

文章编号: 2095-4980(2015)05-0775-04

用于线圈磁轴测量的滤波放大电路的设计改进

王科, 代志勇*, 廖树清, 杨治勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了提高脉冲紧线法的测量精确度, 对测量系统中的信号处理电路进行改进, 首先根据电路的幅频、相频响应得出导致信号畸变的原因, 然后根据理论计算得到磁轴倾斜(Tilt)导致的振动波形是基波为 30 Hz 的方波, 磁轴偏轴(Offset)导致的振动波形是 5 ms 的短脉冲叠加在 Tilt 波形的变化沿。新的信号处理电路可以实现 30 Hz~3 000 Hz 之间的信号等幅放大、无相移传输, 基本实现了信号基波及主要谐波的无失真传输, 使测量结果中磁轴偏轴和磁轴倾斜信号容易区分, 减小了测量误差。

关键词: 磁轴测量; 信号处理; 螺线管; 滤波

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0775

Design and improvement of filter circuit for solenoid magnet axis measurement

WANG Ke, DAI Zhiyong*, LIAO Shuqing, YANG Zhiyong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The signal processing circuit in pulse taut wire magnetic axis measurement system is improved in order to improve the measurement accuracy. Firstly, The reason of signal distortion is analyzed according to the amplitude frequency and phase frequency responses of the circuit. Then the theoretical computation results show that the Tilt error caused a 30 Hz square wave, and the Offset error caused an extra 5 ms pulse at the edge of the square. The proposed signal processing circuit, which can transfer signals from 30 Hz to 3 000 Hz undistortedly, satisfies the demands of this system. The measurement results show that the axis Tilt and Offset errors are easily to distinguish, and the measurement error is reduced.

Key words: magnetic axis measurement; signal processing; solenoid; filter

脉冲紧线磁轴测量方法因系统结构简单, 操作方便, 灵敏度高, 常被应用于高性能螺线管线圈的磁轴测量^[1-2]和加速器束线准直安装效果检验^[3-5]。脉冲紧线法测量系统基本原理为: 将 1 根 $\Phi 0.1$ mm 的铍铜合金丝绷紧, 置于线圈几何轴上, 丝的一端固定, 另一端经滑轮悬挂一个重物绷紧细丝, 丝上通以脉冲电流。固定合金丝两端的支架、放置线圈及探测器的平台均是气垫支撑的三维高精度调节平台。被测线圈加载励磁电流, 当线圈磁轴与几何轴有偏差时, 被测线圈的横向磁场分量(定义丝线方向为轴向)使加载脉冲电流的丝线受到洛伦兹力的作用而产生机械震动, 其振幅与横向磁场分量沿轴向的积分值、丝线上电流脉冲的宽度和幅度成正比^[6]。一对光学位移探测器置于被测线圈近旁, 分别探测绷紧金属丝线在 X,Y 两个方向的振动, 并将振动转换为电信号, 经滤波放大电路后输入数字示波器, 从而获得被测线圈磁轴信息^[7]。因为该测量系统灵敏度高, 所以诸多因素如场地震动、气流、地磁场、噪音以及连接探测器的滤波放大电路等都对测量精确度造成了重大影响^[8]。原有的滤波放大电路, 输出信号既不稳定又出现失真。

本文专门针对滤波放大电路进行研究, 通过优化设计及波形调试, 为后续的相关研究提供一个优质信号获取平台。

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2014-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11405163)

*通信作者: 代志勇 email:caepacc@sina.com

1 原有电路输出信号失真原因分析

金属丝的振动由位于被测线圈旁的光电探测器测量，探测器的发射端为发光二极管，接收端为光电转换电路，金属丝置于中间的槽中，当金属丝发生振动时，照射到接收端基极的光强会发生变化，因此集电极的电流会随之改变，改变值正比于金属丝振动位置。

为获取集电极电流的微弱变化，采取的接线方式见图 1。 U_{out+} 和 U_{out-} 之间输出电压是直流电压信号和金属丝振动产生的小信号的叠加。由金属丝振动产生的电压变化波形幅度大约 10 mV，而直流电压信号约为 5 V，为了检测出小电压信号必须对信号进行滤波放大处理。

