

激光近炸引信单光束脉冲周向探测技术

甘霖,张合,张祥金,冯颖

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 受常规弹药空间和系统功耗的限制,激光近炸引信应用于常规弹药过程中,无法布置多个激光器和多个激光接收器,同时,系统结构要求尽量简单,故传统的光束布局方式无法直接应用;现设计出一种新型的单光束大视场脉冲旋转周向扫描方案,建立了弹目交会模型并进行了目标捕获率理论分析,讨论了系统误差的影响因素,加工制作了初始原理样机并进行了高速风洞实验,结果表明:该方案能够在转速 80 000 r/min 以下实现可靠联接,及常规弹药激光近炸引信 360°大视场周向探测,在保证弹目交会目标捕获率的前提下,可有效减小常规弹药引信空间的占用率和系统功耗。

关键词: 激光近炸引信; 单光束; 周向探测

中图分类号: TJ43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0084-06

Single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze

Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin, Feng Ying

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

Abstract: Due to space and system power limitation of fuze, when laser proximity fuze is used in conventional ammunition, multiple lasers and multiple laser receivers can't be laid out. Meanwhile, system architecture is required to be as simple as possible. Therefore, the traditional layout of the beam can't be directly applied. A new rotation circumferential scanning program of large field of single-beam, was designed. Missile target encounter model was established and theoretical analysis on target acquisition rate was conducted. System error factors were discussed. The initial prototype was processed and high-speed wind tunnel experiment was done. The results show that the program can achieve reliable connection when the speed is less than 80 000 r/min, 360° large field of detection of laser proximity fuze used in conventional ammunition can be realized. Under the premise of ensuring target acquisition rate, fuze space utilization of conventional munitions and system power can be effectively reduced.

Key words: laser proximity fuze; single-beam; circumferential detection

收稿日期:2012-05-22; 修订日期:2012-06-19

基金项目:国家自然科学基金(60908037);国家部委基金(9140A05070508BQ0245)

作者简介:甘霖(1987-),男,博士生,主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email:kg568605@163.com

导师简介:张合(1957-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事探测制导与控制方面的研究。Email:hezhang@mail.njust.edu.cn

0 引言

激光近炸引信是一种利用激光束主动探测目标的光电引信。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,并实时进行处理,完成目标的识别与探测。当引信在预定距离内检测到目标,并且当导弹或战斗部处于最佳炸点位置时,就通过电子系统产生起爆信号控制启动战斗部^[1]。

相对于传统的光电近炸引信,激光近炸引信具有主动性好、方向性强和不易受电子干扰等优点。1980年以来,美国AGM-88型高速反雷达导弹、美国和瑞士联合研制的ADATS防空-反坦克导弹、美国M16步枪发射的枪榴弹,以及瑞典RDS-70导弹、法国“马特拉导弹”都采用了激光近炸引信^[2]。激光近炸引信为提高现代精确制导武器,特别是面空导弹、空空导弹和反辐射导弹的命中率和毁伤效果发挥了重要作用。

1 激光引信常用光束空间布局方式分析

由于弹丸目标以各种不同的情况交会,而且弹目相对运动速度较大,这就要求引信必须具备全向探测、快速识别、精确定位和精确控制炸点的功能。必须采用大探测场探测体制,有效提高光束照射到目标的可能性以及光束对目标的覆盖范围,保证接收机有足够大的接收信号功率和信噪比^[3-5]。

常用的光束布局方式主要包括多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案,分别如图1所示。各方案发射光束的光轴可与弹轴垂直或形成一定夹角,形成圆盘状或圆锥状的光束探测场。

多辐射方案中接收器与激光器数量相等且视场匹配,发射、接收窗口在弹体周围均匀分布,多个辐射状窄光束共同形成探测场,发射光束与接收视场有很强的定向性。该方式对激光器发射功率要求不高,因而在小型空空导弹中应用的较多,如Python4-2(怪蛇)型空空导弹激光引信,Matra Bae Dynamics公司的便携式防空导弹激光引信。

