

激光引信收发视场测试及数据处理

施智勇, 忻云龙, 徐方

(上海师范大学 教育学院, 上海 200234)

摘要: 要批量生产导弹激光引信, 就要快速测试激光引信的各种测量参数; 使用通常方法, 完成各项测试所需时间较长, 不利于批量生产激光引信产品; 为了快速获得发射视场与接收视场的各项测量参数, 针对采用宽光束的激光引信, 采用激光引信收发视场的一次测量, 根据所得测试数据, 进行数据处理的方法; 由测试数据可以计算出收发视场的匹配系数, 并推导了在已知目标反射率和面积情况下, 计算引信作用距离随视野分布所用的公式, 可以避免实际测量带来的耗时; 通过实验验证, 发现理论计算值基本与实际测量值的误差较小, 可以认为它们基本相同; 利用该计算方法可以在实验室测试引信收发组件后, 快速计算出每套引信窗口的作用距离曲线, 可以避免和减少实物测试的麻烦。

关键词: 激光引信; 收发视场; 视场匹配系数

Testing and Data Processing of Field of View of Laser Fuze

Shi Zhiyong, Xin Yunlong, Xu Fang

(Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: To mass produce laser fuzes, it is necessary to quickly test various measurement parameters of the laser fuzes. It takes a long time to complete each test by using the routine method, which is difficult to mass produce laser fuze products. In order to obtain the measurement parameters of the field of view of receiving and emitting quickly, for the laser fuze using the wide beam, this paper uses the laser fuze to receive and measure the field of view, obtained the data processing method according to the obtained test data. From the test data, the matching coefficient of the transmission and reception field of view can be calculated and derived the formula. The formula can be used to calculate the fuze action distance with the field of view distribution within the known target reflectivity and area. It can reduce the time consuming caused by the actual measurement. Through the experimental verification, it is found that the error between the actual measurement value and theoretical calculation value is small and can be considered to be basically the same. This calculation method can quickly calculate the action distance curve of each set of fuze window after testing the fuze transceiver component in the laboratory, which can avoid and reduce the trouble of physical testing.

Keywords: laser fuze; field of view of receiving and emitting; matching coefficient

0 引言

近年来, 激光引信技术得到了广泛的应用^[1], 激光引信测试设备可用于激光引信的内场与外场各项测试。要测试导弹激光引信的各种测量参数, 可利用各种手段模拟目标, 检测引信执行级的输出, 由此判断引信工作是否为正常^[2]。现在, 激光引信收发视场的测试技术也有长足的发展^[3-6]。但是大多数的测试研究往往注重于收发视场的分别测试和两者数据的简单比对。所以, 会造成测试每套激光引信的所用时间较长。

引信作用距离是激光引信系统的重要参数之一。利用对目标表面散射的激光功率的探测, 激光引信可感知目标, 并对作用距离进行估算。

宽光束的激光引信发射的能量呈空间分布, 同一径面上不同点的能量强度会不相同, 这会影响引信作用距离的精度, 严重的可能会影响引信工作的稳定性。

实际上, 引信视场的最大作用距离分布曲线也与收发视场两者的匹配度相关。本文讨论了使用自制成套设备分别测量引信收发视场数据, 计算出该组件最大作用距离随视野的分布曲线。由此计算收发视场“匹配系数”的原理和方法, 并且可以对引信组件的品质做出准确评估, 减少测试所用的时间。

1 引信收发视场测量

激光引信首先发射激光束, 到达目标后, 会发生反射, 反射的激光如果被接收窗口接收, 就会转换成电信号, 最后经过系统计算处理后, 就实现了对目标的探测^[6]。因此, 激光引信的测量包含了激光发射视场的测量和激光接收视场的测量。为了测量设计的方便, 自制成套设备采用的测试方案为: 通过程序来控制激光引信发射激光束, 通过光衰减器, 模拟经目标反射引起的光衰减, 送入到引信的接收窗口。

