

纯电动公交客车结构与设计*

林程 王文伟 孙逢春

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

摘要：介绍了该车的整车结构与设计，包括电气及控制系统设计和机械系统设计。电气及控制系统设计包括低压电气系统、高压电气系统和整车控制与能量管理系统的设计。该车采用高性能水平铅酸电池，并且对电池箱进行了专门设计。转向系统采用整体电动液压式动力转向系统，既节约了能耗又使转向轻便。完成了电气系统参数的匹配计算，包括电动机和电池参数的选择。对整车的操纵稳定性及通过性进行了计算。最后提供了整车的试验结果，表明该车各项性能指标都已达到科技部的技术要求，整车的结构设计是合理的，电气系统参数的匹配计算结果与试验结果基本吻合。

关键词：纯电动公交客车 结构 电气系统 性能

中图分类号：U462

0 前言

汽车工业蓬勃发展的100年极大的改变了人们的生活方式，提高了人们的生活质量，同时也给我们带来了巨大的财富，促进了经济的发展。汽车技术的进步也极大的促进了机械、电子、化工等相关科学技术的进步。可以说，汽车的出现改变了整个世界的面貌。然而，汽车的发展在给我们带来巨大利益的同时，也加剧了世界的能源与环境问题。据资料显示，目前汽车每年的石油消耗量约占世界石油总产量的一半，汽车尾气排放量约占空气污染源的60%。面对日益严峻的能源与环境压力，世界各国政府、学术界、工业界正在加大对电动汽车开发投入的力度，加速电动汽车的商品化步伐。我国政府也非常重视电动汽车的发展，并且在“十五”国家高技术研究发展计划(863计划)中，特别设电动汽车重大专项，组织高等院校、科研机构和企业联合参与电动汽车的研究开发及产业化。本课题就是这一重大专项的子课题之一，同时，本课题也将作为科技奥运、绿色奥运项目之一为2008年北京奥运会提供绿色交通工具。

1 整车结构与设计

在HFF6112GK50EV电动公交客车的设计过程中，以国内外公交客车的先进技术为基础，根据电动汽车的特点进行系统总体设计，并不要求每个子

系统最优，只求得各个子系统的最佳匹配，最终得到整车最优。整车的设计主要分为两部分，一部分主要是电气及控制系统的设计，另一部分是机械系统的集成和优化设计。

1.1 电气及控制系统布置

电气及控制系统主要包括低压电气系统、高压电气系统和整车控制与能量管理系统。

电气及控制系统的结构原理如图1所示。

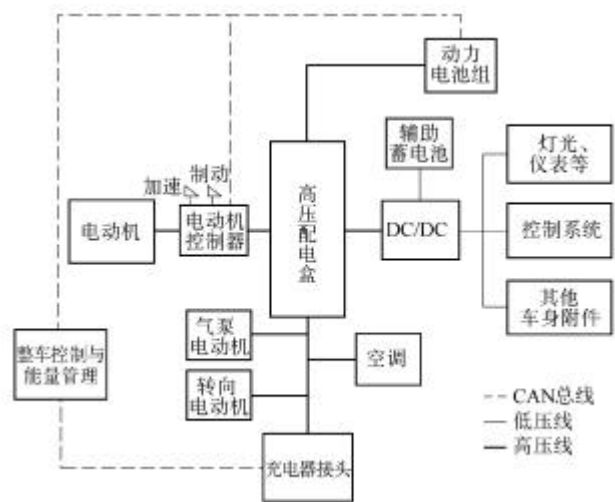


图1 电气及控制系统结构原理图

整车控制与能量管理系统主要完成整车控制与能量管理两部分功能，担负着采集整车的各子系统的运行信息并进行监控与诊断，维持所有电池处于最佳状态，控制充电方式和提供剩余能量显示等职责，并具体实现以下功能。

(1) 整车信息检测与显示，包括：气压信号、加速踏板和制动踏板等模拟信号，以及车速、前进、后退、控制器开关、暖气开关、气泵开关、油泵开关以及手制动等开关量。

* 国家863计划资助项目(2003AA501800)。20050331收到初稿，20050914收到修改稿

(2) 通过 CAN 总线与电动机控制器进行通信并显示与电动机相关的信息。

(3) 进行换挡控制, 通过控制高压断路器避免电池深度放电。

(4) 动力电池组信息检测与显示, 其中包括: 总电流、总电压, 动力电池组充电状态(SOC)估计, 单支电池电压和每箱电池组温度。

(5) 维护电池使用: 放电欠压报警、充电过压报警、电池损坏报警。

(6) 通过 CAN 总线与充电机进行通信。

动力电池组输出的高压直流电通过高压电气配电箱与驱动电动机、空调压缩机、转向系统驱动电动机和制动系统驱动电动机等实现能量分配, 同时通过 DC/DC 变换器将 384 V 高压直流电转换为 24 V 低压电流, 为仪表、照明、控制系统和车身附件提供电能, 并给辅助蓄电池充电。

