

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0123- 03

高速磁浮列车气隙磁场测量系统的研究*

陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了高速磁浮列车气隙磁场测量系统研制中的几项关键技术,提出了三维磁敏传感器的设计方法和基于霍尔元件的电压比磁场测量法,并设计了传感器的高精度运动控制系统。所研制的系统具有较高的测磁精度和定位精度,实现了高速磁浮列车气隙磁场的自动测量。

关键词:磁浮列车; 磁场测量; 三维磁敏传感器; 电压比测量法; 步进电机

中图分类号: U237 **文献标识码:** B

Study on Air-gap Magnetic Fields Measurement System of High-speed Magnetic Levitation Vehicle

CHEN Di-xiang, PAN Meng-chun, LUO Fei-lu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Several key technologies were introduced in the development of the air-gap magnetic field measurement system of high-speed magnetic levitation vehicle. The design method of the three-dimensional magnetic sensors and the voltage proportional magnetic field measurement method based on Hall-effect devices were put forward in this paper. It also presented a motion control system with high precision designed for the sensor. The research shows that the developed system has high measurement and orientation precision, and it can perform automatic measurement of the air gap magnetic fields of high speed magnetic levitation vehicle.

Key words: magnetic levitation vehicle(MLV); magnetic field measurement; three dimensional magnetic sensor; proportional voltage measurement method; stepping motor

随着国民经济的发展,交通运输日益紧张并成为制约经济的一个重要因素,缓解并改善交通状况是当前迫切需要解决的问题。作为新型的陆上交通工具,磁浮列车依靠电磁力将列车悬浮于轨道上,用直线电机推进。它没有车轮及相应的传动机构,与地面无机械接触,可以高速、平稳地运行,并且运营维护费用低,无环境污染,具有良好的发展前景。

常导型高速磁浮列车采用长定子直线同步电机进行驱动^[1]。悬浮电磁铁作为直线同步电机的次级,在绕组电流的激励下,与长定子轨道相互作用,同时具备悬浮、推进、发电等多项功能。列车中气隙磁场的分布和变化规律对于列车的悬浮、推动、导向和车载发电都有很大的影响。常导高速磁浮列车气隙磁场测量系统的建立和应用,对于磁浮列车电磁系统的性能评估和优化设计具有重要意义,可以为高速磁浮列车技术的国产化提供有力的保障。

1 三维磁敏传感器的设计

现有磁场测量系统所用的传感器一般都只能用来测量某个特定方向的磁场,当需要测量空间中同一点磁场的多个分量时,需要精确地调整传感器的位置和姿态才能实现。高速磁浮列车的气隙磁场是个三维磁场,为了降低运动控制系统的复杂性,提高测量速度和精度,采用将霍尔元件粘贴在立方体表面的方法来制作三维磁敏传感器。

将六个性能参数相同的霍尔元件分别粘贴在一个小立方体(3mm × 3mm × 3mm)的六个面上,互相平

* 收稿日期: 2006- 12- 19

基金项目: 国家 863 计划重大专项资助项目(2001AA 505000- 109)

作者简介: 陈棣湘(1970—),男,副教授,博士。

行的两个面上的霍尔元件以差动的方式进行电路连接,共同完成某一个方向的磁场测量;由于立方体相邻的三个面彼此正交,从而就可以构成一个三维的磁敏传感器,用于测量立方体中心点磁场的三个分量。由于霍尔元件的体积很小,这种三维磁敏传感器可以做成点式探头的形式。同时由于霍尔元件以差动的方式进行电路连接,可以有效地减小不等位输出电压和温度变化的影响。

应用该器件所设计的三维磁敏传感器的某一方向的电路连接示意图如图 1 所示(另外两个方向的电路连接与图 1 完全相同)。 $H1$ 和 $H2$ 为粘贴在小立方体两个互相平行表面上的两个霍尔元件,采用差分的方式进行连接。因为霍尔元件的不等位输出电压是由霍尔电极的装配误差等因素所造成的,与被测磁感应强度无关,而配对的两个霍尔元件由于粘贴方向相反,被测磁感应强度在两个霍尔元件上所产生的霍尔输出电压的极性也相反,所以在这种连接方式下, $H1$ 和 $H2$ 输出的不等位电压相当于共模信号,而被测磁感应强度所产生的霍尔输出电压相当于差模信号。两个霍尔元件的输出信号接到差分放大器后,其不等位输出电压得到了抑制,而霍尔输出电压得到了有效的放大。

