

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.04.018

## 基于差分结构的大间隙变面积电涡流式传感器

姜锐, 窦峰山

(国防科学技术大学 磁悬浮技术工程研究中心, 长沙 410072)

**摘要:** 针对因车体振动而带来的测速与定位误差问题, 设计一项基于一阶差分结构的大间隙变面积式传感器。传感器由检测线圈、激励电路、放大电路、线圈检测电路、同步解调电路、差分比较电路和 AD 采样电路等几部分组成, 激励电路产生方波激励磁信号, 经放大电路放大后, 送入检测线圈和解调器。通过对检测线圈和信号检测电路的合理设计, 配合后续处理电路, 可以快速、准确、可靠地完成测速定位功能, 并进行了实验验证。实验结果表明: 传感器可以准确地检测到轨枕的位置, 测量距离可达 5 cm, 并且不受车体振动的影响。

**关键词:** 电涡流传感器; 检测线圈; 差分结构; 大间隙

**中图分类号:** TP206 **文献标志码:** A

## Large Gap and Area-Variable Eddy Current Sensor Based on Difference Structure

Jiang Rui, Dou Fengshan

(Magnetic Suspension Engineering Research Center, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

**Abstract:** Aiming at the speed measuring and location error problems caused by vehicle vibration, a new large gap and area-variable eddy current sensor which uses first difference is designed. The sensor is composed of test coils, excitation circuit, power amplifier circuit, signal detection circuit, demodulation circuit, differential comparison circuit and sampling circuit. The excited signals produced by excitation circuit are amplified, then provided for the test coils and the demodulator. By the appropriate design of the test coils, the signal detection circuit, and the posterior processing circuit, the function of speed detection and relative location can be achieved quickly, exactly and reliability. The availability of the new sensor is verified by ground simulated experiment. The test results show that the new sensor can detect the position of the sleeper accurately, a 5 cm detecting distance is achieved and the measurement results will not be influenced by vehicle vibration.

**Keywords:** eddy current sensor; test coils; difference; large gap

### 0 引言

测速与定位技术是中低速磁悬浮列车的核心技术之一。

目前测速定位方式主要为基于交叉感应回线的测速定位方法、基于多普勒雷达的测速定位方法、基于轨枕计数的测速定位方法、基于传感器计数的测速定位方法<sup>[1]</sup>。

采用感应环线进行测速定位, 系统过于复杂, 且成本较高; 采用多普勒雷达进行测速定位, 无法克服天气变化对测量精度的影响; 而“轨枕技术法”和“传感器计数法”由于采用电感式接近开关作为传感器, 成本低廉、结构简单、不受天气变化的影响、使用可靠, 基本上满足测速定位系统的要求。但由于电感式传感器对检测距离敏感的缺陷, 当列车车体发生抖动, 传感器与轨枕之间的距离发生改变时, 传感器输出信号的占空比和相位发生跳变, 从而导致测速与定位误差。

笔者以国防科技大学研制的 CMS04 型工程化

样车为应用对象, 基于电涡流效应原理, 研究了一种新型测速与相对定位传感器, 可以弥补电感式接近开关对检测距离敏感的缺陷, 克服检测距离对测量结果的影响, 消除了因车体抖动而带来的测速定位误差。

### 1 设计原理

由电涡流效应原理可知, 当线圈中通以某一频率的激励电流时, 线圈周围空间会产生交变磁场, 如果线圈附近存在金属导体, 则在导体表面会产生感应电涡流。受电涡流效应的影响, 线圈的等效阻抗和电感量发生变化<sup>[2]</sup>。

线圈的等效阻抗  $Z$  与被测金属导体的电导率、磁导率, 激励信号的频率, 线圈与金属导体的距离、相对覆盖面积, 线圈的尺寸因子(包括线圈的结构、尺寸和形状)等因素有关<sup>[3]</sup>。当固定其他因素, 则线圈的等效阻抗就为某个因素的单值函数。作为变面积式电涡流传感器, 其他因素固定时, 线圈与金属导体的相对覆盖面积应与线圈的等效阻抗直接相

