doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.03.008

中低速磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法及实现

汤 彪，张 姣，佟来生，张文跃，陈启发

（中车株洲电力机车有限公司 磁浮系统研究所，湖南 株洲 412001）

摘 要：悬浮传感器间隙信号的正确处理是实现磁浮列车稳定悬浮控制的重要基础，若磁浮列车在过轨缝时的间隙信号处理不当会带来阶跃干扰，易使悬浮控制出现过度调节，影响悬浮系统的稳定性，甚至导致磁浮列车发生振动或砸轨。现实中磁浮列车也确实易在过轨缝时发生振动或砸轨现象，因此，为解决这一实际问题，结合实验线和某磁浮运行线磁浮列车过轨缝的间隙信号数据特点，提出一种新的磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法。该算法通过提取磁浮列车过轨缝时的实验和运行数据的间隙信号特点，区分开理想轨缝和轨道台阶，并设计了一种间隙补偿方法。仿真结果表明，所提算法可有效处理轨道台阶带来的信号干扰，提升悬浮控制系统的稳定性。

关键词：磁浮列车；悬浮控制系统；轨缝；间隙补偿

中图分类号：U213.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1673-9833(2020)03-0056-06

引文格式：汤 彪，张 姣，佟来生，等 . 中低速磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法及实现 [J]. 湖南工业大学学报，2020，34(3)：56-61.

Algorithm and Implementation of Signal Processing for Medium-Low Speed Maglev Train Crossing Rail Gaps

TANG Biao，ZHANG Jiao，TONG Laisheng，ZHANG Wenyue，CHEN Qifa

（Maglev System Institute，CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd.，Zhuzhou Hunan 412001，China）

Abstract：The correct processing of gap signal of levitation sensor is an important basis to realize the stable levitation control of maglev trains. A signal interference will be led to by an improper processing of clearance signal with maglev trains passing through rail cracks, which is liable to cause excessive adjustment of suspension control, affect the stability of suspension system, and even lead to vibration or rail smashing of maglev trains. With a view to solving the problem that maglev trains are prone to vibrate or smash the rail when passing through rail gaps, a new algorithm has been proposed for processing the gap signal of the maglev train passing through rail gaps based on the characteristics of the gap signal data of the maglev train passing through rail gaps of the experimental lines and a certain maglev operation lines. By extracting the gap signal characteristics of the experiment and operation data when the maglev train passes through the rail gap, the algorithm distinguishes the ideal rail gap and the rail step, with a gap compensation method further designed. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively deal with the signal interference caused by the track steps, thus improving the stability of the suspension control system.

Keywords：maglev train；levitation control system；rail gap；clearance compensation

收稿日期：2019-08-30

基金项目：湖南省科技厅磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室建设基金资助项目（2018TP1035）

作者简介：汤 彪（1991-），男，湖南株洲人，中车株洲电力机车有限公司助理工程师，硕士，主要研究方向为磁浮列车悬浮控制技术，E-mail：1372424410@qq.com

1　研究背景

近年来，交通拥堵已成为影响人们日常生活和制约社会经济发展的一个重要问题，为此很多城市均大力发展轻轨、地铁等公共轨道交通系统，但不同的轨道交通制式都存在一定的局限性和适用范围 [1]。

磁浮列车是一种具有造价相对较低、使用寿命较长、爬坡能力较强等诸多优势的新型轨道交通产品，其相对于其他轨道交通产品的最大特点是：磁浮列车是在 F 型轨道上悬浮运行，铁轨与车辆不接触，故磁浮列车可以解决轮轨黏着力的限制和摩擦力的损耗问题。因此，相对于传统的轨道交通制式，磁浮列车的上述特点使得它成为轨道交通领域的重要补充和新兴力量 [2]。

磁浮列车实现稳定悬浮的关键是对悬浮传感器采集间隙信号的正确处理。磁浮列车经过轨缝时，悬浮传感器的 3 个间隙检测探头的输出信号会不一致，而且由于轨道安装误差、路基沉降、紧固件松动等原因 [3]，导致轨缝两侧的轨道高度不一致，即出现轨道台阶。因此，磁浮列车在经过轨缝时的间隙信号处理不当会带来阶跃干扰等影响，易使悬浮控制出现过度调节，影响悬浮系统的稳定性，甚至导致磁浮列车发生振动或砸轨等现象，影响磁浮列车的商业化进程。

