

基于 GMR 的机床振动传感器设计与性能分析

王晓燕^{1*} 刘亚伟² 刘立兵² 赵方¹

1. 郑州职业技术学院材料工程系, 河南 郑州 450121

2. 东莞新科技开发有限公司研发部, 广东 东莞 523000

[摘要] 依据精密加工过程中机床振动频率特点, 设计了一种基于巨磁阻单元的三轴加速度传感器。该三轴加速度传感器机械感应部分采用对称四翼式结构, 通过合理布局巨磁阻单元构成的惠斯通电桥测量三个方向的加速度, 机械感应部分与信号输出部分的一体化设计大大减小了产品体积。对三轴加速度传感器进行了灵敏度仿真与试验, 详细分析了仿真与试验的结果。

[关键词] 机床振动; 巨磁阻(GMR); 加速度传感器; 一体化设计; 灵敏度仿真与试验

DOI: 10.33142/ec.v4i7.4182

中图分类号: TN929.5; TP212.9

文献标识码: A

Design and Performance Analysis of Machine Tool Vibration Sensor Based on GMR

WANG Xiaoyan^{1*}, LIU Yawei², LIU Libing², ZHAO Fang¹

1 Material Engineering Department of Zhengzhou Technical College, Zhengzhou, Henan, 450121, China

2 Research Department of Dongguan Xinke Technology Development Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523000, China

Abstract: According to the vibration frequency characteristics of machine tool in the process of precision machining, a three-axis acceleration sensor based on giant magnetoresistance unit is designed. The mechanical sensing part of the three-axis acceleration sensor adopts a symmetrical four wing structure, and the acceleration in three directions is measured by a Wheatstone bridge composed of a reasonable layout of giant magnetoresistance unit. The integrated design of the mechanical sensing part and the signal output part greatly reduces the volume of the product. The sensitivity of three-axis acceleration sensor is simulated and tested, and the results of simulation and test are analyzed in detail.

Keywords: machine tool vibration; giant magnetoresistance (GMR); acceleration sensor; integrated design; sensitivity simulation and test

引言

将新一代信息技术、传感技术与机床技术相融合, 对机床运行中的各种状态信息自动采集、自动处理和反馈, 从而实现机床的自动感知、自动学习、自主决策和自主执行, 是机床智能化发展的必然趋势。机床主轴振动作为影响机床性能的重要参数, 是智能检测的重点^[1-2]。振动检测可采用的加速度传感器有压电式、电容式、压阻式、热对流式、磁感应式。加速度传感器的结构和它的工作原理决定了传感器的性能指标, 五种加速度传感器的性能指标见表 1^[3]。其中磁感应式传感器是基于磁敏电阻的磁阻效应设计的, 尤其是巨磁阻(GMR)效应的发现与应用研究^[4], 使得巨磁阻型传感器在测量振动时能够表现出更高的灵敏度、更宽的线性范围、更好的温度稳定性、以及更优越的高度集成性^[5]。

表 1 5种传感器性能表

| 类型 | 压电式 | 电容式 | 压阻式 | 热对流式 | 磁感应式 |
|------|--------|---------|--------|---------|---------|
| 灵敏度 | 低 | 低 | 低 | 高 | 高 |
| 线性度 | 中 | 高 | 中 | 高 | 高 |
| 稳定性 | 高 | 高 | 高 | 低 | 高 |
| 迟滞性 | 微小 | 无 | 小 | 无 | 小 |
| 工作范围 | >100g | <1000g | >10g | >10g | <100g |
| 测量频段 | >1 kHz | <10 kHz | >1 kHz | <35 kHz | <10 kHz |

注: 重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$

精密机床的振动频率一般小于 100Hz, 振动加速度小于 1G, 属于低频、低加速度值振动, 为了在该范围内获得更好的测量效果, 本文利用巨磁阻效应(GMR)的特点, 设计了一种在低频范围(0.1Hz 至 100Hz)具有高灵敏度, 高信