收稿日期: 2010-12-01; 修回日期: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874015)

作者简介: 姜锐(1985—), 男, 吉林人, 硕士, 从事磁悬浮控制研究。

关。

当 2 个线圈组成线圈组，以图 1 所示方式经过轨枕上方时，通过有限元软件 ANSOFT 进行仿真，得到 2 个线圈的电感相对于位置的变化曲线，以及二者的电感差值曲线，如图 2。

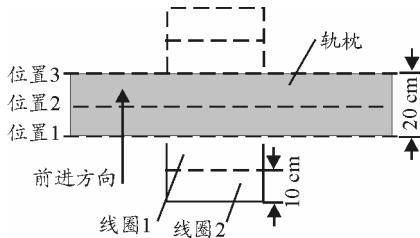


图 1 线圈运动位置示意图

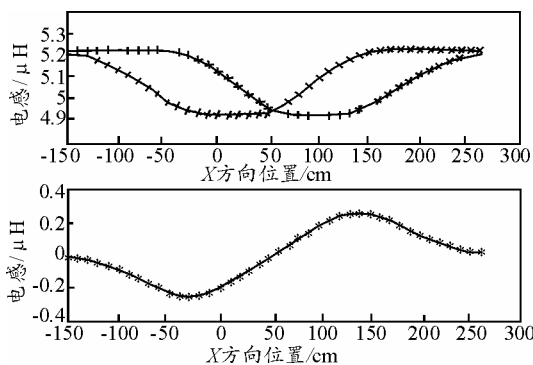


图 2 线圈电感变化曲线

从图 2 中可以看出，在 3 个位置上线圈电感差值为 0，即此时涡流效应对 2 个线圈的影响相同。在以下情况下会出现这种结果：线圈尚未进入轨枕上方、两线圈接缝处在位置 2 附近和线圈完全离开轨枕上方。从图 2 中还可以看到，当两线圈接缝在位置 2 时，不但二者电感差值为 0，线圈 1 与线圈 2 的电感值也均小于正常值。虽然当两线圈尚未进入轨枕上方和完全离开轨枕上方时，虽然差值同样为 0，但由于此时线圈无涡流效应影响，线圈电感等于正常值。

设相邻线圈的电感值为  $L_1$ 、 $L_2$ 。通过以上分析

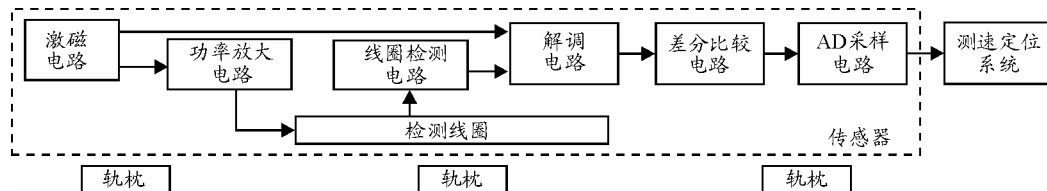


图 4 传感器功能结构示意图

### 2.1 激磁频率的选择

由趋肤效应可知，金属导体中电涡流的密度随着距导体表面深度的增加而呈指数规律衰减。定义电涡流密度等于表面涡流密度  $1/e$  (37%) 处的深度

可知，当  $L_1 < \zeta$ ， $L_2 < \zeta$ ，且  $L_1 - L_2 < \sigma$  ( $\sigma$  趋于 0) 时，即可判断出这 2 个线圈的接缝处在轨枕的中线位置附近。由此即可准确检测到轨枕与线圈的相对位置。

由于相邻线圈的检测距离相同，即使车体发生抖动，检测距离发生变化，对相邻线圈的电感的影响也是基本相同的。通过对相邻线圈检测信号进行差分，就可以克服由于检测距离发生变化而带来的影响，得到准确的位置信号，消除了因测量误差而导致的速度误差。

为达到定位精度要求，同时保证测速定位系统所提供速度信号的连续性，必须使检测线圈的长度  $L$  足够长，可以跨接在相邻 2 个轨枕上。为解决定位精度与水平方向测量范围的矛盾，检测线圈由多个结构相同的单个线圈组成，按图 3 所示方式排列。检测线圈的接头焊接在信号处理板上。

