

轨道交通车载混合储能技术研究进展*

石俊杰¹ 时方力² 安 祺² 刘禹贝² 郭 爱² 戴朝华²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 064099, 唐山; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

摘 要 以锂电池与超级电容构成的混合储能系统, 充分利用了各自能量密度与功率密度的互补特性, 在轨道交通车载储能领域受到高度关注, 但效率优化仍亟待提高。分别从储能子系统和混合储能系统的角度, 论述了混合储能系统能量效率优化的研究进展, 归纳了影响子系统和系统能量效率的因素以及基于这些因素的优化方法。比较分析了这些因素的影响程度和优化方法的优劣, 提出了当前混合储能系统在能量效率提高方面亟需解决的关键问题。给出了车载混合储能系统效率优化展望, 为轨道交通车载动力系统设计与控制提供参考。

关键词 轨道交通; 混合储能系统; 锂电池; 超级电容; 效率优化

中图分类号 TK02; U260.13⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.019

Research Progress on Rail Transit Vehicle On-board Hybrid Energy Storage Technology

SHI Junjie, SHI Fangli, AN Qi, LIU Yubei, GUO Ai, DAI Chaohua

Abstract The hybrid energy storage system composed of lithium battery and super-capacitor exerts the maximized complementary characteristics of energy density and power density from each part separately, therefore attracts great attention in the field of rail transit vehicle on-board energy storage, whereas the efficiency optimization requires immediate amelioration. From the perspectives of energy storage subsystem and hybrid energy storage system, the research progress on power efficiency optimization in hybrid energy storage system is elaborated, the factors affecting the subsystems, the efficiency of systems, and the optimization methods based on these factors are summarized. The influence level of these factors, the merits and demerits of the optimization methods are comparatively analyzed, key problems on energy efficiency improvement in hybrid energy storage system are put forward. Finally, the prospect of efficiency optimization of on-board hybrid energy storage system is presented, providing reference for the design and

control of on-board power system in rail transit.

Key words rail transit; hybrid energy storage system; lithium battery; super-capacitor; efficiency optimization

First-author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 064099, Tangshan, China

储能技术以其独特的优越性而备受青睐和关注, 被广泛应用于轨道交通、汽车等诸多领域。在实际应用中, 储能系统由于受到成本、空间等约束, 所储存的能量是有限的。因而如何提高储能系统能量效率是一个值得深入研究的课题。由于一种类型的储能元件很难同时具有优异的功率和能量特性^[1], 常利用多种储能元件, 通过一定的方式连接构成混合储能系统 (HESS), 充分发挥两者的优点, 使系统获得更好的性能^[2]。

在众多 HESS 中, 锂离子电池加超级电容式的 HESS 应用最为广泛。锂离子电池具有能量密度高、自放电小的特点, 但同时具有功率密度低、循环寿命短、温度特性差等缺点, 降低了其运行效率^[3], 当负载功率突变时, 不能快速地吸收或释放目标功率, 较难满足系统的动态要求^[4]。与之相比, 超级电容具有长寿命周期、良好温度特性以及高功率密度等优点, 能在短时间内提供较大功率, 为其他设备提供缓冲。两者结合的 HESS 兼具较高的能量密度和功率密度, 在面对复杂工况时能快速地吸收或释放功率, 很好地满足车辆的动态要求。

锂离子电池加超级电容式的 HESS 包括锂离子电池、超级电容、DC/DC 转换器以及能量管理控制器等多种设备。在进行 HESS 能量效率优化时, 不仅要考虑储能元件单体的能量效率优化, 还应从系统整体优化角度进行考虑。本文从锂离子电池效率优化、超级电容效率优化以及系统效率优化三个方面对 HESS 效率优化方法进行综述, 对各种优化方法进行了分类, 并指出了下一步研究方向, 为混

* 国家重点研发计划项目 (2017YFB1201003, 2017YFB1201005)

合储能系统效率研究提出了相应建议。

1 锂离子电池效率优化

1.1 电池单体能量效率

研究锂离子电池能量效率,可以从它的等效电路模型进行理论分析。目前关于锂离子电池等效模型主要有 Rint 模型、PNGV 模型、Thevenin 模型、NERL 模型、Randles 模型和 RC 模型等^[5]。其中一阶 RC 模型具有精度高、参数少、易辨识特点,适用广泛。本文在权衡了模型准确度和实现算法复杂度的基础上,选用一阶 RC 等效电路模型,其电路原理如图 1 所示。