分区方案由几个扇形光束组成探测场,接收器与激光器数量相等且视场匹配。与多辐射方案相比,该方案可探测的最小目标尺寸较小,但大接收视场

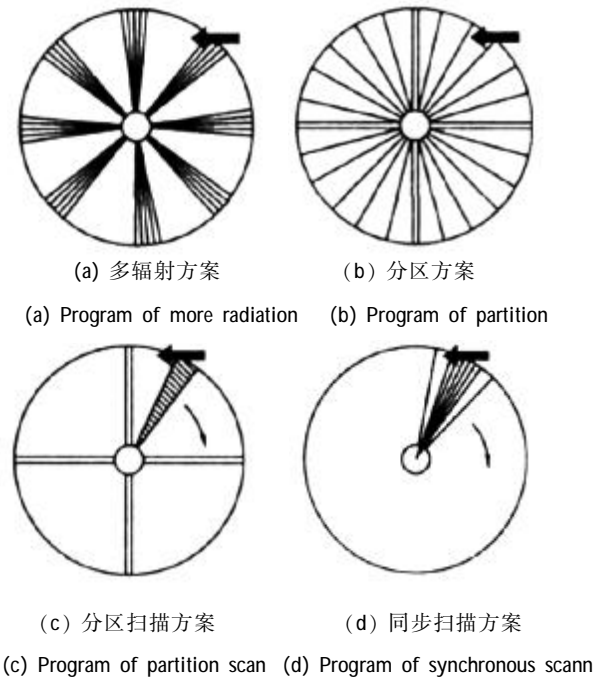


图1 光束空间布局方式

Fig.1 Spatial layout of beam

导致背景噪声增加、发射功率利用率降低,此方案对激光器平均功率要求较高。英国Rapier Mark2导弹激光引信、Thomson-Thom公司的全向探测激光引信^[6-7],2010年美国引信年会上公布的Thales导弹激光近炸引信^[8]均采用该方案。

分区扫描方案在分区视场内,只有激光器扫描形成探测场,多个探测器分区接收,有效利用激光器发射的所有功率,扩大作用距离。如英国Thomson-Thorn公司用于检测空中目标的激光引信^[9]。

同步扫描方案的发射、接收系统同步扫描探测接收。该方案将激光器全部功率集中为窄射束,因接收视场减小降低了背景噪声。同步扫描的重点是要求接收场与发射场同步匹配,结构复杂,需制作专门的高速旋转扫描系统和小型大功率激光器,可以实现较远的作用距离和较高的距离分辨率。在空载激光雷达中应用较多,如直升机激光防撞告警装置^[3]。

其中多辐射方案、分区方案、分区扫描方案均需要布置多个激光器和激光接收器,将占有引信大量的宝贵空间,同时,为了驱动众多的激光器和激光接收器,需要提供大功率激光电源,这将大大提高系统功耗,增加系统内部噪声,影响系统工作稳定性。而同步扫描方案结构复杂,需制作专门的高速旋转扫描系统和小型大功率激光器。

激光引信应用于常规弹药的过程中,由于受到引信空间体积和系统功耗的限制,无法满足多个激光器和多个激光接收器的体积与功耗的要求,同时,系统结构应尽量简单实用,故上述常用的光束布局方式无法直接应用,现提出一种新型的单光束脉冲周向探测扫描方案,仅仅采用一个激光发射器实现光束的 360° 周向扫描探测,将激光发射器的数量减至最少,使该激光引信的体积小紧凑,相对于传统的4种方案,大大减小了激光引信的空间占有率。同时,激光引信的驱动电源部分只需要为单个激光器供电,减小了系统功耗与内部噪声,增加了系统的稳定性。有利于减小常规弹药引信空间占用率和系统功耗,可实现常规弹药激光近炸引信 360° 大视场周向探测,保证弹目交会情况下有效捕获目标。