1.1 发射视场测量

引信收发视场测试系统测量发射视场, 如图 1 所示。垂直放置的 CCD 线阵放置在激光引信的激光发射器为中心、半径为 R 的圆弧上。此圆弧是由步进电机的旋转带动

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101209)。

作者简介: 施智勇(1964-), 男, 上海人, 硕士, 主要从事并行计算与系统模拟解决方案方面的研究。

机械设备运动而成, 视野角 α 的最大角度范围可以是一 $90^\circ \sim 90^\circ$ 。测量发射视场时, 通过调节装载引信的机械装置使其发射光束呈水平线状出射, 按照设置的测试角度范围和步长驱动相关电机作视野扫描, 用垂直放置的 CCD 线阵探测, 自动完成整个发射视场的测量过程^[7-9]。

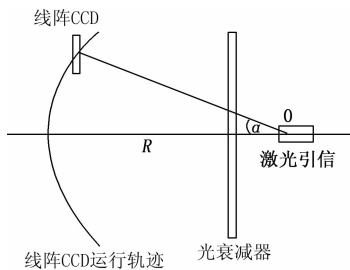


图 1 引信发射视场测试系统示意图

由于激光引信发射的光功率很大, 所以需要加一光衰减器, 以便 CCD 线阵能正确的读出接收到的光功率相对值。

如图 2 所示, 激光引信发射宽光束, CCD 线阵中的每个 CCD 均可接收, 输出信号幅度变化的一维矩阵。由图 2 可见, CCD 线阵中某个 CCD 与 CCD 线阵中心的高度 H 与半径 R 、视场角 β 存在一定的数学关系:

$$\tan\beta = \frac{H}{R} \quad (1)$$

即根据预先测量的高度 H 与半径 R , 就能计算出视场角 β 。

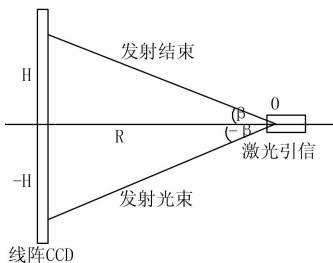


图 2 引信发射视场视场角 β

对每个视野角 α , CCD 线阵接收激光光束, 输出一列信号数据。通过控制步进电机的旋转, 改变视野角 α 的角度。最后形成输出信号幅度的变化二维矩阵, 此二维矩阵按视野角 α 和视场角 β 分布。

通过测量, 得到该引信发射激光功率的相对分布函数矩阵。为了得到准确的激光功率值, 事先可以用宽幅光功率计探头测量出激光总发射功率, 再进行数学计算。

1.2 接收视场测量

接收视场的测量较为复杂。通常有两种方法: 方法一一是用功率不变的目标模拟光脉冲照射引信接收窗口, 测量不同入射角引信接收模块输出信号的幅度变化矩阵。方法二是测量中调节目标模拟光脉冲功率, 使引信接收模块输出的信号幅度刚好在探测阈值上, 由此得到阈值功率随入射角度变化的矩阵^[10-11]。使用方法一时, 由于引信接收模

块光信号放大能力的非线性, 因此很难用大信号时的模块接收信号幅度去推算接收阈值功率时的光脉冲功率。因此我们采用第二种方法。如图 3 所示。在水平方向上, 引信接收窗口放置在激光引信的激光器为中心、半径为 R 的圆弧上。此圆弧是由水平步进电机的旋转带动机械设备运动而成, 视野角 α 的最大角度范围可以是一 $90^\circ \sim 90^\circ$ 。

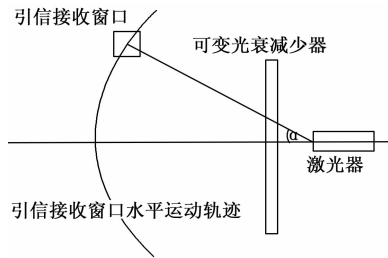


图 3 采用的引信接收视场测试系统示意图

在垂直方向上, 整个引信接收窗口平台由垂直步进电机的旋转带动机械设备上下运动而成。由图 4 可见, 引信接收窗口平台与水平中心的高度 H 与半径 R 、视场角 β 也存在一定的数学关系:

$$\beta = \arctan\left(\frac{H}{R}\right) \quad (2)$$

即根据预先测量的高度 H 与半径 R , 就能计算出视场角 β 。

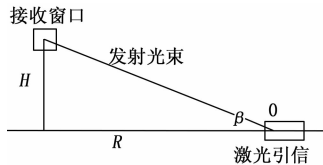


图 4 引信接收视场视场角 β

由图 3 可见, 接收视场的测量使用了可变光衰减器。可变光衰减器是通过控制衰减传输光功率, 来达到实现对信号的实时控制的目的, 它是一种光无源器件, 尤其在光纤通信中的应用更多。所以本设计使用程序来控制可变光衰减器, 来达到调节光脉冲功率的目的。

