是输出效率相对较低。本文研究的是景区摆渡车，其主要运行特点是车速较低，爬坡度比较大，启停频繁以及负载高等，即景区摆渡车对驱动电机的主要需求是低转速高转矩，因此本文选取的是直流永磁同步驱动电机，该电机具有较大的启动转矩，低速特性非常好，过载能力强，转速稳定，调整性能好，并且具有较小的体积和体重。

驱动电机作为景区摆渡车的唯一驱动源，需要克服景区摆渡车在各个运行工况下的外界阻力，由此可得景区摆渡车的驱动力平衡方程为公式（1）：

$$F_t = mgf + mgi + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

根据式（1）可以获得驱动电机的功率平衡方程式为公式（2）：

$$P_e = \frac{1}{\eta_T}\left(\frac{mgfu_a}{3600} + \frac{mgiu_a}{3600} + \frac{C_D A u_a^3}{76140} + \frac{\delta m u_a}{3600}\frac{du}{dt}\right) \quad (2)$$

式中，F_t是驱动电机的驱动力，单位为N；P_e是驱动电机的功率，单位为kW；η_T是传动系统的效率；u_a是车辆的速度，单位为km/h；i是爬坡度；g是重力加速度，g=9.8 N/kg；δ是旋转质量换算系数；du/dt是车辆的加速度，单位为m/s^2。

（1）最高车速时需求功率。当景区摆渡车满载运行时，在水平光滑路面上可以达到最高车速，此时驱动电机只需克服风阻以及滚动阻力，因此得到驱动电机功率平衡方程式如公式（3）所示：

$$P_{e\max} = \frac{1}{\eta_T}\left(\frac{mgfu_{a\max}}{3600} + \frac{C_D A u_{a\max}^3}{76140}\right) \quad (3)$$

根据设计指标可知，$u_{a\max}$=80 km/h，η_t为传动效率，η_t=0.87。将相关参数带入式（3）计算得P_{emax}=22 kW。

（2）最大加速度需求功率。当景区摆渡车满载运行时，在水平光滑路面由静止加速到最高车速的过程中驱动电机除需要克服滚动阻力和风阻外，还需要克服加速阻力。另外，本文研究的是景区摆渡车启停频繁，因此对加速运行工况的计算不可忽略。由于景区摆渡车的最高车速相对较低最大加速度需求不大，因此在加速阻力计算过程中取初速度为10 km/h，加速度为0.5 m/s^2。得驱动电机的功率平衡方程式如公式（4）所示：

$$P_{e\max} = \frac{u_a}{3600\eta_T}\left(mgf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + \delta ma\right) \quad (4)$$

式中，δ是旋转质量换算系数，在整车的加速运行过程中旋转质量产生的加速阻力主要来源于车轮以及飞轮。其推导公式为（5）：

$$\delta = 1 + \frac{1}{m}\frac{\sum I_w}{r^2} + \frac{1}{m}\frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta_T}{r^2} \quad (5)$$

式中，I_w和I_f为转动惯量，其分别表示车轮以及飞轮的转动惯量；i_0和i_g分别为主减速传动比和变速器变速比，由于本车型中没有变速箱，因此变速箱变速比为1。

在进行动力性的计算过程中，车轮以及飞轮的转动惯量是无法进行精确计算的，因此旋转质量换算系数的选取可以根据旋转质量换算系数与档位和传动比的关系来进行选取，如图1所示。

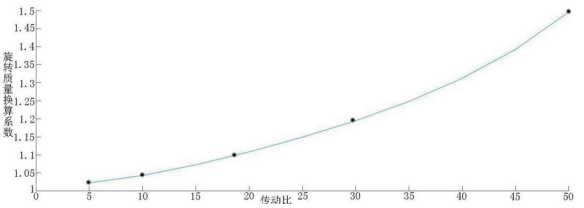

图1 旋转质量换算系数与档位和传动比的关系

景区摆渡车主减速器的传动比为7.58，变速箱传动比为1，因此本文取旋转质量换算系数的值为1.05。将相关参数带入式（4）计算得P_{emax}=5.23 kW。

（3）最大爬坡度时需求功率。由于景区摆渡车的运行工况比较特殊，其运行在爬坡工况下的时间较多，且坡度要求较高，因此在对驱动电机进行功率计算时最大爬坡度的需求功率是其主要计算依据。根据景区摆渡车动力性设计指标可知，此时车速为30 km/h，最大爬坡度不得低于40%。驱动电机的功率平衡方程式如公式（6）所示：

$$P_{e\max} = \frac{u_a}{3600\eta_T}\left(mgf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + mgi\right) \quad (6)$$