噪比 (S / N) 的三轴加速度传感器, 其电阻值会根据振动加速度的变化而变化, 传感器芯片主体由附着在机械感应片上的磁体和 GMR 单元组成, 对于输出, 一个芯片在某个方向上具有方向性, 并且三个芯片作为一组使用, 能够同时测量 X、Y、Z 三个方向的加速度值。传感器机械感应片采用对称四翼式结构, 可以减小传感器体积, 有利于集成。

1 传感器结构与工作原理

巨磁阻型加速度传感器是基于磁敏电阻的磁感应效应原理设计的, 它的感应部分是机械结构的弹性片与磁铁, 输出部分是巨磁阻 (GMR) 单元。

当弹性片感应到外界的加速度时, 弹性片会发生左右摆动, 弹性片的形变改变了磁铁与巨磁阻 (GMR) 单元之间的距离和角度, 使巨磁阻 (GMR) 上方的磁力线的分布发生变化, 从而改变巨磁阻 (GMR) 的电阻值。将巨磁阻 (GMR) 单元内部的阻抗连接构成惠世通电桥, 在电桥的其中两端加上恒压电压源, 另外两端作为信号输出端, 就可以将这种阻抗的变化转换成电压的变化, 输出差分信号。

当安装在机床主轴上时, 基于此差分电压输出大小, 可判断主轴振动幅度、振动频率的状况, 从而为机床的智能加工提供决策。

1.1 机械感应片设计

为了能够测量三个方向的振动加速度值, 同时减小产品体积, 机械感应片的结构设计采用对称的四翼式结构, 见图 1 所示。四个翼片形状相同, 上下左右对称布置, 悬架位于对称中心, 起到连接支撑作用。机械感应片各个部分厚度一致, 以保证感应外界加速度时受到的荷载力分布均匀。机械感应片采用标准厚度的材料一次性定型, 以保证无来料变形的问題。

机械感应片能够产生三种形变状态, 与外界激励相对应, 从而感应三个轴向的加速度激励, 实现三个轴向的振动测量。定义三轴加速度传感器感应的方向为 X 轴、Y 轴、Z 轴, 机械感应片三种形变状态分析见图 1。

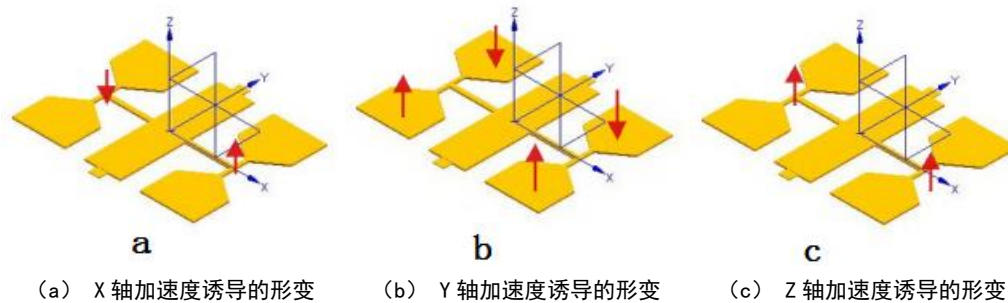


图 1 机械感应片结构与形变状态

以悬架为对称轴和支点, 机械感应片左右两部分翼片均可看作 T 型悬臂梁结构。T 型悬臂梁结构响应外界的加速度激励时, 能够发生两种形变状态——摆动和扭动, 其中摆动形变状态又分悬架两边的同向摆动和异向摆动。根据机械感应片的结构, 形变只能在感应片的厚度方向上, 即上下运动。

图 1 (a) 所示, 感应 X 轴向加速度激励时, 机械感应片悬架两边发生异向形变。图 1 (b) 所示, 感应 Y 轴向加速度激励时, 机械感应片悬架两边发生扭动形变。图 1 (c) 所示, 感应 Z 轴向加速度激励时, 机械感应片悬架两边发生同向形变。

当响应 X 轴向的加速度时, 机械感应片的横轴发生形变, 纵轴不发生形变, 以悬架为对称轴, 左侧翼片与右侧翼片沿着 Z 轴作异向运动, 形象比喻这种形变状态为翘翘板状态。