到目前为止，磁浮领域的学者对磁浮列车发生振动或砸轨的具体成因尚未达成共识，解决方法也尚在实验摸索阶段，其研究主要包括优化轨道参数和优化悬浮控制技术两个方面。理论和实践均证明，优化轨道参数可以提高磁浮列车的悬浮系统稳定性，但并不能完全杜绝磁浮列车发生振动或砸轨现象的发生，且极大地增加了磁浮交通系统的系统造价和维护难度。此外，解决磁浮列车发生振动或砸轨的方法就是优化悬浮控制技术。T. E. Alberts 等 [4] 分析了磁浮列车 – 桥梁耦合系统的特征根，指出差分型 PD 控制器可以保证耦合系统的稳定性，降低磁浮列车发生振动或砸轨现象出现的概率，李云钢等 [5] 也得到了类似的结论。但是磁浮列车上的悬浮传感器所处的电磁环境十分复杂，干扰信号强烈，传输过程中还会引入噪声信号，且间隙信号的微分信号会进一步放大噪声。虽然 Wang H. 等 [6] 设计了一种状态观测器，将反应轨道振动状态变量引入控制系统，可以在一定程度上抑制自激振动，但其对于磁浮列车经过轨道台阶时偶发的振动和砸轨现象没有明显的改善效果。

基于已有研究现状，本文立足于理论研究和工程实践经验，结合现有长沙磁浮工程车上运用的悬浮传感器型号及其数据特点，通过系统分析磁浮列车在经过不同工况的轨道缝隙时的间隙信号特点，区分开理想轨缝和轨道台阶，提出在不同工况下的间隙信号处理算法，并结合仿真结果，分析间隙信号处理算法的效果，并利用可编程逻辑器件实现磁浮列车过轨缝时的间隙信号处理算法，以提高磁浮列车的悬浮系统稳定性，从而提升磁浮列车在轨道交通市场的竞争力。

2　磁浮列车过轨缝的间隙信号特点

2.1　悬浮传感器过轨缝情况概述

悬浮传感器过轨缝示意图如图 1 所示。悬浮传感器位于 F 型轨道内侧，间隙检测探头与 F 型轨道平行并保持一定的可变间距，此间距用于表征磁浮列车的悬浮高度。由于道岔和轨道材料特性等因素的影响，轨道之间会出现不同个数、不同缝宽的轨缝，甚至有些轨缝会形成一定高度错位的轨道台阶 [3]，悬浮传感器的 3 个间隙检测探头随着磁浮列车的运行经过不同工况的轨缝时，会输出对应的电平信号，该电平信号经悬浮控制器解码后转换成对应的具体间隙数值，该数值用于表征悬浮传感器与 F 型轨道的间距，即磁浮列车的悬浮高度。

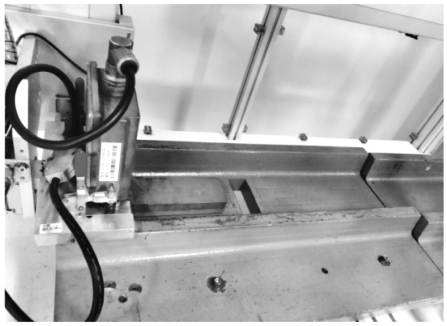

图 1　悬浮传感器过轨缝示意图

Fig. 1　Schematic diagram of suspension sensor passing through rail joints

2.2　悬浮传感器过轨缝的间隙信号特点

悬浮传感器过轨缝简化结构示意图见图 2。轨缝的两个轨道平面之间存在一定的缝差和高差。缝差是指两段 F 型轨道在轨道延伸方向的横向距离差值，它是考虑到轨道制造材料的热胀冷缩特性等因素必须设计的差值，即轨缝的缝差是工程设计中必须存在的。高差即轨道台阶，是指两段 F 型轨道相对地面的垂向距离差值，其是路基沉降等不可抗外力因素带来的偏差，且是工程实施要规避的差值 [7]。

当高差为 0 mm 时，轨缝即理想轨道缝隙。当缝差为 35 mm、高差为 0 mm 时，悬浮传感器经过理想轨缝时的间隙信号特点如图 3 所示。由图可知，悬浮传感器的 3 路间隙值在过轨缝时会依次出现间隙值

