

文章编号: 1672-8785(2015)04-0024-06

旋转靶标平行光束空间交叠 区域的分析与验证

叶 鹏 张灏烨 刘晨晓

(四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 分析了旋转靶标工作时平行光束在空间的交叠区域, 提出了该区域为可准确定义的纺锤形圆锥体区域。使用旋转靶标测试时, 只需将被测设备的方位俯仰视轴交点放置在此区域内即可。使用旋转靶标对摆放在纺锤形圆锥体区域内不同位置的某型光电设备进行了多次测角和跟踪精度的验证试验, 测试值标准差和平均差的最大值均远小于该型设备的对应指标。测试结果表明, 只要将被测设备方位俯仰视轴的交点放置在以旋转靶标光锥顶点为中心的纺锤形圆锥体区域内, 由摆放位置偏差引入的测试误差就极其有限。测试结果的离散程度很低, 重复性很好, 能满足测试应用的需求。验证试验证明了纺锤形圆锥体区域定义的正确性, 表明该定义可作为测试时判断被测设备是否与旋转靶对准的理论依据。

关键词: 旋转靶标; 平行光束; 空间交叠区域; 纺锤形圆锥体; 光电设备测试

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.04.005

Analysis and Verification of Spacial Overlap Region of Parallel Light Beams from Dynamic Precision Target

YE Peng, ZHANG Hao-ye, LIU Chen-xiao

(Sichuan Jiuzhou Electric Group Co. Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: The overlap region of the parallel light beams in a space is analyzed when a dynamic precision target is running. The region is considered to be a cusiform cone region which can be defined accurately. When a dynamic precision target is used to test an optoelectronic device, it only needs to let the azimuthal pitch visual axis intersection point of the device to be tested be in this region. The dynamic precision target is used to test the angle and tracking accuracy of a given optoelectronic device in different positions in the region for many times. The maximum standard deviation and mean deviation of the test data obtained are much less than the corresponding specifications of the given device. The test result shows that as long as the azimuthal pitch visual axis intersection point of the device to be tested is in the above region, the test error due to the position deviation of the device to be tested is extremely limited. The test result has low discrete degree and good repeatability. It can meet the requirements for practical application. The verification test validates the definition of the fusiform cone. It shows that this definition can be taken as the theoretical basis for judging whether the device to be tested is in alignment with the rotating target during test.

Key words: dynamic precision target; parallel beam; spatial overlap region; fusiform cone; optical-electronic device test

收稿日期: 2015-03-08

作者简介: 叶鹏 (1981-), 男, 四川德阳人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为光电工程。E-mail: 16502980@qq.com

0 引言

旋转靶标用于在室内为光电设备提供已知空间角度真值的静态或动态模拟点目标, 它是对光电设备的测角精度、跟踪精度等关键指标进行测试的主要装置^[1-4]。在使用旋转靶标对光电设备进行正常测试时, 必须将被测设备对准旋转靶标。因此快速、准确地对准是高效测试的关键。这里讲的对准, 就是将被测设备的方位俯仰视轴交点放置在旋转靶标工作时所投射出的模拟点目标的平行光束在空间交叠的区域内。

目前, 旋转靶标工作时所投射出的模拟点目标的平行光束在空间交叠的区域尚无准确定义。现有文献通常认为模拟点目标的平行光束在空间中会交叠成一个点, 因此在使用旋转靶标对光电设备进行指标测试的具体操作步骤中, 通常要求光电设备的方位俯仰视轴交点与该空间交叠点重合。实际对准操作难度大, 测试效率低^[5-7]。

本文对用于约束被测设备与旋转靶标相对摆放位置的模拟点目标平行光束的空间交叠区

域进行了深入研究, 提出了纺锤形圆锥体空间交叠区域的定义, 研制了一种三维载物台, 并对某型光电设备进行了多次测角和跟踪精度测试。最后, 通过定量分析测试数据, 验证了所提出的纺锤形圆锥体空间交叠区域定义的正确性。

