

中低速磁浮列车悬浮传感器热稳定性研究

乔林真

(湖南磁浮交通发展股份有限公司, 410041, 长沙//高级工程师)

摘要 悬浮传感器是列车悬浮系统重要的组成部分, 由于悬浮传感器安装在悬浮架发热电磁铁的端部, 工作时会将热量传递到悬浮传感器, 导致悬浮传感器输出数据漂移, 从而影响悬浮稳定性。研究了悬浮传感器受温度的影响及隔热的必要性。通过试验证明, 悬浮传感器受温度的变化, 其数据的漂移值逐渐增大。当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°C , 从而解决传感器温升过高而导致的数据漂移问题。

关键词 磁浮列车; 悬浮系统; 隔热; 悬浮传感器; 传感器安装块

中图分类号 U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.018

Thermal Stability of Medium and Low Speed Maglev Train Suspension Sensor

QIAO Linzhen

Abstract The suspension sensor is an important part of the train suspension system. Since it is installed at the end of the heating electromagnet of the suspension frame, the heat will be transferred to the suspension sensor when it works, resulting in the output data drift and the instability of the suspension sensor. In this paper, the influence of temperature on the suspension sensor and the necessity of heat insulation is studied. Experiment shows that the drift value of the suspension sensor data increases gradually with the changes of temperature. When the mounting block of thermal insulation material is used, the maximum temperature of the suspension sensor can be controlled below 45°C , thus the problem of data drift caused by the sensor temperature rise is solved.

Key words maglev train; suspension system; heat insulation; suspension sensor; sensor mounting block

Author's address Hunan Maglev Transportation Development Co., Ltd., 410041, Changsha, China

长沙磁浮快线是国内首条中低速磁悬浮商业运营线路, 作为一种新型的交通工具, 具有速度快、能耗低、噪声小、安全舒适等优点, 适合城市之间的快速客运需求。而悬浮系统是中低速磁悬浮列车

的关键系统, 其中悬浮传感器则是悬浮系统的重要组成部分之一。

1 悬浮传感器原理及问题

悬浮传感器是悬浮系统中的检测部件, 通过“安装块”安装在悬浮电磁铁端部(见图1), 检测悬浮电磁铁极板与 F 轨磁极面之间的间隙和悬浮电磁铁的垂向加速度, 并将信号传递给悬浮控制器。悬浮控制器根据间隙信号及加速度信号调节控制悬浮电磁铁电流, 通过控制电磁铁吸力以保持列车稳定在 8 mm 的悬浮间隙。悬浮传感器的正常工作温度范围为 $-25 \sim 85^{\circ}\text{C}$, 在夏天环境温度持续维持较高的情况下, 悬浮电磁铁温度最高可以达到 90°C 甚至更高, 工作时会将热量传递到悬浮传感器, 导致悬浮传感器受高温影响输出误差增大, 悬浮性能下降, 甚至引起悬浮系统失稳。为了研究悬浮传感器受温度的影响程度, 以及如何采取应对措施削弱温度变化对传感器的影响, 特此进行以下研究。

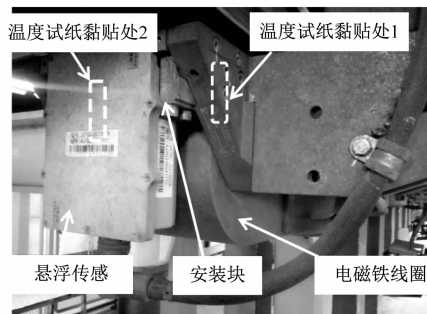


图1 悬浮传感器安装位置

2 悬浮传感器热稳定性研究

根据统计正线运营的各车各点悬浮电磁铁温度情况, 分别在3列磁悬浮列车上选择了温度最高的3个点, 在图1所示的位置黏贴了温度试纸, 记录了“安装块”附近电磁铁极板和悬浮传感器的最高温度, 具体如表1所示。

表 1 随车温度采集记录 ℃				
时间	位置	温度/℃		
		线圈	黏贴处 1	黏贴处 2
第 1 天	电磁铁 1	93	54	46
	电磁铁 2	<71	<40	<40
	电磁铁 3	<71	49	44
第 2 天	电磁铁 1	93	54	49
	电磁铁 2	<71	<40	<40
	电磁铁 3	<71	49	42
第 3 天	电磁铁 1	<71	<40	<40
	电磁铁 2	77	42	42
	电磁铁 3	<71	<40	<40
第 4 天	电磁铁 1	<71	54	49
	电磁铁 2	77	42	40
	电磁铁 3	<71	46	42
第 5 天	电磁铁 1	<71	54	49
	电磁铁 2	82	57	49
	电磁铁 3	<71	49	42
注:环境温度为 27~33℃				

根据表 1 所示的记录,电磁铁线圈最高温度 93℃,传感器最高温度 49℃,出现在节假日载客量大的情况。考虑到 A 级和 B 级温度试纸的灵敏度分别为 3℃和 6℃,电磁铁线圈实际最高温度应为 93~99℃之间,传感器实际最高温度应为 49~52℃之间。