的波动变化，其变化趋势是先变大再变小，最后回归最初间隙值，即悬浮传感器经过理想轨道缝隙时，间隙数值会有波动，但经过理想轨缝最初和最后的间隙信号数值是相等的。

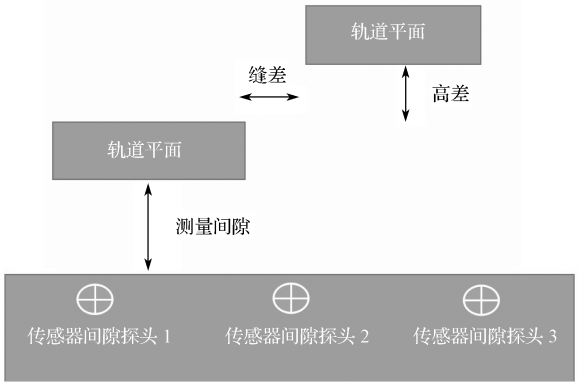

图 2 传感器过轨缝简化结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simplified sensor structure through rail joints

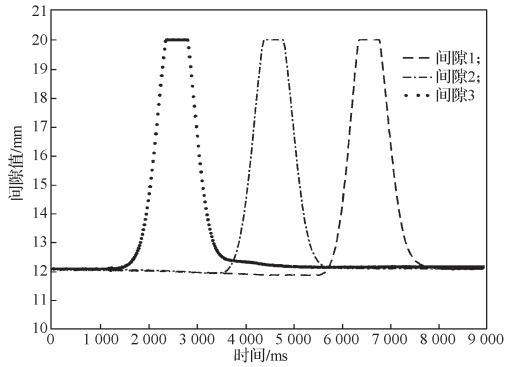

图 3 理想轨缝的间隙信号图

Fig. 3 Signal diagram of ideal rail gaps

当高差不为零时，即轨缝处形成了轨道台阶。当缝差为 35 mm、高差为 2 mm 时，悬浮传感器经过轨道台阶时的间隙信号特点如图 4 所示。

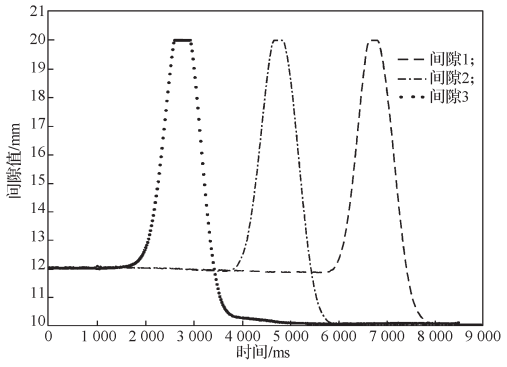

图 4 高差为 2 mm 的轨道台阶间隙信号图

Fig. 4 Signal diagram of track step clearance with a height difference of 2 mm

由图 4 可见，悬浮传感器的 3 路间隙值在过轨缝时依次出现间隙值的波动变化，其变化趋势是先变大再变小，但最后没有回归最初间隙值，即悬浮传感器经过轨道台阶前后的间隙信号数值存在一个差值，此间隙差值体现为轨缝的高差，即轨道台阶的高度。

必需提出的是，悬浮传感器在经过轨缝时的间隙信号数值的具体图像变换与轨缝的缝差值大小、高差值大小以及磁浮列车经过轨缝时的运行速度等都有一定的关系，但变化趋势是类似的 [4]，并不影响磁浮列车经过轨缝的间隙信号特点的提取与分析，所以本文选取上述代表性图像进行描述，对其他类似的具体图像不作展示和阐述。

3 间隙信号处理算法及其可编程逻辑器件的实现

3.1 磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法

对于磁浮列车经过轨缝高差为 0 mm 的理想轨缝时的间隙信号算法处理，可以采用小值平均的间隙信号处理算法，该算法的核心思想是通过提取悬浮传感器在经过理想轨缝时的间隙信号特点，发现 3 路间隙数值虽然在经过轨缝时都有较大的波动，但各自波动范围几乎没有交集，即 3 路间隙数值中的某 1 路发生波动时，另外 2 路间隙信号是没有波动的，且没有波动的 2 路信号数值相对于波动的那 1 路信号的间隙数值偏小，且该偏小的间隙数值能正常表征悬浮传感器与轨道的实际间隙值。综上，让等效间隙信号选取 3 路间隙信号中数值较小的两路间隙信号的平均值作为间隙输出值，可以消除悬浮传感器在经过轨缝时的间隙信号数值剧烈波动的影响，还可以通过平均运算减少间隙探头的测量误差。