1.2 机械系统设计

HFF6112GK50EV 电动公交客车主要由能量系统、驱动控制系统和底盘系统组成。

能量系统采用高性能水平铅酸电池, 整车的电池共 96 块, 分成 10 箱, 其中位于车身尾部两箱分别为 20 块和 12 块, 其余 8 箱每箱 8 块。电池箱采用强制通风, 每个电池箱安装有一个风扇, 避免了电池组温度过高造成电池损坏和意外伤害。为了充分保证电池组的安全, 在每个电池组上安装有接触器和快速熔断器, 在意外情况发生时及时切断电源, 保证乘客和车辆的安全。每个电池箱内有一个信号采集盒, 用于采集电池组的电压、温度信息。

驱动电动机采用稀土永磁直流电动机, 该电动机具有换向性能好、噪声低、效率高、高效区宽、过载能力强、运行可靠、性能价格比高和使用寿命长等优点。该电动机控制器为针对该电动机的特性设计的斩波控制器, 具有自动弱磁功能, 可获得比较高的转矩, 满足电动汽车起步、爬坡的需要。

变速器采用行星齿轮式二挡变速器, 电控气压换挡。由于采用了两挡变速器, 可以使汽车在低挡位时得到较高的瞬时转矩, 在高挡位时得到较高的行驶速度, 并且能够使电动机经常处于高效区运转。采用电控气压换挡, 使得驾驶员能比较轻便地完成换挡操作。变速器与电动机采用一体化设计, 直接与驱动轴安装联结在一起。

本车转向系统采用整体电动液压式(简称电液式)动力转向系统, 动力转向系统可以减小驾驶员作用在方向盘上的力, 减轻驾驶员的劳动强度, 使转向轻便、灵活, 而且提高了汽车高速行驶时的安全性。在传统的燃油车中, 通常使用由发动机驱动液

压泵来实现动力转向, 它的液压泵一直随着发动机的旋转而旋转, 并且与转速成正比, 结果导致了能量的浪费。据计算, 在燃油汽车的总能耗中, 有 3% 是被这种液压泵式的动力转向系统消耗了的。为了减少动力转向系统的能耗, 电动汽车中的液压泵的驱动动力不是来自于主动力驱动电动机, 而是来自于独立的驱动电动机。图 2 所示的是电液式动力转向系统的结构简图, 它的液压泵由电动机驱动, 电动机由动力电池供电, 转向器与传统的液力转向器相同。基于这样的动力转向系统, 液压泵就可以在车辆直线行驶时低速运行或者停止运行, 而车辆转向时它高速运转提供动力, 实现动力转向^[1]。

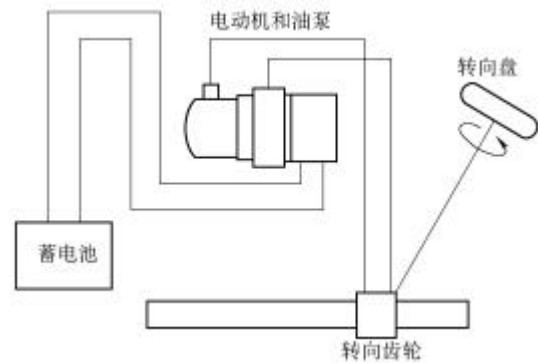


图 2 电液式动力转向系统原理图

本车的制动系统主要由行车制动系、应急制动系和驻车制动系组成。为了提高本车制动时的方向稳定性, 安装了 ABS 防抱死系统, 同时为了提高制动系统的工作可靠性, 保证行车安全, 气压管路采用双回路结构, 以便当一个回路失效后, 另一个回路仍能可靠的工作。

