

高速磁浮车辆悬浮间隙传感器与相对定位传感器对比分析*

晁 闯¹ 吴 峻¹ 洪小波¹ 郑瑶佳²

(1. 国防科技大学智能科学学院, 410073, 长沙;

2. 北京轨道交通技术装备集团有限公司, 100028, 北京//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 高速磁浮车辆悬浮间隙传感器为悬浮控制系统提供必要的间隙信息。相对定位传感器则分别为高速磁浮车辆牵引和运行控制提供同步直线电机次级极相角信息和速度信息。在分析两者应用差异的基础上,讨论了检测线圈结构设计、电路结构设计、动态特性、抗电磁干扰与抗温度漂移等共性技术。对悬浮间隙传感器而言,需弱化齿槽效应;对相对定位传感器而言,则需强化齿槽效应,以抑制悬浮间隙波动和减少传感器过接缝时的信号畸变程度。

关键词 高速磁浮车辆; 悬浮间隙传感器; 相对定位传感器; 齿槽效应

中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.029

Comparison between Levitation Gap Sensor and Relative Position Sensor of High-speed Maglev Train

CHAO Chuang, WU Jun, HONG Xiaobo, ZHENG Yaojia

Abstract The levitation gap sensor of high-speed maglev train provides necessary gap information for the levitation control system. While the relative position sensor provides secondary phase angle and velocity information for the traction and operation control of high-speed maglev train respectively. Based on an analysis of their application differences, the common technologies like detection coil design, circuit structure design, dynamic characteristics, anti-electromagnetic interference and anti-temperature drift are discussed. For the levitation gap sensor, the cogging effect should be weakened, while for the relative position sensor, it is necessary to strengthen the cogging effect, in order to suppress the fluctuation of levitation gap and reduce the degree of signal distortion when the sensor passes through the joint.

Key words high-speed maglev train; levitation gap sensor; relative position sensor; cogging effect

First-author's address College of Intelligence Science and

Technology, National University of Defense Technology, 410073, Changsha, China

我国磁浮交通技术研究起步较晚,加上德国严密封锁技术,在高速磁浮车辆国产化过程中遇到了许多困难,这些困难主要体现在核心技术的突破上。本文针对高速磁浮车辆悬浮控制与同步牵引两种核心技术,对比分析了分别在悬浮控制技术和牵引控制技术上发挥重要作用的电感型传感器——悬浮间隙传感器与相对定位传感器,讨论了两者的共性技术及各自的关键技术,并给出了两者未来研究的侧重方向。

1 两种传感器的应用差异

高速磁浮车辆与轨道无接触运行,它通过电磁力实现悬浮与导向。悬浮控制系统控制车体和轨道之间的垂向间隙大小。为实现列车稳定悬浮,悬浮间隙传感器(见图1)必须随时为悬浮控制系统提供可靠、稳定的间隙信息。因此,悬浮间隙传感器的研制是悬浮控制系统研究的核心任务之一。



图1 悬浮间隙传感器

Fig.1 Levitation gap sensor

同样,高速磁浮车辆采用直线同步电机牵引技术,轨道可以看作直线电机的定子,车体可以看作动子。为实现有效稳定的直线牵引控制,必须检测出动子的准确相位。相对定位传感器见图2。在车

* 十三五国家重点研发计划(2016YBF1200602-40)

辆测速定位系统中,相对定位传感器需要为牵引控制提供足够精度的次级极相角信息,为运行控制系统提供准确的速度信息。因此,在牵引控制系统和运行控制系统研究中,相对定位传感器的研制也是核心任务之一。

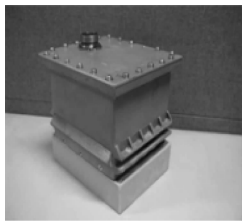


图 2 相对定位传感器
Fig. 2 Relative positioning sensor

2 两种传感器的共性技术

尽管两者功能不同,但都是针对长定子齿槽面的非接触式测量,只是两者分别利用不同的信号处理方法提取出不同的信号。两种传感器的设计研究中存在不少共性技术,包括检测线圈结构设计、电路结构设计、抗电磁干扰和抗温度漂移等技术。

