

纯电动客车驱动系统匹配设计与性能仿真分析

王佳羽, 来星呈, 齐会莎, 刘凯, 张秀宾

(北京福田欧辉新能源汽车有限公司, 北京 102206)

摘要:根据某纯电动客车基本参数,应用 Simulink 工具对驱动电机进行匹配设计,并通过 AVL Cruise 软件进行仿真分析,结果证明匹配设计满足要求。

关键词:纯电动客车; 电机匹配; AVL Cruise; 动力性; 经济性

中图分类号:U469.72; U462.3

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)04-0015-04

Matching Design and Performance Simulation Analysis of Drive System for a Pure Electric Bus

WANG Jiayu, LAI Xingcheng, QI Huisha, LIU Kai, ZHANG Xiubin

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

Abstract: According to the basic parameters of a pure electric bus, the authors apply the Simulink tool to the matching design of the drive motor and use the AVL Cruise software for the simulation analysis, which proves that the matching design meets the requirements.

Key words: pure electric bus; motor matching; AVL Cruise; power performance; economy performance

在客车方面,目前国内外主机厂所应用的新能源技术主要包括纯电动、混合动力及燃料电池。其中纯电动客车的动力源和驱动系统分别为电池和电机,开发初期采用专业仿真软件对纯电动客车进行仿真分析,可节省大量时间并提升产品质量。本文以开发某款 6 m 纯电动客车为例,应用 Simulink 搭建电机参数匹配模型以快速确定驱动电机总成,并利用 Cruise 软件对整车的动力性及经济性进行仿真分析。

1 整车基本参数及性能指标要求

本文 6 m 纯电动客车的整车基本参数见表 1,其部分动力性、经济性指标要求^[1-2]见表 2。

表 1 某 6 m 纯电动客车基本参数

整车参数	数值	整车参数	数值
最大允许总质量/kg	6 500	风阻系数	0.48
整备质量/kg	4 700	主减速比	16.575
滚动半径/m	0.373	整车机械传动效率/%	0.96
滚阻系数	0.005 8	整车电量/kW·h	127.74
迎风面积/m ²	5.2		

表 2 某 6 m 纯电动客车部分性能指标

性能参数	设计要求
最高车速/(km·h ⁻¹)	69
最大爬坡度/%	≥15
0~50 km/h 加速时间/s	≤10
40 km/h 等速电耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]	≤30
CHTC-B 工况电耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]	≤40

2 驱动电机参数匹配设计

驱动电机需匹配的参数主要包括:峰值功率、额定功率、最高转速、额定转速、峰值扭矩、额定扭矩。

2.1 驱动电机功率的确定

驱动电机的功率应满足纯电动客车在各行驶工况下的动力需求。电机功率参数匹配通常依据电动汽车的最高车速、最大爬坡度和加速性能^[3],其所对应的电机功率 P_v 、 P_θ 、 P_a 分别由式(1)~(3)计算。

$$P_v = \frac{v_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (1)$$

$$P_\theta = \frac{v_\theta}{3600\eta_t} \left(mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v_\theta^2}{21.15} \right) \quad (2)$$

收稿日期:2024-01-07。

第一作者:王佳羽(1994—),女,硕士;工程师;主要从事整车系统集成与电控系统开发设计工作。E-mail:2448958828@qq.com。

$$P_a = \frac{v_t}{3600\eta_t} \left(\frac{mgf}{1.5} + \delta m \frac{dv}{2dt} + \frac{C_D A v_t^2}{2.5 \times 21.15} \right) \quad (3)$$

式中: $v_{\max}$ 为最高车速; η_t 为整车传动效率; m 为最大总质量; g 为重力加速度(取 9.8 N/kg); f 为滚阻系数; C_D 为风阻系数; A 为迎风面积; v_θ 为车辆爬最大坡时车速(取 20 km/h); θ 为最大坡度角; v_t 为加速末车辆速度(取 50 km/h); δ 为车辆旋转质量换算系数(取 1.03); dv/dt 为车辆加速度, $dv/dt = (v_t - v_0)/(3.6t)$, t 为加速要求时间(本文加速区间为 $0 \sim 50$

km/h)。

应用 MATLAB 中的可视化仿真工具 Simulink 搭建电机参数(功率、转速、扭矩)匹配模型,其架构如图 1 所示。将表 1、表 2 中的部分参数输入到模型中,可快速求得 $P_v = 18.59 \text{ kW}$ 、 $P_\theta = 57.07 \text{ kW}$ 、 $P_a = 72.54 \text{ kW}$,电机所需峰值功率 $P_{\max}$ 必须保证任何时候车辆都能达到上述三种动力性指标,即 $P_{\max} \geq \max\{P_v, P_\theta, P_a\} = 72.54 \text{ kW}$ 。根据电机特性,电机的额定功率 $P_e \geq P_{\max}/2 = 36.27 \text{ kW}$ 。