2 单光束大视场脉冲旋转周向扫描方法

系统由脉冲激光发射系统(发射驱动电路,半导体激光器,激光准直透镜)和高速反射式扫描转镜系统(涡轮或者电机等旋转机构,涡轮或电机转子,全反平面镜)组成。系统组成原理图如图2所示。

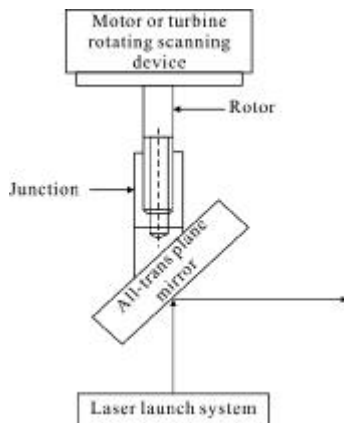


图2 系统组成原理图

Fig.2 Diagram of system components

直流电动机依靠直流电压运行,以其良好的转矩特性和快速响应能力被重视,具有调速性好、运行效率高等诸多优点。直流电动机按结构及工作原理可分为有刷直流电动机和无刷直流电动机。受引信体积、连线数目、可靠性等因素的限制,不宜采用有位置传感器的无刷直流电动机,因此文中采用永磁

有刷直流电动机协助完成目标方位角检测。系统中使用的电动机其额定电压为 $5\pm 1\text{V}$ 、额定空载转速为 $20\,000\text{r/min}$ 、转矩为 $0.033\text{N}\cdot\text{m}$ 、稳速时间为 20ms 、体积为圆柱形,直径 $D=20\text{mm}$ 、高度 $H=20\text{mm}$,可以满足现阶段静态实验要求。

电动机转子结构如图3所示,转子外径车有外螺纹,实现与全反平面镜的可靠联接。电动机转子总长度为 20mm ,直径为 2mm 。

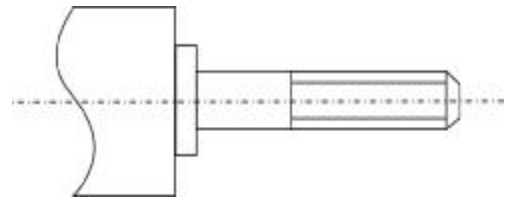


图3 电机转子结构图

Fig.3 Structure diagram of motor rotor

全反平面镜材料选用聚碳酸酯,增加材料强度的同时可减轻质量,减小电机负载,缩短电机稳速时间。加工成如图形状,反射部分为椭圆形,其长轴为 30mm ,短轴为 15mm ,厚度为 1mm ;在椭圆中心有外延圆柱杆,内部车有螺纹,实现与转子的配合,外延圆柱部分与椭圆镜面成 45° ,结构如图4所示。

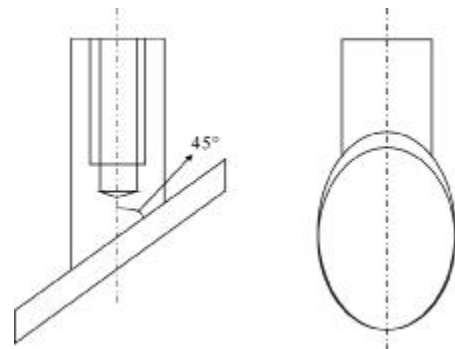


图4 全反平面镜结构图

Fig.4 Structure diagram of whole reverse plane mirror

该系统工作过程为:脉冲激光电源驱动半导体激光器发射出发散角较大的激光束,经准直系统准直成发散角较小的激光束之后,射在全反平面镜表面;涡轮或电机旋转扫描装置带动转子高速旋转,全反平面镜和转子联接部位采用一体化设计,并通过螺纹联接,提高联接稳定性的同时,可提高系统抗冲击性能。随着全反镜的高速旋转,反射激光束完成空间周向旋转 360° 大视场扫描探测。系统工作流程图