2.1 检测线圈结构设计

两种传感器均属于电感式传感器,且均通过检

测线圈与长定子齿槽面间的电磁感应来进行测量(见图 3),而齿槽结构会影响检测线圈处的等效电感大小。因此,两者检测线圈的设计需要考虑齿槽结构的影响。但在检测线圈结构设计过程中,两者的侧重点有所不同。对于悬浮间隙传感器而言,在弱化齿槽效应的同时需保证其检测的灵敏度;对于相对定位传感器而言,检测线圈必须对齿槽结构敏感^[1-2]。

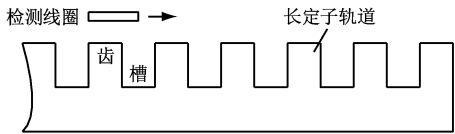
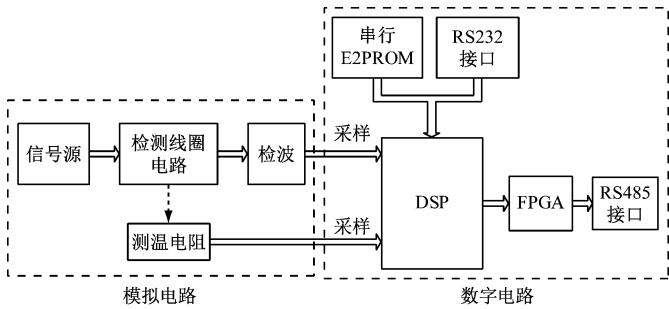


图 3 传感器检测线圈与长定子的关系
Fig. 3 Relationship between sensor detection coil and long stator

2.2 电路结构设计

电感式传感器的基本结构形式包括调频式、调频调幅式和恒频调幅式。考虑到两种传感器工作环境较恶劣,且对稳定性、灵敏度和线性范围要求较高,选用恒频调幅式电路较为理想。两种传感器的电路结构如图 4~5 所示。两种传感器的电路结构基本相似,它们具有以下共同特点:



注: DSP 为数字信号处理器; FPGA 为可编程逻辑门阵列。

图 4 悬浮间隙传感器的电路结构

Fig. 4 Circuit structure of levitation gap sensor

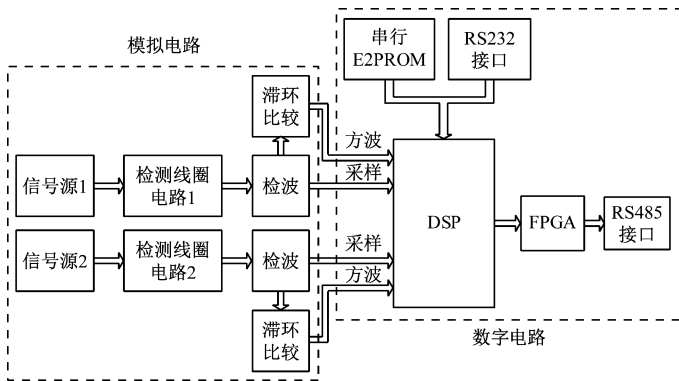


图 5 相对定位传感器的电路结构

Fig. 5 Circuit structure of relative positioning sensor

1) 信号处理均在 DSP 以及现场 FPGA 的算法程序中完成,且可以在 1 个通用平台上实现多种处理方法;

2) 标定数据的获取、处理,以及补偿参数的输入均在 1 个程序中完成,无需人工干预;

3) 均可与上位机进行实时通信,并通过上位机发送命令对传感器各部分功能进行检测和诊断。

2.3 抗电磁干扰

悬浮间隙空间中存在牵引行波磁场干扰、悬浮磁场干扰,以及传感器本身检测线圈之间的互干扰等多种干扰。这些干扰极易经检测线圈耦合进入传感器电路中,影响检测精度。因此,必须采取有效措施提升传感器抗电磁干扰的能力^[3-4]。

2.4 动态性能研究

悬浮间隙传感器的动态特性关系到悬浮控制系统的动态跟踪能力。在高速条件下,间隙传感器能否实时跟踪轨道关系到行车安全。因此,应对间隙传感器的动态性能进行考察评估,以明确它是否会影响列车在高速运行条件下的安全性。此外,当列车运行速度超过 100 km/h 时,直线同步电机采用反电势法来确定磁极位置,而此时相对定位传感器未参与到牵引控制中,但其信号仍可作为参考。因此,亦须在车辆的全速度范围内考察评估相对位置传感器的动态特性。