在使用第二种方法时, 每个测试点测试系统需要经多次调节光脉冲功率才能得到结果。每次只能得到矩阵中的一个数据, 而不是象发射测量中可以一次读取 CCD 线阵同一视野角的整个视场的一系列数据。

根据测量的范围, 在测量前, 将引信接收窗口放置在垂直方向的最大值、视野角 $\alpha = -90^\circ$ 处, 开始测量。每次获得数据后, 视野角 α 增加一个水平步长值, 再次测量, 直到视野角 $\alpha \geq 90^\circ$ 为止。这样, 记录了一行数据。然后, 将引信接收窗口在垂直方向降低一个垂直步长值, 视野角 $\alpha = -90^\circ$ 处, 开始测量, 直到视野角 $\alpha \geq 90^\circ$ 为止。此时, 记录了下一行数据。如此循环, 直到将引信接收窗口放置在垂直方向的最小值, 并记录了此行的数据。最后形成输出信号幅度的变化二维矩阵, 此二维矩阵按视野角 α 和视场角 β

分布。

这种方法测量速度较慢。要能提高测量速度, 测试系统必须能迅速地控制照射在引信接收窗口的光脉冲功率, 且能高速检测接收模块输出的信号幅度。虽然测量过程有点复杂但效果较好。使用这种检测方法甚至可以灵敏地分辨出光脉冲照射到接收模块光敏芯片的引线引起的阈值功率差异。

为了获得光功率接收阈值, 用于目标模拟的光脉冲信号源需经过输出功率定标。接收测量中该信号源输出平行光从不同角度照射接收模块窗口, 最终可以得到光功率接收阈值随视野与视场角变化的分布矩阵。

根据实测设备的技术需求, 采用数字化处理的要求, 一般使用设备能实测的位置是离散的, 实测光功率数据也是离散的。所以, 要想实测光功率接收阈值所在位置, 这几乎是不可能的。为了求出实测光功率接收阈值与所在位置, 只能使用插值法。利用测量范围内已知的测量点的实测值, 作出或猜测合适的函数, 并在其他点上用这特定函数计算值, 并作为光功率接收阈值的近似值。^[12]因此, 用插值法只能近似地求出实测光功率接收阈值与所在位置。如果实测的位置间距较小, 并且数字化处理的位数较大, 则误差就不会太大。

2 引信作用距离计算

如果同时测量了一对收发组件处于实际弹体安装位置的完整性能参数, 就可以将两幅视场的三分贝曲线重叠画在一起比较它们是否重合。还可以得到收发视场视野角范围、它们的几何中心偏差角度、视野的倾斜偏差角, 等等参数。通过这些参数, 可以粗略地判断引信收发组件的基本性能。然而要确定一套激光引信收发组件是否合格, 还是应该知道收发组件作为一个整体它的实际作用距离。事实上我们可以根据已经测试的收发视场数据, 经过计算来推算作用距离曲线是否满足设计要求。下面给出对于给定的目标参数, 最大作用距离随视野角分布的计算公式。

用 CCD 测出激光发射功率相对值按视野角 (和视场角) 分布的二维矩阵, 以 \mathbf{P} 表示, 即:

$$\mathbf{P} = [P_{\beta_i, \alpha_j}] \quad (3)$$

其中: $\beta_j = [\beta_0 \cdots \beta_n]$, $\alpha_i = [\alpha_0 \cdots \alpha_m]$ 。

