

双源式无轨电车储能系统设计

蒋时军

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要:介绍了双源式无轨电车的储能系统的基本原理与相关设计要点,特别是根据一种无轨电车运营模式对储能系统容量、储能形式以及能量分配进行了研究,同时在电池箱散热设计中采用了有限元的分析方法,最后通过无轨电车实际运营考核验证了该方法的有效性。

关键词:无轨电车;运营模式;有限元分析;电池荷电状态(SOC);绝缘防护

中图分类号:TM469.72;TM912

文献标识码:A

文章编号:1671-8410(2011)03-0034-04

Design of Energy Storage System in Double-power Trolleybus

JIANG Shi-jun

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The basic principles and related design essentials of energy storage system of double-power trolleybus are presented, especially making a research on energy storage system's capacity, energy storage method and energy distribution strategy according to a new running model of trolleybus. FEM method is used in energy storage system's thermal design. At last, the trolleybus's actual running proves the design method's validity.

Key words: trolleybus; running model; Finite Element Analysis(FEM); SOC; insulation protection

0 引言

由于无轨电车具有清洁环保、噪声小等优点,目前国内许多大中型城市建有无轨电车线路,线路总数多达65条,另外中国部分煤矿矿区也采用了无轨电车作为通勤交通工具。但无轨电车也有存在着运营地域受限、对电网建设依赖性强等缺点。

为了拓展无轨电车的应用范围,我国在1994年开始研制双能源系统无轨电车——增程式无轨电车。电车双源系统是在原有动力能源和动力装置的基础上,增加了一种动力能源或一套动力装置,使原来的无轨电车由单能单动升级为双能单动或双能双动。到目前为止,电车双源系统有电-电双源系统和电-油双源系统两种。电-电双源系统实际上是双能源无轨电车,即双能

单动类型。其构成是驱动系统不变,只增加了一套电池供电装置,在无轨电车脱离线网以后,由电池组向牵引电动机供电,保证车辆正常行驶。

无轨电车直接使用电力驱动,与目前兴起的新能源电动汽车产业有着契合之处。随着我国新能源汽车产业的兴起和锂离子动力电池技术的日益成熟,电-电双源无轨电车通过使用锂离子动力电池作为储能系统将获得更大的续驶里程。随着续驶里程的增加,无轨电车运营模式将更加灵活。本文将对电-电双源无轨电车储能系统进行分析计算,针对预定工况,设计一套适合无轨电车的储能系统。

1 储能系统容量计算

无轨电车储能系统的设计首先需计算实际工况下整车的能耗,同时根据不同的储能形式和充电模式计算出适宜的电池组容量。车长为12 m的城市公交无轨电车基本参数如下:

收稿日期:2011-03-25

作者简介:蒋时军(1970-),男,高级工程师,主要从事电动汽车动力系统相关产品的研究开发工作。

整车最大质量	18000kg
最大迎风面积	7m ²
车辆的尺寸(长×宽×高)	
	12 000 mm×2 490 mm×3 000 mm(不含空调)

1.1 公交工况下整车能耗计算

车辆匀速行驶时，不考虑道路坡度，整车行驶的总功率 P 为：

$$P=P_f+P_w \tag{1}$$

式中： $P_f=(G\times f\times v/3600)/(\eta_T\times\eta_m)$ ——克服滚动阻力的功率； $P_w=(C_w\times A\times v^3/76140)/(\eta_T\times\eta_m)$ ——克服风阻的功率（其中： G ——车重（N）； f ——滚动摩擦系数； v ——车速（km/h）； η_T ——传动效率； η_m ——电机效率； C_w ——风阻系数； A ——车辆迎风面积（m²）。

在车辆满载18 t时， $A=7\text{ m}^2$ ， $f=0.013$ ， $C_w=0.6$ ，不考虑空调的情况下，各车速下匀速行驶的理论功率需求如表1所示。

表1 不同车速（匀速）理想功率、能量需求
Tab. 1 Ideal power and energy requirement at different speeds (Constant speeds)

车速 / km · h ⁻¹	需求功率 / kW	百公里能耗 / (kW · h / 100 km)
20	13.2	66
40	29.5	74
60	51.8	86

但在实际公交路况下，无轨电车处于频繁启停和上下坡工况，导致整车实际能量消耗远大于理论计算值，实际工况运行时其百公里能耗（不开空调）如下：

国内典型工况百公里能耗	105 kW·h
北京公交工况百公里能耗	110 kW·h
株洲公交工况百公里能耗	101 kW·h
上海公交工况百公里能耗	110 kW·h
广州公交工况百公里能耗	108 kW·h