车身骨架与底架采用先进的全承载式桁架结构, 减轻了整车的重量, 增加了续驶里程。整车结构经过有限元分析具有合理的强度与刚度。车身与底架结构如图 3 所示。

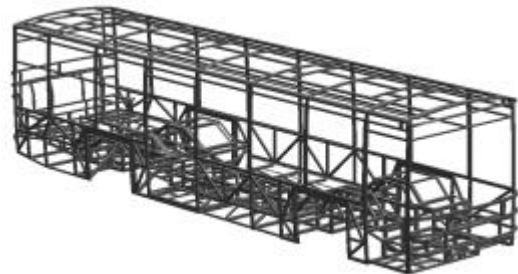


图 3 车身及车架结构

2 整车性能

2.1 基本参数

基本参数如表 1 所示。

表 1 基本参数

项目	数据
长×宽×高 $L_a \times b_a \times h_a$ /(mm×mm×mm)	11 220×2 500×3 040
轴距 L /mm	5 700
前悬 L_f /mm	2 440
后悬 L_r /mm	3 080
接近角/离去角 g_1/g_2	7°/7°
前轴轴载质量 m_1 /kg	6 500
后轴轴载质量 m_2 /kg	13 000
整备质量 m /kg	12 340
最小离地间隙 h /mm	185

2.2 电气系统参数匹配

2.2.1 电动机参数选择

汽车行驶动力学方程

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j$$

或

$$\frac{M_m i_g i_0 h}{r_K} = mgf + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2 + mg \sin \alpha + d m \frac{dv_a}{dt} \quad (1)$$

式中 M_m ——驱动电动机转矩

i_g ——变速器传动比，挡为 3.342，挡为 1

i_0 ——主减速比， $i_0=5.73$

h ——传动系机械效率， $h=0.95$

f ——滚动阻力系数， $f=0.012$

r_K ——轮胎半径， $r_K=508$ mm

C_D ——空气阻力系数， $C_D=0.7$

A ——汽车面迎风面积， $A=7.85$ m²

d ——汽车旋转质量换算系数，低速挡时， $d_1=2.05$ ，高速挡时， $d_2=1.11$

v_a ——车速

该车采用 100 kW 永磁直流电动机，电动机转矩—转速特性曲线图如图 4 所示。

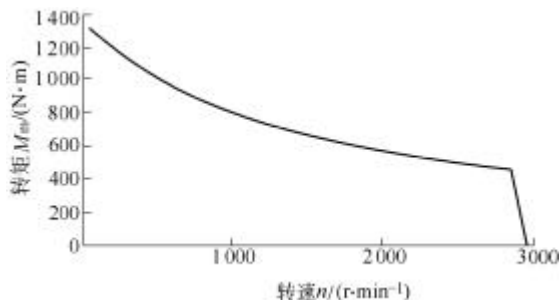


图 4 电动机转矩—转速特性曲线图

按照公式和电动机转矩—转速特性曲线图可以计算得到驱动力—行驶阻力平衡图如图 5 所示。

加速时间可以按式(2)计算

$$t = \int_{v_{a1}}^{v_{a2}} \frac{1}{a} dv_a \quad (2)$$

$$a = \frac{dv_a}{dt} \quad (3)$$

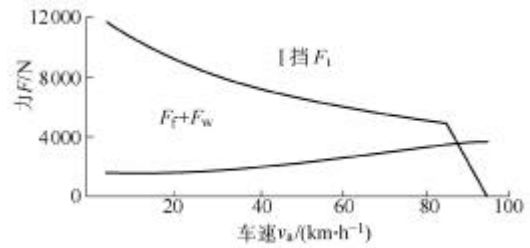


图 5 驱动力—行驶阻力平衡图

计算所得加速时间曲线图如图 6 所示。

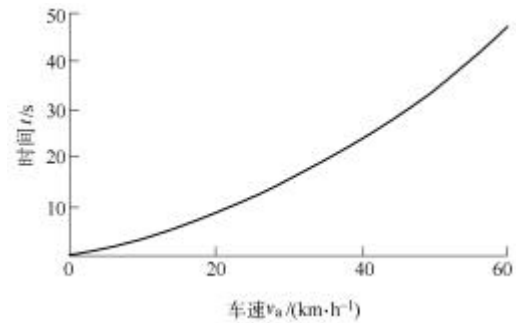


图 6 加速时间曲线图

爬坡度可以按式(4)计算

$$i = \tan \left[\arcsin \left(\frac{F_t - (F_f + F_w)}{mg} \right) \right] \quad (4)$$

经计算，该车以低速挡 6 km/h 的速度爬坡时最大爬坡度大于 20%。

通过计算，采用 100 kW 永磁直流电动机可以使该车最高车速达到 89 km/h，0~50 km/h 加速时间为 32 s，最大爬坡度大于 20%，完全可以满足技术要求。