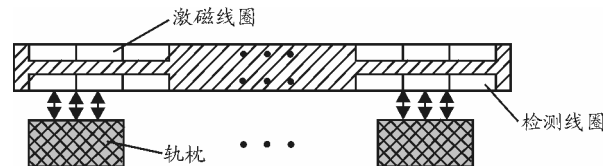


图 3 检测线圈排列位置示意图

## 2 系统设计与实现

传感器由检测线圈、激励电路、放大电路、线圈检测电路、同步解调电路、差分比较电路和 AD 采样电路等几部分组成如图 4。激励电路产生方波激励信号，送入检测线圈作为激磁信号，同时发给同步解调电路作为解调参考信号。线圈检测电路检测到各个线圈的信号后，分别送入同步解调电路与参考信号相乘，进行同步检波。对同步检波后的信号进行低通滤波，即可得到和线圈与轨枕位置对应的直流信号。相邻线圈的经过处理后的直流信号通过差分比较电路做差，再送入 AD 采样电路转化为数字量，供测速定位系统使用。

为涡流渗透深度  $\delta$ 。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中： $\mu$ 、 $\sigma$  为金属材料的磁导率和电导率， $f$  为激

励频率。

由式 (1) 可知, 激磁频率越低, 涡流渗透深度越大。涡流激励频率直接决定涡流渗透深度<sup>[3]</sup>。

由于笔者所讨论的电涡流传感器主要用于检测轨枕的位置, 所以涡流渗透深度越小越好, 即可以适当提高激磁频率。但由于电涡流损耗功率与激磁频率的二次方成正比, 频率过高, 会增加涡流的能量损耗, 从而增加系统功耗, 降低效率。

在实际工作环境中, 磁浮列车车下电磁环境十分复杂, 电磁铁、斩波器、悬浮控制器、牵引逆变器等。它们的频率各不相同, 其中悬浮控制器的频率(基频)最高为 20 kHz。并且它们都有不同程度的谐波分量存在, 尤其以斩波器和牵引逆变器的谐波分量最为丰富。选择频率时要与以上频段错开, 否则不但自身会受到干扰, 也会影响其他设备工作。其他设备的谐波分量对传感器的影响, 可以通过合理选择检测线圈在车底的位置, 使谐波分量对每个检测线圈的影响相同或近似相同, 通过差分作用, 就可以减弱, 甚至消除谐波分量对测量结果的影响。

另外, 为减少相邻线圈之间的串扰, 相邻 2 个线圈采用 2 种不同的激磁频率。

### 2.2 检测线圈设计

对于检测线圈的结构、尺寸和形状对传感器的灵敏度和线性范围等性能的影响, 国内外学者做了大量的研究工作。由文献[4]可知, 线圈的灵敏度随匝数的增加而提高; 随线圈的外径增加, 内径减小而提高。且这种规律不受线圈形状的影响。由文献[5]可知, 矩形线圈的线性度好于圆形线圈; 检测线圈应尽量靠近被测物体, 以增加检测的灵敏度。由文献[6]可知, 线圈的截面积愈大, 传感器灵敏度越高, 线性范围越小; 线圈的匝数密度越大, 传感器灵敏度越高, 线性范围越大。

在实际工作环境中, 检测线圈固定在车底, 距轨枕约 5 cm 左右。为提高传感器的测量范围和线性度, 应加大检测线圈尺寸, 增加线圈匝数密度。最终检测线圈形状设计为矩形, 宽度略大于轨枕宽度的 1/2, 长度大于轨枕的最短长度。

### 2.3 放大电路设计

由于所设计传感器的正常检测范围需达到 50 mm, 如果驱动电流过小, 激磁线圈产生的磁场较弱, 所引起的涡流效应也较弱, 检测线圈受涡流效应影响较小, 增大了传感器检测轨枕的难度。所