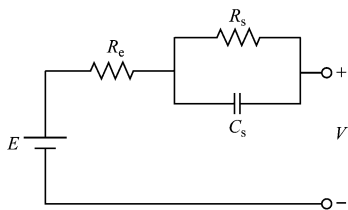


图 1 一阶 RC 等效电路模型

根据上述模型,由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,求解电池内部损耗表达式为:

$$Q_{\text{loss}} = I^2 R_0 + \frac{U_s^2}{R_s} \quad (1)$$

式中:

I ——通过 R_0 的电流;

R_s ——与电容 C_s 并联的电阻;

U_s ——电容 C_s 两端电压。

分析锂离子电池内部能量交换过程,可得:

$$Q_{\text{gross}} = Q_{\text{net}} + Q_{\text{loss}} \quad (2)$$

式中:

Q_{gross} ——输出/输入的总能量;

Q_{net} ——负载/电池获得的净能量,净能量与总能量之比即为电池能量效率。

电池能量效率包括电池充电效率、放电效率以及充放电循环效率。一般来说,电池净能量难以测得,容易测得的是电池端口处的能量。

当电池处于充电过程中,根据电池内部能量交换过程,可得充电能量效率为:

$$\eta_{\text{chg}} = \frac{Q_{\text{net}}}{Q_{\text{gross}}} \times 100\% = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

Q_{in} ——端口输入的电池能量;

η_{chg} ——电池充电能量效率。

当电池处于放电过程中,根据电池内部能量交换过程,可得放电能量效率为:

$$\eta_{\text{dischg}} = \frac{Q_{\text{net}}}{Q_{\text{gross}}} \times 100\% = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{out}} + Q_{\text{loss}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

Q_{out} ——端口输入的电池能量;

η_{dischg} ——电池放电能量效率。

1.2 效率影响因素

电池内部损耗越大,能量效率就越低,而影响电池内部损耗的关键是电池内阻和电荷转移。

对于锂电池能量效率的影响因素可以归纳为 5 种:温度、电池老化、荷电状态(SOC)、充电/放电倍率、电化学反应^[6-7]。图 2 为这些因素与能量效率的逻辑关系图。现有研究表明:

1) 当锂离子电池处于一定的温度范围内($-18 \sim 25^\circ\text{C}$),电池的内阻随温度的上升而减小^[8]。当温度超过这一区间后,温度变化对内阻影响不明显。

2) 电池老化分为两个过程:容量衰减、内阻增加^[9]。前者会导致电池容量降低,后者会增大电池损耗,降低能量效率。

3) SOC 的变化会影响电池的内阻^[10]。当电池处于充电状态时,随着 SOC 增加,能量效率缓慢增加,当 SOC 持续上升至 50% 之后,能量效率呈现出下降的趋势;当电池处于放电状态时,随着 SOC 的降低,能量效率减小,直到 SOC 下降到 60%,此后,能量效率下降趋势趋于平缓^[11]。

4) 电池充电/放电倍率直接影响内部损耗^[12],随着充电/放电倍率的增加,电池的内部损耗急剧增大,电池能量效率降低。

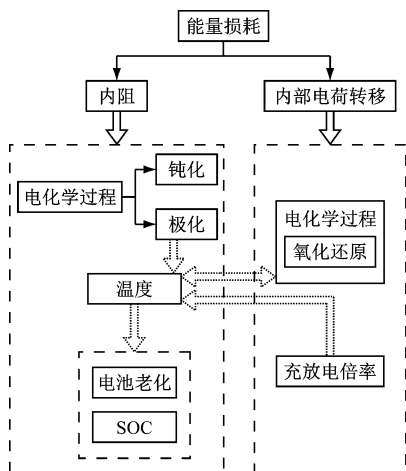


图 2 锂电池效率机理关系图

5) 影响电池能量效率的电化学反应包括氧化还原反应、极化以及钝化反应。氧化还原反应影响电池内部电荷的转移^[13],极化和钝化反应影响电池内阻。

综上所述,温度、电池老化、SOC 影响电池内阻,充电/放电倍率影响电荷转移,电化学过程既能影响内阻又与电荷转移息息相关。目前,该领域的研究还局限在单因素或多因素作用下的能量效率优化,尚未涉及将上述 5 个因素综合考虑下的效率优化方法。