1 旋转靶标平行光束空间交叠区域分析

旋转靶标由平行光管、反射镜、旋转臂和主轴系等组成。工作时, 旋转臂绕主轴系旋转, 由平行光管辐射出的模拟点目标的平行光束经平面镜反射后会形成一个光锥^[8]。因为旋转靶标的平行光管的口径通常为几十到几百毫米, 所以模拟点目标的平行光束由于旋转臂绕主轴旋转所形成的光锥在其顶部存在一个光束在空间中交叠的区域, 如图 1 所示。空间交叠区域不是原点 O 所指的一个空间位置点 (有的文献称其为光锥顶点), 而是一个以原点 O 为中心的可准确定义的纺锤形圆锥体区域。

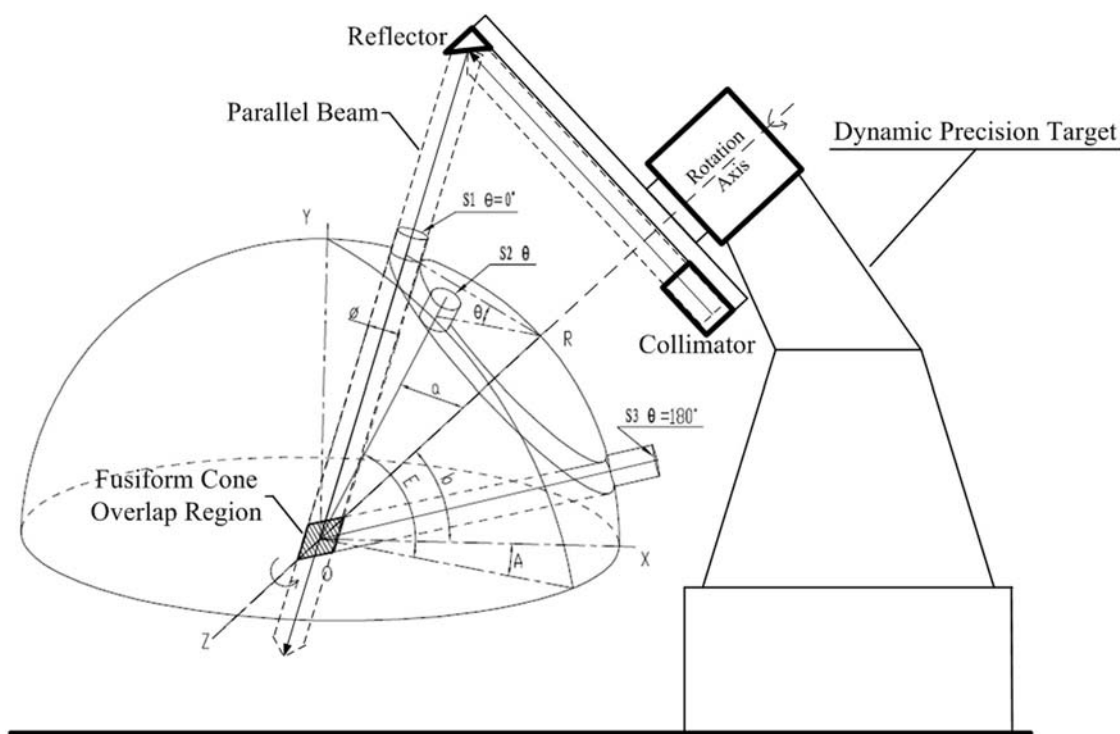


图 1 旋转靶标的平行光束空间交叠区域的示意图

图 1 中, S_1 、 S_2 和 S_3 为模拟点目标在其圆周运动轨迹中的任意三个位置, 模拟点目标的直径为 ϕ 的平行光束分别从 S_1 、 S_2 和 S_3 向原点 O 辐射; 阴影图形为模拟点目标平行光束的空间交叠区域; 原点 O 即光锥顶点, 即平行光束中心线的理论交叉点; OR 为旋转靶标主轴系中心线, a 为 S_2 点出射光束与主轴 OR 的夹角, 即光锥的半锥角; b 为主轴 OR 与水平面的倾角; A 为光电设备在原点 O 处对 S_2 点目标探测的方位角, E 为光电设备对 S_2 点目标探测的俯仰角; θ 为模拟点目标从 S_1 运动到 S_2 时相对于主轴 OR 的转角, 由旋转靶标主轴系编码器读取 [9-11]。

半锥角 a 和倾角 b 是旋转靶标的固定参数, 根据球面三角定理,

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \cos a \cos\left(\frac{\pi}{2} - b\right) + \sin a \cos\left(\frac{\pi}{2} - b\right) \cos \theta \quad (1)$$

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - E\right)}{\sin \theta} \quad (2)$$

可求得光电设备探测到模拟点目标方位角 A 及俯仰角 E 的值为