此前一直使用高通滤波器来滤掉直流信号^[1]，接线方式见图 2。其中 C_2 是为了滤掉高频干扰信号， C_2 左边是一高通滤波器，用来滤掉直流信号。但是通过该电路获得的丝线振动波形与仿真结果的差异很大，见图 3，仿真结果与法国 AIRIX 上的测量结果^[2]相似，图 3 的测量结果是因为信号处理电路导致了畸变，信号畸变后一旦叠加 Offset 信号(一般叠加在 Tilt 波形平顶的变化沿)，将很难从测量信号中准确地分辨出 Tilt 信号，这严重影响了 Tilt 的测量精确度。下面对导致信号畸变的原因进行分析。

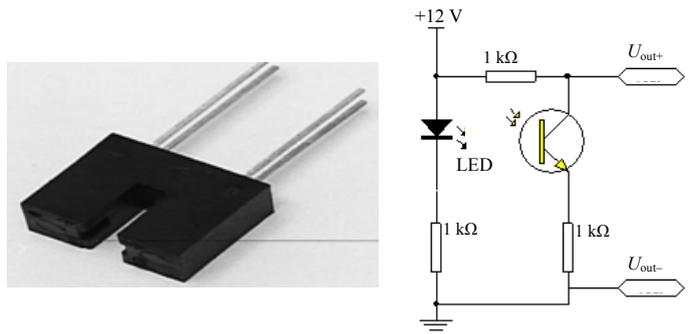


Fig.1 HOA1873-11 photodetector and wiring layout of the photodetector
图 1 光电探测器及其接线图

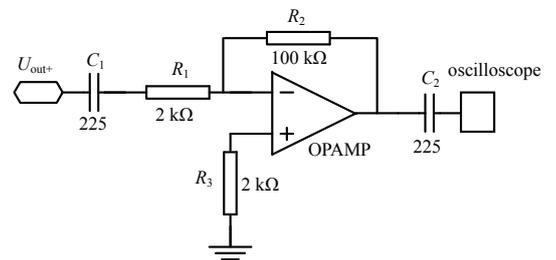


Fig.2 Signal processing circuit
图 2 信号处理电路

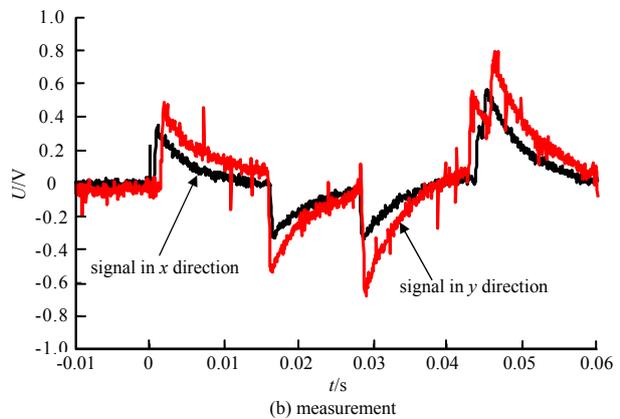
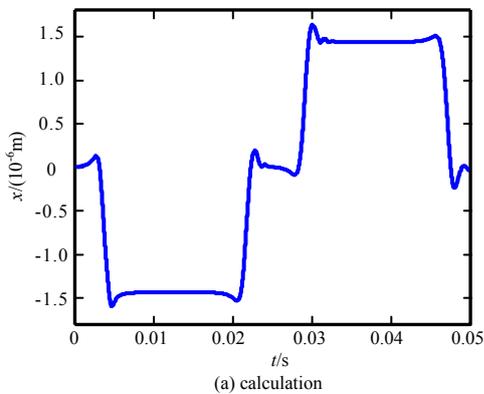


Fig.3 Calculated waveform(left) and measured waveform(right) of Tilt error
图 3 单纯 Tilt 情况下计算波形(左)与测量波形(右)