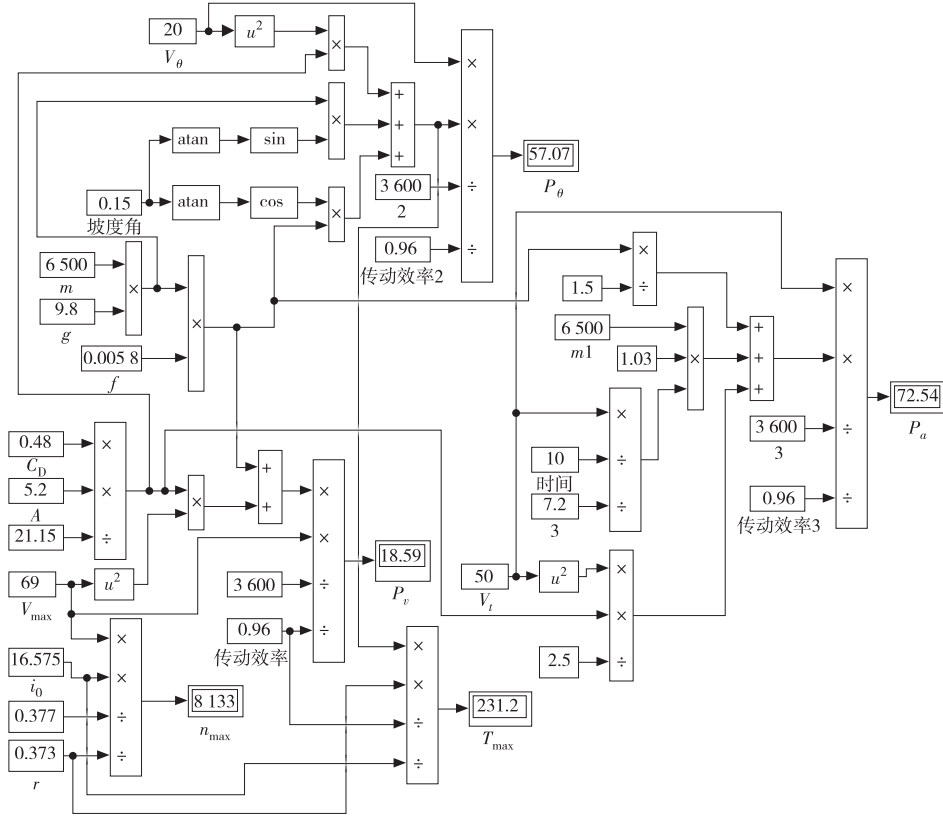


图 1 电机参数匹配 Simulink 仿真模型架构

2.2 驱动电机转速的确定

最高车速决定电机最高转速需求,电机最高转速 $n_{\max}$ 由式(4)计算:

$$n_{\max} \geq i_0 v_{\max} / (0.377r) \quad (4)$$

式中: i_0 为主减速比; r 为轮胎滚动半径。

将表 1、表 2 中的部分参数输入到图 1 的 Simulink 模型中,可快速求得电机最高转速 $n_{\max} \geq 8133 \text{ r/min}$ 。由于电机转速基数($\beta = n_{\max}/n_e$)的取值区间一般为 $2 \sim 3$,因此电机的额定转速 n_e 的取值范围为 $2711 \sim 4066.5 \text{ r/min}$ 。

2.3 驱动电机扭矩的确定

最大爬坡度决定驱动电机最大扭矩需求。根据整车动力学平衡方程,电机峰值扭矩 $T_{\max}$ 由式(5)计算,将表 1、表 2 中的部分参数输入到图 1 的 Simulink 模型中,可快速求得电机峰值扭矩 $T_{\max} \geq 231.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。电机的额定扭矩 T_e 由式(6)确定。根据上面求出的额定转速和额定功率,可计算出额定扭矩 $T_e \geq 127.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ (n_e 取最小值 2711 r/min)。

$$T_{\max} \geq \frac{r \left(mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v_\theta^2}{21.15} \right)}{i_0 \eta_t} \quad (5)$$

$$T_e \geq 9\ 550 P_e / n_e \quad (6)$$

2.4 驱动电机选型

纯电动汽车驱动系统结构可分为传统驱动型式、机电集成化驱动型式、机电一体化驱动型式等^[4]。本文使用如图2所示的同轴集成电驱桥型式,电机置于桥中间,主减采用行星齿轮结构,设置在电机左侧。该型式不仅省略了传动系统中间环节,同时将电机壳体与桥壳高度集成,在轻量化、传动效率和节约布置空间方面具有一定优势^[5]。