2 超级电容效率优化

2.1 超级电容效率

超级电容内部结构比较复杂,主要应用的等效模型有经典德拜极化电池模型和 Newman 提出的传输线模型^[14]。但这两种模型在计算时比较复杂,因此,在要求不十分精确的工程应用中,使用经典一阶 RC 模型。简化电路模型具有模型结构简单、参数容易辨识、精度高等优点,许多学者在储能系统的研究中都采用此种模型。

目前,关于超级电容的能量效率没有统一的说法,在此选取目前运用最为广泛的定义。

2.1.1 充电能量效率

当超级电容处于充电状态时,充电能量效率可被定义为:

$$\eta_{\text{chg}} = \frac{w_c}{w_i} \quad (5)$$

式中:

w_c ——电容储存的能量;

w_i ——充电器输出能量。

从超级电容的 RC 等效电路可知,由于内阻的存在,使得在充电过程中因为消耗能量而产生热,真正存入超级电容的电能与充入的电能有了一定的差别。充电电路与超级电容内部结构都对充电效率造成影响。

2.1.2 放电能量效率

当超级电容处于放电状态时,放电能量效率可被定义为:

$$\eta_{\text{dischg}} = \frac{w_o}{w_c} \quad (6)$$

式中:

w_o ——超级电容能够放出的能量。

如果要把储存于超级电容组中的能量全部释

放出来,需要将其电压值从最大值降到 0。但是,在实际工况中,随着超级电容能量的降低,其电压压降明显,无法满足电压需求,达不到能量的全部输出。

2.1.3 超级电容储能效率

储能效率即指充电过程中放出电能与存入电能的比值。同时,储能效率也等于充电效率与放电效率的乘积,即:

$$\eta = \frac{w_c}{w_i} \cdot \frac{w_o}{w_c} = \frac{w_o}{w_i} \quad (7)$$

2.2 效率影响因素

影响超级电容的效率因素除自身化学材料特性外,充电/放电电流也会影响超级电容能量损耗。理论上,超级电容有恒电流、恒电压、恒功率三种充电/放电方式。因超级电容可看作带有内阻的电压源,所以恒电压方式不适合超级电容。

2.2.1 恒电流充放电

在恒电流充电/放电过程中,超级电容能量 E 及能量损耗 E_{loss} 为:

$$\begin{cases} E = \frac{1}{2} C \cdot U_{\text{sc}} (U_1^2 - U_0^2) \\ E_{\text{loss}} = I_E R t = RC \cdot U_{\text{sc}}^2 \cdot \frac{(U_1^2 - U_0^2)}{t} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

I_E ——超级电容的电流;

U_0 、 U_1 ——电压;

C ——电容值;

U_{sc} ——超级电容端电压;

R ——等效内阻。

由式(8)可得:

$$\begin{cases} \eta_{\text{chg}} = \frac{w_c}{w_i} = \frac{E}{E_{\text{loss}} + E} \\ \eta_{\text{dischg}} = \frac{w_o}{w_c} = \frac{E_{\text{loss}} + E}{E} \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知,时间 t 、时间常数、放电深度是影响超级电容效率的主要因素。其中,充电/放电时间 t 与放电深度直接影响效率,随着充放电时间 t 的增加,效率增大;放电深度增加,效率降低。时间常数不仅影响效率,还与电容容量密切相关。容量越大,时间常数就越大,但时间常数增大会影响效率,使效率降低。因此,在选择超级电容型号时,应考虑时间常数对储能容量及效率的影响。除此之外,为了达到快速高效的充电目的,充

电电流和时间也应综合考虑。

2.2.2 恒功率充放电

在恒功率充电/放电过程中, U_{sc} 、电能损耗 W_{loss} 及实际充入/放出电能 W_C 为:

$$\begin{cases} U = U_{sc} - Ri_C = U_{sc} - R \frac{P}{U_{sc}} \\ W_{loss} = \int_0^t P dt \\ W_C = \int_0^t U \cdot i_C dt = \int_0^t C(U_{sc}) U dU \end{cases} \quad (10)$$

式中:

P ——充放电功率;

i_C ——超级电容的电流;

