

激光自动准直系统及静态准确度^{*)}

南京航空学院激光自动机研制小组

提 要

中距离(0~40米)空间定位是航空工业的一项重要技术关键,现有方法存在较多问题,激光自动准直技术是解决这一关键的有效方法。我们与有关工厂协作所研制的激光自动准直系统通过试验表明,其静态准确度达到了 ± 0.1 毫米(试验距离0~27米)。这种激光自动准直系统也可用于其他工业部门。本文介绍了激光自动准直系统的原理、静态准确度分析和试验结果、激光束的飘移。

在0~40米距离范围内对工件进行空间六个自由度方向的定位,是发展航空工业的一项重要技术关键。现有方法主要有两种:

1. 在专用机床中,通过三组互相垂直的标尺进行空间定位。现有这种专用机床的最大定位距离不能满足生产要求。这种机床制造周期长、成本高、机动性差、温差变形严重。

2. 由准直望远镜、水准仪、经纬仪等光学仪器组成光学坐标进行空间定位。由于光学仪器只解决了定位中的测量问题,未解决调整问题,用手工方法进行空间六个自由度方向的调整,效率低。当测量距离超过15米时,准确度显著降低。

激光自动准直技术是解决上述关键的有效方法之一。激光的方向性好,能量集中,能在空间形成一条具有一定能量的基准轴线。光电靶标将光能转换成电能,通过激光自动准直系统可对工件进行自动定位。这种方法兼有上述光学方法机动灵活和机械方法效率较高的优点。

激光自动准直系统尚可有其他应用,如自动控制深孔钻的钻孔直线性、自动控制掘进机的方向等。当激光束移动时,物体能自动跟踪激光束移动,因此可对物体位置进行遥控,如自动控制武器的运动方向。

激光自动准直系统的原理

激光自动准直系统的基准光束采用直流内腔式单模氦-氖激光管,输出的激光束经过12倍的平行光管,形成一条直径约10毫米的平行光束,其直径在60米范围内的变化量小于1毫米。

光电靶标的结构原理如图1所示。基准光束照射到光电靶标的反射锥I上,通过反射锥的圆锥反射面反射到光敏电阻 R_1 和 R_2 、 R_3 和 R_4 上。反射锥I中央有一直径5毫米的孔,部分光束穿过这个孔照射到反射锥II上,经其圆锥反射面反射到光敏电阻 R_5 和 R_6 、 R_7 和 R_8 上。

^{*)} 静态准确度是指静态误差分布带的大小,而静态误差则为自动控制系统在稳定状态时被控制量的实际值与名义值之差。

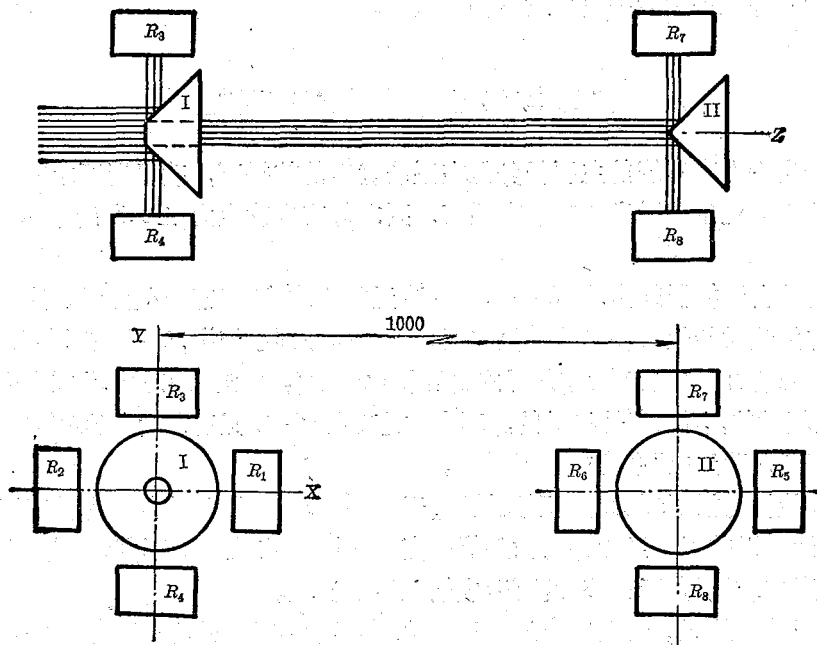


图1 光电靶标结构原理图

先以 x 轴方向为例。当靶标在 x 轴方向相对基准光束有偏离时，经反射锥反射到光敏电阻 R_1 和 R_2 上的光通量改变，从而引起光敏电阻 R_1 和 R_2 的电阻值改变，即 $R_1 \neq R_2$ 。 R_1 和 R_2 是电桥的两个相邻臂，当其阻值不等时，电桥便产生输出信号。此信号经放大器放大后，通过电液伺服阀、液动机、机械传动装置产生缩小偏离的调整动作，直至光电靶标对准基准光束为止。此时， $R_1 = R_2$ ，整个系统处于平衡状态。