用放大电路处理频率复杂的信号时，产生的失真可分为幅频失真和相频失真。幅频失真是由于放大电路对不同频率信号的放大倍数不一样导致的总体信号失真，而相频失真是指放大电路处理不同频率信号时产生的相移与对应频率之比不是常数，导致不同频率的信号在时间轴上有错位，从而与原始信号产生差异^[9]。

计算波形是周期性方波信号，从图 3 中给出的一个周期的信号可看出，实际的信号应该是频率约 20 Hz 的方波，而方波的傅里叶级数展开是由基波及 3,5,7 等奇次谐波组成，谐波的权重反比于谐波次数 n ，越高次谐波权重越低，在分析时更高次谐波的权重很低，对信号影响很小。

对信号处理电路进行分析，首先考虑 C_2 左边的高通滤波器，传递函数为 $G(s) = -50 \times \frac{4.4 \times 10^{-3}s}{4.4 \times 10^{-3}s + 1}$ ($s=j\omega$ 是拉普拉斯域复变量， ω 是角频率)，其对应的 20 Hz(基波)到 140 Hz(7 次谐波)之间的幅频响应曲线及相频响应曲线见图 4。从图 4 可分析信号处理电路存在的幅频失真：基波放大倍数为 24.2，3 次谐波放大倍数为 42.7，5 次谐波放大倍数为 47。至于相频失真，由于信号反向不会影响测量结果，根据 $\Delta t = (\Delta\phi - \pi) / \omega$ ($\Delta\phi$ 是对应谐波的相移， ω 是谐波的角频率)可以得出整个信号反向后基波在时间轴上移位 8.5 ms, 3 次谐波移位 1.5 ms, 5 次谐波移位 0.55 ms，可见基波的幅频响应失真和相频响应失真都是最大的，如果经过后面的电容，相对时间错位将更加严

重,这说明信号处理电路的设计本身是有问题的。

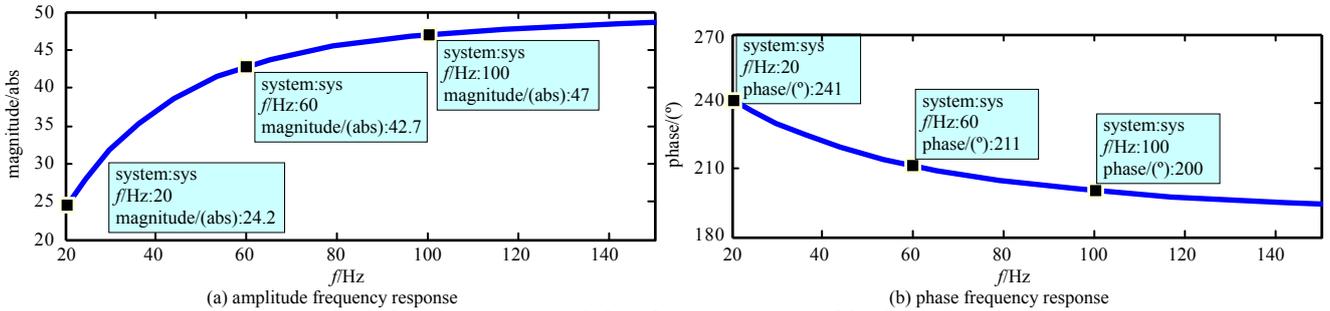


Fig.4 Amplitude frequency response and phase frequency response of the signal processing circuit

图 4 放大滤波电路的幅频响应及相频响应

2 滤波放大电路的改进设计

为了改进放大电路的性能,在原来电路的基础上减小了高通滤波电路的截止频率,并且在后端添加低通滤波器来补偿相移减小失真,兼顾对高频干扰信号进行滤波处理。

图 5 是改进后的电路及其 Bode 图,其传递函数为: $G(s) = 50 \times \frac{0.02s}{8.8 \times 10^{-7}s^2 + 2.0044 \times 10^{-2} + 1}$, 对应的不同谐