当响应 Y 轴向的加速度时, 机械感应片的横轴不发生形变, 纵轴发生形变, 以横轴为对称轴, 左侧翼片绕横轴扭动, 右侧翼片也绕横轴扭动, 扭动方向一致。

当响应 Z 轴向的加速度时, 横轴发生形变, 纵轴不发生形变, 以悬架为对称轴, 左侧翼片与右侧翼片沿着 Z 轴作同向运动。

1.2 磁铁设计

传感器中磁铁的作用主要是提供磁场, 通过机械感应片的运动, 改变磁力线分布, 从而使巨磁阻 (GMR) 的阻抗发生变化^[6]。本文所提出传感器的磁铁部分采用磁铁组合体结构, 见图 2a。

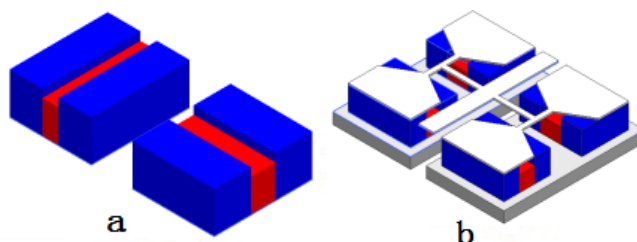


图2 (a) 单个磁铁组合体 (b) 三轴加速度传感器的感应部分模型

每个磁铁组合体由两块磁铁和一块隔离块组成，两块磁铁的极性方向相反放置，磁铁中间用隔离块隔开，两块磁铁的尺寸相同，沿隔离块对称。磁铁组合体固定在屏蔽板上，屏蔽板采用坡莫合金材料，主要是屏蔽外界磁场对磁铁组合体自身磁场的干扰。

每个磁铁组合体为一组，因为有 X、Y、Z 三个轴向的加速度需要感应，所以需要三个与 X、Y、Z 轴向对应的磁铁组合体。但为了满足机械感应片四个机翼体的对称性，传感器需要四个磁铁组合体，这样就比实际需求多出一个磁铁组合体。

磁铁组合体需要安装在机械感应片上，与机械感应片一起组成传感器的感应部分。安装时，X 单元磁铁组合体与 Z 单元磁铁组合体关于悬架左右对称。而 Y 单元磁铁组合体与 X 单元磁铁组合体布置在悬架的同一侧，Y 单元磁铁组合体需要相对于 X 单元磁铁组合体旋转 90° 放置。如果 X 单元磁铁组合体与 Y 单元磁铁组合体摆放方向一致，则测量值相同，将无法区分两个轴向的振动。三轴加速度传感器的感应部分模型安装见图 2b。

1.3 GMR 单元设计

巨磁阻 (GMR) 单元是传感器芯片的主体，主要是通过感应磁铁组合体的磁场变化，改变阻抗值。GMR 单元内部阻抗组成的惠斯通电桥，在外界加速度激励时，能够输出差分信号。为了获得好的频率特性，高的信噪比，以及低饱和和磁场时高的灵敏度，本文所提出的传感器其 GMR 单元采用非耦合型自旋阀多层膜结构^[7-8]。本文所提出的传感器需要响应三个方向的加速度，因此设计了三 GMR 单元，定义为 G1、G2、G3，分别与三个磁铁组合体对应。每个 GMR 单元具有四个 GMR，可以把这四个 GMR 看作四个具有磁场方向感应功能的电阻，分别定义为 R1、R2、R3、R4，与磁铁组合体的位置关系以及内部电路连接如图 3 所示。