矩阵元 $P_{\beta, \alpha}$ 表示视场角为 β , 视野角为 α 处的相对激光功率。 $[\beta_0 \cdots \beta_n]$ 为垂直方向视场扫描范围, $[\beta_0 \cdots \beta_m]$ 为水平方向视野扫描范围。令 \mathbf{P}_{sum} 为分布矩阵 \mathbf{P} 各元素之和, 即:

$$\mathbf{P}_{\text{sum}} = \sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_n} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_m} P_{\beta, \alpha} \quad (4)$$

用光功率计测量出激光总发射功率为 I_0 , 则可得与分布矩阵 \mathbf{P} 中每个测量数据对应的光功率分布矩阵 \mathbf{I} 为:

$$\mathbf{I} = \frac{I_0}{P_{\text{sum}}} \mathbf{P} \quad (5)$$

即每个矩阵元素为:

$$I_{\beta, \alpha} = \frac{I_0}{P_{\text{sum}}} P_{\beta, \alpha} \quad (6)$$

由于被激光照射的目标散射回接收窗口时的光功率密度 (即单位面积上的功率) 与接收窗口至目标的距离平方成反比, 且考虑到视场方向光斑较窄, 可以近似地认为目标上每点与接收窗口的距离 L_c 仅与视野角有关, 定义一维矩阵:

$$\mathbf{A} = [A_{\alpha_0} \cdots A_{\alpha_m}] \quad (7)$$

其中:

$$A_{\alpha} = 1/(\pi L_{\alpha}^2) \quad (8)$$

为与接收窗口至目标间距离有关的散射衰减因子。由式 (6)、(8) 可以得到从视场角为 (视野角为 (处, 反射率为 1 的目标散射回接收窗口处的激光功率密度为:

$$A_{\alpha} \mathbf{I}_{\beta, \alpha} = \mathbf{I}_{\beta, \alpha} / (\pi L_{\alpha}^2) \quad (9)$$

接收测量中测得阈值光功率密度分布矩阵:

$$\mathbf{g} = [g_{\beta, \alpha}] \quad (10)$$

找出矩阵 \mathbf{g} 所有元素中的最小值用 g_{\min} 表示, 计算出归一化接收增益系 $G_{\beta, \alpha} = g_{\min} / g_{\beta, \alpha}$, 即:

$$\mathbf{G} = [G_{\beta, \alpha}] \quad (11)$$

由式 (9)、(11) 每项分别相乘得到等效接收功率密度矩阵为 $\mathbf{A}_{\alpha} \mathbf{I}_{\beta, \alpha} \mathbf{G}_{\beta, \alpha}$ 。

考虑到收发视场都是线状的, 一旦照射到目标上可以认为目标充满整个有效视场角范围, 即 $\beta = \beta_0 \cdots \beta_n$, 计算反射光功率密度时可以将 $\mathbf{A}_{\alpha} \mathbf{I}_{\beta, \alpha} \mathbf{G}_{\beta, \alpha}$ 在视场方向 $\beta_j = [\beta_0 \cdots \beta_n]$ 范围内累加。

设目标水平宽度为 W , 反射率为 R , 目标位于距离探测窗口为 L 的弧面上。考虑到目标尺寸不是很大, 在目标宽度 W 上的不同视野角照射的光功率近似相等, 在视野角 (处目标被照射的视野宽度为 $360 W / (2\pi L_{\alpha})$, 当视野测试步长为 $\Delta\alpha$ 时接收窗口处等效散射光功率密度为:

$$\left(A_{\alpha} \sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_n} I_{\beta, \alpha} G_{\beta, \alpha} \right) R (360 / \Delta\alpha) \times (W / 2\pi L_{\alpha}) \quad (12)$$

式中, A_{α} , $G_{\beta, \alpha}$ 以及 R 分别为导弹与目标距离引起的光衰减因子、入射方向接收灵敏度不同引起的等效衰减因子、以及反射率的等效衰减因子。这些因子与 $I_{\beta, \alpha}$ 相乘得到的是每个发射功率矩阵单元值在接收窗口处贡献的等效光功率密度。上式中后两个括号的内容是目标的视野宽度除以视野测试步长, 也就是照亮目标的发射功率矩阵单元数。因此该式即为累加了全部目标散射光的接收窗口处等效散射光功率密度。显然, 当:

$$\left(A_{\alpha} \sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_n} I_{\beta, \alpha} G_{\beta, \alpha} \right) R (360 / \Delta\alpha) \times (W / 2\pi L_{\alpha}) = g_{\min} \quad (13)$$