波放大倍数为:基波 50, 3 次谐波 50, 5 次谐波 50, 由相频响应根据 $\Delta t = \Delta\phi / \omega$ 可算出经过处理后基波在时间轴上的移位为 $-2.68 \mu s$, 3 次谐波移位为 $-39.26 \mu s$, 5 次谐波为 $-42.7 \mu s$, 即经过信号处理电路后基本不存在幅频响应失真,至于相频响应失真,基波只有 $2.68 \mu s$, 高次谐波在 $40 \mu s$ 左右,对于周期为 $50 ms$ 的波形基本可忽略不计。

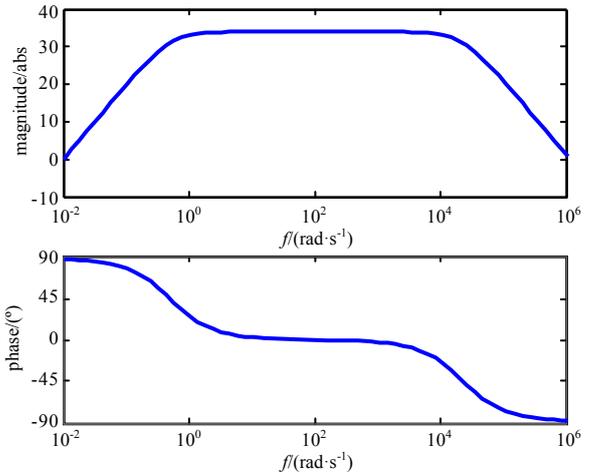
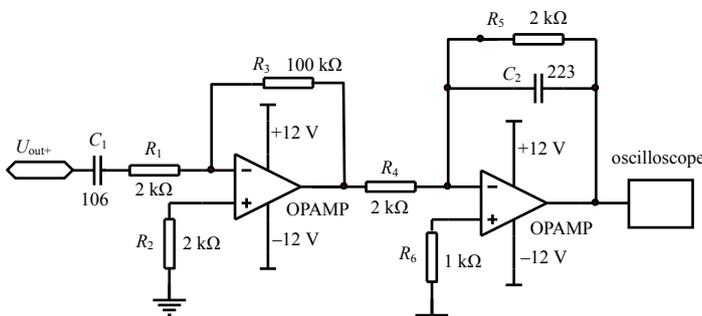


Fig.5 New signal process circuit and its Bode diagram

图 5 改进后的信号处理电路及其对应的 Bode 图

3 实验测量结果

图 6 给出了改进信号处理电路后获得的磁轴倾斜测量结果,该波形能够与图 3 中的数值计算结果很好地对应。

实际测量中磁轴倾斜与磁轴偏轴是同时存在的,2 种波形理论上差异很大。改进信号处理电路后,将很容易从实际信号中读出磁轴倾斜信号的信息,避免了读数时互相干扰引入的误差。图 7 给出了磁轴倾斜与偏轴同时存在情况下金属丝的理论计算振动波形,以及转换为电信号后的测量波形。可以看出,新的信号处理电路基本可以实现信号的无失真传输,Offset 信号基本不会影响 Tilt 信号的读取。至于平顶部分的波动是由环境因素的波动导致,因此致力于从测量方法的改进上来解决这一问题。