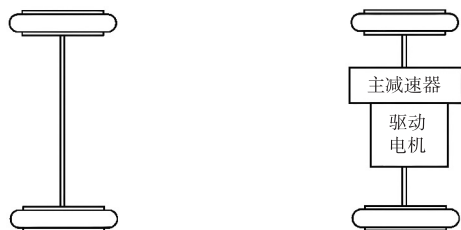


图2 纯电动汽车同轴集成电驱桥结构型式

最终所选驱动电机参数见表3,其中远超计算数据的电机参数可满足客户在更复杂、更崎岖的工况下使用,如爬坡度更大的景区。

表3 驱动电机参数

电机参数	计算值	选型值
额定/峰值扭矩/N·m	127.1/231.2	145/350
额定/峰值功率/kW	36.27/72.54	60/135
额定/峰值转速/(r·min ⁻¹)	2 711~4 066.5/8 133	4 000/12 000

3 基于 AVL Cruise 的整车部分性能及仿真分析

AVL Cruise 软件在车辆方面主要用于基本性能的分析、传动系统的匹配及参数优化、概念新车的评价、动力传动系统的分析评价、零部件子系统特性分析及复杂条件下车辆性能研究等^[6-7]。其使用便捷,仿真分析时可快速改变汽车的结构布置型式,内置丰富的计算任务和工况,可快速进行模型搭建和仿真分析。

3.1 纯电动客车的 AVL Cruise 建模

根据纯电动客车的结构,在 AVL Cruise 软件中选择需要的模块,将其拖拽到建模窗口中。本文所需

模块主要包括整车、车轮、电机、主减速器、电池、驾驶台、制动器、差速器、监控、MATLAB 控制/计算和电器阻耗模块。各模块间通过机械、电气以及信号相连接^[8-9],其架构如图3所示。

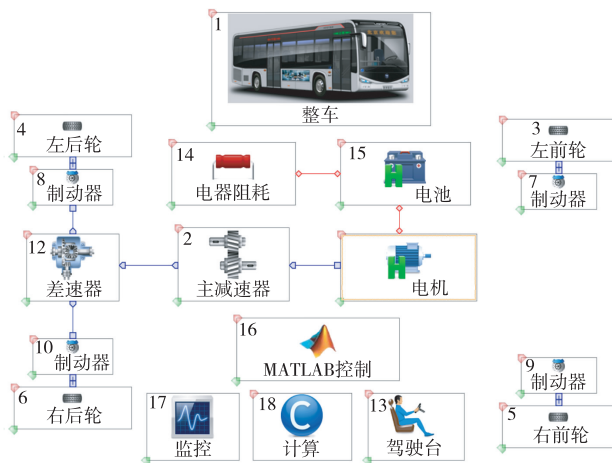


图3 纯电动客车整车 AVL Cruise 模型架构

搭建完成如图3所示的整车模型后,将表1中的部分参数输入到整车、车轮、主减速器等模块中,将电机效率 MAP 数据和表3中的电机参数代入电机模块中,得到如图4、图5所示的电机外特性曲线和电机效率 MAP 图。

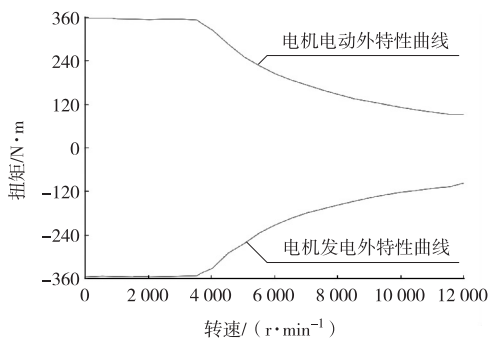


图4 电机外特性曲线

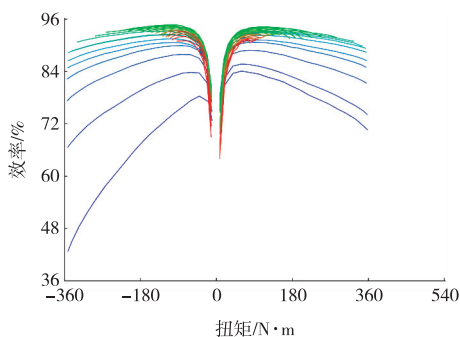


图5 电机效率 MAP 图

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 动力性仿真结果及分析

模型搭建和参数输入完成后,通过 Cruise 中的 Task Folder 创建 Constant Drive 任务,分别对最高车速和 0~50 km/h 加速时间进行仿真计算,得知该车最高车速为 101.8 km/h、0~50 km/h 最短加速时间为 7.48 s。通过 Task Folder 创建 Climbing Performance 任务对最大爬坡度进行仿真计算,得知该车最大爬坡度为 23.29%。最高车速、最大爬坡度和 0~50 km/h 加速时间均满足表 2 中的设计要求(表 2 中的最高车速 69 km/h 为国标要求,实际设计车速应大于该值)。