根据测试悬浮传感器的表面最高温度达 52℃,为进一步研究温度漂移的线性关系,将悬浮传感器放入温控箱,调成 0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃、60℃分别在试验台进行测试。经过测试,0℃时误差基本保持在 0.05 mm 误差范围,60℃时误差增大到 0.4 mm。悬浮传感器温度每增加 10℃,测量间隙误差会随之增加 0.05~0.07 mm。虽然根据悬浮传感器测试标准,间隙误差小于 0.5 mm 为合格,但是由于在炎热的夏天正线轨道变形,平顺度下降,在多种外在因素的影响下,误差范围逐步放大,造成磁浮列车偶发出现砸轨。因此,控制悬浮传感器温升,成为解决磁悬浮列车稳定性的重要措施。表 2 为 0℃时悬浮传感器测量误差,表 3 为 60℃时悬浮传感器测量误差。根据测试多个传感器进行数据统计,间隙误差与温度变化的曲线如图 2 所示。当温度大于 60℃时,悬浮传感器的输出误差大于系统的允许范围。

表 2 悬浮传感器测量数据(0℃时) mm				
标准间隙	Gap1 间隙探头	Gap2 间隙探头	Gap3 间隙探头	
0.000	0.049	0.059	0.061	
1.000	1.043	1.053	1.055	
2.000	2.045	2.056	2.061	
3.000	3.047	3.047	3.056	
4.000	4.039	4.048	4.058	
5.000	5.039	5.049	5.053	
6.000	6.030	6.041	6.043	
7.000	7.040	7.041	7.046	
8.000	8.037	8.036	8.044	
9.000	9.034	9.042	9.046	
10.000	10.028	10.036	10.042	

表 3 悬浮传感器测量数据(60℃时) mm				
标准间隙	Gap1 间隙探头	Gap2 间隙探头	Gap3 间隙探头	
0.000	0.250	0.255	0.241	
1.000	0.807	0.814	0.887	
2.000	1.720	1.812	1.682	
3.000	2.612	2.611	2.782	
4.000	3.708	3.709	3.679	
5.000	4.705	4.711	4.778	
6.000	5.600	5.612	5.780	
7.000	6.689	6.707	6.775	
8.000	7.681	7.708	7.676	
9.000	8.772	8.808	8.775	
10.000	9.660	9.707	9.671	

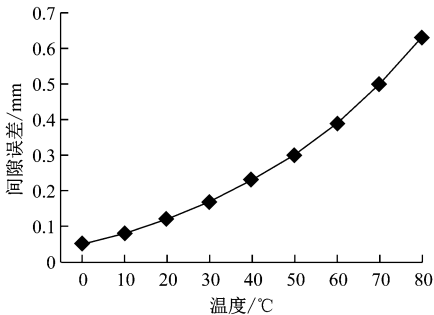


图 2 传感器测量间隙误差随温度变化曲线

3 悬浮传感器隔热效果分析

3.1 温升分析

根据传感器安装的位置,悬浮传感器的温度来自于电磁铁热传导或热辐射,而热辐射在条件有限的情况下无法避免。以下主要研究热传导对温度

传感器温升的影响,通过选用 3 种不同的“安装块”进行对比试验。

1) A 型安装块:即目前车辆上采用的铝制安装块(见图 3)。



图 3 A 型安装块

2) B 型安装块:在 A 型安装块的基础上,表面喷涂厚度为 0.1~0.2 mm 的隔热涂层(见图 4)。



图 4 B 型安装块图

3) C 型安装块:采用隔热材料(FX-502 酚醛玻璃纤维模塑料)制成的安装块并配置了防压溃垫片(见图 5)。

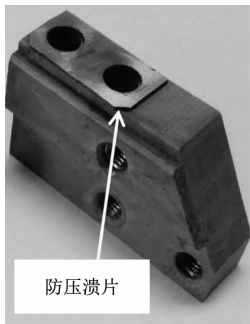


图 5 C 型安装块

3.2 温度测试点

为了保证测量准确性,共选择 7 个测试点进行测量,其中测试点 1 为电磁铁极板温度,其他测试点如图 6 所示。

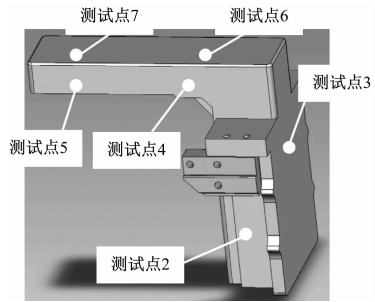


图 6 温度测试点

3.3 室内试验验证

将悬浮电磁铁两端各安装 1 个悬浮传感器,电磁铁 4 个线圈串联,通入 35 A 电流,不通风,模拟列车正线静浮。当悬浮电磁铁达到热稳态温度后,测量数据并记录。

试验分 3 次进行对比测试,分别为“A 型安装块”与“B 型安装块”测试,“A 型安装块”与“C 型安装块”测试,“A 型安装块”与悬浮传感器安装支架测试,确保传感器与电磁铁不直接接触,处于“悬空”状态,但与采用“安装块”安装的位置相同。

3.4 测试数据及分析

当悬浮电磁铁达到热稳态温度后,采用红外成像仪测试线圈表面的最高温度,并采用点温枪测试各测试点的平均温度,试验数据如表 4 所示。

表 4 安装块隔热试验数据(环温 29℃)					℃
试验次数	安装块类型	线圈表面最高温度	测试点 1 温度	测试点 2~7 平均温度	温度差
第 1 次	A	130.2	85.3	53.4	1.4
	B	130.1	86.3	52.0	
第 2 次	A	128.1	78.4	50.9	5.9
	C	128.6	82.2	45.0	
第 3 次	A	129.2	78.8	51.1	5.7
	悬空	129.6	86.0	45.4	

从隔热效果看,C 型安装块最好,B 型安装块次之,A 型安装块最差,但 B 型与 A 型最大只差 1.4℃,C 型与 A 型最大差 5.9℃。

4 结论

中低速磁浮列车悬浮传感器是针对悬浮系统
(下转第 88 页)

- 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)