$$E = \arcsin(\cos a \sin b + \sin a \cos b \cos \theta) \quad (3)$$

$$A = \arcsin\left(\frac{\sin a \sin \theta}{\cos E}\right) \quad (4)$$

根据平行光原理, 如果光电设备保持探测到模拟点目标的方位俯仰视轴角度不变, 即使其相对旋转靶标的摆放位置沿任意方向移动一定距离, 只要其光学接收窗口仍然进入模拟点目标平行光束的覆盖范围, 则模拟点目标相对于光电设备的空间角度关系是恒定的, 即光电设备探测到模拟点目标的方位角 A 及俯仰角 E 不变。

旋转靶标模拟点目标平行光束因旋转臂绕主轴旋转所形成的覆盖范围如图 1 中所示的阴影图形区域。根据形状, 称其为纺锤形圆锥体空间交叠区域。只要将光电设备方位俯仰视轴交

点放置在该纺锤形圆锥体区域内, 式 (1) 至 (4) 均适用于其探测模拟点目标的方位俯仰角度计算。换句话说, 即使把光电设备的方位俯仰视轴交点放置在该区域内的不同位置, 其探测旋转靶标模拟点目标的方位俯仰角度仍相同。

图 2 在二维平面上更直观地表征了该原理。

图中示意地画出了旋转靶标的平行光管、反射镜和主轴系。平行光管和反射镜的实线图形表示其处于绕主轴系旋转时编码器读值为 θ 的某位置, 虚线图形表示其处于绕主轴系旋转 108° 后编码器读值为 $\theta + 108^\circ$ 的某位置。半锥角 a 和平行光束直径 ϕ 与图 1 中的参数相同。图 2 下部的菱形 $ABCD$ 即为旋转靶标在主轴系编码器读值为 θ 和 $\theta + 180^\circ$ 两个位置的模拟点目标平行光束空间交叠区域的平面图形, 线段 AC 与主轴系中心线 OR 重合, 线段 AB 和 DC 与编码器读值为 θ 时平行光束外包络线重合, 线段 AD 和 BC 与编码器读值为 $\theta + 180^\circ$ 时平行光束的外包络线重合。将光电设备方位俯仰视轴交点放置在菱形区域内的不同位置, 例如 O 点和 O' 点, 对旋转靶标模拟点目标进行探测, 其探测方位角 A_O 与 $A_{O'}$, 俯仰角 E_O 与 $E_{O'}$ 相同。