此方法的实用性在实验线路和运行线路中都得到了验证。在实验线路上进行悬浮传感器过轨缝实验，设定缝差为 35 mm，高差为 0 mm，得到的间隙信号数据结果如图 5 所示。

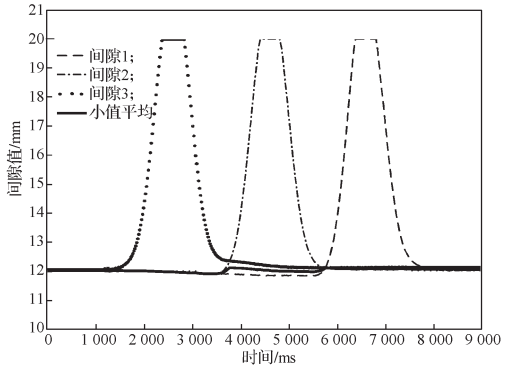

图 5 实验线路的间隙信号图

Fig. 5 Gap signal diagram of experimental circuits

由图 5 可知，等效信号巧妙地规避了信号检测探头过轨缝时间隙数值的剧烈变化，且等效间隙信号可以更准确地表征磁浮列车的实际悬浮状况。

在实际运行线路上进行悬浮传感器过轨缝实验，得到的运行线不砸轨间隙信号数据结果如图 6 所示。

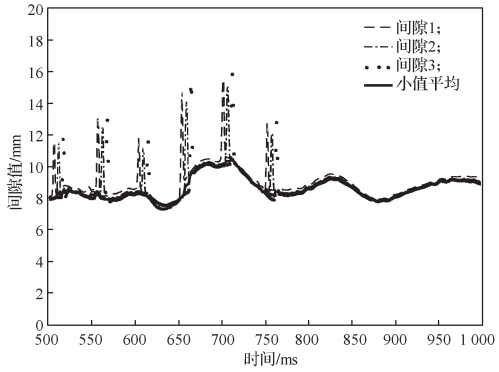

图 6　实际运行线路的间隙信号图

Fig. 6　Gap signal diagram of the actual operating line

由图 6 可以得知，实际运行间隙信号与实验室间隙信号不太相同，主要在于实际运行间隙信号不经过轨缝时，其间隙信号数值也会发生一定的上下波动，但是波动数值范围远小于过轨缝时的间隙波动数值范围，小值平均间隙处理算法同样适用于实际运行线路的大部分路段。实践证明，采取此间隙处理算法的磁浮列车可以顺利通过高差为 0 mm 或高差可忽略不计的理想轨缝。

对于轨缝的高差不为 0 mm 且高差较大（大于 1 mm）的间隙信号，当取缝差为 35 mm，高差为 2 mm，并采用小值平均间隙信号处理算法时，得到的轨道台阶间隙信号如图 7 所示。

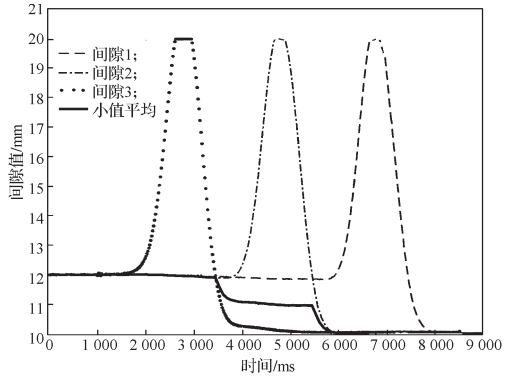

图 7　小值平均算法处理的轨道台阶间隙信号图

Fig. 7　Signal diagram of track step clearance processed by small-value average algorithm

由图 7 可知，经过小值平均间隙信号处理算法处理后的等效间隙会出现阶跃信号，由于间隙信号的微分信号也是悬浮控制的一个重要控制参数，即阶跃信号的微分信号是脉冲冲击信号。显然，“高差”值越大，阶跃信号和脉冲信号越大，悬浮控制系统本身不是一个自稳定系统，阶跃信号和脉冲信号传递到悬浮控制反馈控制中，会导致比例项、微分项和控制电压等一系列控制参数发生突变，进而会导致悬浮控制系统失稳（运行线的砸轨间隙信号如图 8 所示），最终发生振动或砸轨现象 [8]。

