

doi: 10.3788/gzxb20174601.0114003

脉冲激光探测方位角磁电检测技术

徐孝彬, 张合

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要: 针对常规弹药脉冲激光周向探测系统无法精确获取目标方位信息的问题, 设计了基于磁电检测的单光束激光引信全向方位角探测方案. 对磁电检测系统进行建模, 建立圆柱形永磁体转动磁场模型, 推导出磁阻传感器所测位置磁场的解析式, 验证所测磁场为一正弦磁场信号. 依据此正弦信号, 设计了上升沿阈值周期检测算法, 并运用 FPGA 与 TDC-GP21 对激光回波出现时间与电机转速信号周期进行高精度时间间隔测量实现方位角的解算. 依据方案设计原理样机并编写上位机程序, 进行方位角探测实验. 实验结果表明: 磁电检测系统采用多重屏蔽方法, 能有效抑制电磁干扰; 并能实时监测电机转速, 实现方位角解算, 方位角解算误差在 $\pm 2^\circ$ 以内. 满足激光引信方位角测量的高精度、抗干扰能力强等要求.

关键词: 脉冲激光探测系统; 激光引信; 磁电检测; 永磁体; 磁场模型; 时间测量; 方位角; 电磁屏蔽

中图分类号: TJ43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0114003-9

Pulsed Laser Detection Azimuth Magneto-electric Detection Technology

XU Xiao-bin, ZHANG He

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Pulse laser fuze of conventional ammunition cannot accurately obtain the azimuth information of target. Therefore, the circumferential azimuth detection scheme of single beam laser fuze was designed based on magnetic-electric detection. The magnetic-electric detection system was modeled; a cylindrical permanent magnet rotating magnetic field model was established. The analytic expression of magnetic position which is measured by magneto resistive sensor was deduced. According to the analytical expression of the magnetic signal, rising along the cycle threshold detection method was put forward. The high precision azimuth resolution was achieved by using the method of combining FPGA with TDC-GP21 to measure high precision time, which is the time of laser echo signal appearance and the period of motor speed signal. According to the scheme, prototype was designed, and the program of the host computer was finished. The experiment of azimuth angle detection was carried out. The experimental results show that, the magnetic-electric detection system uses multiple shield method which can effectively suppress electromagnetic interference. Meanwhile, this system can achieve real time monitoring of the motor speed and range angle solver. Azimuth solution calculation error is in plus or minus 2° . The magnetic-electric detection system can meet the requirement of high precision and anti-interference ability of the azimuth angle measurement of laser fuze.

Key words: Pulsed laser detection system; Laser fuze; Magneto-electric detection; Permanent magnets; Magnetic model; Time measurement; Azimuth; Electromagnetic shielding

OCIS Codes: 140.3538; 140.3460; 120.1880; 120.4630;

基金项目: 武器装备预先研究项目 (No. 51305020104) 资助

第一作者: 徐孝彬 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光探测与目标识别. Email: njstxxb@163.com

导师 (通讯作者): 张合 (1957-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为探测制导与控制. Email: hezhangz@njust.edu.cn

收稿日期: 2016-07-04; 录用日期: 2016-08-31

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着激光技术和半导体技术的发展,具备较强抗电磁干扰能力的激光引信已经广泛应用于各种炮弹、航弹、无人机、战术导弹及战略导弹中^[1-3].激光近炸引信是利用激光束探测或感知目标的光电引信^[4],它通过发射光学系统将特定幅值、时域和空域特性的激光束对目标进行照射,光电接收系统接收目标反射回波,通过对目标回波信号的分析以及方位角的判断来确定战斗部定向起爆^[5].而战斗部实施定向起爆对来袭目标进行有效杀伤的关键是引信在弹目交会的过程中最佳起爆方位角的确定^[6].

对于目标方位角探测,国内外在激光告警、水下激光探测等方面已有大量研究.郎文杰^[7]通过基于二维交叠掩膜编码的全方向激光探测方法实现识别角度分辨率小于 30° ;掩膜编码型结构简单,但需要面阵 CCD 多窗口探测器.张维安^[8]等提出针对散射激光的全向激光告警系统定位技术,获取敌方威胁激光源相对系统的方位和距离信息;但鱼眼镜头焦距短、探测器灵敏度和分辨率相对较低、探测器各像元响应有差别等因素,对定位模型带来了一定的误差.程玉宝^[9]等设计了由 6 个光学劈尖构成的激光方位探测光学窗口和探测电路组成的激光方位探测系统,该方案具有准确度高、反应快等优点,但为了提高方位分辨准确度,必须使用足够多的光学窗口和探测器,使得体积大,信号处理复杂;以上方位角探测准确度较高,但方式结构复杂,信号处理要求高,占用体积较大,无法满足激光引信小型化的要求.在引信方位角探测方面,国内研究主要集中在无线电方面.北京理工大学针对微波体制的无线电引信做过利用微带天线进行目标定方位探测的研究,目标方位识别准确度大约为 90° .乐以长对电容引信的目标方位探测进行了研究,通过 3 个接收电极获取目标的方位信息,可将目标方位中心确定在 30° 范围内^[10].北京理工大学、8358 所等对激光引信的目标方位探测进行了研究,通过多个激光器与探测器实现目标方位探测,可以将目标方位中心确定在 22.5° 的范围之内^[11].以上技术都通过多个发射与接收系统进行方位角测量,但是准确度都未达到 10° 以内,无法实现高准确度测量.