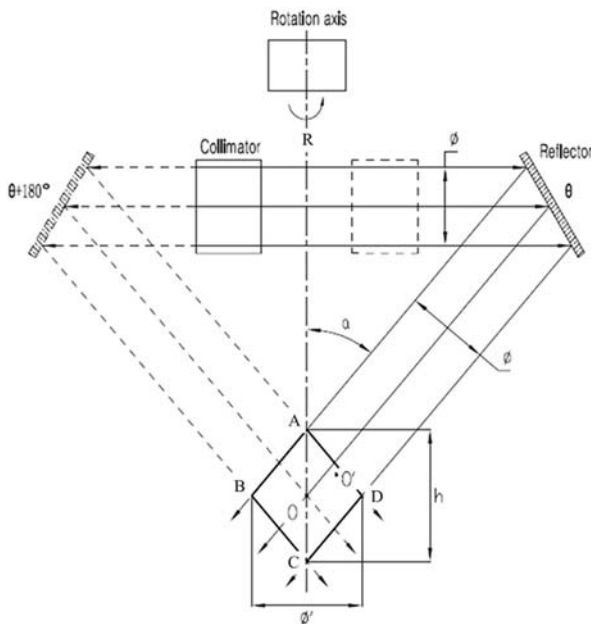


图 2 平行光束空间交叠区域平面示意图

旋转靶标工作时, 旋转臂绕主轴系旋转, 相应的, 图 2 中菱形 ABCD 绕主轴系中心线 OR 旋转形成纺锤形圆锥体。如图 3 所示, a 为圆锥体半锥角, 即 $\angle BAC$, 与图 2 中菱形 ABCD 的 $\angle BAC$ 相同, 显然地, 也与图 1、图 2 中旋转靶标的半锥角 a 值相同; ϕ' 为圆锥体中心圆的直径, 即线段 BD, 与图 2 中菱形 ABCD 的线段 BD 相同, h 为圆锥体顶点的高度, 即线段 AC, 与图 2 中菱形 ABCD 的线段 AC 相同, 由三角关系易得 $\phi' = \phi / \cos a$, $h = \phi / \sin a$, 其中, a 为旋转靶标的半锥角, ϕ 为平行光管的口径。

总之, 应用旋转靶标进行测试时, 只要将被测光电设备的方位俯仰视轴交点放置在以旋转靶标 (半锥角 a , 平行光管口径 ϕ) 光锥顶点为中心, 中心圆直径 $\phi' = \phi / \cos a$ 和顶点高度 $h = \phi / \sin a$ 的纺锤形圆锥体区域内, 就可认为对准, 被测设备均可有效探测模拟点目标在其圆周运动轨迹上任意位置的空间角度, 即使测试时相对旋转靶标的具体摆放位置略有不同, 也不会影响测试结果。以现有的半锥角为 30° 、平行光管口径为 80 mm 的旋转靶标为例, 将被测设备放置在以光锥顶点为中心, 中心圆直径为 92 mm、顶点高度为 160 mm 的纺锤形圆锥体区域内, 均可认为对准, 满足测试要求。

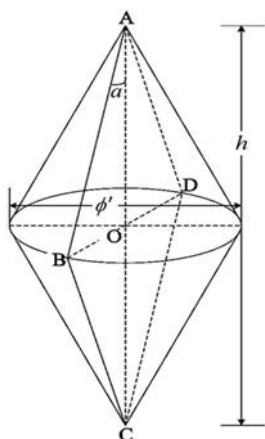


图 3 纺锤形圆锥体示意图

2 验证试验环境

结合现有旋转靶标与某型光电设备, 研制了三维载物台, 搭建了验证试验环境, 如图 4 所

示。三维载物台可以精确量地在左、右、高、低、前、后六个方向移动其承载的标校仪器或者被测设备。载物台的主要指标有: 台面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 载重为 350 kg, 单向移动范围是左右前后 600 mm、高低 100 mm, 移动精度为 0.5 mm。

将某型光电设备摆放在图 4 所示载物台上的徕卡 MS50 型图形全站仪位置处, 大致调整其方位俯仰视轴交点, 使其位于旋转靶标光锥顶点附近。然后调节三维载物台定位不同的空间位置, 反复多次进行测角和跟踪精度测试, 以验证被测设备放置在纺锤形圆锥体区域内的不同位置是否会影响测试结果。