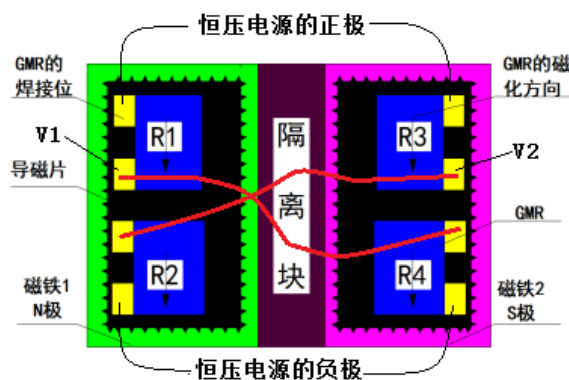


图3 GMR 单元的内部电路

两个 GMR 阻抗对应一个磁铁的 N 极，另外两个 GMR 阻抗对应磁铁的 S 极。阻抗部分的面积与磁铁的有效极性部分面积相对应，阻抗部分的面积需要被磁铁的有效极性部分面积完全覆盖，使磁铁在上下运动和前后左右扭动时也能够完全覆盖阻抗部分的面积。

GMR 单元内部阻抗组成的电路需要交叉连接，其等效惠斯通电桥如图 4 所示。

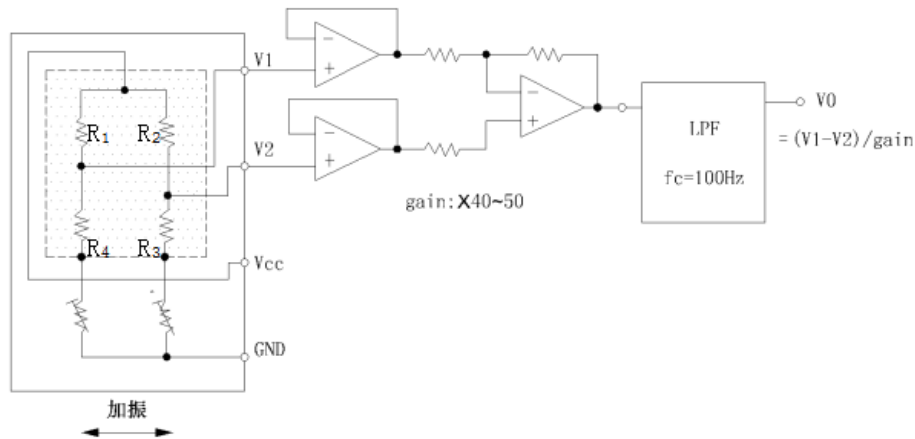


图4 GMR 惠世通电桥

当磁铁感应外界加速度发生偏转时，GMR 单元的 GMR 阻抗受磁铁磁场变化的影响，左边的 R_1 、 R_2 增大，同时右边的 R_3 、 R_4 减小。那么信号输出 V_1 和信号输出 V_2 构成一对差分输出信号 S_x 。在没有外界激励时，差分输出信号 S_{x0} 满足下面的公式 1；在有外界激励时，差分输出信号 S_{x1} 满足下面的公式 2。

$$S_{x0} = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) * V_{CC} \quad (1)$$

$$S_{x1} = \left(\frac{R'_4}{R'_1 + R'_4} - \frac{R'_2}{R'_2 + R'_3} \right) * V_{CC} \quad (2)$$

其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为 GMR 的静态阻抗，而 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 、 R'_4 为 GMR 的动态响应阻抗， V_{CC} 为恒压电源。

理论上， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 相等，但是由于制造加工工艺差异，会造成 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 不相等，只是非常接近，所以在无外界激励时，差分信号 s_{x0} 输出为零或某恒定值。

当有外界激励时， R'_1 、 R'_2 增大， R'_3 、 R'_4 减小，或者 R'_1 、 R'_2 减小， R'_3 、 R'_4 增大。如果外界的加速度激励是间断性的，输出信号表现为一种阻尼震荡正弦波状态；如果外界的加速度激励是连续性的，输出信号表现为一种正弦震荡正弦波状态。

2 传感器性能仿真

2.1 传感器灵敏度仿真

三轴加速度传感器的灵敏度主要由 GMR 单元的灵敏度和飞机仔发生形变的幅度决定。GMR 单元的灵敏度由 GMR 的制作工艺决定，为减小 GMR 单元的磁滞现象对传感器精度的影响，GMR 单元的灵敏度不能太高。那么提高传感器的灵敏度的唯一办法就是提高传感器感应部分（飞机仔）发生形变的幅度（感应同样单位的加速度，飞机仔发生形变的幅度尽可能的大）。而飞机仔只能在它的厚度方向上发生形变，也就是说它的厚度决定了它的单位加速度的形变幅度。