如图 5 示。

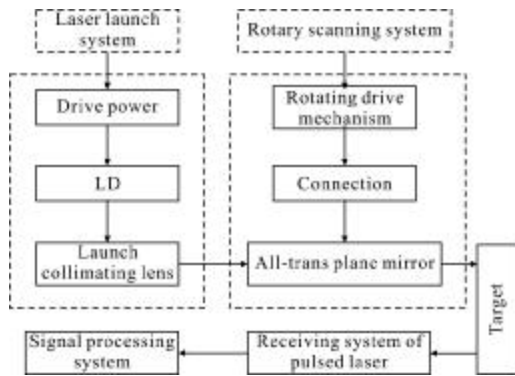


图5 系统工作流程图

Fig.5 Work flowchart of system

文中提出的激光引信单光束脉冲周向探测方案,整个发射旋转扫描系统只由电机、全反镜、激光发射器组成,各部件加工难度小,联接关系简单可靠,系统体积小,结构简单,在实现同步扫描方案功能的同时,简化了系统结构,减小了系统体积,使单光束脉冲周向探测方案在激光近炸引信中的应用成为可能。

在激光近炸引信中,引信只对目标是否已进入作用区感兴趣,而对目标不处于作用区时的每一个具体的距离信息不关心,因此只要对单一距离进行测定,在这里假设定距距离为 8m,不同全反镜扫描角度情况如图 6 所示。由于弹药的攻击目标一般位于弹丸前方,在这里假设是应对来袭导弹的防空火箭弹,发射弹丸的速度为 v_1 ,来袭导弹的速度为 v_2 ,并且假设两者迎面相向飞行,速度夹角为 180° ,在这种情况下,可以确定当出射光束垂直弹丸轴线时,有最大的探测范围。此时,全反平面镜与电机转子的夹角为 45° ,在增加探测距离的同时,可减小加工制作难度。

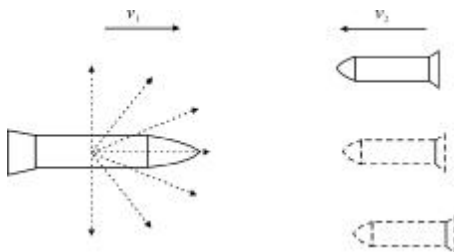


图 6 不同全反镜扫描角度分布图

Fig.6 Distribution of different scan angles of total reflector

3 弹目交会目标捕获率建模与分析

为了实现战斗部的精确炸点起爆控制,在弹目

交会时,激光近炸引信必须能准确可靠地捕获目标弹丸,脉冲激光捕获到目标的可靠性是系统获取目标方位信息的基础,为简洁说明弹丸目标捕获情况,建立数学模型如下:

假设弹目相向运动,弹丸速度为 $v_1, m/s$,目标速度为 $v_2, m/s$,两者相对速度为 $v=v_1+v_2$,旋转机构旋转方向与弹丸自旋方向一致,旋转机构转速为 $n_1, r/min$,弹丸自旋速度为 $n_2, r/min$,综合转速为 $w=n_1+n_2$,目标弹丸长度为 l ,直径为 D ,弹目交会模型如图 7 所示。

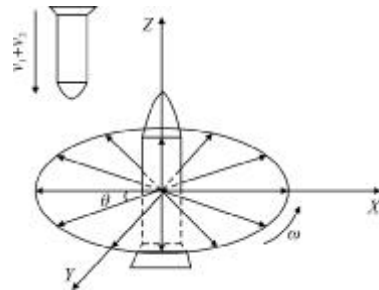


图 7 弹目交会模型图

Fig.7 Missile target encounter model diagram

激光束扫描一周时间 $\Delta t(s)=60/(n_1+n_2)$,旋转扫描一周激光束数量 $N=60/(n_1+n_2) \cdot f$,相邻光束之间最大弧长 $L=\frac{2\pi}{N} \cdot R=\frac{4\pi}{15f}(n_1+n_2)$,目标弹丸穿过激光扫描区域所需时间 $T_1=\frac{l}{v_1+v_2}$ 。