2.5 抗温度漂移

高速磁浮列车长时间工作后,电磁铁表面温度可以达到 85 ~ 120 °C。而悬浮间隙传感器安装在悬浮电磁铁磁极之间,相对定位传感器安装在头车悬浮电磁铁端部,它们受电磁铁温升的影响明显。因此,需要提高传感器的抗温度漂移能力以抑制温度漂移,进而提高信号输出的稳定性。

3 两种传感器各自的关键技术

3.1 悬浮间隙传感器的关键技术

在悬浮气隙波动的同时,齿槽效应使得传感器输出含有周期性的扰动信号,如图 6 所示。悬浮控制系统无法区分该扰动是齿槽效应引起的,还是正常调整悬浮气隙时引发的,这极易导致该系统发生振荡。因此,悬浮间隙传感器研制的一个重点就是要弱化齿槽效应。由于传感器需要兼顾对齿槽形状不敏感而对其间隙变化敏感,因此采用信号处理的方法很难达到理想效果,须通过优化检测线圈结构的手段来解决。目前,较为有效的方法是将矩形

线圈结构改造为立体线圈结构^[5]。如图 7 所示,AD 为 1 个齿槽的长度,AA₀ 与 DD₀ 折起时抑制边端磁场变化,AD 与 A₀D₀ 中间折起时抑制中部磁场过强,进而使得检测线圈通过齿槽时,磁感应强度值在齿槽宽度方向基本保持恒定。由此可见,通过优化线圈结构,齿槽效应的抑制可取得良好效果。

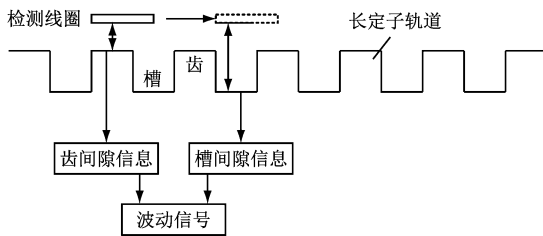


图 6 悬浮间隙传感器测量示意图

Fig. 6 Measurement schematic of levitation gap sensor

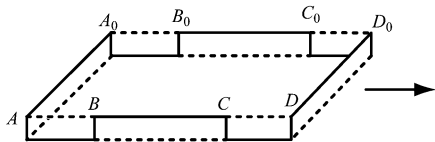


图 7 立体线圈结构图

Fig. 7 Structure diagram of three dimensional coil

对悬浮间隙传感器而言,通过优化线圈结构及抗温度漂移等技术,其测量精度可达到 0.4 mm;当悬浮间隙传感器在 20 ~ 85 °C 时,其全量程温度漂移可控制在 1% 左右^[6]。

3.2 相对定位传感器的关键技术

3.2.1 强化齿槽效应

由于齿槽效应的影响,相对定位传感器输出的波动信号带有齿槽数目信息,通过齿槽计数法可获得列车相对位置,如图 8 所示。因此,相对定位传感器必须对齿槽效应敏感。目前,针对该问题较好的解决手段是优化线圈结构。本文介绍一种如图 9 所示的“8”字型线圈结构^[7];设线圈宽度 W 为 1 个齿槽宽度;传感器在使用时通常设置 2 组差分线圈,每组由 2 个“8”字线圈组成。通过这种“8”字结构与

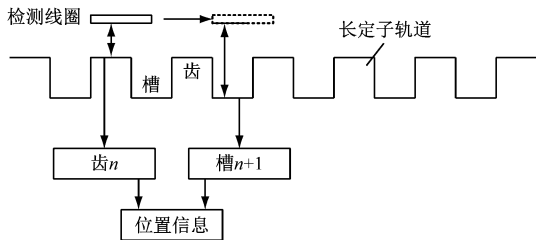
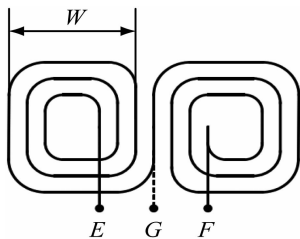