时引信刚好处于能够接收到信号的最远距离, 用式 (8) 代入上述方程可得到收发组件最大作用距离 L_{\max} 随视野角的分布为:

$$L_{\max} = L_{\alpha} = [180 RW \left(\sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_n} I_{\beta, \alpha} G_{\beta, \alpha} \right) / [g_{\min} (\pi^2 \times \Delta\alpha)]^{1/3} \quad (14)$$

引信在整个视场中的可探测最小接收功率为：

$$I_{\min} = g_{\min} \times S \quad (15)$$

式中， S 为接收窗口面积，则最大作用距离可表示为：

$$L_{\max} = [180 RWS (\sum_{\beta=\beta_l}^{\beta_h} I_{\beta,\alpha} G_{\beta,\alpha}) / I_{\min} (\pi^2 \times \Delta\alpha)]^{1/3} \quad (16)$$

由式 (6)，可将上式改写为：

$$L_{\max} = [180 RWS (I_0 / I_{\min}) \sum_{\beta=\beta_l}^{\beta_h} (G_{\beta,\alpha} P_{\beta,\alpha} / P_{sum}) / (\pi^2 \times \Delta\alpha)]^{1/3} \quad (17)$$

式 (17) 即为收发组件的最大作用距离随视野角变化的计算公式。如图 5 所示，如果目标宽度 W 取 50 cm， R 取 0.3，当激光器的发射总功率与接收器的最小探测功率之比 I_0 / I_{\min} 有三种不同值时，某一收发组件的最大作用距离曲线。

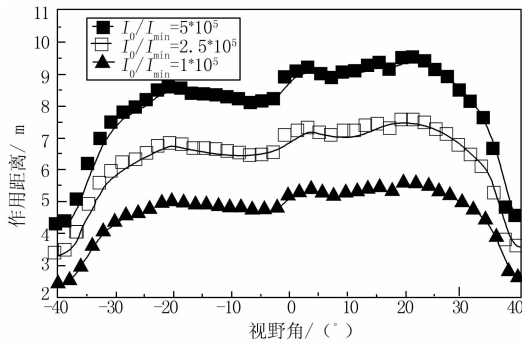


图 5 收发组件的最大作用距离曲线

从式 (17) 和图 5 中可以看出，激光发射功率和接收窗口的最小可探测接受功率阈值之比 I_0 / I_{\min} 是影响作用距离大小的决定因素，它主要和组件的光电性能有关。而式 (17) 的收、发视场分布矩阵决定了最大探测距离随视野角的分布形状，它主要反映了组件的光学性能。为此定义“收发视场匹配系数 K ”：

$$K = \sum_{\alpha=\alpha_l}^{\alpha_h} \sum_{\beta=\beta_l}^{\beta_h} [G_{\beta,\alpha} (P_{\beta,\alpha} / P_{sum})] \quad (18)$$

注意到式 (18) 中的每一项是某个角度的归一化接收增益系数乘以该角度的归一化激光功率分量。因而，如果在每个角度上接收增益系数均为最大值 1，那么 K 有最大值 1，说明散射回接收窗口的激光全部落在接收最灵敏的方向上。实际情况下如果散射回窗口的激光功率大部分落在接收增益比较大的方向上，可以期望 K 会有较大的值。图 (5) 的测试样品匹配系数计算结果： $K=0.64$ ，表明回到接收窗口的散射光因部分落在接收增益小于 1 的区域而有 0.36 的分量被损耗，这 0.36 部分是改善光路和接收器件性能的可能空间。由于视野角增大时，接收窗口面积 S 在视野角方向的投影也会减小，理论上不可能达到增益处处为 1。