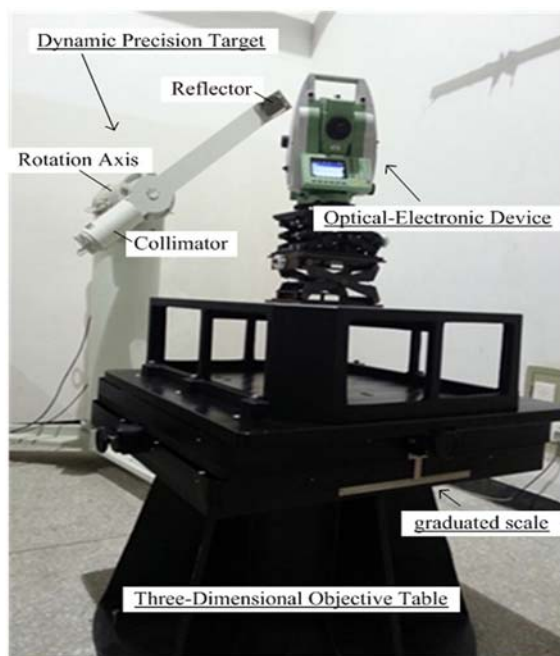


图 4 三维载物台和验证试验环境

3 验证试验

3.1 对某型光电设备测角精度测试的验证试验

使用现有旋转靶标对某型光电设备进行测角精度测试。首先采用传统方法精确调节三维载物台以确定光锥顶点位置^[5], 然后左右高低各移动 35 mm (根据 92 mm 中心圆直径确定)、前后各移动 70 mm (根据 160 mm 顶点高度确定), 共得到 7 个位置。上述位置均在第 2 节最后所描述的中心圆直径为 92 mm、顶点高度为 160 mm 的纺锤形圆锥体区域内, 并留有一定余量。控制

旋转靶标, 分别对在上述不同位置的光电设备进行 7 次测角精度测试, 每次测试选取 8 个主轴系编码器 θ 不同角度的模拟点目标, 7 次测试共获得 56 组数据。试验数据和相关计算结果见表 1。

表 1 对某型光电设备测角精度的测试数据

编码器 角度	目标角度 真值 α (°)	摆放位置	原点位置	左移 35mm	右移 35mm	上移 35mm	下移 35mm	前移 70mm	后移 70mm	标准差 SD (°)	平均差 MD (°)
0°	方位	0	0.187	0.181	0.169	0.182	0.175	0.181	0.179	0.0053	0.0041
	俯仰	29.66	29.279	29.279	29.262	29.273	29.269	29.279	29.269	0.0061	0.0053
45°	方位	21.93	21.533	21.544	21.522	21.529	21.535	21.539	21.537	0.0066	0.0053
	俯仰	20.48	20.281	20.275	20.286	20.274	20.283	20.281	20.279	0.0039	0.0033
90°	方位	29.66	29.136	29.136	29.136	29.141	29.143	29.147	29.141	0.0039	0.0034
	俯仰	0	0.071	0.055	0.069	0.054	0.05	0.071	0.067	0.0084	0.0081
135°	方位	21.93	21.511	21.524	21.5	21.521	21.511	21.524	21.507	0.0086	0.0077
	俯仰	-20.48	-20.171	-20.193	-20.182	-20.183	-20.19	-20.187	-20.189	0.0067	0.0054
180°	方位	0	-0.049	-0.06	-0.033	-0.05	-0.041	-0.049	-0.039	0.0082	0.007
	俯仰	-29.66	-29.29	-29.284	-29.29	-29.291	-29.291	-29.29	-29.289	0.0022	0.0016
225°	方位	-21.93	-21.621	-21.644	-21.627	-21.643	-21.647	-21.643	-21.639	0.0091	0.0078
	俯仰	-20.48	-20.226	-20.237	-20.257	-20.25	-20.245	-20.253	-20.241	0.0098	0.0081
270°	方位	-29.66	-29.13	-29.13	-29.13	-29.129	-29.125	-29.125	-29.127	0.0021	0.002
	俯仰	0	-0.011	0	-0.033	-0.014	-0.019	-0.016	-0.021	0.0093	0.0069
315°	方位	-21.93	-21.313	-21.297	-21.325	-21.322	-21.315	-21.313	-21.308	0.0085	0.0063
	俯仰	20.48	20.204	20.22	20.187	20.198	20.209	20.204	20.21	0.0096	0.0072
测角 精度 σ (°)	方位	---	0.4175	0.4153	0.4166	0.4124	0.4136	0.4118	0.4159	0.0020	0.0018
	俯仰	---	0.2647	0.2596	0.2653	0.2626	0.2605	0.2597	0.2621	0.0021	0.0018