加速度的值取 0.5g、1g、2g、5g、10g、15g、20g、25g、30g ($g=9.8\text{m/s}^2$) 共 9 个点；飞机仔的厚度尺寸取 18 μm 、20 μm 、22 μm 三种尺寸；加速度的方向分为 X、Y、Z 三个轴向，分别通过有限元仿真软件计算出三种响应模态飞机仔发生形变的角度。而飞机仔与 GMR 单元的空间和 GMR 的结构固定，因此可以估算出传感器的灵敏度。仿真结果分析，飞机仔的厚度与飞机仔的灵敏度成反比，18 微米的飞机仔的灵敏度最高，22 微米的飞机仔的灵敏度最低。传感器的线性度非常好，轴向间的交互感应信号也都比较小。

2.2 灵敏度试验

灵敏度试验一是为了验证样品的灵敏度是否符合设计预期，二是验证验证加速度传感器量程范围内输出信号的线性度。抽取 100 个样品，按照图 5 中的灵敏度试验装置分别测试三个轴向（仅调整夹具的放置方式）的加速度感应输出信号。

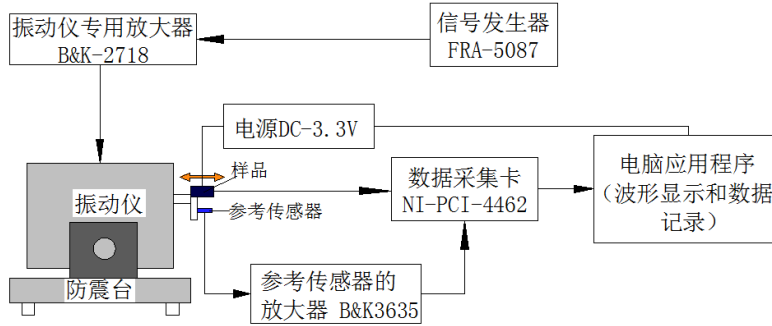


图5 灵敏度试验原理图

验证灵敏度时，振动仪实际输入的最大加速度为 1g，输入振动仪的信号频率为 60 赫兹的正弦波，放大器的倍数为统一恒定值（均使用放大器的同一通道）。记录 GMR 单元的输出信号的峰值，结果显示，X 轴与 Z 轴的灵敏度接近，X 轴的灵敏度均值为 0.9733 mV/g，Z 轴的灵敏度均值为 0.9775 mV/g，Y 轴的灵敏度均值偏低为 0.8856 mV/g。

2.3 线性度测试

验证线性度时，根据传感器的适用频段取四个不同的频率点，分别是 15Hz、60Hz、100Hz 和 500Hz，加速度从 0.5g 到 100g。对 X 轴向、Y 轴向、Z 轴向记录数据如图 6 所示。