一般来说，可以使用发射视场的三分贝区域是否全部落在收视场的三分贝区域内来检验两个视场的重合度，但

匹配系数 K 值的大小除精确量化了重合程度外，对于收、发视场不均匀，激光发射分布范围过大，或落在接收增益相对较小方向也是敏感的。根据所测各激光引信视场分布参数，利用式 (15) 可计算出引信对应不同反射率和面积的目标的实际作用距离分布。

3 实验验证

为了用实验手段进行验证，采用分点实际测试的方法，然后再汇总处理，与计算结果进行比较。如此则需耗大量的人力、物力与时间。为了节约时间，必须加大测量位置的间隔。

实验环境选取室内，为 22 m×12 m 的区域范围。如图 6 所示，在区域的原点 O 处放置某一型号的激光引信收发组件，模拟目标的模型放置在 $-40 \sim 40^\circ$ 范围内，每隔 2° ，进行测量距离原点 O 的作用距离。为了保证测量精度，每个位置测量 10 次，排除最大的 2 个数以及最小的 2 个数后，用剩余的 6 个数取平均值，采用这样的处理方法来改善系统误差。在每一次测量时，记录实测仪器的位置角度及测量距离原点 O 的作用距离。

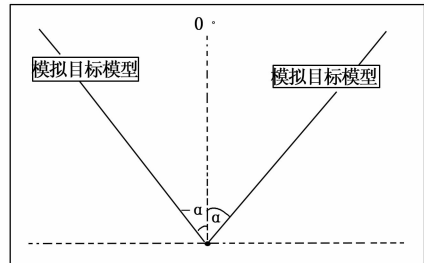


图 6 实验环境示意图

实验使用的模拟目标的模型目标宽度 W 约为 50 cm，反射率的等效衰减因子 R 约为 0.3，某一型号的激光引信收发组件的收发视场匹配系数 K 为 0.64。为了减少实际测试所用的力、物力与时间，采用计算收发组件的最大作用距离曲线时，激光器的发射总功率与接收器的最小探测功率之比 I_0 / I_{\min} 的最大值与最小值。

测量激光器的发射总功率与接收器的最小探测功率之比 $I_0 / I_{\min} = 1 \times 10^5$ 与 $I_0 / I_{\min} = 5 \times 10^5$ 值时的实际最大作用距离曲线 (如图 7 所示)。通过与图 5 所示比较，可以看出图形基本相同，数据相近。

若误差 $\Delta =$ 实际测量值 - 理论计算值，则最大作用距离曲线的误差如图 8 所示。如激光器的发射总功率与接收器的最小探测功率之比 I_0 / I_{\min} 值大，其误差也大。最大的误差范围在 $(-2.87, 4.19)$ cm 之间。可以认为理论计算值基本与实际测量值相同。

通过以上的实验，可以发现：

- 1) 利用自制成套设备分别测量引信收发视场数据，形成二维数据，通过计算能够对引信组件的品质做出准确评估。
- 2) 针对不同的目标，可以计算或测出目标宽度 W 、反

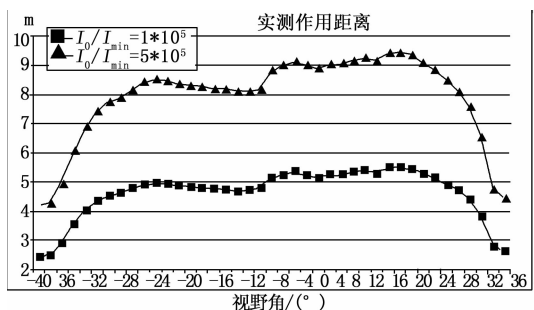


图 7 收发组件的实测最大作用距离曲线

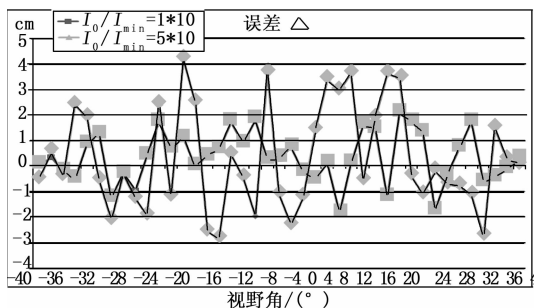


图 8 最大作用距离的误差

射率的等效衰减因子等参数, 这样可以避免和减少实物测试的麻烦。

3) 针对不同的激光引信收发组件, 可以计算或测出收发视场匹配系数 K 。利用式 (17), 可以增加测试距离的间距, 减少测试次数, 节约时间。

因此, 利用本文计算的方法, 激光引信收发视场只需进行一次测量, 根据所得测试数据, 进行数据处理, 就能对引信组件的品质做出准确的评估。

4 结论

利用本文计算方法可以在实验室测试引信收发组件后,

(上接第 28 页)