图2 激光自动准直系统方框图

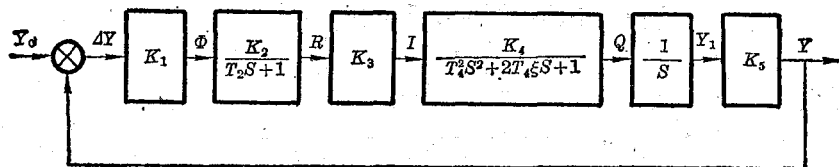


图3 激光自动准直系统结构图

上述激光自动准直系统的方框图如图2所示，其结构图如图3所示。

同理，光敏电阻 R_3 和 R_4 控制调整对象在 y 轴方向的位置，光敏电阻 R_5 和 R_6 控制调整对象绕 y 轴转动方向的位置，光敏电阻 R_7 和 R_8 控制调整对象绕 x 轴转动方向的位置。

准直对象沿 z 轴方向和绕 z 轴转动方向的位置，分别通过定距系统和自动调平系统进行自动控制。

这样，就建立了以激光束为基准的自动准直系统和以电子水准器为基准的自动调平系统；

自动控制调整对象在空间六个自由度方向的位置。

激光自动准直系统的静态误差

研制激光自动准直系统的主要任务是在系统稳定的前提下, 确保所要求的静态准确度。用于航空工业空间定位的激光自动准直系统, 要求静态准确度为 ± 0.1 毫米/40 米(或 $\pm 2.5 \times 10^{-6}$)。

按照传统的自动控制理论, 图 3 是一种一阶无差系统, 即静态误差为零。这一结论是假定系统全部元件为绝对线性时得出的。但在实际的自动控制系统中, 无差是不存在的。“对立的统一是有条件的、暂时的、相对的, 而对立的互相排除的斗争则是绝对的。”在激光自动准直系统中, 准直是相对的, 不准直是绝对的。不存在绝对的无差, 只有相对的准直准确度。由于元件的非线性特点, 使“无差”系统产生了误差。

元件的非线性包括滞环、间隙、不灵敏区、干摩擦等, 引起了元件的两种静态误差:

1. 输入迟滞误差 Δ_a , 当元件的输入值改变 Δ_a 时, 输出值迟滞不变。例如电液伺服阀的余磁、滑阀静摩擦、滑阀负开口等, 均可造成输入迟滞误差。

2. 输出飘移误差 Δ_b , 当元件输入值不变时, 输出值产生变化量 Δ_b 。例如放大器的温飘、湿式电液伺服阀磁隙中杂质影响、光敏电阻温飘等。

各元件输入迟滞误差 $\Delta_{a1}, \Delta_{a2}, \dots, \Delta_{ai}, \dots, \Delta_{an}$ 所造成的系统静态误差为

$$\Delta_a = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{ai}}{\prod_{j=1}^i K_j} \quad (1)$$

式中 K_j 为第 j 个元件的比例系数。

各元件输出飘移误差 $\Delta_{b1}, \Delta_{b2}, \dots, \Delta_{bi}, \dots, \Delta_{bn}$ 所造成的系统静态误差为

$$\Delta_b = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{bi}}{\prod_{j=1}^i K_j} \quad (2)$$

激光自动准直系统的总误差为

$$\Delta_y = \Delta_a + \Delta_b = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{ai}}{\prod_{j=1}^i K_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{bi}}{\prod_{j=1}^i K_j} \quad (3)$$

其误差带大小为

$$\omega_y = \frac{1}{k_y} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{K_{ai}^2 \omega_{ai}^2}{\prod_{j=1}^i K_j^2} + \sum_{i=1}^n \frac{k_{bi}^2 \omega_{bi}^2}{\prod_{j=1}^i K_j^2}} \quad (4)$$

式中 k 为相对离散系数, ω 为误差带大小。

可见:

1. 各元件静态误差对系统总静态误差的影响是不同的, 取决于 $\frac{k_{ai} \omega_{ai}}{\prod_{j=1}^i K_j}$ 和 $\frac{k_{bi} \omega_{bi}}{\prod_{j=1}^i K_j}$ 的

大小。这两项大小占 1/10 的元件, 即使将其全部消除, 总误差带的减小还不到 1/100。因此, 在研制激光自动准直系统中, 必须抓住主要矛盾, 减小占主要影响的元件的静态误差, 才能有