本文设计了单光束激光引信全向方位角探测系统,提出方位角高准确度磁电检测技术,对磁电检测系统进行建模,通过实时测量激光回波信号与电机每周期转速,实现对目标方位角的高准确度检测.对方位角磁电检测系统进行系统抗干扰实验、电机测速实验以及高准确度方位角测量实验.

1 单光束激光引信全向方位角探测系统

单光束激光引信全向方位角探测系统由脉冲激光发射系统(脉冲激光发射电路,半导体激光器,激光准直透镜)、高速扫描系统(高速直流电机、全反平面镜)、脉冲激光接收系统(激光聚焦透镜,光电探测器,接收放大电路)、方位角检测系统和信号处理系统组成^[12].激光引信全向方位角探测系统结构图如图 1.激光引信全向方位角探测系统工作原理:弹丸发射后,供电系统开始工作,经一定延时后,电路中产生脉冲信号,点亮激光器.激光器发出激光束后经过准直透镜后压缩成发散角很小的光束,光束入射到发射全反平面镜上.随着反射平面镜高速旋转,反射光束完成空间全向动态扫描.反射光束通过透光窗口在空气中传输,遇到目标后形成漫反射光束,漫反射光束通过接收反射平面镜反射到激光接收聚焦透镜上,光束汇聚进入光电探测器,获取回波信号.同时,电机控制模块控制电机进行稳速转动,磁阻传感器探测电机轴端磁片磁场,输出一个交变磁电信号.两路信号分别经过滤波电路滤波后,分别被送入放大器中进行信号放大,整形后送到

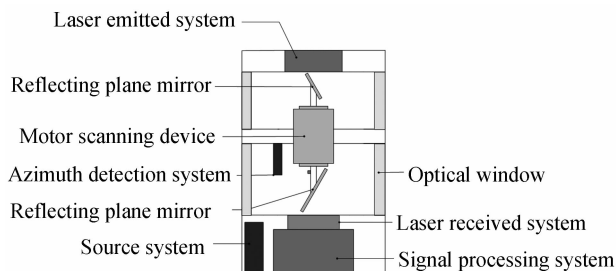


图 1 激光引信全向方位角探测系统结构

Fig. 1 Structure diagram of circumferential azimuth detection system of laser fuze

FPGA 中,将所有数据进行信号处理后,即可得到目标所在方位信息.激光引信全向方位角探测系统工作原理如图 2.