当 $T_1 \geq \Delta t$ 时,修正系数 $\zeta_1=1$ 。当 $T_1 < \Delta t$ 时,修正系数 $\zeta_2=\frac{T_1}{\Delta t}=\frac{l(n_1+n_2)}{60(v_1+v_2)}$,当 $D \geq L$ 时,修正系数 $\zeta_3=1$ 。

当 $D < L$ 时,修正系数 $\zeta_4=\frac{D}{L}=\frac{15Df}{4\pi(n_1+n_2)}$ 。

目标捕获率:

$$\eta = \begin{cases} \frac{IDf}{16\pi(v_1+v_2)} & T_1 < \Delta t, D < L \\ \frac{l(n_1+n_2)}{60(v_1+v_2)} & T_1 < \Delta t, D \geq L \\ \frac{15Df}{4\pi(n_1+n_2)} & T_1 \geq \Delta t, D < L \\ 1 & T_1 \geq \Delta t, D \geq L \end{cases} \quad (1)$$

常规弹药攻击的目标类型主要包括导弹、飞机等,其参数如表 1 所示。

表 1 各类目标外型、速度参数

Tab.1 Parameters of various target shape and speed

Target type	Shape parameters		Speed/ $m \cdot s^{-1}$	
	Length/m	Diameter/m		
anti-tank missile	0.75-1.8	0.1-0.2	200	
Missile	air to air /surface to air missile	3.66-16.5	0.1-1.07	600-1 300
	anti-ship missile	4.5-5.8	0.1-0.36	200-900
Aircraft	Boeing aircraft	30-70	4-6	160-220
	Fighter	13-23	2-4	270-850

由于篇幅原因,在这里选取空空导弹为仿真分析实例,取 $L=5\text{ m}$, $D=1\text{ m}$, $v_1=1\ 000\text{ m/s}$,电动机转速 $n_1 \in [30\ 000, 60\ 000]\text{ r/min}$, 弹丸自旋转速 $n_2 \in [3\ 000, 40\ 000]\text{ r/min}$, 则

$$D < L_{\min} = \frac{4\pi}{15f} (n_1 + n_2) = 1.1\text{ m} \quad (2)$$

根据公式(1),导弹捕获率为:

$$\eta = \begin{cases} \frac{IDf}{16\pi(v_1 + v_2)} & n_1 + n_2 < 12\ 000\text{ r/min} \\ \frac{15Df}{4\pi(n_1 + n_2)} & n_1 + n_2 \geq 12\ 000\text{ r/min} \end{cases} \quad (3)$$

对导弹类目标捕获率进行 MATLAB 仿真分析,这里假设弹丸自旋与电机转速一致,于是 $n_1 + n_2 \in [33\ 000, 100\ 000]\text{ r/min}$,故导弹捕获率满足第二类情况,分别对脉冲激光频率为 10 kHz、30 kHz、50 kHz 的脉冲激光进行仿真,仿真结果如图 8 所示,可见,当脉冲激光频率保持不变时,目标捕获率随着整体转速的增加而减小,这是由于随着转速的增加,相邻激光束之间的夹角逐渐变大,相当于目标可以穿透的“缝隙”变大,目标捕获率随之降低;当整体转速一

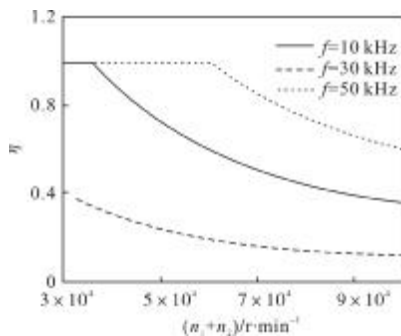


图 8 脉冲激光频率为 10 kHz、30 kHz、50 kHz 时捕获率仿真结果

Fig.8 Simulation results of capture rate when frequency is 10 kHz, 30 kHz and 50 kHz