根据以上计算与典型城市工况统计，不考虑电制回收能量，公交车在实际工况驱动所耗的能量约为106 kW · h/100km。

1.2 特定工况下储能系统容量计算

在夜间电池组充满电的条件下，根据实际工况每天需要在线路上运行8趟次，其中线网运行14 km，脱网运行10 km，平均速度12 km/h。考虑到整车电机工作电压平台，储能系统额定电压选择为400 V，同时配置最大充电电流为40 A的车载充电机。具体运行状况如图1所示。

在整车能耗中，附件能量损耗特别是空调能量损耗是不可忽略的部分，在以上工况中不带电网运行10 km所用的时间约为50 min。空调功率为11 kW，按空调满负荷运行不带电网运行10 km(约50 min)所需要的能量约为

9.1 kW · h。因空调会有启停时间（温度达到设定点时会停机），空调这里暂按75%的开机率计算，运行50 min消耗6.8 kW · h能量。

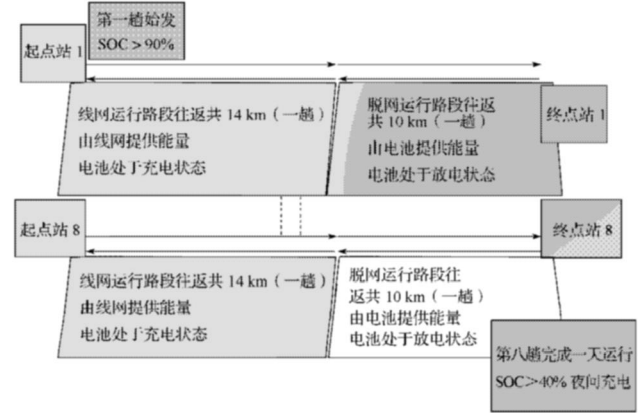


图1 双源无轨电车运行工况示意图
Fig. 1 Actual running model of double-power trolleybus

表2 列出了无轨电车实际工况能量分配情况（带空调），由表2可知，为满足运行8趟的工况需要，储能系统总能量不能低于19.2 kW · h，同时考虑到电池使用寿命及电池最佳充放电效率，电池荷电状态（SOC）工作区间为90% ~ 40%。

$$C=\frac{E}{V_{dc}(SOC'-SOC'')} \approx 100\text{ Ah} \tag{2}$$

式中： C ——电池容量； E ——电池组初始最少能量； V_{dc} ——整车工作额定电压； SOC' ——电池初始荷电状态，90%； SOC'' ——电池最低荷电状态，40%。

表2 无轨电车实际工况能量分配表（带空调）
Tab. 2 Energy distribution of trolleybus in actual running with air-conditioning

项 目	能耗 / kW · h	备 注
脱网单次驱动能量消耗	10.6	10km × 106kW · h/100km
带网单次运行驱动能量消耗	15	14km × 106kW · h/100km
单次电池充电有效能量	15	40A × 400V × 1.16h × 0.8/1000 (电池充电效率80%)
脱网单次空调能量消耗	6.8	11kW × 0.83h × 0.75 (空调开机率75%)
单次电池组能量消耗	2.4	脱网运行消耗总能量减去充电补充能量
电池组初始最少能量需求	19.2	单次消耗能量 × 运行趟数

按以上条件运行，电池容量选用100 Ah，能满足无轨电车线网运行14 km、脱网运行10 km、每天运行8趟的运行条件。

2 电池选型与储能电池箱体设计

2.1 电池类型分析

现有电动车常用储能元件主要有3种，如表3所示。

表3 不同电池特点

Tab.3 Characteristics of different batteries

电池类型	结构特点	比能量 / (Wh · kg ⁻¹)	最大放电倍率	比价格 / (元 · Wh ⁻¹)	工作温度 / °C	单体循环寿命 / 次
铅酸电池	正极采用二氧化铅，负极采用海绵状的铅，电解液是稀硫酸溶液	35~40	5 C	1.2	-30~60	500
镍氢电池	正极为氢氧化镍，负极为储氢合金，电解质为氢氧化钾	50	8 C	6	-20~55	1 300
锂电池	正极为氧化锂合金，负极为石墨	110	2 C	4	-20~45	> 2 000