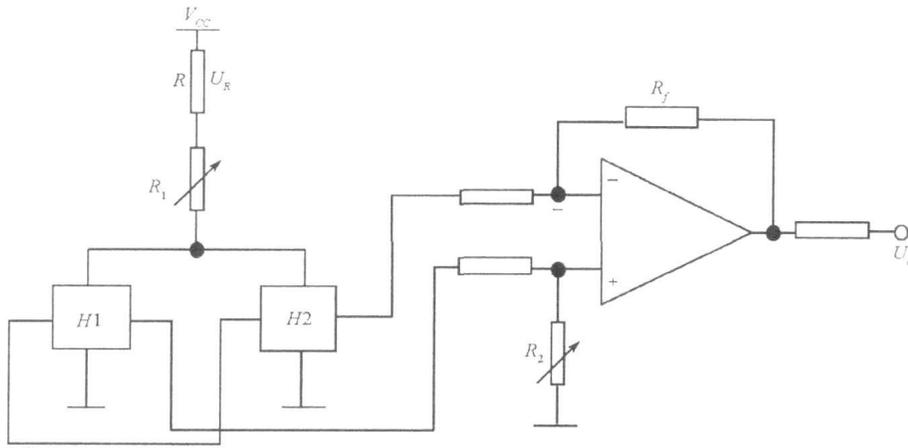


图 1 三维磁敏传感器的某一方向的电路连接示意图

Fig. 1 The circuit connected diagram in one direction of 3D magnetic sensor

2 基于霍尔元件的电压比磁场测量法

使用恒流源供电虽然可以减小霍尔传感器内阻变化对测量精度的影响,但其硬件电路复杂,成本较高,而且电流的稳定性还直接影响到测量的精度^[2]。因此,提出了电压比测量法来测量磁场强度,以消除激励电流变化对测量带来的影响,其原理框图如图 2 所示。

如图所示,霍尔传感器和电阻 R 串联在同一个回路中,当由于磁电阻效应和温度变化引起霍尔传感器内阻变化时,霍尔传感器的激励电流会发生变化,同时流过电阻 R 的电流也会同步发生变化,且霍尔传感器的输出电压和电阻 R 上的压降均与激励电流成正比。计算机控制模拟开关轮流采集霍尔传感器的输出电压 U_H 和电阻 R 上的压降 U_R 。由于霍尔传感器的输出电压 $U_H = K_H IB$,电阻 R 上的压降 $U_R = IR$,所以磁场强度 B 可根据 U_H 与 U_R 的比值求出,即

$$B = R(U_H / U_R) / K_H \tag{1}$$

上式中不含激励电流 I ,可见采用电压比测量法消除了激励电流变化对磁场测量精度的影响。再通过软件对霍尔传感器的灵敏度系数 K_H 随温度的变化进行补偿,即可得到高精度的磁场测量结果。

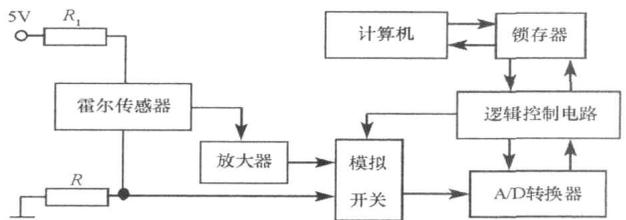


图 2 电压比测量法原理框图

Fig. 2 The principle diagram of propoitional voltage measurement method

3 系统的调零与标定

3.1 调零

通过调节图 1 电路中电位器 R_2 的阻值, 可以在被测磁感应强度为 0 时使传感器的输出电压 U_0 为 0, 即两个霍尔元件的不等位输出电压经过差分放大后相互抵消。系统的三个测量方向应分别调零。