效地提高准直准确度。一般情况下,越是前面的元件,对总静态误差的影响越大。光敏电阻的静态准确度和光电靶标的比例系数对准直准确度有决定性意义。

2. 各元件静态误差对系统总静态误差的影响,不仅取决于元件静态误差的大小,还取决于该元件之前各元件的比例系数大小。要减小元件静态误差对系统总误差的影响,可提高该元件之前各元件的比例系数。但是,比例系数的提高会对系统稳定性产生不利影响。稳定性和静态准确度在这一点上是矛盾的。

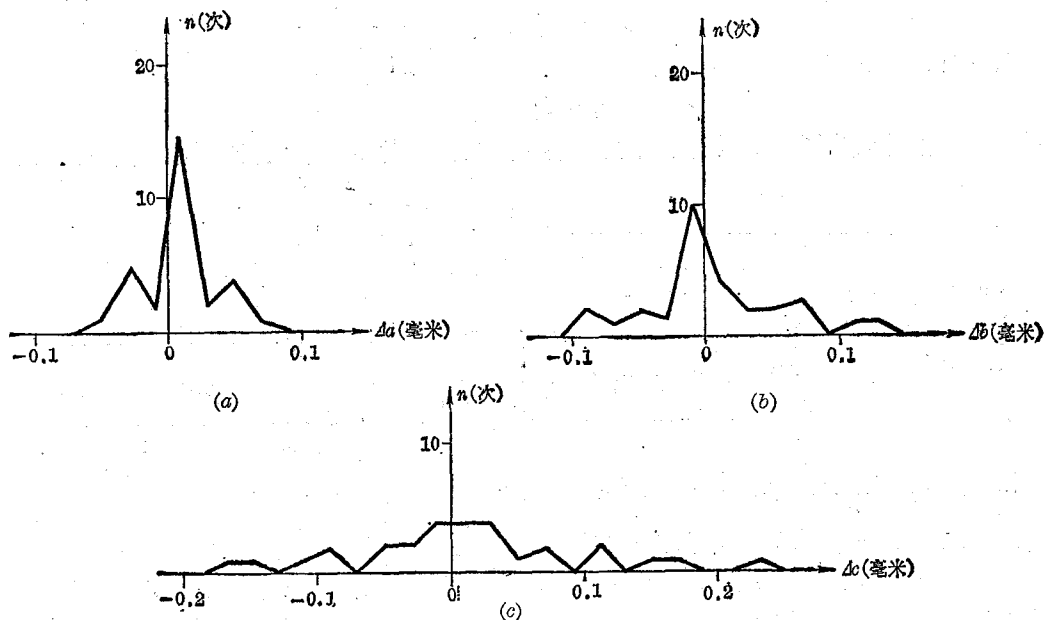


图4 激光自动准直系统静态误差的统计分布

激光自动准直系统的静态准确度试验结果如图4所示。以系统(a)的静态准确度最高。这是由于:系统(b)的机械传动装置的比例系数 K_5 较大,由于系统稳定性的限制,使放大器的放大倍数 K_3 较小,因而降低了静态准确度。系统(c)的 K_5 更大,因而静态准确度更低,以至不能满足使用要求。

基准激光束的飘移

实践表明,激光自动准直系统的给定值——基准激光束的位置有飘移现象。给定值也不是定值。

对激光束飘移的认识是通过激光自动准直系统和激光准直仪的联合试验取得的。试验装置如图5所示。基准激光束发射器1、激光准直仪靶标2和激光自动准直靶标3安放在一条

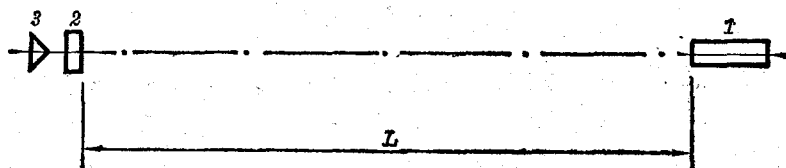


图5 激光自动准直系统和激光准直仪联合试验装置简图

直线上。间隔一定时间,将两个靶标对准光束,测量得准直仪靶标的位置误差 Δ_1 和自动准直靶标的位置误差 Δ_2 。 $L=27$ 米时的试验结果如图 6 所示。

对试验结果的分析:

准直仪靶标的位置误差 Δ_1 包括基准激光束位置误差 Δ_{y0} 和准直仪测量误差 Δ_{y1} , 即

$$\Delta_1 = \Delta_{y0} + \Delta_{y1} \quad (5)$$

自动准直靶标的位置误差 Δ_2 包括基准激光束位置误差 Δ_{y0} 和自动准直系统误差 Δ_{y2} , 即

$$\Delta_2 = \Delta_{y0} + \Delta_{y2} \quad (6)$$

将(5)、(6)两式相减,得

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \Delta_{y1} - \Delta_{y2} \quad (7)$$