图 8 相对定位传感器测量示意图

Fig. 8 Measurement schematic of relative positioning sensor



注: E、F、G 为感应电压输出端。

图9 “8”字型线圈示意图

Fig.9 Schematic of 8-shaped coil

差分结构的综合使用,可极大地提高检测线圈的灵敏度,进而更好地实现快速定位等功能。

3.2.2 车辆悬浮波动处理

相对定位传感器的检测是在悬浮间隙恒定的前提下进行,但车辆运行时悬浮间隙总会存在一定幅度的波动。因而,必须消除悬浮波动的影响。针对该问题,目前较为可行的是间隙量纲一化法,即:将不同间隙下的位置信息量纲一化至某一标准间隙下,建立该标准间隙下的位置表格,相对定位传感器在运行过程中监测悬浮间隙并利用查表法获取当前位置信息。

3.2.3 通过轨道接缝处理

高速磁浮轨道相邻轨道梁间存在着较大的接缝。当相对定位传感器经过接缝时,其检测信号会产生畸变。如果不采取措施,畸变信号将导致牵引设备过流或过压,甚至烧毁。针对该问题,目前定位测速系统在 PRW(磁极相角处理单元)中采用的是自适应滤波及传感器冗余配置的方法,更简易、高效的处理方法尚待提出。

针对相对定位传感器而言,重点是要保证其定位的精度。目前,通过感应齿槽来获取相对定位传感器的位置可达到 4 mm 的位置测量精度^[7]。

4 结语

现阶段悬浮间隙传感器和相对定位传感器技术已达到国产高速磁浮车辆的应用要求,未来研究应侧重于如下问题:

- 1) 传感器的互换性问题。每辆车上布置 128 只间隙传感器,以提升传感器的互换性。
- 2) 多线圈结构之间的磁场耦合问题。检测探头中布置的多个线圈存在磁场耦合,须解决线圈耦合问题以改进传感器的性能。
- 3) 简化算法和硬件结构,以降低成本。特别是

在设计相对定位传感器时,还需提出更有效的方法来解决周期预测法在静止及低速运行时检测误差较大的问题。

参考文献

- [1] 黄书童. 高速磁浮列车悬浮间隙传感器齿槽效应的研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
HUANG Shutong. Study of the groove effect of the sensor for high-speed maglev train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2008.
- [2] 戴春辉, 薛松, 龙志强. 基于长定子齿槽的磁浮列车测速定位传感器信号处理[J]. 传感技术学报, 2009(6):822.
DAI Chunhui, XUE Song, LONG Zhiqiang. The signal disposal of position and speed detection sensors based upon long stators for maglev train [J]. Journal of Transduction Technology, 2009(6):822.
- [3] 李璐. 高速磁悬浮列车间隙传感器的设计与研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002.
LI Lu. The design and research of gap sensor for high-speed maglev train [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [4] 吴峻, 李中秀. 悬浮间隙传感器的电磁兼容设计[J]. 计算机测量与控制, 2010(4):933.
WU Jun, LI Zhongxiu. Design of electromagnetic compatibility for levitation gap sensor [J]. Computer Measurement and Control, 2010(4):933.
- [5] 李璐, 吴峻, 周文武. 高速磁浮列车悬浮间隙传感器线圈结构的分析设计[J]. 传感技术学报, 2007(12):2567.
LI Lu, WU Jun, ZHOU Wenwu. Analysis and design of coil structure for the gap sensor of high-speed maglev train [J]. Journal of Transduction Technology, 2007(12):2567.
- [6] 吴峻, 周文武, 李璐. 高速磁浮列车悬浮间隙传感器的研究[J]. 测试技术学报, 2009(5):466.
WU Jun, ZHOU Wenwu, LI Lu. Research on levitation gap sensor for high-speed maglev train [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009(5):466.
- [7] 何宁. 高速磁浮列车相对位置传感器的优化设计与实现[D]. 长沙:国防科技大学, 2012.
HE Ning. Optimal design and realization of relative position detection sensor for high-speed maglev train [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [8] 赵春霞. EMS 型高速磁浮列车导向动力学研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2014.
ZHAO Chunxia. Research on guidance dynamics of EMS high-speed maglev train [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.

(收稿日期:2020-11-17)