以需要对激磁信号进行功率放大, 从而使激磁线圈产生足够强的交变磁场, 检测线圈所受到的涡流效应影响也较强, 便于检测。丙类功率放大电路经常被用于高频或射频放大等电路中, 故笔者采用丙类功率放大电路, 如图 5, 为保证功率放大器工作在丙类状态, 需在功放管的发射结上加一负偏置电压, 故激磁信号通过一级减法电路, 进行偏置和幅值放大后, 送入功率放大器中。图 3 中所示 L 为激磁线圈, 根据测得的线圈电感值, 通过公式 (3) 计算出所需电容 C 的值, 使 LC 谐振的频率与激磁信号的基波频率相同。

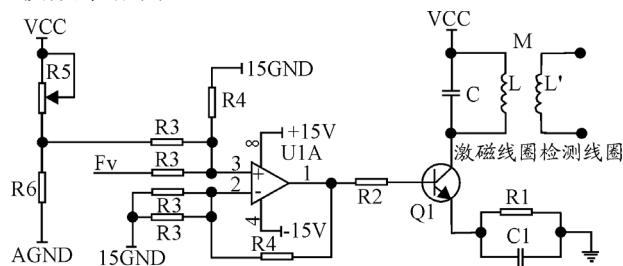


图 5 功率放大电路

### 2.4 同步解调

同步解调选用 AD 公司生产的四象限乘法器/除法器 AD734, 通过配置管脚, AD734 的传递函数为:

$$W = \frac{U_{CM} \sin \omega t \cdot [-U_{SM} \sin(\omega t + \varphi)]}{10} = \frac{U_{CM} U_{SM}}{10} \cdot \frac{1}{2} [\cos(2\omega t + \varphi) - \cos \varphi] \quad (2)$$

解调出来的信号, 通过 RC 一阶低通滤波电路, 滤掉高频分量, 则得到的信号为:

$$U_o = -\frac{U_{CM} U_{SM}}{20} \cos \varphi \quad (3)$$

对传感器进行同步解调, 每个线圈都拥有单独的同步解调电路。相邻线圈采用不同频率的参考信号, 可以有效地避免线圈之间串扰的问题。

## 3 实验数据分析

检测线圈组由 2 个检测线圈组成, 检测线圈由直径为 1 mm<sup>2</sup> 的铜线手工绕制而成, 矩形线圈宽度为 10 cm, 长度为 15 cm, 匝数 5 匝; 激磁频率选为 2 MHz、1.7 MHz; 线圈距钢板垂直高度为 50 mm, 轨枕宽 20 cm。实验范围为从轨枕进入检测线圈区域, 二者开始有相对覆盖面积开始, 至轨枕完全离开检测线圈, 二者无相对覆盖面积为止。每隔 2 cm, 记录下 2 个检测线圈输出的信号幅值。O 代表线圈 1, \*代表线圈 2。

(下转第 71 页)

是实现全线自动化生产的关键。由此可见, 机器人、图像识别和自动物流等先进技术的大量应用是组件自动化装配技术及装备的发展趋势。

### 4 结论

只有通过借鉴国外的先进技术及装备, 认清差距, 在较短的时间内研发出具有自主知识产权的组件自动化装配装备, 打破该领域装备的国外垄断局面, 才能使我国的光伏产业真正走上“自主品牌”的道路。

(上接第 55 页)

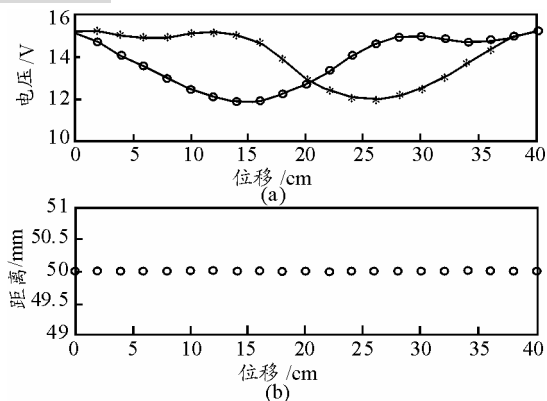


图 6 测距离不变时, 相对位置-电压曲线

图 6 中, (a)图为相对位置与电压曲线, (b)图为相对位置与检测距离曲线。当检测距离不变时, 相对位置与电压的关系是 1 条向两端逐渐衰减的正弦曲线。当线圈 1 与线圈 2 的接缝处位于轨枕中线附近位置时, 2 个线圈输出信号幅值相同。只需记下幅值相同的时刻, 因线圈宽度已知, 即可求得列车此时的速度。

