

Research on Micro-Magnetic Fluxgate Integrated-System Based on Projectile-Mounted Speed-Measured^{*}

HAO Jian-wei, LOU Wen-zhong^{*}, WANG Yong-qiang, XU Xiang-hong
(School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: On the base that introduced basic principle of the fluxgate sensors, we analyze the principle and method of measuring the turns of pill. Aim at some lacks of fluxgate now, we design subminiature sensor-detector and relevant circuit, then do sensor system-model. After carry through correlative examination and register waveform of output signal, we can gain pill-turns by calculating the number, the system suffices the require of measuring muzzle velocity by validating.

Key words: projectile-mounted speed-measured; fluxgate; turns-counting; sensor-detector
EEACC: 3120W

基于弹载测速的微型磁通门集成系统研究^{*}

郝建伟, 娄文忠^{*}, 王永强, 徐祥红

(北京理工大学 宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘要: 在介绍磁通门传感器基本工作原理的基础上, 对磁通门如何应用于测量弹丸转数的原理及方法进行了分析。针对现有磁通门的一些不足, 设计了微型化的磁通门探头及与之配套的电路, 从而集成制作出传感器系统样机。对样机进行相关的试验并记录其输出信号的波形, 对其计数后即可获得弹丸的转数, 经验证, 系统基本满足了弹丸初速测量的要求。

关键词: 弹载测速; 磁通门; 计转数; 传感器探头

中图分类号: TM936.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)02-0369-04

现代战争对弹丸炸点精确度的要求越来越高, 在影响弹丸炸点精确度的众多外部因素中, 最重要的就是弹丸初速^[1]。在当前的弹丸初速测试领域, 广泛使用的线圈靶测速方法存在着一些原理性缺陷, 如必须在炮口安装、测速线圈与处理电路相对较脆弱、战斗中容易损坏并且系统的可靠性低、易受外界电磁场的干扰等。

初速测量的弹载方法无需在炮口安装任何测速装置, 而是在引信体内安装计转数传感器, 这就在很大程度上克服了线圈靶测速方法的不足。对于新出现的用于炮口初速测量的磁阻传感器, 由于国内尚未掌握其核心技术, 所以运用国内技术较为成熟的磁通门传感器来进行炮口初速测量更为可行。

1 磁通门的工作原理

测定初速的关键是如何选用有效的传感器。磁通门对弱磁场测量十分有效, 它具有很高的分辨力和良好的方向性, 可将环境磁场物理量转化为相应的电势信号, 从而实现弹丸炮口初速的测量。与其他类型磁传感器相比, 磁通门具有分辨力高, 测量弱磁场范围宽, 能直接测量磁场分量和适于在高速运动系统中使用等特点。磁通门传感器是利用铁磁材料的各向异性磁电阻效应制作的一种能够测量磁场大小和方向的传感器^[2]。当磁芯处于周期性过饱和和工作状态时, 感应电势中就会出现随环境磁场强度而变的偶次谐波分量。对环境磁场来说, 就好比有一道“门”, 通过这道“门”, 相应的磁通量即被调制,

基金项目: 总装备部预研基金项目资助(9140A05040307BQ0112)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-01-02

并产生感应电势。因为二次谐波幅值在所有的偶次谐波分量中最大,所以普遍采用的检测方法是二次谐波法。

磁通门由传感器探头和相关电路组成,探头包括高磁导率的磁芯及外绕的激磁、感应线圈,电路包括激磁电路和信号处理电路两部分。激磁电路的作用就是产生激励磁场,使传感器处于周期性过饱和和工作状态,以便产生磁通门信号;信号处理电路的作用是把磁通门信号中有效的偶次谐波信号(即二次谐波)提取出来,通常包括选频放大(带通滤波)、相敏检波、低通滤波等环节^[3]。