根据表3可知，锂离子电池在能量密度、循环寿命等重要指标中具有明显优势，也是目前纯电动车的首选储能元件。

2.2 储能系统电池箱体设计

2.2.1 方案设计

依据以上计算以及对电池应用状况的分析，选定100 Ah型动力磷酸铁锂电池，其具体参数如下：

外形尺寸(L×H×D)	220 mm×67 mm×142 mm
质量	3.1 kg
内阻	<0.6 mΩ
额定容量	100 Ah
额定电压	3.2 V
循环寿命(80%DOD@0~50°C 0.3C)	≥2 000次
最大充电电流(恒流)	100 A
最大放电电流(10 s)	400 A
放电温度	-25~55°C
充电温度	0~55°C

考虑整车布置，储能系统的空间要求为：1 330 mm×400 mm×280 mm，依据该空间要求，电池的布置方案有如图2和图3所示两种。

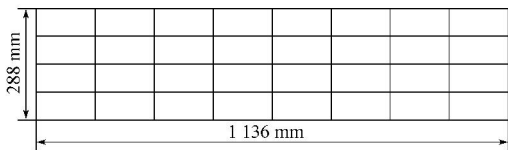


图2 电池布置方案一

Fig.2 1st layout of battery

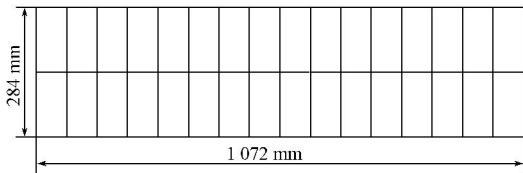


图3 电池布置方案二

Fig.3 2nd layout of battery

两种方案在结构上均可以满足实际装车要求，在采用强迫风冷的方式下，应用ANSYS-CFX有限元流体分析软件进行了不同结构下的风流分布和压力损失分析，两种方案的分析结果如图4~图7所示。

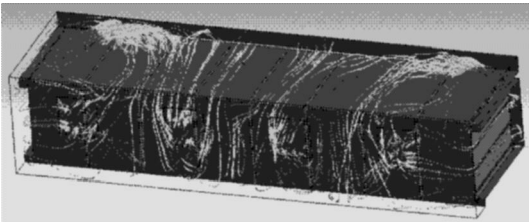


图4 方案一内部风流分布

Fig.4 Air flue in 1st layout

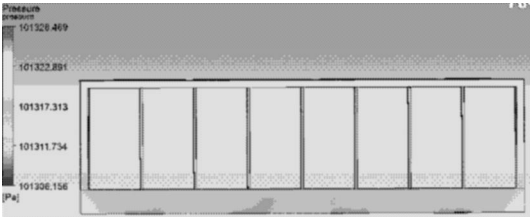


图5 方案一箱体风压损失分布

Fig.5 Air-pressure loss in 1st layout

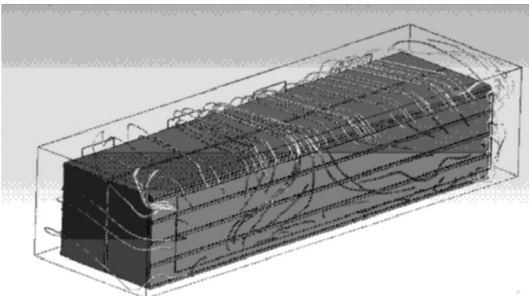


图6 方案二内部风流分布

Fig.6 Air flue in 2nd layout

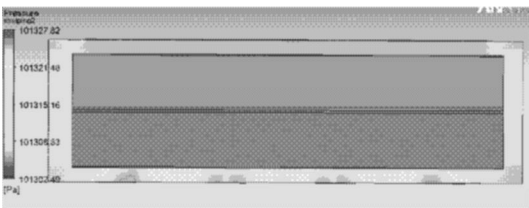


图7 方案二箱体风压损失分布

Fig.7 Air-pressure loss in 2nd layout

通过分析可见，两种方案箱体内部风流状况均比较均匀，没有明显的散热死角，两种结构压力损失也基本相同(10~12 Pa)。根据电池外壳结构特点，方案一中每个电池之间留有6 mm宽的散热风道，不但更利于各单体电池均匀散热，还可有效预防电解液泄露时带来的电气安全隐患，因此选用方案一进行结构设计。