定,目标捕获率随着脉冲激光发射频率的增加而变大,这是因为随着脉冲激光频率的增加,扫描激光束的数量会由稀疏变为稠密,相应的激光束之间的夹角会逐渐减小,增大目标捕获概率;同时,随着脉冲激光发射频率的增加,目标捕获率更容易趋近于 1。

为了更加清晰地表示出目标捕获率与脉冲激光频率和整体转速之间的匹配关系,仿真建立了 MATLAB 三维图如图 9 所示,假设条件与前仿真一致,整体转速 $n_1 + n_2 \in [33\ 000, 100\ 000]\text{ r/min}$,脉冲激光频率变化范围为 $[10\ 000, 50\ 000]\text{ Hz}$,由图可见,当脉冲激光频率 $< 30\text{ kHz}$,整体转速 $> 50\ 000\text{ r/min}$ 时,目标捕获的概率较大,由仿真结果同样可以得到不同的脉冲激光频率和整体转速的最佳匹配情况。

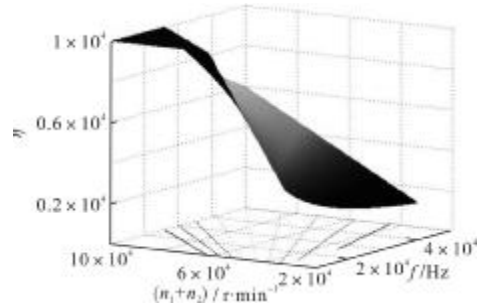


图 9 目标捕获率与脉冲激光频率和整体转速之间的匹配关系图

Fig.9 Matching diagram of target acquisition rate, pulsed laser frequency and the overall speed

4 目标捕获率误差及影响因素分析

由前面的公式推导,目标捕获率 η 和电机转速 n_1 、弹丸自旋 n_2 、脉冲激光频率 f ,弹体速度 v_1 以及目标速度 v_2 相关,为简化讨论,假设电机旋转方向和弹丸自旋方向一致,两者变化综合为 Δn ;同理综合弹体速度 v_1 以及目标速度 v_2 变化为 Δv ;脉冲激光频率变化为 Δf ,目标捕获率误差为 ψ 。当 $T_1 < \Delta t$, $D < L$ 时, Δf , Δv 对目标捕获率产生影响,具体影响推导如下:

$$\begin{aligned} \varphi(\Delta f, \Delta v) &= \frac{\eta(f + \Delta f, v + \Delta v) - \eta(f, v)}{\eta(f, v)} = \\ &= \frac{A \frac{f + \Delta f}{v + \Delta v} - A \frac{f}{v}}{A \frac{f}{v}} = \frac{v \cdot \Delta f - f \cdot \Delta v}{f(v + \Delta v)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $A = LD/16\pi$ 。同理可推导出其他 3 种情况下目标捕获率误差为:

$$\varphi(\Delta n, \Delta v) = \frac{v \cdot \Delta n - n \cdot \Delta v}{n(v + \Delta v)}, \varphi(\Delta f, \Delta n) = \frac{n \cdot \Delta f - f \cdot \Delta n}{f(n + \Delta n)}, \varphi = 0。$$

综合可得:

$$\eta = \begin{cases} \frac{v \cdot \Delta f - f \cdot \Delta v}{f(v + \Delta v)} & T_1 < \Delta t, D < L \\ \frac{v \cdot \Delta n - n \cdot \Delta v}{n(v + \Delta v)} & T_1 < \Delta t, D \geq L \\ \frac{n \cdot \Delta f - f \cdot \Delta n}{f(n + \Delta n)} & T_1 \geq \Delta t, D < L \\ 0 & T_1 \geq \Delta t, D \geq L \end{cases} \quad (5)$$