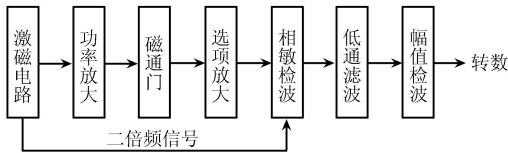


图1 磁通门及其处理电路工作原理框图

对于最常见的双芯结构磁通门,当沿磁芯轴向有外磁场 H 不为零时,对平行放置的二磁芯分别施加方向相反的激磁电流,由于在磁芯中同时存在交变的饱和激磁磁场及被测外磁场,在前半周期内,被测外磁场的方向跟激磁磁场的方向相同,它加强激磁磁场,使磁芯提前饱和;对于后半周期,被测外磁场的方向跟激磁磁场的方向相反,它抵制激磁磁场,使磁芯滞后饱和。由于电流在感应线圈中产生的感应电势(即奇次谐波)为零,因此在感应线圈中将只存在由外界直流磁场引起的偶次谐波。

信号处理电路先把外磁场产生的感应电势信号(即磁通门信号)通过选频放大电路进行放大并滤除其中的一些噪声信号(主要是基波和三次谐波分量);通过相敏检波电路,滤除磁通门信号中其它各次谐波信号,仅留下二次谐波信号;最后通过低通滤波电路滤除脉动分量,将平滑处理后的二次谐波信号传输到后续电路以便作进一步分析。

综合考虑磁通门的探头及激磁电路的各项参数,在考虑到聚磁、退磁效应后,探头信号二次谐波分量的幅值可表达如下:

$$E_{2m} = - \frac{16}{3} \times 10^{-8} f_1 \mu_0 W_2 S H_m \left\{ \left[1 - \left(\frac{H_s - H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[1 - \left(\frac{H_s + H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: f_1 为激磁磁场频率, μ_0 为铁芯未饱和时的相对磁导率, W_2 为感应线圈匝数, S 为磁芯截面积, H_m 为激磁磁场强度幅值, H_s 为铁芯饱和磁场强度, H_0 为外界磁场强度的轴向分量值。此时与之对应的二次谐波分量的最大灵敏度表达如下:

$$G_2 = - 16 \times 10^{-8} g \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{d}{C_1}} \right) f_1 \frac{4}{N} W_2 S \quad (2)$$

式2中: g 为聚磁系数, N 为退磁系数, d 为二磁芯距离, C_1 为铁芯形状尺寸系数。

由以上分析可知,磁通门探头仅对其轴向磁场分量敏感,具有良好的矢量响应性。

2 计转数初速测量原理

将磁通门传感器的敏感轴按其于弹轴(弹体运动方向)成一定夹角布置,当弹丸围绕弹轴作旋转运动时,地磁场强度矢量 H 在磁通门敏感轴上的分量相应按一定规律变化,求得此变化规律就可以得到弹丸的转动情况^[4]。

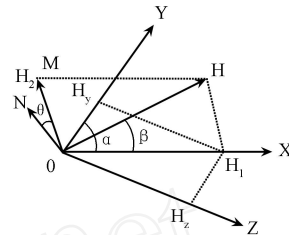


图2 弹轴、磁通门敏感轴与地磁场强度方向的关系

通常认为,在弹丸运动过程中,弹丸旋转平稳并且其弹道为一直线(弹轴)。如图2所示, X 为弹轴方向, Y 为磁通门传感器敏感轴的方向,二者成一固定夹角, Z 是 $X-Y$ 平面内与 Y 轴正交的轴向。在弹丸运动过程中有如下情况: $H-X$ 平面是静止的(二轴向夹角为 α),而 $X-Y$ 平面以弹轴 X 为中心转动。

地磁场强度矢量 H 在弹轴 X 及其垂直方向矢量 \overrightarrow{OM} 上的分量分别为:

$$| H_1 | = | H | \cos \alpha, | H_2 | = | H | \sin \alpha \quad (3)$$

由点 M 向 $X-Y$ 平面作垂线,得垂足点 N ,则矢量 \overrightarrow{ON} 为 H_2 在 $X-Y$ 平面内的分量,矢量 \overrightarrow{OM} 与矢量 \overrightarrow{ON} 的夹角即为弹体旋转角度。可得地磁场强度矢量 H 在 $Y、Z$ 方向上的分量分别为:

$$\begin{aligned} | H_y | &= | H | \cos \alpha \cos \beta + | H | \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \\ | H_z | &= | H | \cos \alpha \cos \beta - | H | \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \end{aligned} \quad (4)$$