列车正常运行时, 悬浮间隙为 8 mm, 当间隙小于 3 mm 时, 列车会自动保护。模拟列车剧烈振动时的极限情况, 设定列车振动幅度为±5 mm, 如图 7(a)所示, 传感器与轨枕的距离在剧烈变化。图 7(b)中, 2 个线圈输出信号幅值相同的位置与图 3 中所示位置相同。

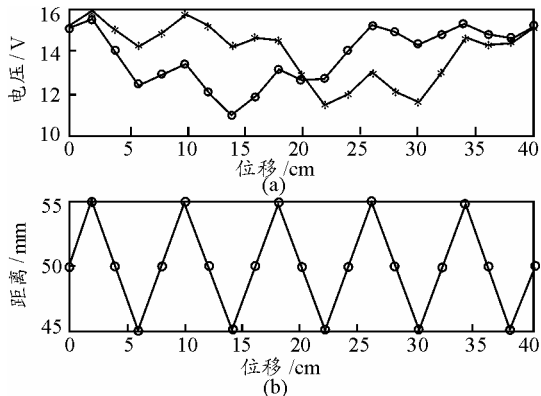


图 7 检测距离改变时, 相对位置-电压曲线

### 参考文献:

[1] 杨志刚, 等. 小型太阳能光伏电源实用技术[M]. 北京: 科普出版社, 2009.

[2] 沈辉, 等. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[3] 熊红珊, 等. 工业检测机器人控制中的视觉技术[J]. 兵工自动化, 1997, 16(2): 37-40.

[4] 唐建中, 等. 直流伺服机器人自适应结构控制[J]. 兵工自动化, 2004, 23(3): 55-57.

[5] 王永林, 等. 基于双目立体视觉系统的精确标定算法[J]. 兵工自动化, 2008, 27(6): 82-84.

因实验线圈为手工绕制, 工艺差, 无法保证线圈的一致性, 所以在输出信号幅值上略有差别。

通过实验可以判定, 该传感器通过增大检测线圈, 提高发射功率的方式, 增加了传感器的检测距离; 通过差分, 有效克服了因车体振动而带来的误差。并且当检测线圈相同时, 由于差分作用, 还可有效抑制温漂对传感器的影响。

### 4 结论

该传感器能增加传感器的检测距离, 消除因车体振动等因素而带来的测量误差, 提高传感器的环境适应性。经实验验证, 传感器可以准确、可靠地检测轨枕与线圈的相对位置, 为测速定位系统提供准确的位置信号。该传感器不但可用于中低速磁浮列车的测速定位, 还可广泛用于各种工业现场。下一步, 将继续消除和补偿因检测线圈不一致所带来的测量误差, 进一步提高传感器测量精度。

### 参考文献:

[1] 王旭, 刘志, 龙志强. 磁浮列车测速定位方法综述[J]. 兵工自动化, 2008, 27(1): 69-70.

[2] 周丹丽, 赵辉, 刘伟文, 等. 电涡流传感器建模与仿真分析[J]. 传感器技术, 2005, 24(5): 28-30.

[3] 丁天怀, 陈祥林. 电涡流传感器阵列测试技术[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 1-5.

[4] 郭顺祥. 列车定位中电涡流传感技术的研究[R]. 北京交通大学硕士学位论文, 2006: 41-42.

[5] 何斌, 岳继光, 杨灿军, 等. 探头参数对变面积电涡流传感器的影响及仿真研究[J]. 传感器技术, 1999, 18(2): 7-9.

[6] 于亚婷, 杜平安, 廖雅琴. 线圈形状及几何参数对电涡流传感器性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1045-1050.

[7] 王鹏, 丁天怀, 傅志斌. 平面电涡流线圈的结构参数设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(24): 1959-1961.