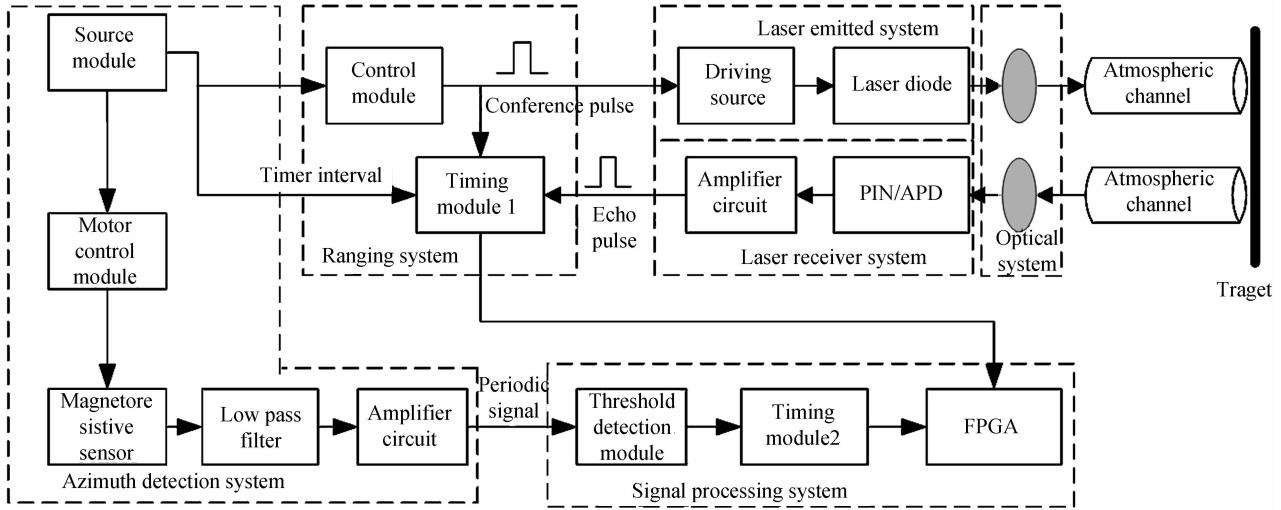


图 2 激光引信全向方位角探测系统工作原理

Fig. 2 Block diagram of circumferential azimuth detection system of laser fuze

2 磁电检测系统建模

磁电检测系统感应磁片安装于高速微型直流电机一端,磁阻传感器中心与磁片中心齐平.电机转动,感应磁片磁场方向交替变化,磁电传感器检测到交变磁场后,输出具有相同变化规律的电信号,将电信号滤波、放大获得转速周期信号.磁电检测系统结构示意图如图 3.本文选用 HMC1021 单轴磁阻传感器,感应磁片选用圆柱形永磁体,根据永磁体与磁电检测模块的相对运动,磁电检测系统测量的是以 o 为圆心,半径为 r 圆周上的 z 轴磁场分量.

对圆柱形永磁体进行磁场分析,考虑如图 4 所示的轴向均匀磁化永磁环,其磁作用可理解为由柱面上的一层环形电流片产生.由于是均匀磁化,永磁体在宏观上表现为只有表面电流,无体电流存在^[13].根据磁环的轴对称性,采用柱坐标系,建立如图 4 所示的永磁体等效电流模型.

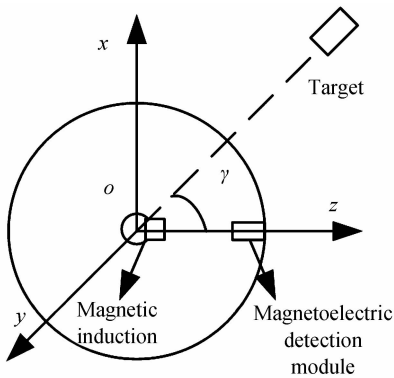


图 3 磁电检测系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic detection system

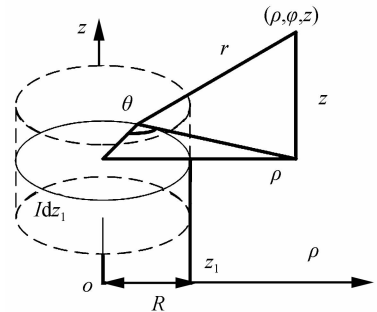


图 4 永磁体等效电流模型

Fig. 4 Permanent magnet equivalent current model

磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

线圈电流 $I dz_1$ 产生的矢势为

$$dA_\varphi(\rho, z) = \frac{\mu_0 I R dz_1}{4\pi} \int_0^{2\pi} (\cos \theta d\theta) / [\sqrt{\rho^2 + R^2 + (z - z_1)^2 - 2R\rho \cos \theta}] \quad (2)$$

式中, z_1 为电机轴线中心与磁铁中心间距, R 为磁铁半径, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率, I 为等效面电流密度.

图 5 是永磁体磁场计算模型. 依据永磁体磁场计算模型, 将 $\theta = \pi - 2\varphi$ 代入式(2), 再对 z_1 沿磁环厚度方向从 $z_1 - h$ 到 $z_1 + h$ 进行积分, 即可得到磁环在其外部空间任一点 P 产生的总磁感应强度分量^[14]为

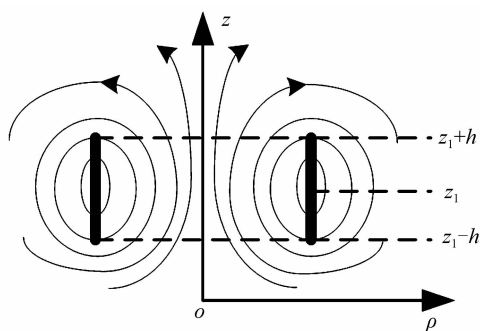


图 5 永磁体磁场计算模型

Fig. 5 Permanent magnet field calculation model

$$B_\rho(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ \frac{4R}{\sqrt{c_o}} \left[2 \frac{F(k_o) - E(k_o)}{k_o^2} - F(k_o) \right] - \frac{4R}{\sqrt{c_u}} \left[2 \frac{F(k_u) - E(k_u)}{k_u^2} - F(k_u) \right] \right\} \quad (3)$$

$$B_z(\rho, z) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ \frac{2r_{zo}}{\sqrt{c_o}} \left[F(k_o) + \frac{R-\rho}{R+\rho} \Pi(k_o, \lambda) \right] - \frac{2r_{zu}}{\sqrt{c_u}} \left[F(k_u) + \frac{R-\rho}{R+\rho} \Pi(k_u, \lambda) \right] \right\} \quad (4)$$