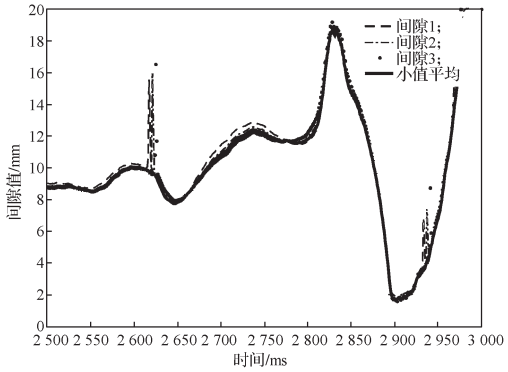

图 8　冲击信号引发的砸轨间隙信号图

Fig. 8　Gap signal diagram of rail impact caused by impact signal

需要提出的是，轨道台阶带来的冲击信号不是悬浮系统失稳的充分条件，即磁浮列车过轨道台阶时间隙信号处理不当带来的阶跃和脉冲信号的存在并不一定会引起磁浮列车发生振动或者砸轨现象，因为悬浮控制参数较多且控制权重不一样，间隙信号和间隙微分信号只是悬浮控制参数之一，且间隙信号和间隙微分信号在参与悬浮控制调节前还会经过一系列滤波等操作，但实际运行经验却显示磁浮列车多在过轨道台阶位置处发生振动和砸轨现象，所以可以推断磁浮列车过轨缝时的间隙信号的处理对于悬浮控制具有至关重要的作用。

针对磁浮列车过轨缝间隙信号处理问题，业界已有部分研究，且提出来一些解决方案，如国防科技大学的翟毅涛等 [9] 提出如下改进算法：先识别轨道台阶，再利用分段函数进行间隙补偿。理论上该算法是可行的，但是因涉及二次函数分段实现和大量数据储存，工程实践比较复杂，在可编程逻辑器件平台上资源受限的情况下更是难以实现。

本文结合实验线和长沙磁浮运行线的磁浮列车过轨缝的间隙信号数据特点，并考虑实际工程情况，提出一种新的磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法，设计的算法流程如图 9 所示。即先依据第一个间隙探头的数据变化规律进行过轨缝识别，当识别到第一个间隙探头过轨缝结束时，对第二个间隙输出信号进行比例性补偿；同理，再依据第二个间隙探头的数据变化规律进行过轨缝识别，在其过轨缝结束时对第三个间隙输出信号进行比例性补偿；最后，输出 3 个等效间隙的小值平均，并将其作为最终的等效间隙值。

这种间隙信号处理算法将比例间隙补偿和小值平均相结合，使得磁浮列车在通过轨缝时的间隙信号平缓过渡，无突变信号，且该算法便于在可编程逻辑器件上进行软件编程与实现。

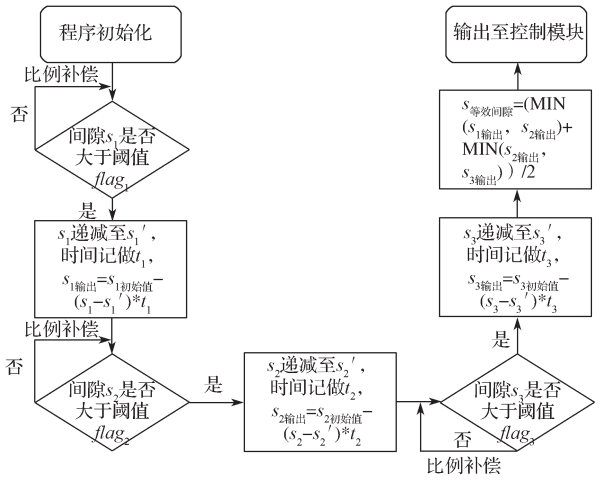

图 9 过轨道台阶的间隙信号处理算法流程图

Fig. 9 Flow chart of gap signal processing algorithm for track steps

3.2 间隙信号处理算法的可编程逻辑器件实现

结合磁浮列车过轨缝的间隙信号特点和上文提到的各种仿真结果，利用 verilog 编程语言 [10]，在 ISE 软件开发平台上，设计了一个如图 10 所示的含 4 个子模块的 gapSynth 模块。