经过实际工况测量,按平均放电电流为100 A计算,电池内阻 $\leq 0.6\text{ m}\Omega$,取 $0.6\text{ m}\Omega$,其电发热功率为6 W/单体,电池散热面以上表面及一窄侧面计算,其热流密度不到 $0.03\text{ W}/\text{cm}^2$ 。电池的散热特性是:电池本身的发热比较小,而电池之间的连接导电条因接触电阻较大,发热相对集中。因此,主箱体内散热风流主要分布在电池上表面,更利于电池散热。

电池工作时平均电流为100 A,每箱32节电池串联,那么单箱电池的发热量为 $32\times 100^2\times 0.6\times 10^{-3}=192\text{ W}$,依据散热冷却风量的计算,冷却风量的计算公式如下:

$$q'=\frac{Q}{0.335\Delta T}$$

式中: q' ——实际所需的风量(m^3/h); Q ——散热量(W); ΔT ——空气的温升(K)。

此处 ΔT 取5 K,得到散热风量 $q'\approx 114\text{ m}^3/\text{h}$,风机选型时按照2倍裕量选择风机的最大风量,则风机的最大风量需为 $228\text{ m}^3/\text{h}$ 。依据箱体尺寸有限元分析结果以及考虑到散热均匀性,在箱体内安装2台风机,那么单台风机的散热风量需大于 $114\text{ m}^3/\text{h}$ 。

最终选用了SRFJ-B50型风机,该风机的排风量达到了 $350\text{ m}^3/\text{h}$,可以满足散热风量需求,该风机的工作特性如图8中的曲线③。

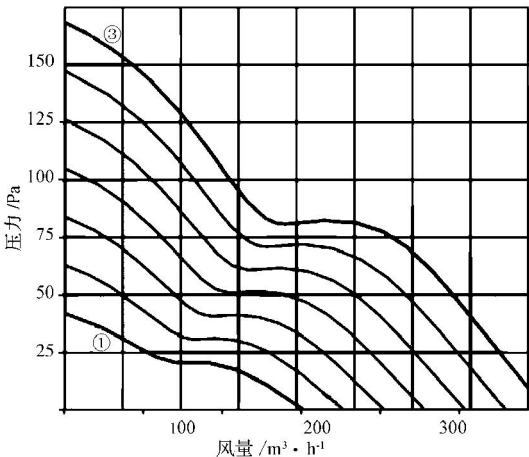


图8 风机工作特性曲线
Fig. 8 Characteristic curve of the fan

该风机在压力为25 Pa时排风量仍有不小于 $340\text{ m}^3/\text{h}$ 的排风量,该风机的功率约为16 W。选用两台该型号风机,完全能够满足电池箱的散热要求。

2.2.2 防护处理及可维护性设计

2.2.2.1 电池箱防火安全处理

电池箱电源出口使用快速熔断器保护。电池箱作防火阻燃处理,全部采用阻燃材料,主要材料为冷轧钢板,部分绝缘材料为环氧布板(本身具有阻燃特性,另外还涂覆阻燃绝缘材料,进一步加强其阻燃绝缘性能),

电池箱内部的采样信号线均使用阻燃线。采取上述措施后,能够满足UL94 V-0的防火等级。

2.2.2.2 绝缘防护

无轨电车是在线网上运行的,其绝缘防护尤为重要,万一绝缘防护出现问题,将导致乘客触电事故,因此电池与车体间采用两级绝缘保护,即电池对电池箱绝缘(耐压DC 2 500 V,持续1 min)、电池箱对车体绝缘(耐压DC 2 500 V,持续1 min)。在电池箱内,与电池接触的安装架等器件,均采用JYCL-10绝缘保护材料进行处理,实现电池与电池箱之间的第一级绝缘。JYCL-10绝缘材料的特性参数如下:

防火等级	UL94 V-0
热变形温度	121℃
击穿电压	22000V
绝缘电阻	$3.97\times 10^{15}\Omega$

安装在电池箱底架上的滑轮使用的是聚氨酯有机绝缘材料,从而实现电池箱对滑轮底架的绝缘,即第二级绝缘。

2.2.2.3 防尘防水

考虑到电池箱的散热要求,在通风散热的情况下,电池箱能够满足IP53的防尘防水等级要求。

2.2.2.4 可维护性设计

电池箱设有方便拆装的电池管理系统调试检修口,可随时对电池管理系统进行检测、调试等工作。电池箱采用快拆结构,便于电池箱的后续维护。

3 实际运行验证

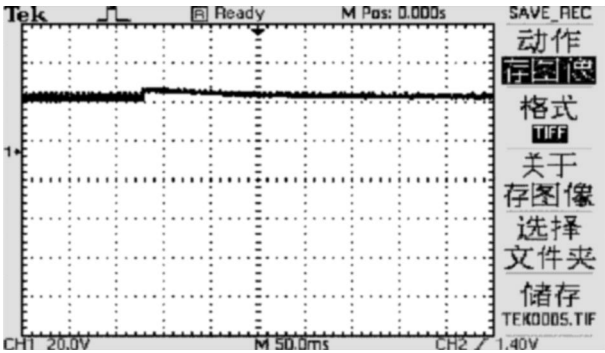
储能系统装车后,在市区内进行了上路试验,采集的运行数据见表4。

表4 实际运行数据
Tab. 4 Data in actual running

时刻	SOC/%	电压/V	电池箱温度/℃	运行里程/km	状态
9:45	99	437	31	始发	
10:09	80	423	35	5	脱网运行
10:52	94	431	33	10	线网运行
11:56	62	422	35	6.4	脱网运行
中午休息, 充电					
13:05	90	436	33	出发	
13:24	76	423	37	5	脱网运行
13:48	84	429	35	10	线网运行
14:09	70	424	36	5	脱网运行
14:53	88	432	34	10	线网运行
15:49	58	421	35	7.8	脱网运行

4 结语

最终设计的无轨电车储能系统 (下转第50页)



(b)突卸负载
(b) Suddenly unloading
图 16 突加 / 突卸负载时输出电压
Fig.16 Output voltages while suddenly loading
and suddenly unloading

5 结语

本文针对现行航空地面电源车在飞行保障过程中因电源质量达不到要求而经常迫使飞行保障中断的现象,提出在电压反馈的基础上加入电流反馈组成双闭环控制方案^[6];针对电流滞环控制存在的开关频率不

稳定的问题,利用变环宽恒频控制以稳定系统的开关频率^[7]。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性和系统的高效性。

参考文献:

[1] 赵徐成,蒋 超. 航空地面电源[M]. 徐州:徐州空军学院,2005.
[2] 丁道宏. 电力电子技术[M]. 北京:航空工业出版社,2007.
[3] 韩 林,赵荣祥,柳 鹏. 基于SaberSktech/Scope的无刷直流电机仿真分析[J]. 微电机,2004, 37(5): 15-17.
[4] 黄 辉,姜学东. 三相异步电机交流调压电路Saber 仿真与控制[J]. 电力电子技术,2005, 39(2): 78-80.
[5] 刘日科. 电压调节模块滞环控制方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
[6] Vasudevan K, Kumar M N. Bi-directional real and reactive power control using constant frequency hysteresis control with reduced losses[J]. Electric Power Systems Research,2005,76(1):127-135.
[7] Poulsen S,Andersen M A E. Hysteresis controller with constant switching frequency[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(2): 688-693.
[8] 杨 旭,王兆安. 一种新的准固定频率滞环PWM 电流控制方法[J]. 电工技术学报,2003, 18(3): 24-28.

(上接第37页) CNXT168已经装车运行。经过实际运行证实,该储能系统满足实际工况条件要求,并且电池箱内的温升控制在合理的温升范围内。该储能系统的成功应用将在很大程度上使无轨电车摆脱电网建设的依赖,同时也拓展了新能源电动车的应用范围,为城市交通领域进一步节能减排打下了良好的技术基础。

参考文献:

[1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
[2] 王小磊. 无轨电车的技术与发展[J]. 城市公共交通,2001(1): 22-23.
[3] 张连福. 新型无轨电车[J]. 城市公共交通,2009(3): 39-40.
[4] CJ/T3034-1995,城市无轨电车运行耗电计算通则[S].

(上接第43页) 配合转子位置传感器实现可逆运行也预期具有较宽的恒功率调速区,且宽度可调、控制参数易于配置,亦可作起动/发电机;(3)配以变频器组成并网风力发电系统,有简化系统、降低成本的作用。

航空航天大学,2006。
[2] 胡敏强,黄学良. 电机运行性能数值计算方法及其应用[M]. 南京:东南大学出版社,2003。
[3] 王远兵. 车用混合励磁爪极发电机的有限元分析与研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009。

参考文献:

[1] 秦海鸿. 混合励磁双凸极电机基本性能研究[D]. 南京:南京