将相关参数带入式（6）计算得P_{emax}=96 kW。

（4）坡道起步时需求功率。景区摆渡车的运行工况比较复杂，启停频繁，因此对驱动电机的匹配计算需要考虑到坡道起步时的需求功率。在坡道起步时，整车的行驶阻力主要包括加速阻力和爬坡阻力，为了保证景区摆渡车在坡道起步时有足够的附着力，本文选取的坡道角度为20%，车速为

15 km/h，加速度为 0.5 m/s^2。驱动电机的功率平衡方程式如公式（7）所示：

$$P_{emax}=\frac{u_a}{3600\eta_T}(mgf+\frac{C_D A u_a^2}{21.15}+mgi+\delta ma) \quad (7)$$

将相关参数带入式（7）计算得 P_{emax}=32.35 kW。

综上所述，景区摆渡车的最大需求功率是在坡道起步时运行工况下，其值为 96 kW，为保证景区摆渡车不同运行工况下的功率需求，以及考虑到能量损失，景区摆渡车驱动电机的峰值功率选取为 100 kW。

由于景区摆渡车的结构相对简单，没有采用变速箱，因此在对驱动电机进行参数匹配时除峰值功率外，还要满足转速需要。驱动电机的转速匹配主要依据整车的行驶速度，其关系如公式（8）所示：

$$u=2\pi r\frac{n}{i} \quad (8)$$

式中，n为驱动电机转速。

在对景区摆渡车驱动电机的匹配计算过程中已知最高车速，因此将式（8）变换为：

$$n_{max}\geq\frac{u_{max}}{2\pi r} \quad (9)$$

将相关参数带入，计算得驱动电机的最高转速应该大于 6 332 r/min。

驱动电机额定转速和最高转速之间满足公式（10）：

$$n_e=\frac{n_{max}}{\beta} \quad (10)$$

其中 β 为扩大恒功率系数，在此取 2.84，带入最高转速可以获得额定转速应不小于 2 229 r/min。

驱动电机额定功率和峰值功率之间满足公式（11）：

$$P_e=\frac{P_{max}}{\lambda} \quad (11)$$

式中，λ为电机过载系数，λ=2；计算得驱动电机的额定功率应大于50 kW。

电机的额定转矩与额功率之间的关系如公式（12）所示：

$$T_e=\frac{9550P_e}{n_e} \quad (12)$$

式中，P_e=50 kW，n_e=2 200 r/min，由此可得T_e=217 N·m。

经匹配计算，本文选取的驱动电机的峰值功率为 100 kW，峰值转速为 7 500 r/min，峰值扭矩为 310 N·m。

2.2 动力电池匹配

对于纯电动汽车而言，目前常用的动力电池主要有铅蓄电池、镍基蓄电池和锂基蓄电池[10]。本文选取动力电池是镍基电池（NIMH），单电池电压为 7.2 V，电池容量为 5 Ah，电池包为 30 个单电池串联，其电压为 180~270 V，电池容量为 150 Ah。

动力电池的匹配计算主要依据景区摆渡车的经济性要求，即续驶离程不低于 50 km，此时车速取为 40 km/h，在水平路面匀速运行。其动力电池的输出能量应满足公式（13）~（15）：

$$W_n=P\cdot t \quad (13)$$

$$P=\frac{u}{3600\eta_t\eta_m\eta_b}(mgf+\frac{C_D A u^2}{21.15}) \quad (14)$$

$$t=\frac{S}{v} \quad (15)$$

式（14）中，η_m为电机效率，η_m=0.9；η_b为电池组的放电效率，η_b=0.9。

将相关参数带入计算得动力电池需要输出 7.4 kW/h 的能量。

电池容量与输出能量之间的关系如公式（16）所示：

$$W=\frac{UC\xi}{1000} \quad (16)$$

式中，U为电池组的电压；C为电池组的总容量；ξ为电池组的放电深度，ξ=0.7。

带入电池输出能量可计算得动力电池的总的电池组容量为 543 Ah。动力电池的电池容量除需要满足续驶离程外，还要满足短时大功率放电需求，以满足整车动力性要求，经 cruise 仿真验证得并联电池组数为 10 组。

2.3 整车模型搭建

目前，国内外车辆系统动力学仿真软件主要有 AVL Cruise、Carsim、Advisor 及 Adams 等，其功能侧重点各不相同[11]。CRUISE 软件是奥地利 AVL 公司开发的一款基于模块化建模的整车仿真软件，可以用来研究车辆动力性、燃油经济性、排放性能及制动性能的高级模拟分析软件。本节应用 CRUISE 软件进行整车模型的搭建。

整车模型如图 2 所示，其各功能块主要包括：整车模块（Electric Hybrid Vehicle），轮胎模块（Vehicle），制动器模块（Disc Brake），电器系统模块（Electrical System），动力电池模块（NiMH），防滑模块（ASC），差速器模块（Differential），传动模块（Final Drive），驱动电机模块（eDrive）模块等。模块之间除需要进行力矩与电的传递外，还需要进行信号传递，从而保证各个模块能够进行协同工作。如图 2 所示，蓝色线实现了机械力矩的传递，红色线实现了电流的传递，信号传递图中不可见。