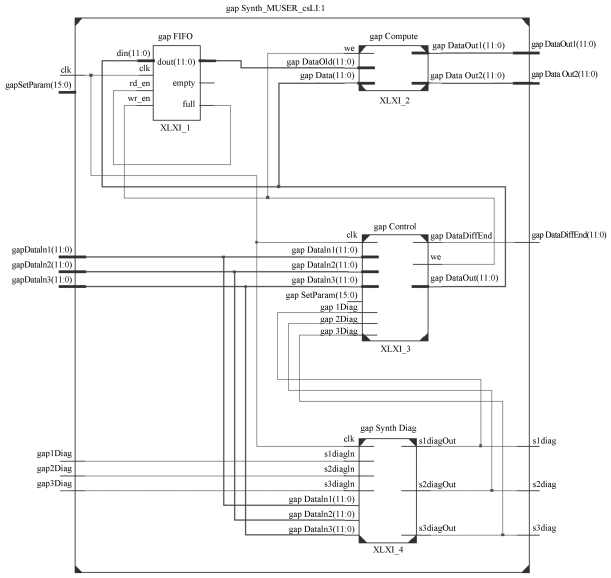

图 10 可编程逻辑器件实现算法模块

Fig. 10 Algorithm module of programmable logic devices

图 10 中，gapSynthDiag 子模块用于磁浮列车的悬浮传感器的间隙探头过轨缝的识别，gapControl 子模块用于阀值判别，gapCompute 子模块用于间隙值计算，gapFIFO 子模块用于数据缓冲。整个模块通过信号连接，用于实现磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法，并且通过了仿真平台的验证 [11]。设定缝差为 35 mm，高差为 2.0 mm，得到的间隙补偿算法的仿真结果如图 11 所示。

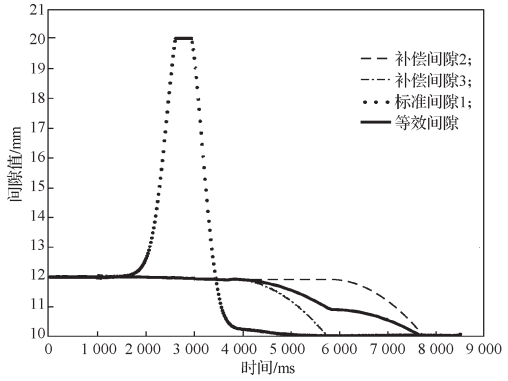

图 11 磁浮列车过轨缝的间隙补偿算法仿真结果

Fig. 11 Simulation results of clearance compensation algorithm for maglev trains passing through rail joints

由图 11 可知，标定间隙 1 用于进行轨缝识别，识别完成后依次对间隙 2 和间隙 3 进行间隙补偿，得到补偿间隙 2 和补偿间隙 3，最后利用平均运算得到的等效间隙用于等效间隙信号输出。对比图 11 和图 7 可知，图 11 的等效间隙没有发生突变，过渡平滑，不会产生阶跃信号，该等效间隙信号经过后续微分处理后也不会产生脉冲冲击信号。

算法处理前后的间隙信号对比如图 12 所示。

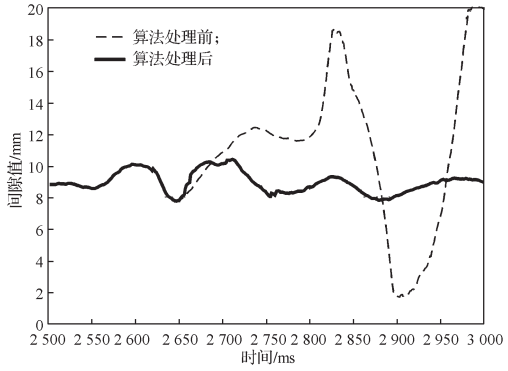

图 12 算法处理前后的间隙信号对比图

Fig. 12 Gap signal comparison before and after algorithm processing

如图 12 所示，算法处理前，磁浮列车在经过轨道台阶时，间隙信号的数值会发生剧烈波动，即发生砸轨现象；经算法处理后，磁浮列车在经过轨道台阶时，间隙信号波动数值明显变小，且在正常运行的间隙波动范围内，可见该算法是可行的。

综上可知，利用所提出的补偿算法处理磁浮列车过轨缝时的间隙信号，可以避免轨道台阶带来的阶跃信号和脉冲信号影响，消除悬浮控制参数的突变，从而避免发生磁浮列车过轨道台阶时的砸轨现象，提