W_{loss} ——实际充入/放出的电能;

W_C ——电能损耗;

U_{sc} ——超级电容端电压;

U ——超级电容器组等效电容两边的电压。

由式(10)可得:

$$\begin{cases} \eta_{chg} = \frac{w_c}{w_i} = \frac{W_C}{W_{loss} + W_C} \\ \eta_{dischg} = \frac{w_o}{w_c} = \frac{W_{loss} + W_C}{W_C} \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知,影响超级电容的充电/放电效率的因素主要有 R 、 U_{max} 、放电深度及充电/放电功率 P ; 升高电容电压、降低内阻和功率以及放电深度可提高充电/放电效率。

综上所述,在超级电容充放电的整个过程中,没有发生任何电化学反应,电极结构没有发生变化。因而超级电容的效率与充放电电流有很大的关系,对超级电容能量效率的优化应注重对充放电电流的控制。

3 系统效率优化

对于一个混合储能系统来说,除储能元件单体可以影响其系统效率外,该系统的能量控制拓扑也是尤为关键的环节。能量控制拓扑是 HESS 中的“骨骼”,承担着储能系统中能量分配的功能。对于不同的能量控制拓扑,它们的组成元件主要包括:储能元件、DC/DC 转换器、负载以及能量控制器。根据储能元件与直流母线的连接情况,可分为三种类型:被动式、半主动式、全主动式^[15]。被动式 HESS 的拓扑结构简单,但由于电流不可控制,因而本文不讨论。

3.1 半主动式

半主动式的 HESS 是在电池和超级电容的基础上,增加一个 DC/DC 转换器。根据储能元件与直流母线的连接方式不同,可以得到两种配置:UC/电池配置、电池/UC 配置。

UC/电池是指电池直接连接到直流母线,超级电容通过 DC/DC 转换器连接,如图 3 所示^[2]。超级电容作为主要能源为负载供能,锂离子电池提供辅助能量。UC/电池配置式的 HESS 能够实现电流的合理分配,提高 UC 的峰值功率^[16],进一步降低了电池的峰值电流,延长了电池循环寿命^[17],但 DC/DC 转换器自身的能量损耗会降低系统效率^[18],且转换器所占体积较大,成本较高。

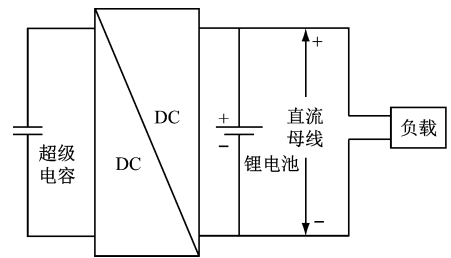


图 3 UC/电池配置式

电池/UC 是指超级电容直接连接到直流母线,作为低通滤波器使用,电池通过 DC/DC 转换器连接到母线,如图 4 所示^[2]。锂离子电池作为主要能源为负载供能,超级电容提供辅助电力。当负载功率需求超出电池能提供的最大功率时,则由 UC 提供额外的功率。电池/UC 配置式的 HESS 可以降低电池峰值功率,保证电池电压维持在较低水平,减少平衡问题^[2],但不能提高系统总体能量效率^[19]。

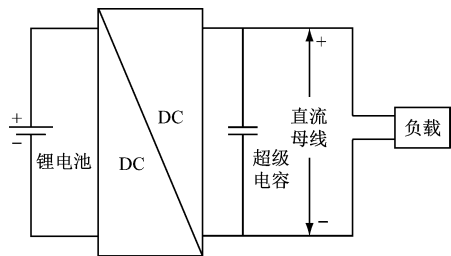


图 4 电池/UC 配置式

3.2 全主动式

全主动式 HESS 是超级电容和锂离子电池都通过 DC/DC 转换器连接到直流母线的结构。根据连接方式的不同,全主动式 HESS 可分为级联配置式、多 DC/DC 配置式以及多路输入转换器配置式。

级联配置式是在锂离子电池和超级电之间、超

级电容和母线之间各连接一个 DC/DC 转换器。如图 5 所示,该拓扑结构中电池和 UC 具有更大的电压工作范围,但随 DC/DC 转换器的增多,加大了系统的能量损耗和成本,降低了系统效率。