同样分析第三种情况,取 $n=50000\text{r/min}$, $f=30\text{kHz}$, 代入公式得: $\eta = \frac{5 \cdot \Delta f - 3 \cdot \Delta n}{3(5 \times 10^4 + \Delta n)}$, 当 $\Delta f, \Delta n$ 的数量级接近 10^4 时, η 有较大值,对目标捕获率的影响较大,一般情况下, $\Delta f, \Delta n$ 的数量级远小于 10^4 , 故 η 值较小,对目标捕获率影响不大,同理可以分析其他 3 种情况。

在文中假设的理论模型下,为了减小目标捕获率误差,可以通过提高脉冲激光发射频率的稳定性以及电机旋转的平稳性加以改善;由于弹目相对速度变化 Δv 难以控制,故属于随机误差,对系统的捕获率误差影响难以消除,可以考虑在后续的处理电路里增添一定的补偿措施,以减小其造成的影响。

5 高转速风洞实验及分析

根据理论分析及模型的建立,设计并加工了初始原理样机模型,如图 10 所示,由于高速电机在研究定制阶段,此处旋转机构驱动方式为涡轮驱动方式,通过风洞实验,测试在高转速情况下全反平面镜与转子联接的稳定性,测试结果如表 2 所示,表明在转速 80000r/min 左右,联接部分开始出现松动现象,在此之前,联接稳定可靠,可以满足高速旋转状态下的可靠联接,为今后的系统设计奠定了理论和实验基础。



图 10 初始原理样机模型

Fig.10 Initial prototype model

表 2 不同转数实验结果

Tab.2 Results of different number of revolutions

	20 000 r/min	40 000 r/min	60 000 r/min	80 000 r/min	100 000 r/ min
1	Intact	Intact	Intact	Intact	Have loose
2	Intact	Intact	Intact	Have loose	Have loose

6 结束语

针对激光引信大探测场光束布局方式难以直接应用在常规弹药激光近炸引信这一问题,设计出一种新型的单激光束脉冲周向扫描探测系统,通过模型仿真与理论分析,表明该方案在保证弹目交会目标捕获率的基础上,可有效减小系统空间占有率,有利于降低系统功耗与加工制作难度。经过初始原理样机的高速风洞实验,表面该方案的联接方式可以在转速 80000r/min 以下联接可靠,为常规弹药激光近炸引信的研究奠定了理论与实验基础,推动了激光引信向小型化、智能化方向发展。

参考文献:

- [1] Chen Hongju, Zhang Zhenghui. Comment on the development of laser proximity fuze [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2002, 17(3): 310-312. (in Chinese)
- [2] Zhao Feng, Zhang Gengyu. Characteristics of U.S. Artillery ammunition and development trends [J]. Modern Military, 2005, 3(11): 54-55. (in Chinese)
- [3] Zhang Zhenghui, Yang Ming, Xu Shiwen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 700-704. (in Chinese)
- [4] Amann M C, Bosch T, Myllyla R. Laser ranging: a critical review of usual techniques or distance measurement [J]. Optical Engineering, 2001, 3: 10-19.
- [5] Steinvall O, Chevrier T. Range accuracy and resolution for laser radars [C]//SPIE, 2005, 5988: 598801-5988018.
- [6] Buzzard G. Advanced laser proximity fuzing [C]//First Annual International Missile and Rocket Symposium, 2000.
- [7] Burns H N, Christodoulous C G, Boreman G D. System design of a pulsed laser range finder [J]. Optical Engineering, 1991, 3: 323-329.
- [8] Gary Buzzard. Modeling the Interaction of a laser target detection device with the sea surface [C]//54th Annual Fuze Conference, 2010, 4: 67-69.
- [9] Buzzard G. Development in laser target detection device technology [C]//Second Annual International Missile and Rocket Symposium, 2002, 18(2): 103-106.