式中, $c_o = (R+\rho)^2 + r_{zo}^2$, $c_u = (R+\rho)^2 + r_{zu}^2$, $k_o^2 = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2 + r_{zo}^2}$, $k_u^2 = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2 + r_{zu}^2}$, $r_{zo} = z - (z_1 + h)$, $r_{zu} = z - (z_1 - h)$. $\lambda^2 = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2}$, h 为永磁体的半高.

$F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{(1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}$ 为第一类完全椭圆积分; $E(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta$ 为第二类完全椭圆积分; $\Pi(k_o, \lambda) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \theta)(1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}$ 为第三类椭圆积分.

将 $\rho = d \cos \varphi$ 和 $z = d \sin \varphi$ 代入式(3)和式(4)中, 其中, d 为磁铁中心到磁阻传感器中心间距离. 通过坐标变换, 在磁阻传感器所在点的磁场分量为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_\rho \\ B_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(3)、(4)、(5)联立, 可得 B_y 即 z 轴磁感应分量可简化为一正弦曲线.

根据磁场建模结果可知, 磁阻传感器检测的磁场为一类正弦磁场, 磁电检测系统输出的是正弦电信号, 为方位角检测与解算提供了原理依据. 依据图 1 所示的激光引信全向方位角探测系统工作原理, 磁电检测系统输出的正弦电信号可转换为电机转速周期, 将脉冲激光回波信号与磁电检测系统输出的正弦电信号叠加, 计算出回波信号出现的时刻, 即可解算出回波信号的相位信息, 即本文所求方位角.

3 方位角解算策略

根据仿真所得的正弦曲线, 设计上升沿阈值周期检测法. 上升沿阈值周期检测原理如图 6, “上升沿阈值

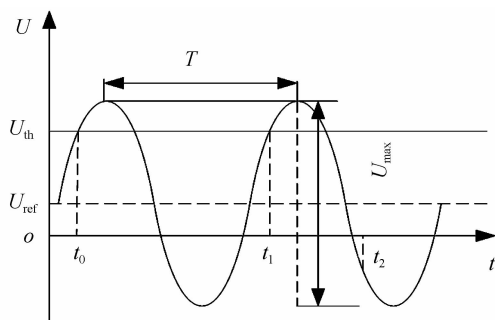


图 6 上升沿阈值周期检测原理

Fig. 6 Detection principle of the rising edge of the threshold cycle

周期检测法”是通过激光引信全向探测系统探测到目标回波信号的时间与前一周期磁阻传感器输出的转速周期信号来解算目标方位角。

由于地磁场远小于感应磁片所产生的磁场,磁阻传感器所检测的信号主要为电机高速旋转周期信号,即正弦信号.依据图 6 所示原理,信号为

$$U=U_{\max}\sin(2\pi t/T+\theta)+U_{\text{ref}} \quad (6)$$

假设阈值电压为 U_{th} ,当磁阻传感器输出信号达到阈值点,并且为上升沿信号时,记录此刻为本周期计时起点 t_0 ,当下一个信号到达阈值时,并且为上升沿为信号时,记录此刻为本周期计时结束点 t_1 .则周期为

$$T_1=t_1-t_0 \quad (7)$$

当下一周期到来,激光探测系统探测到目标后输出回波信号,经过整形后记录回波信号在周期信号中的时刻为 t_2 ,则回波出现时间为

$$T_2=t_2-t_1 \quad (8)$$

则方位角为

$$\gamma=2\pi \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (9)$$

根据式(9),高准确度方位角测量转化为高准确度时间间隔测量.本文所测电机转速为 $0\sim 60\,000\text{ r/min}$,对应时间测量范围为 $0\sim 6\text{ ms}$.TDC-GP21 时间测量模块和 FPGA 相比单片机有更高的时钟分辨率,因此,运用 FPGA 与 TDC-GP21 实现时间间隔测量.时间间隔测量时序图如图 7.