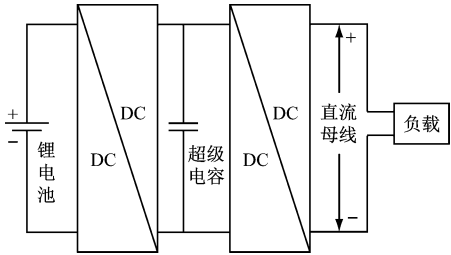


图 5 级联配置式多 DC/DC 配置式

不同于级联配置式,多 DC/DC 配置 HESS^[20]是将两个转换器的输出并联,如图 6 所示^[2]。电池和 UC 的电压低于直流母线电压,避免了平衡问题,保证了 UC 能量的充分利用。但该拓扑需要两个 DC/DC 转换器,成本昂贵。

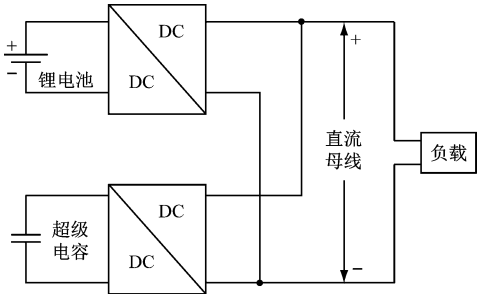


图 6 多 DC/DC 配置式多路输入转换器配置式

多路输入转换器配置式 HESS 是将锂离子电池和超级电容连接在同一个 DC/DC 转换器。相比于多 DC/DC 配置式,降低了系统成本。图 7 为多路输入转换器配置式的拓扑结构。

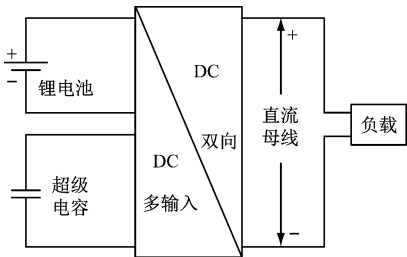


图 7 多路输入转换器配置式

3.3 对比分析

两种半主动式 HESS 包括:UC/电池配置式、电池/UC 配置式。UC/电池能够更好地利用 UC 能量,其能量效率对负载动态变化更敏感^[15]。通常 UC 的效率远高于电池的效率^[19]。当 UC 作为主要

能源时,系统总效率更接近于 UC 效率。因此,前者系统效率高于后者,容易实现系统的高效率运行和长寿命周期,但该拓扑的参数之间存在强相关性,使得 HESS 运行状态更加复杂。电池/UC 是一种相对简单的 HESS,在抑制电池温升(即电池保护)方面具有更佳的性能,但该拓扑的效率主要取决于 DC/DC 转换器的效率。

目前关于能量控制拓扑的研究已经趋于成熟,通过改变转换器的连接方式或增减转换器的个数已难以大幅度地提升系统能量效率。引入新兴器件或颠覆既有模式、改变拓扑中能量流通道或将成为此领域研究的又一突破口。

4 总结与展望

能量效率是评价一个系统的重要衡量指标。在实际应用中,由于 HESS 的成本、空间等约束,系统所能储存的能量往往是有限的。提高 HESS 的能量效率不仅可以充分利用有限的能量,更重要的是可以突破 HESS 应用领域的局限性,推动 HESS 在更广阔的领域应用。

本文综合已有文献,对 HESS 能量效率进行了概述。一方面,从储能元件的角度总结了能量效率提高的切入点和方法,分析了影响储能元件能量效率的因素,并给出了后续的研究方向;另一方面,从系统能量效率提高的角度总结现有的能量控制拓扑和能量管理策略,对比了不同控制拓扑对能量效率的影响,分析了不同拓扑的优缺点,并指出了下一步的研究重点。以上工作为 HESS 系统能量效率指明了研究方向,为该领域的进一步研究提供了参考。

参考文献

[1] JOOS G, FREIGE M D, DUBOIS M. Design and simulation of a fast charging station for Phev/Ev batteries [C]// IEEE. 2010 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC). Halifax, NS, Canada; IEEE, 2010: 1.

[2] JIAN C, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1):122.