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

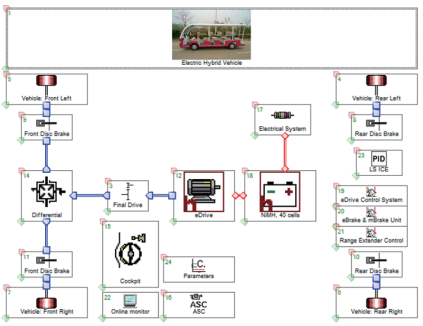

图 2 整车仿真模型

3 仿真结果分析

3.1 经济性仿真结果

基于 cruise 搭建的整车模型，且由于景区摆渡车的最高车速相对较低、启停频繁与 FTP75 运行工况相似，因此选取 FTP75 运行工况进行整车经济性仿真验证。仿真过程中初始电荷量为 90%，为了保证电池寿命不受影响，当电池电荷量达到 20% 时，停止仿真。在 FTP75 循环工况下仿真结果如图 3 所示，由图 3 可知续驶里程为 56.6 km，满足经济性设计要求。

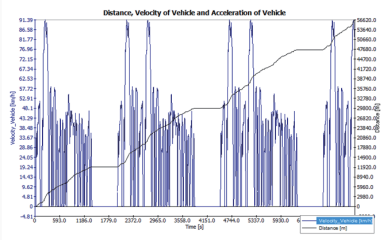

图 3 经济性仿真结果

3.2 动力性仿真结果

景区摆渡车的动力性仿真结果如图 4、图 5 所示，其分别表示为爬坡度仿真结果和加速性能仿真结果。由图 4 可知，在车速为 30 km/h 的最大爬坡度大于 40%，由图 5 可知 0 到 50 km/h 的加速时间为 4.75 s，且在图 5 中可看出此款摆渡车的最高车速达到了 100 km/h。

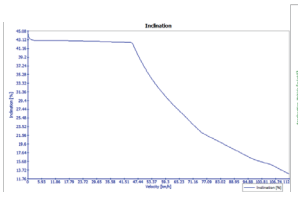

图 4 爬坡度仿真结果

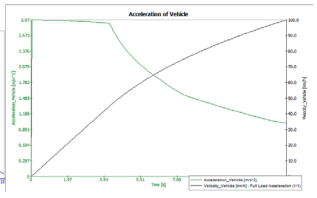

图 5 加速性能仿真结果

综上所述，景区摆渡车的动力性仿真结果满足整车设计要求。

4 结语

以某款纯电动汽车作为景区摆渡车的设计参考车型，对其驱动电机与动力电池进行参数匹配。通过 cruise 仿真软件搭建整车仿真模型，对整车的动力性和经济性进行了计算分析，仿真结果表明，整车的动力性和经济性仿真结果都满足其设计指标，参数匹配比较合理，其匹配计算过程对摆渡车的设计具有指导意义。

参考文献

[1] 邓纯纯，吴晋峰，吴珊珊，et al. 中国 A 级景区等级结构和空间分布特征 [J]. 陕西师范大学学报（自然科学版），2020, 48（01）: 70-79.

[2] 段七零，薛美云．中国 5A 级景区系统空间结构的聚集分形演变研究 [J]. 安徽师范大学学报（自然科学版），2019, 42（04）: 381-386.

[3] 李会琴，李丹，董晓晴，et al. 中国 5A 级景区分布及网络关注度空间格局研究 [J]. 干旱区资源与环境，2019, 33（10）: 178-184.

[4] 中国旅游研究院发布《2019 年旅游市场基本情况》[J]. 空运商务，2020,（03）: 9.

[5] Engineering - Naval Architecture and Shipbuilding; Researchers at ChosunUniversity Report New Data on Naval Architecture and Shipbuilding （Vehicle Securing Safety Assessments of a Korean Coastal Car Ferry According To Acceleration Prediction Approaches）[J]. NewsRx, 2019.

[6] 杨芊芊，梁庄．浅析遗产型景区详细规划的策略与方法——以麦积山景区详细规划为例 [J]. 建筑与文化，2019,（07）: 73-74.

[7] 陈昊宇．长白山景区旅游导向系统设计研究 [D]. 吉林建筑大学，2019.

[8] Novotny D W, Lipo T A. Vector Control and Dynamics of AC Drive[J]. 特色文献库，1996.

[9] Hanselman D C. Brushless permanent-magnet motor design[J]. McGraw-Hill, 2003.

[10]Mehrdad Ehsani，Yimin Gao，Ali Emadi. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车 [M]. 北京：机械工业出版社，2008.

[11] 窦国伟，马涛峰，马先萌．基于模糊控制算法的增程式电动车能量分配策略 [J]. 上海汽车，2012（3）:10-14.