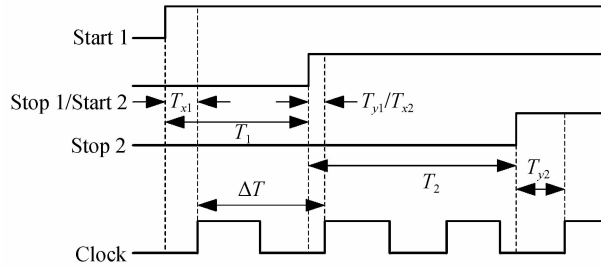


图 7 时间间隔测量时序图

Fig. 7 Time interval measurement sequence diagram

Start 1 为电机转速本周期信号的计时起点 t_0 ,Stop 1/Start 2 为本周期激光回波信号接收时刻 t_1 ,Stop 2 为电机转速本周期信号的计时结束点 t_2 ,则 T_1 和 T_2 分别为

$$T_1=n_1\Delta T+T_{x1}-T_{y1}=(n_1-2)\Delta T+(T_{x1}+\Delta T)-(T_{y1}+\Delta T) \quad (10)$$

$$T_2=n_2\Delta T+T_{x2}-T_{y2}=(n_2-2)\Delta T+(T_{x2}+\Delta T)-(T_{y2}+\Delta T) \quad (11)$$

式中, T_{x1} 为 Start 1 信号与下一个时钟周期上升沿之间的时间间隔, T_{y1} 为 Stop 1/Start 2 信号与下一个时钟周期上升沿之间的时间间隔, T_{y2} 为 Stop 2 信号与下一个时钟周期上升沿之间的时间间隔, ΔT 为时钟周期. T_1 和 T_2 中 $(n_1-2)\Delta T$ 和 $(n_2-2)\Delta T$ 部分由 FPGA 实现测量.运用 PLL 锁相环将 50 MHz 的时钟周期倍频到 200 MHz ;再运用相移倍频法,将 200 MHz 时钟通过内部时钟相移为 180° 的时钟,实现将时钟周期二等分,等效为 400 MHz 时钟周期;通过此时钟周期进行脉冲计数法测量,时间分辨率达到 2.5 ns .

高准确度时间间隔测量的关键在于测量 T_{x1} 、 T_{y1}/T_{x2} 和 T_{y2} .因此选用 TDC-GP21 运用延迟线时间内插法对 2.5 ns 时间间隔进行细分后测量.TDC-GP21 具有一个共用的 Start 通道和 2 个测量通道(Stop 1 和 Stop 2).由于回波信号产生时刻是随机出现的,回波可能出现在 T_{y1}/T_{x2} 时间段内,为此选用双通道进行测量.TDC-GP21 测量范围为 $3.5\text{ ns}\sim 1.8\text{ }\mu\text{s}$.由于 T_{x1} 、 T_{y1}/T_{x2} 和 T_{y2} 三个时间参量都在 2.5 ns 以内,将一个时钟周期加入三个时间参量测量中,如式(10)和式(11),最终 TDC-GP21 测量 $T_{x1}+\Delta T$ 、 $T_{y1}+\Delta T$ 和 $T_{y2}+\Delta T$ 时间.时间间隔测量原理图如图 8.

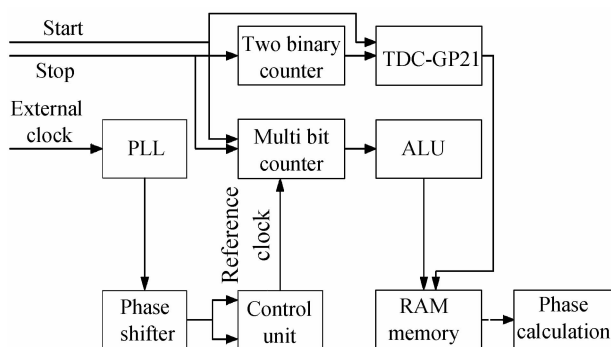


图8 时间间隔测量原理

Fig. 8 Schematic diagram of time interval measurement

4 实验与分析

4.1 磁电检测模块抗干扰实验

由于本文所设计应用的激光引信全向方位角探测系统具有小型化特征,所有部件相互紧邻,在方位角探测中,磁电模块输出周期信号中夹杂干扰信号,如图9(a).杂波的产生是在高速微型直流电机供电后稳速转动时,在换向过程中,当电刷从换向片的一片向另一片过渡时,由于接触电阻的变化以及电刷前后边电流密度的不均匀,导致电刷接触压降的剧烈变化,这个瞬变的电压及电流通过电机供电线对外产生传导干扰^[15],传导干扰属于宽频带干扰.由于电机供电导线是效率很高的电磁波辐射天线,当传输信号频率超过30 MHz时,会产生明显的电磁辐射^[16].由于上述高频信号的存在,在使用磁阻传感器测定感应磁片磁场时,无法对磁电检测电路板进行电磁屏蔽,此种辐射干扰会串入感应磁片的磁场中,出现在磁阻传感器输出的波形中;同时,激光接收电路中使用PIN光电二极管作为光电探测器,在回路中相当于接收天线,会受到电磁辐射干扰,在回波信号中产生高频杂波,影响回波判断.