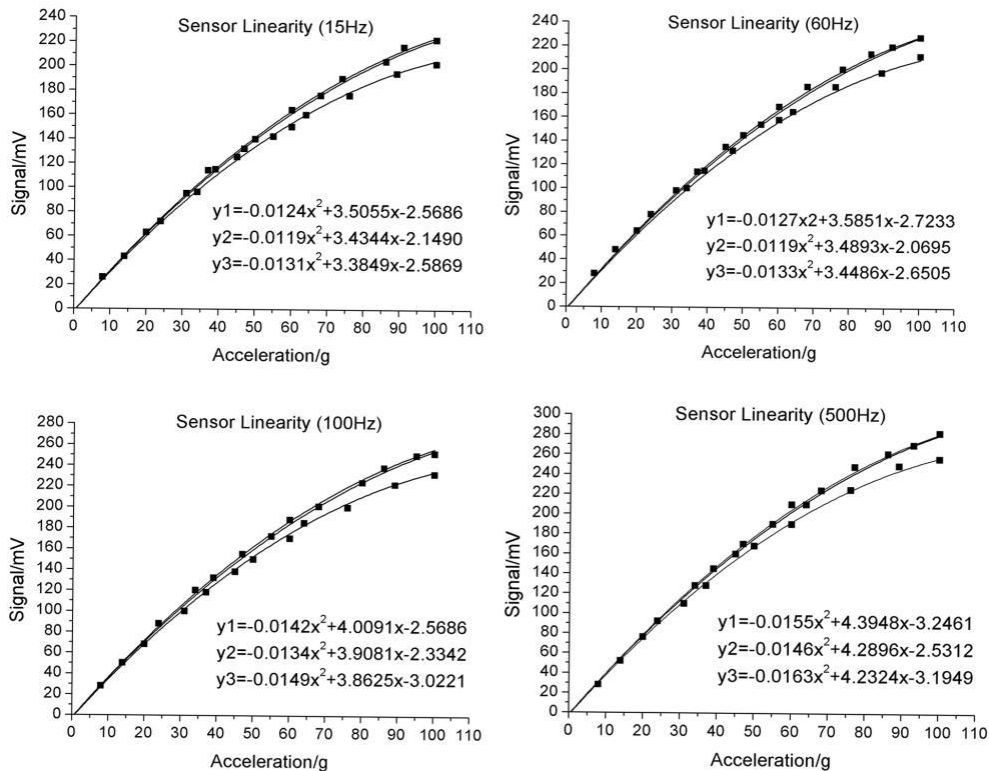


图6 灵敏度线性图

结果显示，在 0.5g 到 50g 的加速度范围内，三个轴向的相关性均接近百分之百，基本上是一条直线，传感器有着很好的线性。在 50g 到 100g 范围内三个轴向的线性均变差，而且输入信号的频率对传感器的线性度没有明显地影响，在低于 500 赫兹的范围内传感器的线性度基本上一致。

3 结论

本文基于 GMR 设计的对称四翼式加速度传感器，经过有限元分析与试验测试，具有良好的线性度，灵敏度较高，可以较好的满足机床主轴在低频段的测试需求。在以往的主轴振动检测系统设计中往往采用三个传感器分别检测主轴

径向与轴向的振动,本文设计的三轴加速度传感器可以同时实现主轴径向与轴向的振动检测,减少了硬件成本。同时,本文设计的三轴加速度传感器的机械感应部分与信号输出部分实现了一体化设计,大大减小了产品体积。

[参考文献]

- [1] 范文超. 基于 Qt 和 Matlab 的数控机床主轴振动监测系统[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 78-81.
- [2] 李卓. 基于经验模态分解与最小二乘法结合的机床主轴不平衡振动信号提取[J]. 装备制造技术, 2020, 2(9): 58-61.
- [3] 张岩, 胡秀芳, 张济国等. 传感器应用技术[M]. 福建: 福建科学技术出版社, 2005.
- [4] 韩秀峰, 刘东屏, 温振超. 从物理发现到成功应用—兼谈 2007 年度诺贝尔物理学奖授予巨磁电阻效应发现者[J]. 科技导报, 2007, 2(24): 17-24.
- [5] 杨敏, 王凤森, 黄险峰. GMR 传感器和 TMR 传感器的性能对比[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1): 127-131.
- [6] 胡佳飞. 基于 GMR 的高性能小型化磁传感器理论与技术研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2014.
- [7] 谭稀, 宋玉哲, 史鑫, 强进, 魏廷轩, 卢启海. 自旋阀多层膜磁化翻转场的调控和磁电阻特性[J]. 材料研究学报, 2020, 34(4): 272-276.
- [8] 刘振涛. GMR 自旋阀材料的制备及性能研究[D]. 浙江省: 杭州电子科技大学, 2019.

作者简介: 王晓燕(1980-), 女, 汉族, 河南郑州人, 硕士, 副教授, 现就职于郑州职业技术学院, 研究方向: 机械自动化控制。

基金项目: 本文系河南省重点研发与推广专项“基于新型传感技术的数控机床状态监测与自适应控制系统研究”阶段成果, 项目编号: 192102210062, 主持人: 王晓燕。