表 1 从两个方面对测试数据进行了分析计算:

(1) 计算对编码器 θ 相同角度的模拟点目标, 光电设备在 7 个不同位置的目标方位俯仰角度探测值的标准差和平均差。

$$SD_{\alpha} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 / 7} \quad (5)$$

$$MD_{\alpha} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 |\alpha_i - \bar{\alpha}| \quad (6)$$

其中标准差最大值为 0.0098° (0.171mrad), 平均差最大值为 0.0081° (0.1414mrad)。

(2) 计算光电设备在 7 个不同位置的方位俯仰测角精度以及 7 组测角精度值的标准差和平均差。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (\alpha_i - \alpha_r)^2 / 8} \quad (7)$$

$$SD_{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 / 7} \quad (8)$$

$$MD_{\sigma} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 |\sigma_i - \bar{\sigma}| \quad (9)$$

其中标准差最大值为 0.00216° (0.0367mrad), 平均差最大值为 0.0018° (0.0314mrad)。

该型光电设备的测角精度为 10mrad , 计算得出的目标方位俯仰角度探测值和测角精度值的标准差与平均差均远小于 10mrad , 说明被测设备在纺锤形圆锥体区域内不同位置的测角精度测试结果的离散程度很低, 重复性很好。

3.2 对某型光电设备跟踪精度测试的验证试验

使用现有旋转靶标对某型光电设备进行跟踪精度测试。控制旋转靶标分别以 $10.1^{\circ}/\text{s}$ 、 $5.2^{\circ}/\text{s}$ 和 $1.2^{\circ}/\text{s}$ 的角速度匀速旋转, 类似地调节三维载物台, 选取 7 个不同位置分别测试光电设备的跟踪精度。试验数据和相关计算结果见表 2。

表 2 分析计算了相同旋转角速度下光电设备在 7 个位置处的跟踪精度值的标准差和平均差。计算公式与测角精度值的标准差和平均差计算公式相同, 其中, 标准差的最大值为 0.0189° (0.3299mrad), 平均差的最大值为 0.0171° (0.2985mrad)。

表 2 对某型光电设备跟踪精度的测试数据

旋转 角速度	摆放位置 跟踪精度 σ (°)	原点 位置	左移 35mm	右移 35mm	上移 35mm	下移 35mm	前移 70mm	后移 70mm	标准差 SD (°)	平均差 MD (°)
10.1°/s	方位	0.5592	0.6026	0.6002	0.5532	0.5689	0.5912	0.587	0.0184	0.0171
	俯仰	0.6059	0.5868	0.5877	0.569	0.6152	0.6273	0.6144	0.0189	0.0169
5.2°/s	方位	0.4378	0.4323	0.4458	0.438	0.4525	0.4621	0.446	0.0094	0.0076
	俯仰	0.389	0.3824	0.394	0.3968	0.3763	0.3852	0.4011	0.008	0.0069
1.2°/s	方位	0.2069	0.2086	0.2155	0.2028	0.2044	0.2146	0.2153	0.005	0.0046
	俯仰	0.1684	0.171	0.1633	0.1645	0.1615	0.1546	0.1568	0.0054	0.0045