2.2.2 电池参数选择

匀速行驶时续驶里程可以按式(5)估算。

电量消耗率

$$I_a = \frac{P}{U v_a h} \quad \text{A} \cdot \text{h}/\text{km} \quad (5)$$

式中 U ——电池组总电压

能量消耗率

$$I_w = \frac{P}{v_a h} \quad \text{kW} \cdot \text{h}/\text{km} \quad (6)$$

式中 P ——汽车行驶总阻功率，即总消耗功率

$$P = \frac{F_f + F_w}{3 600 h} v_a \quad \text{kW} \quad (7)$$

续驶里程

$$s = \frac{C}{I_a} \quad \text{km} \quad (8)$$

式中 C ——电池组总容量

该车选用水平铅酸电池，其参数参见表 2。

表 2 水平铅酸电池的各项参数

单体额定电压	单体额定容量(C/3)	总电压	总容量
U_i/V	$C_i/(A \cdot h)$	U/V	$C/(A \cdot h)$
12	85	384	255

由式(5)、(7)、(8)可以得该车的续驶里程图如图 7 所示。

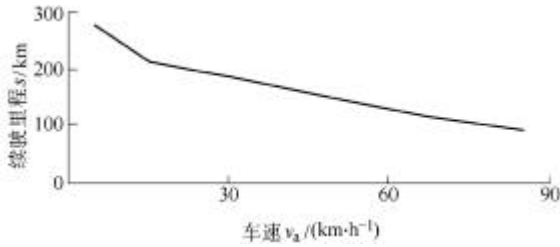


图 7 续驶里程图

该车以 40 km/h 的速度匀速行驶时, 续驶里程为 179 km, 完全满足技术要求。

2.3 计算性能

2.3.1 操纵稳定性分析计算

经计算该车空载静态储备系数为 0.31, 满载静态储备系数为 0.29, 整车操纵稳定性为不足转向, 符合操纵稳定性安全性要求。

2.3.2 行驶稳定性计算

2.3.2.1 纵向行驶稳定性

纵向行驶稳定性及保证汽车上坡时不致纵向翻车, 其条件为

$$\frac{b}{h_g} > j \quad (9)$$

式中 b —— 汽车质心至后轴距离

h_g —— 汽车质心高

j —— 道路附着系数, 取 $j = 0.7$

计算结果见表 3。

表 3 纵向行驶稳定性计算结果

参数	空载	满载
汽车质心至后轴距离 b/mm	2 220	2 190
汽车质心高 h_g/mm	820	570
b/h_g	2.71	3.84

计算结果表明, 该车上坡时不致纵向翻车, 纵向行驶稳定。

2.3.2.2 横向行驶稳定性

(1) 静态侧翻角 b 计算

$$\tan b = \frac{B}{2h_g} \quad (10)$$

式中 B —— 汽车前轮距, $B = 2 046$ mm

静态侧翻角, 《客车通用技术条件》中规定应不小于 35° , 计算结果见表 4。

表 4 静态侧翻角计算结果

参数	空载	满载
汽车前轮距 B/mm	2 046	2 046
汽车质心高 h_g/mm	820	570
B/h_g	1.248	1.79
静态侧翻角 $b(^{\circ})$	51.3	60.9

(2) 动态侧翻角计算如下。汽车在横向坡道上行驶时, 应保证侧滑发生在侧翻之前。条件是

$$\frac{B}{2h_g} > j \quad (11)$$

计算结果见表 5。

表 5 动态侧翻角计算结果

参数	空载	满载
汽车前轮距 B/mm	2 046	2 046
汽车质心高 h_g/mm	820	570
$B/2h_g$	1.248	1.79

计算结果表明, HFF6112GK50EV 电动公交车在有坡度的良好沥青路面 ($j = 0.7$) 上行驶仍能保证侧滑发生在侧翻之前, 所以是稳定的。

2.3.2.3 通过性计算

汽车克服台阶、沟道等障碍时车速较低, 可以用解静力学平衡方程来求解汽车可以通过的台阶高度和沟宽, 可用如下公式计算^[2]

$$\left(\frac{h_w}{D}\right)_1 = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+j^2 \left[\frac{a/L}{1-(a/L)-jD/2L} \right]^2}} \right\} \quad (12)$$

$$\left(\frac{h_w}{D}\right)_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+j^2}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{l_d}{D} = 2 \sqrt{\frac{h_w}{D} - \left(\frac{h_w}{D}\right)^2} \quad (14)$$