为抑制电机产生的电磁干扰,采用多重屏蔽的方式,对传导干扰进行抑制.一方面,在电机源端将电容器并联接在电源引线之间,对差模干扰进行抑制;另一方面,将电源线缠绕在铁氧体中,实现共模扼流圈功能,抑制共模干扰.屏蔽后磁电检测波形图如图9(b).

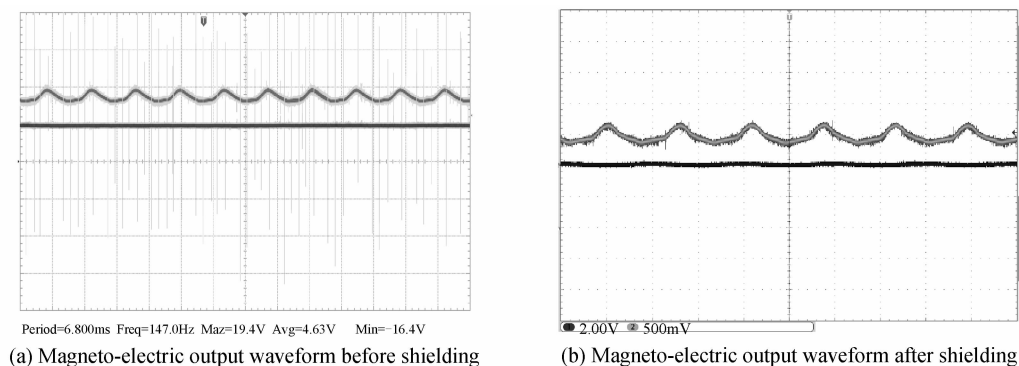


图9 磁电检测输出波形

Fig. 9 Magneto-electric output waveform

4.2 电机转速测量实验

高精度方位角检测模块转速测量是高精度解算方位角的前提,为验证高精度测速模块,定制微型有刷双向直流高速扫描电机,电机额定电压为7.4 V,额定空载转速为60 000 r/min,电机尺寸为 $\phi 14 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,电机上下全反平面镜片、平面镜联接件和感应磁片共重3 g.对磁电检测模块测量周期信号进行测量实验,所测不同电压波形如图10.并设计串口输出到上位机,编写LABVIEW上位机程序,实时显示周期信号与转速信号.

同时,应用转速表测量不同电压下电机带负载转速,并将不同电压上位机输出的电机转速值取平均进行求解,所测电压与转速关系见表1.测量误差在1.5%以内.