该型光电设备的跟踪精度为 25 mrad, 计算得出的方位俯仰跟踪精度值的标准差与平均差均远小于 25 mrad, 说明被测设备在纺锤形圆锥体区域内不同位置的跟踪精度测试结果的离散程度很低, 重复性很好。

两轮测试中, 通过调节三维载物台移动被测设备, 使其在左右高低方向超出约 40 mm, 或在前后方向超出约 80 mm, 即将被测设备方位俯仰视轴交点移出纺锤形圆锥体区域, 被测设备就无法全程有效地探测旋转靶标的模拟点目标, 也就无法完成相关测试。

从前述两轮测试的验证试验数据和分析计算结果可以看出, 对于现有旋转靶标, 只要被测设备的方位俯仰视轴交点处在以旋转靶标 (半锥角为 30°, 平行光管口径为 80 mm) 光锥顶点为中心, 中心圆直径为 92 mm、顶点高度为 160 mm 的纺锤形圆锥体区域内, 并能对沿圆周轨迹运动的模拟点目标进行全程探测, 则被测设备相对旋转靶标摆放位置偏差引入的测试误差就极其有限, 测试结果离散程度很低, 重复性很好, 可满足指标测试的应用需求。但是如果超出该区域, 则无法完成测试。该试验验证了本文所提出的纺锤形圆锥体定义的正确性。

4 结束语

通过本文研究可以看出, 旋转靶标工作时模拟点目标的平行光束在空间交叠的区域可以准确定义为纺锤形圆锥体区域。该纺锤形圆锥体以旋转靶标 (半锥角 α , 平行光管口径 ϕ) 光锥顶点为中心, 中心圆直径 $\phi' = \phi / \cos \alpha$ 和顶点高度 $h = \phi / \sin \alpha$ 。在使用旋转靶标进行测试时, 只

要被测设备的方位俯仰视轴交点处在该纺锤形圆锥体区域内, 则其相对旋转靶标摆放位置偏差引入的测试误差极其有限, 测试结果离散程度很低, 重复性很好, 可满足指标测试的应用需求。

提出的纺锤形圆锥体定义为测试时被测设备与旋转靶标是否对准提供了更准确、更实际的理论依据, 大大降低了快速对准的操作难度, 提高了测试效率。

参考文献

- [1] 洪进, 张立中, 王霞. 动态靶标误差建模分析 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2014, 37(5): 69-72.
- [2] 吴瑾, 张波, 沈湘衡. 可编程动态靶标参数设计 [J]. 光电工程, 2008, 35(9): 91-94.
- [3] 马军, 何煦, 韩冰. 新型动态多光学目标模拟装置研究 [J]. 应用光学, 2008, 29(3): 374-379.
- [4] 张东梅, 尚春民, 乔彦峰. CCD 激光自准直旋转靶标轴系跳动测量系统 [J]. 测试技术学报, 2006, 20(5): 407-411.
- [5] 伞晓刚, 杨立保. 经纬仪对准动态靶标的方法研究 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2010, 33(2): 1-4.
- [6] 顾营迎, 沈湘衡, 贺庚贤, 等. 光电经纬仪旋转靶标特性对目标跟踪的影响 [J]. 光电工程, 2011, 38(3): 19-24.
- [7] 张乐, 成斌, 杨伟宏. 光电活动靶标建模及仿真分析 [J]. 光电技术应用, 2006, 21(3): 66-68.
- [8] 张波, 贺庚贤, 沈湘衡. 可编程动态旋转靶标标定方法 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 73-77.
- [9] 关志军. 新型动态靶标的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [10] 杨亮. 动态仿真目标的空间位置精度测量 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.