3.2.2 经济性仿真结果及分析

1) 40 km/h 等速工况。通过 Project 中的 Task Folder 创建 Cycle Run 任务,建立 65% 载荷下 40 km/h 等速工况行驶电耗计算任务。图 6 为客车在该工况下行驶 100 km 的能量消耗结果,所消耗电能约为 22.49 kW·h,满足经济性设计要求。则 127.74 kW·h 整车电池电量下的续驶里程为 567.99 km。

```

*** CYCLE RUN 40km/h_65% ***

Calculation Mode: SIMULATION
Algorithm: Implicit Euler +
Slip: WITHOUT

Calculation running ..

Fuel Consumption of 0 Combustion Engine(s): 0.00 [l/100km]
Fuel Consumption of 2 Electrical Motor(s): 22.49 [kWh/100km]
H2 Consumption of 0 Fuel Cell(s): 0.000 [kg/100km]

```

图 6 65%载荷下 40 km/h 等速工况的百公里能耗结果

2) 中国重型车商用车测试城市客车(CHTC-B)循环工况。该工况包括低速、高速两个速度区间,工况时长共计 1 310 s^[10]。通过 Project 中 Task Folder 创建 Cycle Run 任务建立 CHTC-B 循环工况(图 7)。图 8 为客车在 65%载荷下以 CHTC-B 循环工况行驶 100 km 时的能量消耗结果,所消耗电能约为 32.23 kW·h,满足经济性设计要求。则 127.74 kW·h 电池电量下的续驶里程为 396.34 km。

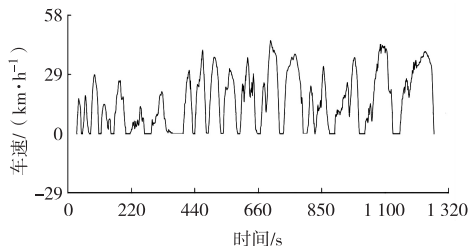


图 7 CHTC-B 循环工况的速度与时间关系曲线

```

*** CYCLE RUN CHTC_B_65% ***

Calculation Mode: SIMULATION
Algorithm: Implicit Euler +
Slip: WITHOUT

Calculation running ..

Fuel Consumption of 0 Combustion Engine(s): 0.00 [l/100km]
Fuel Consumption of 2 Electrical Motor(s): 32.23 [kWh/100km]
H2 Consumption of 0 Fuel Cell(s): 0.000 [kg/100km]

```

图 8 65%载荷下 CHTC-B 循环工况的百公里能耗结果

4 结束语

根据某 6 m 纯电动客车整车基本参数,应用 MATLAB 中可视化仿真工具 Simulink 搭建电机参数匹配模型进行匹配设计。并通过 AVL Cruise 软件搭建整车模型,仿真分析该客车的动力性和经济性,其结果满足纯电动客车性能指标要求。驱动电机参数的匹配设计采用仿真方法,既可提高工作效率,又可降低研发成本。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 电动汽车 动力性能 试验方法: GB/T 18385—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-9.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第 2 部分: 重型商用车辆: GB/T 18386. 2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1-9.
- [3] 崔胜民. 基于 MATLAB 的新能源汽车仿真实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 112-117.
- [4] 严朝勇. 电动汽车电机控制与驱动技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 204-206.
- [5] 陈志龙, 程方斌, 常颖. 一种集成电驱桥的整车应用匹配设计及验证[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(6): 18-21.
- [6] 沈鑫泽. 中型纯电动城市客车动力系统匹配研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [7] 缪明雅. 基于 AVL Cruise 的某纯电动汽车动力系统匹配设计[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(23): 109-113.
- [8] 江兴洋, 钟远婷, 吴帅. 基于 CRUISE 的纯电动客车动力匹配仿真分析[J]. 现代机械, 2022(5): 53-57.
- [9] 李慧凯. 基于 Cruise 对某纯电动公交车动力系统匹配与仿真分析[J]. 装备制造技术, 2023(8): 87-92.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况 第 2 部分: 重型商用车辆: GB/T 38146. 2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1-18.