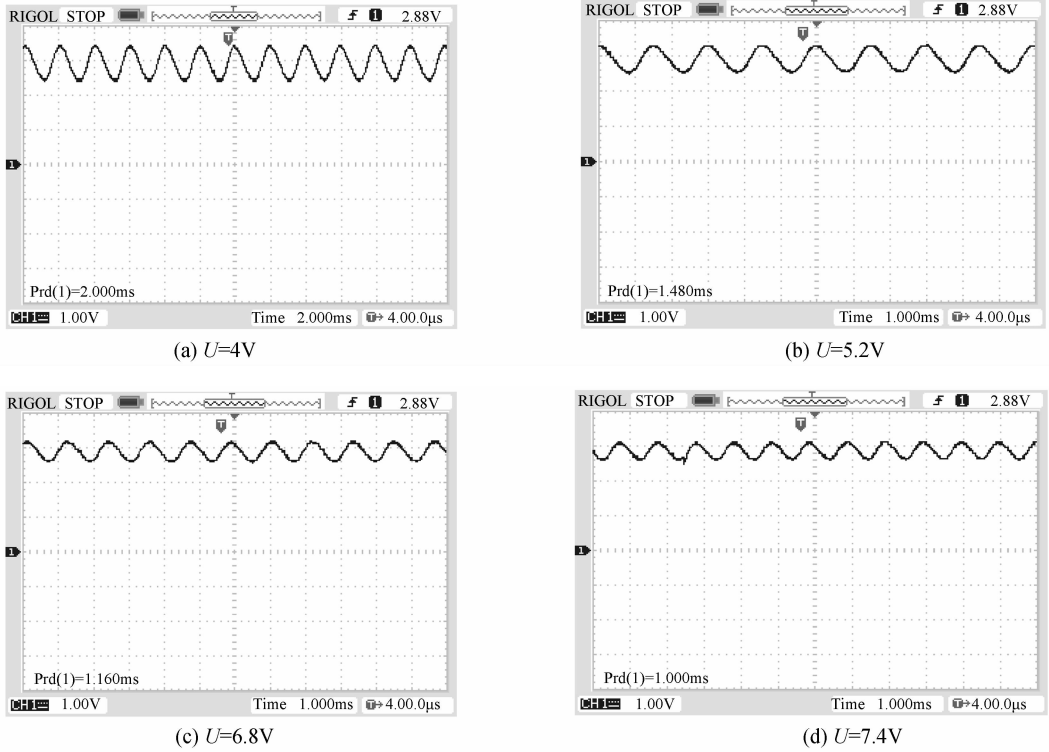


图 10 不同电压下磁电检测所测周期信号

Fig. 10 Detect periodic signal under different voltage magnetic

表 1 不同电压下电机带负载转速

Table 1 Speed of motor with load under different voltage

Voltage/V	4	5.2	6.8	7.4
No-load rotation speed/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	30 000	40 000	50 000	60 000
Experiment speed/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	30 242	40 541	50 370	59 981

4.3 方位角测量实验

依据方位角解算策略,依据单光束激光引信全向方位角探测方案,选用 SPLPL90-3 激光器设计激光发射电路,选择 PIN 光电二极管设计接收电路.为获得方位角解算准确度,依据选定器件与参量设计加工原理样机.调整接收系统接收视场角,保证接收视场与发射视场空间匹配.以圆柱形弹体模拟目标,目标长为 1.1 m,直径为 125 mm,将发射频率调节至 5 kHz,转速调节为 5 000 r/min.将传感器所在位置标定为 0° 位置.将目标放置在距离样机 5 m 处的不同方位,角度分别为 60° 、 120° 、 200° 、 280° .对不同位置所测角度值实时测量 100 次, 280° 所测角度波形图如图 11,不同角度测量绝对误差统计结果如表 2.依据统计结果,磁电检测模块所测误差在 $\pm 2^\circ$ 以内.

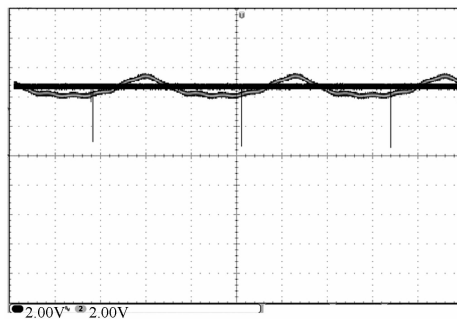
图 11 280° 所测角度波形Fig. 11 280° angle waveform

表 2 不同角度测量绝对误差统计结果

Table 2 Statistical results of absolute error in different angles

Angle/ $^{\circ}$	Absolute error section/ $^{\circ}$		Statistics times	
60	$[-2, -1] 13$	$[-1, 0] 33$	$[0, 1] 43$	$(1, 2) 11$
120	$[-2, -1] 15$	$[-1, 0] 38$	$[0, 1] 37$	$(1, 2) 10$
200	$[-2, -1] 11$	$[-1, 0] 55$	$[0, 1] 23$	$(1, 2) 11$
280	$[-2, -1] 9$	$[-1, 0] 46$	$[0, 1] 30$	$(1, 2) 15$

应用本文设计的磁电检测系统和方位角解算策略所得实验结果,相比已有的方位角探测研究,测量准确度得到较大的提高,如相比文献[10]中多发多收方位角测量方法所获得的 22.5° 的检测准确度,准确度提高了 20.5° 。磁电检测系统能有效抑制电机产生的电磁干扰,保证了测量系统的稳健,并且系统能在每一周期中实时解算方位角信息,有很强的实时性,能满足单光束激光引信全向方位角探测系统的实时探测需求。

本文是基于在 5 m 探测距离范围内能有效探测圆柱形弹体目标回波的条件下所得的结论。目标外形、尺寸与表面反射特性的不同,会影响回波波形,从而影响回波出现的时间。当激光发射特性、弹体与目标相对位置相同时,同一尺寸的圆柱形弹体目标反射特性不同会影响回波电压的峰值。本文采用上升沿阈值时刻鉴别方法,在同一阈值情况下,大回波电压峰值会导致时刻鉴别点前移,导致测量方位角偏小;反之,测量方位角偏大。当激光发射特性、弹体与目标相对位置相同时,同一反射特性的圆柱形弹体目标直径越小,回波展宽越大,时刻鉴别点前移,导致测量方位角偏小;反之,测量方位角偏大。