由于式4中的 $\alpha、\beta$ 在弹丸的运动过程中均可视为常量,因此在弹丸运动过程中, $H_y、H_z$ 的第一项可看作常数,即将其作为由地磁场产生的直流电压,在信号处理电路中可将其去除。这样只有 $H_y、H_z$ 的第二项 $H_y、H_z$ 与转角有关,所以它们产生的电压信号就是所需的被测信号。由于 H_y/H_z 为一常量 $\tan \beta$,所以利用单轴磁通门就可以完全测得转角信号。

当敏感轴 Y 与弹轴 X 垂直,即 $\beta = 90^\circ$ 时,此时输出电压信号 u 最大, $u = k | H | \sin \alpha \cos \beta$ (k 为磁通

门的灵敏度), 在以下分析中均设定 $\alpha = 90^\circ$ 。由于传感器输出电压是弹丸转角的正(余)弦函数, 其波形个数即为相应的弹体转数。

3 磁通门微型化设计方法

3.1 磁通门现行状况

磁通门技术并不仅仅是简单为生产磁力计而发展的技术, 它的技术、原理在许多领域都有着广泛的应用。虽然现今磁通门已被广泛使用, 国际上技术也较为成熟。但是迄今为止, 世界上仅有少数几个国家具有先进磁通门的开发和生产能力, 技术仍被掌握在极少数的单位里, 我国尚未具有独立的磁通门知识产权。

传统的磁通门传感器由于采用了较大体积的磁芯材料及绕制的线圈, 使得整个系统无论体积、重量甚至制作花费都是相对巨大的。目前国内可选用的磁通门传感器具有体积大、功耗高、集成度低等缺点, 无法在引信上直接应用。如选用国外高集成度的磁通门产品, 在其基础上进行二次集成, 不仅价格极高, 装备时货源、渠道也均难以保证。所以开发微型化的磁通门有着迫切的需要。

采用微技术设计并制造的微型化传感器, 并不是一件轻而易举的事情。磁通门的各种性能, 尤其是来自磁芯和前端电路的噪声会随着尺寸的减小而明显增大。但是微型传感器与传统传感器相比, 有着无法比拟的优点: 首先是体积小, 只有传统磁通门的几十分之一, 甚至几百分之一, 重量也大幅度下降; 其次是微磁通门是将微机械和集成电路合为一体的新型功能器件, 其功耗低、响应快、可靠性高。

3.2 微型磁通门探头设计

鉴于传统磁通门的结构较为复杂, 抗过载能力不足, 体积大无法直接安装于引信等不足, 微型磁通门的探头铁芯材料选用钴基非晶合金软磁材料 VITROVAC6025 ($\text{Co}_{66.5} \text{Fe}_{3.5} \text{Si}_{12} \text{B}_{18}$), 利用它可制作出一个低噪声高精度的、尺寸约为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的磁通门探头^[5], 从而实现了磁通门探头的微型化, 可安装在弹丸的引信上。

传感器探头的制作过程大致如下:

(1) 制作好内骨架后, 在环形内骨架的外环槽内卷绕薄带铁芯, 卷绕完成后在内骨架槽内涂覆黏合剂以固定铁芯;

(2) 在内骨架上缠绕漆包线作为激磁线圈, 浇注黏合剂, 使得内、外骨架相对固定;

(3) 在矩形外骨架上缠绕漆包线作为感应线圈,

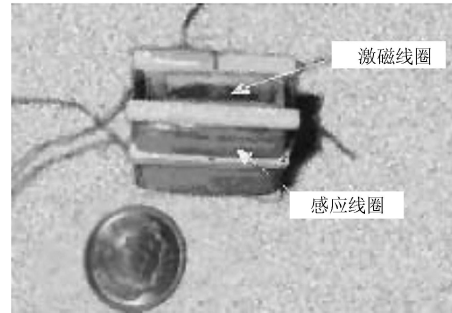


图 3 微磁通门探头模型

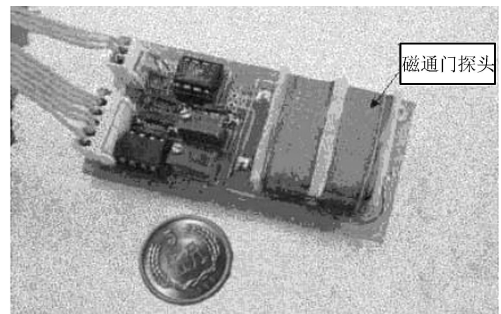


图 4 微磁通门探头及其处理电路系统样机

在感应线圈和外骨架之间涂覆黏合剂, 以使线圈固定;