[3] LIN H, JIANG J, WEI S, et al. Optimization control for the efficiency of an on-board hybrid energy storage system in tramway based on fuzzy control [C]// IEEE. 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). Cadiz, Spain;

- IEEE, 2017: 454.
- [4] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(4):335.
 - [5] 陈息坤,孙冬,陈小虎. 锂离子电池建模及其荷电状态鲁棒估计[J]. 电工技术学报,2015,30(15):141.
 - [6] FLEISCHHAMMER M, WALDMANN T, BISLE G, et al. Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperatures and safety in lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2015, 274:432.
 - [7] BARRE A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications [J]. Journal of Power Sources, 2013, 241(11):680.
 - [8] PARVINI Y, VAHIDI A, FAYAZI S A, et al. Heuristic versus optimal charging of supercapacitors, lithium-ion, and lead-acid batteries: an efficiency point of view [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 26(1):167.
 - [9] WEHBE J, KARAMI N. Battery equivalent circuits and brief summary of components value determination of lithium ion: a review [C]// IEEE. 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE2015). Beirut, Lebanon: IEEE, 2015: 45.
 - [10] HU X, LI S, PENG H, et al. Charging time and loss optimization for linmc and LiFePO₄ batteries based on equivalent circuit models [J]. Journal of Power Sources, 2013, 239:449.
 - [11] ZHANG P, DU C, YAN F, et al. Influence of practical complications on energy efficiency of the vehicle's lithium-ion batteries [C]// IEEE. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2011:2278.
 - [12] VIRTANEN A, HAAPALA H, HANNIKAINEN S, et al. Calorimetric efficiency measurements of supercapacitors and lithium-ion batteries [C]// IEEE. 2011 Twenty-Sixth Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2011:1367.
 - [13] KLEIN R, CHATURVEDI N A, CHRISTENSEN J, et al. Optimal charging strategies in lithium-ion battery [C]// IEEE. Proceedings of the American Control Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 382.
 - [14] 孟彦京,张商州,陈景文,等. 充电方式对超级电容能量效率的影响[J]. 电子器件,2014(1):17.
 - [15] MORENO J, ORTUZAR M, DIXON J. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2):614.
 - [16] GAO L, DOUGAL R A, LIU S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1):236.
 - [17] SCHROEDER J C, FUCHS F W. General analysis and design guideline for a battery buffer system with DC/DC converter and EDLC for electric vehicles and its influence on efficiency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2):922.
 - [18] BLANES J M, GUTIERREZ R, GARRIGOS A, et al. Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck-boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12):5940.
 - [19] MIN H, LAI C, YU Y, et al. Comparison study of two semi-active hybrid energy storage systems for hybrid electric vehicle applications and their experimental validation [J]. Energies, 2017, 10(3):1.
 - [20] NAPOLI A D, CRESCIMBINI F, CAPPONI F G, et al. Control strategy for multiple Input DC-DC power converters devoted to hybrid vehicle propulsion systems [C]// IEEE. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. L' Ayuila, Italy: IEEE, 2002:1036.

(收稿日期:2019-09-17)

(上接第 82 页)

开发的一种特有的检测装置,其同时检测电磁铁极板与 F 轨磁极面之间的间隙和悬浮电磁铁的垂向加速度。悬浮控制器通过接收悬浮传感器的加速度信号、间隙信号不断地控制调整电磁铁线圈的电流,从而达到控制列车悬浮稳定的目的。本文结论如下:① 悬浮传感器受温度的变化,其数据的漂移值逐渐增大,当温升大于 60℃ 时,悬浮传感器输出值超出系统允许的误差范围;② 采用隔热材料的安装块,可以控制悬浮传感器的最高温度低于 45℃,从而解决传感器温升过高的问题。本文研究确定的结论为后续中速磁悬浮列车设计改进提供了参考依据。

参考文献

- [1] 吕梁. 高速磁悬浮列车间隙传感器工程化技术的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [2] 吕梁,樊树江,吴峻. 电涡流间隙传感器的温度补偿[J]. 传感器与微系统,2006(5):37.
- [3] 吴峻,吕梁. 高速磁悬浮列车悬浮间隙传感器的故障检测设计[J]. 计算机测量与控制,2009(10):1923.
- [4] 李希宁,佟来生. 中低速磁悬浮列车技术研究进展[J]. 电力机车与城轨车辆,2011(2):1.
- [5] 张文跃,罗京,朱跃欧,等. 中低速磁悬浮列车非线性悬浮控制方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2015(3):29.

(收稿日期:2018-11-09)