5 结论

本文根据激光引信目标方位角测量的高准确度要求,提出磁电检测方案,建立磁电检测模型,验证磁电检测信号为正弦信号。根据正弦信号设计了上升沿阈值周期检测算法,并运用 FPGA 与 TDC-GP21 组合测量实现方位角的解算,并进行方位角探测实验。实验结果表明:磁电检测系统采用多重屏蔽方法,能有效抑制电磁干扰;能实时监测电机转速,电机转速测量误差在 1.5% 内;方位角解算误差在 $\pm 2^{\circ}$ 以内。本文设计与采用的磁电检测系统具有检测准确度高、抗干扰能力强、低成本、实现简单等特点,且满足激光引信方位角测量的实时探测要求,相比其他方位角探测研究具有明显优势。

参考文献

- [1] XU Xia-bin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin, *et al.* Miniaturized transmitting technology of laser circumferential detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0314005.
徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 激光周向探测小型化发射技术[J]. 光子学报, 2016, **45**(3): 0314005.
- [2] CHEN Hui-min, LIU Xin-yang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 626-631.
陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(3): 626-631.
- [3] SHEN Na, ZHANG Xiang-jin, GUO Jing. Attenuation of laser fuze through fog [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 864-869.
沈娜, 张祥金, 郭婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(4): 864-869.
- [4] LÜ Hua, YAO Hong-bao, CHEN Pin. Target indentifying of large visual angle to the laser fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 427-429.
吕华, 姚宏宝, 陈平. 大视场激光引信目标识别方法研究[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(4): 427-429.
- [5] ZHANG Zheng-hui, YANG Ming, XU Shi-wen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 700-704.
张正辉, 杨明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(6): 700-704.
- [6] LI Hong-gang, JIAN Jin-lei, WEI Shao-li. A study of optimum azimuth of direction warhead[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science ed*, 2003, **4**(4): 19-22.
李宏刚, 简金蕾, 魏少莉. 定向战斗部最佳起爆方位角研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, **4**(4): 19-22.
- [7] LANG Wen-jie. Research on two-dimensional overlapping coding for detection of laser direction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1374-1378.
郎文杰. 基于二维交叠掩膜编码的全方向激光方向探测应用研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1374-1378.
- [8] ZHANG Wei-an, WANG Long, REN Jian-guo. Research on laser threat source location of omni-direction laser warning system based on scattering laser detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 163-170.
张维安, 王龙, 任建国. 针对散射激光的全向激光告警系统激光威胁源定位技术研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 163-170.

- [9] CHENG Yu-bao, LI Qing, LIU Shang-qian. A novel design for laser orientation detection system [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 538-540.
程玉宝, 李庆, 刘上乾. 一种新的激光方位探测系统设计[J]. 激光技术, 2005, **29**(5): 538-540.
- [10] DENG Jia-hao, LI Yin-lin, SHI Ju-sheng. Detecting directivity of the capacitance fuze [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(2): 160-164.
邓甲昊, 李银林, 施聚生. 电容近炸引信探测方向性研究[J]. 北京理工大学学报, 2000, **20**(2): 160-164.
- [11] LUO Wei, DENG Jia-hao, ZHANG Tong, *et al.* Research and design of target azimuth detection system for laser fuze [C]. Proceedings on the Tenth Special Equipment Professional Committee of Chinese Society of Astronautics, 2000.
罗炜, 邓甲昊, 张彤, 等. 激光引信目标方位探测系统研究与设计[C]. 中国宇航学会特种装备专业委员会第十次学术交流会, 2000.
- [12] XU Xiao-bin, ZHANG He. Optimum directional detonating technology of pulsed laser circumferential detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(5): 0514003.
徐孝彬, 张合. 脉冲激光周向探测最佳定向起爆技术[J]. 光子学报, 2016, **45**(5): 0514003.
- [13] LI Qun-ming, WAN Liang, DUAN Ji-an, *et al.* Design of a new radial permanent bearing and analytical calculation of magnet field[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, **37**(5): 970-975.
李群明, 万梁, 段吉安, 等. 一种永磁轴承的设计和磁场分布的解析计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, **37**(5): 970-975.
- [14] LANG M. Berechnung und optimierung von passiven permanent magnetischen lagern für rotierende maschinen[D]. Berlin: Berlin Technischen University, 2003.
- [15] YU Ji-hui, ZHOU Shang-hua, WANG Quan-di, *et al.* Modeling and simulation of the conducted electromagnetic interference for permanent magnet direct current motors[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2009, **32**(5): 539-544.
俞集辉, 周尚华, 汪泉第, 等. 永磁直流电动机传导电磁干扰的建模与仿真[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, **32**(5): 539-544.
- [16] MABUCHI Y, NAKAMURA A, HAYASHI T, *et al.* A feasibility study for reducing common-mode current on the wire harness connected to electronic control units[J]. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, 2007, **90**(9):19-31.