(4) 将激磁线圈和感应线圈的端线分别引出, 并对它们标记以便与电路连接。

微型磁通门探头的主要技术改进如下:

(1) 使用的薄带式铁芯带宽较大, 可解决常见铁芯抗过载能力不足、体积大的缺点;

(2) 骨架材料为微晶陶瓷 MACOR[®], 其热膨胀系数与铁芯几近相同, 与磁绝缘、有较好刚度^[6];

(3) 钴基非晶合金具有很高的硬度 (HV 约 900)、很高的抗拉强度和较高的磁导率 (约为 5000), 其磁饱和强度为 $0.53 \sim 0.59 \text{ T}$;

(4) 探头磁芯使用环形结构, 具有很好的结构平衡性和对称性, 环形的形状能够获得较低的噪声和比较高的灵敏度;

(5) 铁芯缠绕方式采用卷绕方式, 可以减小涡流等带来的噪声, 缓解趋肤效应, 以便选用较高的激磁频率。

4 实验方案及结果

为验证微型磁通门对初速测量是否可行, 进行了如下试验: 把磁通门探头及其相关电路组成的测速系统样机置于仿 25 mm 枪榴弹的弹体内, 调整样机位置, 使传感器位于弹体轴线上, 将弹体与手摇离心机转轴同轴安装。启动电机, 使其在较短的时间内达到稳定工作状态, 摇动离心机手柄带动测试系统进行试验, 可得到磁通门电压信号波形^[7]。

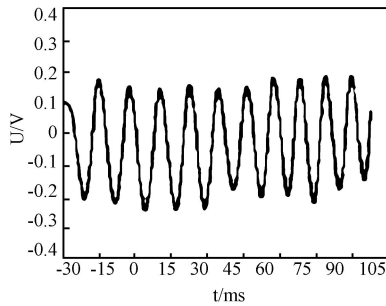


图5 试验得到的磁通门信号波形

表1 试验得到的计转数实验结果

试验序号	试验所得的转数	误差
1	1023	0
2	1025	2
3	1021	- 2
4	1022	- 1
5	1022	- 1
6	1023	0

经过分析曲线,传感器输出电压波形为正(余)弦波,与理论分析相符,其波形个数即为弹体转数;当转轴旋转速度为 4390 r/min,预设转数为 1023,得到的实验结果表明:虽然转数测量的误差大小有区别,但是都很小,即该系统的准确性、可靠性很高,完全可以满足实际的引信转数测量要求。



郝建伟(1983-),男,山西太原人,2006级硕士,主要从事微系统集成技术研究, haojwxt@bit.edu.cn.



娄文忠(1969-),男,陕西西安人,工学博士,副教授,主要从事微系统集成技术研究, louwz@bit.edu.cn.

5 结论

本文提出的微型磁通门传感器,实现了利用环境磁场的变化间接地测出弹丸的炮口初速,并将传感器与处理电路集成于一体,有效地缩小了体积,降低了功耗,实现了与引信的一体化设计。经验证,制作出一种立足国内技术,灵敏度高、性能稳定、高集成度的弹丸炮口初速测量系统样机。

参考文献:

- [1] 俞卫博,于新峰. 基于引信炮口磁探测的单线圈被动测速原理[J]. 测试技术学报,2006,20(4):364-367.
- [2] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995. 5.
- [3] 谢子殿,朱秀,周鑫. 磁通门信号处理电路的设计与研究[J]. 黑龙江科技学院学报,2003,13(2):47-50.
- [4] 李朝晖,张河,江小华. 基于磁通门技术的空炸引信计转数系统研究[J]. 弹道学报,2003,15(2):77-82.
- [5] 杨会平. 一维磁通门磁力计的研究[D]. 华中科技大学,2005.
- [6] 娄文忠,孙运强. 微机电系统集成与封装技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007. 3.
- [7] 李朝晖,江小华,张河. 基于磁阻式传感器的引信转数测量方法[J]. 传感器技术,2003,22(5):55-57.