式中 D —— 车轮直径, $D = 2r_k = 1 016$ mm

L —— 汽车轴距, $L = 5 700$ mm

a —— 汽车质心至前轴距离, $a = 3 480$ mm

h_w —— 台阶高度

l_d —— 沟宽

计算结果见表 6。

表 6 通过性计算结果

	上台能力(台阶高)		过沟能力(沟宽)	
	h_w/D	h_w/mm	l_d/D	l_d/mm
前轮	0.196	199	0.793	805
后轮	0.09	92	0.573	582

在采用静力学平衡方程求解通过性时没有考虑车速引起的惯性力的影响, 因此后轮越过的台阶

高度较小，但是实际运行时由于汽车具有一定的加速度，汽车可以越过的台阶和沟宽要比计算值大。

2.4 试验性能

该车已经在北京交通部车辆试验场完成了电动公交车各项性能测试和 5 000 km 可靠性试验，检测结果如表 7 所示。

表 7 电动公交车检测结果

试验项目	技术要求	试验结果
30 min 最高车速 $v_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	80	81
最高车速 $v_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	90	92.5
最大爬坡度 $i/\%$	20%	> 20%*
加速时间(0~50 km/h)/s	35	30.4
制动距离(初速 30 km/h 紧急制动)/s/m	10	8.2
一次充电续航里程(40 km/h 匀速行驶)/s/km	150	165**
最小转弯直径 D_{\min}/m	21	< 21
加速行驶车外噪声 $L_{\text{out}}/\text{dB(A)}$	82	75.9
匀速行驶车内噪声 $L_{\text{in}}/\text{dB(A)}$	82	79.8

注：*因最大爬坡度已经满足整车技术要求，故未进行更大坡度的试验。

**试验在单体电池电压低于电池厂家规定的电压情况下终止，此时车速仍可以维持 40 km/h 匀速行驶。

试验结果表明该车的各项性能指标都已经达到了科技部的技术要求，这说明整车的结构设计是合理的，电气系统参数的匹配计算结果与试验结果基本吻合。但是还需要在下一轮的设计中进一步优化电气系统的参数和整车结构，使整车性能得到进一步的提高。

3 结论

HFF6112GK50EV 电动公交客车采用目前先进的高性能水平铅酸动力电池作为整车的能量源，具有较好的动力性，而且 40 km/h 匀速行驶的续航里程达到 165 km，完全可以满足城市公交客车的需要。采用直流电动机作为驱动系统，可以比较容易的实现驱动控制。整车具有零排放，噪声低，整车平顺性好及驾驶员操纵方便等优点，是现在城市公交的最佳选择之一。

参 考 文 献

- 1 陈清泉，孙逢春，祝嘉光．现代电动汽车技术．北京：北京理工大学出版社，2002

- 2 余志生．汽车理论．北京：机械工业出版社，2002
- 3 Rainer B, Peter S. The e-KA : An Electric Vehicle as Technology Demonstrator. In : 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition(EVS-18),Berlin,2001

PURE ELECTRIC CITY BUS STRUCTURE AND DESIGN

Lin Cheng Wang Wenwei Sun Fengchun
(School of Mechanical and Vehicular Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract : The overall vehicle configuration and design are described, which include electrical and control system design and mechanism system design. Electrical and control system design include low-voltage electrical system design, high-voltage electrical system design, overall vehicle control and energy management system design. This vehicle chooses high performance horizon lead-acid battery and the battery box is designed specially. Steering is electrohydraulic power steering, which not only minimizes the energy consumption but also turns easily. Electrical system parameter match is calculated, which includes parameter selection of motor and battery. Handleability and stability, passibility are also calculated. In the end the test result is provided, which indicates that the vehicle performance targets all attain the request of Ministry of Science and Technology and the vehicle configuration design is reasonable and electrical system parameter match result accord with the test result.

Key words : Pure electric city bus Structure
Electrical system Performance

作者简介：林程，男，1969 年出生，博士，副教授。主要研究方向为电动车辆总体设计。

E-mail : lincheng@bit.edu.cn

王文伟，男，1980 年出生，博士研究生。主要研究方向为电动汽车结构安全与轻量化。

E-mail : wwwsd@163.com

孙逢春，男，1958 年出生，留德博士，教授，博士生导师，首批“长江学者奖励计划”特聘教授。主要研究方向为电动车辆总体设计，车辆电传动。

E-mail : sunfc@bit.edu.cn