高悬浮控制系统的稳定性。

4　结语

悬浮控制系统是一个复杂的反馈控制系统，而作为悬浮控制参数的间隙信号及间隙信号的微分信号对于悬浮控制系统十分重要。本文系统地分析了磁浮列车过轨缝时的间隙信号特点，并结合实验线运行数据和运营线运行数据的间隙信号特点，对理想轨缝和轨道台阶进行了区分，设计了一种间隙补偿方法，有效地排除了轨道台阶带来的阶跃和脉冲等冲击信号的干扰，消除了悬浮控制参数的突变。最后，利用可编程逻辑器件实现了此算法。仿真结果表明，所提方法可极大提升悬浮控制系统的稳定性，推进磁浮列车的商业化进程。但该算法不可避免地会带来一定的延时和误差，影响悬浮控制系统的实时控制效果，且该算法只针对磁浮列车过轨道台阶时的间隙信号进行了优化处理，并不能杜绝其他干扰信号对悬浮控制系统的影响，存在一定的局限性，这将是下一步的研究方向。

参考文献：

[1] 王欢芳，钟志敏．“两型”视角下长株潭公共交通建设问题研究 [J]. 湖南工业大学学报，2014，19(1)：8−11.
WANG Huanfang，ZHONG Zhimin. Research on Public Transportation Problem of Changzhutan Urban Agglomeration Based on “Two-Oriented” Society Perspectives[J]. Journal of Hunan University of Technology，2014，19(1)：8−11.

[2] 曾颖丰 . 基于控制器局域网的悬浮控制器调试监测系统 [J]. 湖南工业大学学报，2018，32(4)：55−56.
ZENG Yingfeng. Magnetic Levitation Controller Debugging and Monitoring System Based on Controller Area Network[J]. Journal of Hunan University of Technology，2018，32(4)：55−56.

[3] 王志强 . 永磁电磁混合型中低速磁浮列车悬浮系统信号处理技术研究 [D]. 长沙：国防科学技术大学，2014.
WANG Zhiqiang. Research on Signal Processing Technique for Suspension System of Mid-Low Speed PEMS Maglev Train[D]. Changsha：National University of Defense Technology，2014.

[4] ALBERTS T E，OLESZCZUK G. On the Influence of Structural Flexibility on Feedback Control System Stability for EMS Maglev Vehicles[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2006：2−5.

[5] 李云钢，常文森，龙志强 . EMS 磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计 [J]. 国防科技大学学报，1999，21(2)：93−96.
LI Yungang，CHANG Wensen，LONG Zhiqiang. Guideway Resonance Vibration and Levitation Control System Design of an EMS Maglev Vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology，1999，21(2)：93−96.

[6] WANG H，ZHONG X B，SHEN G. Analysis and Experimental Study on the MAGLEV Vehicle-Guideway Interaction Based on the Full-State Feedback Theory[J]. Journal of Vibration and Control，2015，21(2)：408−416.

[7] 刘　伟，苏燕辰，凌世波，等 . 磁浮轨道长波不平顺信号的分析与提取 [J]. 中国测试，2009，35(5)：105−107.
LIU Wei，SU Yanchen，LING Shibo，et al. Analysis and Extraction of Long-Wave Irregularity Signal of Maglev Railway[J]. China Measurement & Test，2009，35(5)：105−107.

[8] 王　辉，钟晓波，沈　钢 . 一种新型磁悬浮线路设计方案及悬浮控制方法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版)，2013，41(7)：1112−1118.
WANG Hui，ZHONG Xiaobo，SHEN Gang. A New Maglev Line System Design and Control Strategy[J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2013，41(7)：1112−1118.

[9] 翟毅涛，吴　峻 . 抑制轨道台阶干扰的磁浮传感器间隙补偿算法 [J]. 铁道学报，2016，38(7)：77−83.
ZHAI Yitao，WU Jun. Algorithm for Gap Compensating Signal of Maglev Levitation Sensor to Suppress Disturbance from Guide Way Step[J]. Journal of the China Railway Society，2016，38(7)：77−83.

[10] 夏宇闻 . Verilog 数字系统设计教程 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2010：5−60.
XIA Yuwen. Verilog Digital System Design Course [J]. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2010：5−60.

[11] 侯佰康 . 高速磁浮列车悬浮间隙测量模块的可编程逻辑器件实现 [D]. 成都：西南交通大学，2006.
HOU Baikang. Implemention of Gap Determination Module for High-Speed Maglev Vehicle Based on FPGA[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2006.

（责任编辑：廖友媛）