3.2 标定

由于本系统的探头采用了线性元件, 且系统的量程在探头的线性传输范围之内, 所选用的放大器和数据采集器件也都具有很好的线性度, 所以整个系统具有良好的线性特征。在标定时, 只需选取系统量程中间某点已知磁感应强度值进行定标即可。系统的三个测量方向应分别进行标定。

根据系统的量程及准确度, 选用了计算线圈法^[3]进行标定。制作一个精密长直螺线管, 精确测量它的几何尺寸, 其中, 真空中的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, N 为匝数, L 为螺线管的长度, D 为直径, I 为通过螺线管的电流, 根据下式可计算出该螺线管几何中心处的磁感应强度 B , 并以此值作为系统的定标值。

$$B = \mu_0 NI \sqrt{L^2 + D^2} \quad (2)$$

该方法的准确度可以达到 10^{-5} 。在一定的环境温度下, 调节图 1 所示电路中电位器 R_1 的阻值, 使系统的测量结果与定标值相同即可。

4 运动控制系统的设计

为了实现对高速磁浮列车气隙磁场的连续测量, 研制了三维磁敏传感器的运动控制系统, 其原理框图如图 3 所示。从图中可以看出, 运动控制系统是由安装在 PC 机 PCI 插槽内的运动控制卡以及功率放大电路、步进电机、光栅尺和两自由度运动平台等部分组成。运动控制卡作为运动控制系统的核心部分, 由位置计数器、接口控制电路、恒转矩细分驱动系统等模块构成。在本系统中, 位置计数器和接口控制电路由 CPLD 实现, 数据缓存、运动规划和中断管理等功能则由 DSP 来完成。恒转矩细分驱动电路的输出经功率放大器放大后, 驱动两台四相混合式步进电机运行, 并通过滚珠丝杠将步进电机的旋转运动转换为两自由度运动平台上支架的直线位移, 从而带动安装在支架上的三维磁敏传感器在平面上运动。

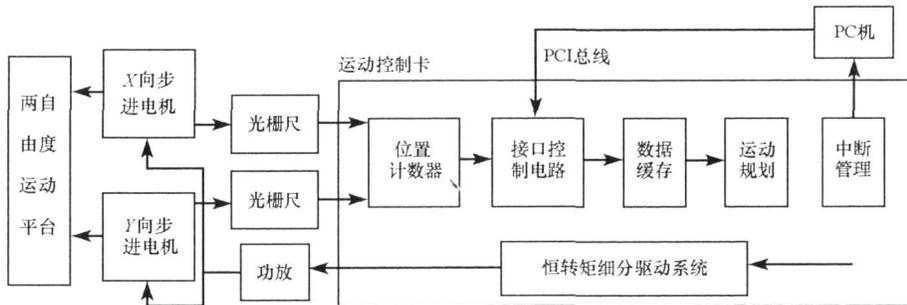


图 3 运动控制系统原理框图

Fig. 3 The principle diagram of motion control system

5 结论

高速磁浮列车气隙磁场测量系统研制成功后, 大大缩短了气隙磁场的测量时间, 提高了测量精度。由于被测磁场较强, 地磁场和传感器本身对磁场的影响可以忽略不计。测量误差主要来源于三维磁敏传感器的固有误差和姿态误差。系统经标定后, 测磁的相对精度达到了 0.5%, 运动控制系统的定位精度达到了 0.01mm^[4]。应用该系统对高速磁浮列车实验模型的气隙磁场进行了测量, 测量结果与采用 ANSYS 软件得到的数值仿真结果完全吻合^[5]。

参考文献:

- [1] Meins J, Miller L. The High Speed MAGLEV Transportation System Transrapid[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1988, 24(2): 808- 811.
- [2] 孙传友, 孙晓斌. 感测技术基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 58- 64.
- [3] 张三慧. 大学物理(第三册, 电磁学)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 166- 167.
- [4] 陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路. 高精度智能磁场测量仪的设计[J]. 测试技术学报, 2004, 18(3): 259- 262.
- [5] 潘孟春, 陈棣湘, 罗飞路. 常导高速磁悬浮列车电磁场的分析与测量[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 126- 128.