试验结果表明, 基于 NI 实时控制器的六自由度平台测控系统运行可靠, 满足了六自由度平台的功能和性能要求, 完成了一系列性能试验。

通过测控系统的集成设计, 完成了多自由度平台研制过程中的主要关键技术中的软件攻关工作, 掌握了六自由度平台研制过程中的软件编制技术和先进的理论分析方法和分析手段, 积累了工程研制经验, 达到了技术创新的目的。

参考文献:

[1] 吴江宁. 并联式六自由度平台及其控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1996.

[2] 杨乐平, 等. LabVIEW 程序设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

[3] 金维香. 图形化程序设计 G 语言— LabVIEW 与虚拟仪器

快速计算出每套引信窗口的作用距离曲线, 可以避免和减少实物测试的麻烦。文中给出的最大作用距离公式普遍适用于该类型的激光引信, 公式计算结果和匹配系数 K 值可以作为引信的性能检验指标使用。

参考文献:

[1] 谢静, 陈海清. 新型激光引信光学发射机的参量测试研究 [J]. 光子学报, 2013, 34 (8): 983-987.

[2] 李艳, 周海龙. 基于光学技术的引信测试方案设计 [J]. 测控技术, 2008, 27: 115-120.

[3] 谭佐军, 陈海清, 康竟然. 激光引信接收光学组件的研究与测试 [J]. 光子学报, 2009, 38 (11): 2742-2746.

[4] 陈守谦, 张正辉, 范志刚. 激光近炸引信测距能力的光学测试方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35 (5): 320-324.

[5] 张正辉, 陈守谦. 激光近炸引信距离控制精度测试技术分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (5): 639-643.

[6] 李喆, 范卫东, 李源. 半导体激光引信光学参数测试技术研究 [J]. 制导与引信, 2013, 34 (2): 13-17.

[7] 周承仙, 王高, 李仰军, 等. 基于非对称双 CCD 交汇的信号弹高度测量方法 [J]. 测试技术学报, 2009, 23 (3): 240-243.

[8] 史春波, 马献华. 探测视场对激光引信作用距离影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (6): 368-371.

[9] 狄惠鸽, 王建宇, 舒嵘. 激光雷达双轴配准度的测试 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38 (1): 131-134.

[10] 王宏力, 陆敬辉, 崔祥祥. 大视场星敏感器星光制导技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[11] 肖韶荣, 黄新, 张周财, 等. 散射能见度仪接收器视场角对测量的影响 [J]. 现代雷达, 2015, 37 (1): 78-82.

[12] 杨功流, 张桂敏, 李士心. 泛克里金插值法在地磁图中的应用 [J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16 (2): 162-166.

[1] 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2002, 2: 18221.

[4] 李宇华. 虚拟仪器开发平台 LabVIEW 介绍 [J]. 计算机自动测量与控制, 1996.

[5] 黄真, 孔令福, 方跃法. 并联机器人机构学理论与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[6] 姜虹, 贾嵘, 等. 六自由度并联机器人位置正解的数值解法 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34 (3).

[7] 杨乐平, 李海涛, 赵勇, 等. LabVIEW 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[8] 郑宗汉. 实时系统软件基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[9] 蒲凤萍, 吕迪波. 基于 LabVIEW 的多任务测控系统设计与实现 [J]. 电子测试, 2009 (8).

[10] 郑焱, 王磊. LabVIEW7.1 测试技术与仪器应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[11] 刘君华, 贾惠芹. 虚拟仪器图形化编程语言 LabVIEW 教程 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.