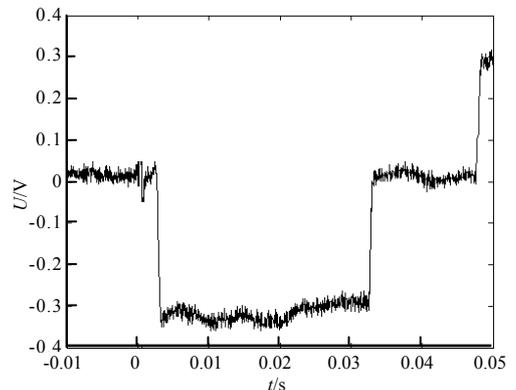


Fig.6 Waveform of Tilt error measured by new circuit

图 6 改进信号处理电路后测得的磁轴倾斜波形

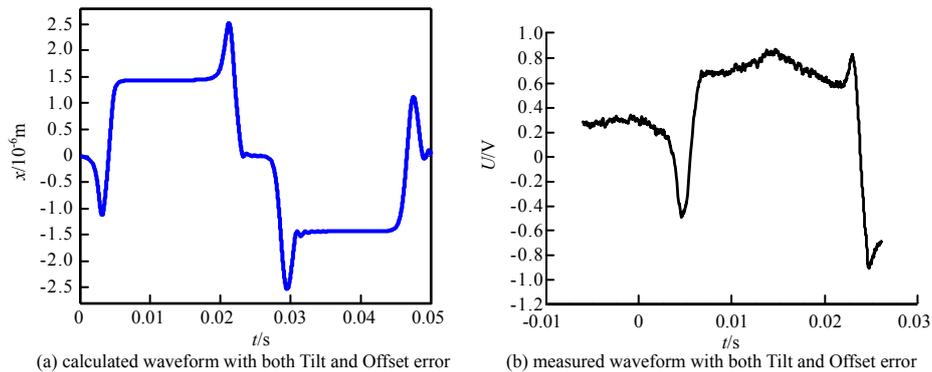


Fig.7 Calculated waveform and measured waveform with both Tilt and Offset error

图7 理论计算的金属丝振动波形与测量波形

4 结论

通过理论计算结果与测量结果的比较,发现了之前信号处理电路的不足之处,并分别对信号处理电路幅频响应、相频响应进行了分析,得到了导致信号畸变的原因。针对信号的特点设计了新的信号处理电路,实现了信号的无失真传输,使得 Offset 和 Tilt 波形容易区分,减小了测量误差。

参考文献:

- [1] 章文卫,李洪,王华岑,等. 采用脉冲悬丝法测量强流加速腔聚焦场磁轴[J]. 强激光与粒子束, 1996,8(2):203-208. (ZHANG Wenwei,LI Hong, Wang Huacen,et al. Pulsed wire magnetic field alignment measurements on a high current induction cell[J]. High Power Laser and Particle Beams. 1996,8(2):203-208.)
- [2] Bonnafond C,Villate D. Alignment techniques for the high current AIRIX accelerator[C]// Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. IEEE:[s.n.], 1999,2:1381-1383.
- [3] 章文卫,潘海峰,李洪,等. “神龙一号”加速器聚焦磁场准直[J]. 强激光与粒子束, 2002,14(4):621-624. (ZHANG Wenwei, PAN Haifeng,LI Hong,et al. Magnetic field alignment for a 20 MeV linear induction accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002,14(4):621-624.)
- [4] YONG Daizhi,TONG Xieyu. Alignment techniques for the Dragon-I LIA[J]. Chinese Physics C, 2009,33(9):789-791.
- [5] Waldron W L,Abraham W J,Arbelaez D,et al. The NDCX-II engineering design[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators,Spectrometers,Detectors and Associated Equipment, 2014,733:226-232.
- [6] Arbelaez D,Kwan J W,Lipton T M,et al. Magnetic alignment of pulsed solenoids using the pulsed wire method[C]// Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. New York:[s.n.], 2011:2087-2089.
- [7] Takakuwa J H,Jung J Y,Kehl J T,et al. Design and fabrication of the lithium beam ion injector for Ndex-ii[C]// Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. New York:[s.n.], 2011:2032-2034.
- [8] 杨治勇,代志勇,谢宇彤,等. 时变透镜设计理论研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):157-161.(YANG Zhiyong, DAI Zhiyong,XIE Yutong,et al. Design of time-varying magnetic lens in theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):157-161.)
- [9] 杨栓科. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2003. (YANG Shuanke. Analog Electronic Technology Foundation[M]. Beijing:Higher Education Press, 2003.)

作者简介:



王科(1990-),男,陕西省商洛市人,硕士,从事加速器束测、磁测方面的工作.email: 358460941@qq.com.

杨治勇(1986-),男,重庆市人,在读硕士研究生,从事加速器理论研究。

代志勇(1968-),男,湖北省金山县人,研究员,博士,从事加速器物理专业。

廖树清(1979-),男,福建省永定县人,博士,助理研究员,从事加速器工作。