图 7 所示,便是消除了基准激光束位置误差后的激光自动准直系统误差和激光准直仪误差的综合。

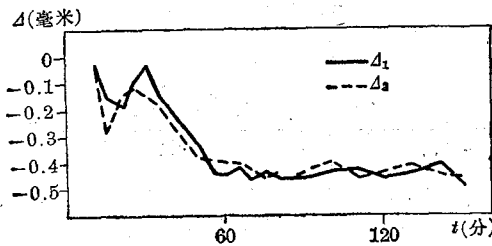


图 6 激光准直仪靶标和自动准直靶标的位置误差

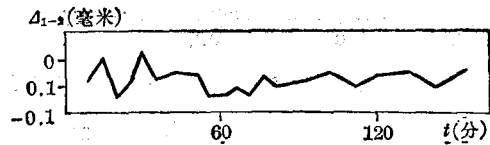


图 7 $\Delta_1 - \Delta_2$ 曲线

而 Δ_1 和 Δ_2 的相同部分 Δ_{y0} , 即反映在图 6 中 Δ_1 、 Δ_2 曲线的变化相同部分,则是由于基准激光束的飘移造成的。多次试验表明,基准激光束的飘移量在 1 小时以内约在 0.5 毫米左右,数值是不固定的,在 1 小时以后的飘移量约在 0.1 毫米以下。两者超过或相当激光自动准直的公差值。因此,控制激光束飘移量,是研制激光自动准直系统的一项关键。

产生激光束飘移的原因是多方面的,目前认识到的有:

1. 氦-氖激光管的不稳定热传导

氦-氖激光管既是一个光源,又是一个热源,这两方面是互相联系互相制约的。

激光管的温度分布,是中心高,四周低,阴极一端高,阳极一端低,在圆周方向也不均匀,形成一个不均匀不对称的温度场,引起了氦-氖激光管的各种变形:放电管的形状和位置改变、共振腔反射镜相对位置改变、激光管相对安装基准的位置改变等。这些变化,都会造成激光束轴线位置的改变。

而且,这个不均匀非对称的温度场又随时间而变,造成激光束随时间而飘移。开始时,温差变化大,飘移也大。后来,温度场接近平衡,飘移较小。这种相对平衡,由于外界温度、散热条件等因素的变化,不断遭到破坏,然后再平衡,再变化,……致使激光束不断飘移。

不稳定热传导过程可用下列方程式作概略的数学描述:

$$c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q \quad (8)$$

式中 c 为比热(大卡/公升·°C); γ 为密度(公斤/米³); t 为温度(°C); τ 为时间(小时); λ 为导热系数(大卡/米·小时·°C); q 为单位时间单位容积热源发出的热量(大卡/米³·小时)。

在实际物体中,式(8)的列式和求解都很困难,但由方程可以定性地看出,影响不稳定热传导过程的主要因素是温度场、物体导热能力和储热能力。因此,减小激光束飘移的相应措施是:

- (1) 稳定热源,采用稳压稳流激光电源;
- (2) 稳定周围介质的温度,如采用固液双相恒温介质、隔热罩等;
- (3) 控制热容量和导热系数;
- (4) 采用膨胀系数小的材料制造氮-氩激光管,如用石英代替玻璃;
- (5) 采用外腔式激光管,控制共振腔反射镜相对位置;
- (6) 用基准靶标对光束进行校正。

2. 大气干扰

激光束经过大气进入靶标。空气流动和温度不均匀,使激光束折射。为排除或减少大气干扰应采取如下措施:

- (1) 禁止在光经过的空间附近设置热源;
- (2) 要求在不感觉有风的车间条件下使用;
- (3) 采用积分电路。

3. 杂光干扰

和激光束同时进入靶标的杂光,如阳光、灯光、物体反射光等,也引起光敏元件输出值的改变,其后果相当于光束飘移。针对这方面所采取的措施:

- (1) 采用干涉滤光片;
- (2) 采用遮光罩;
- (3) 靶标内部用黑色表面保护层。

4. 激光发射器支座不稳定

5. 激光电源不稳定。

在采取1[(1)、(6)]、2[(1)、(2)]、3[(1)、(2)、(3)]等措施后,控制了激光束的飘移量,达到了技术指标。此外,实验表明采用双相恒温介质[措施1(2)],提高了光束稳定性。

小 结

以激光束为基准,可对物体进行自动准直或自动跟踪。其静态准确度目前可达 10^{-1} 毫米数量级,提高到 10^{-2} 毫米数量级是可能的。

参 考 资 料

- [1] 南京航空学院,自动调节原理,1972.
- [2] В. В. Солодовников, Основы автоматического регулирования теории, Машгиз, 1954.
- [3] Л. Ф. Дунаев, Размерные цепи, Машгиз, 1962.
- [4] Douglas C. Sinclair, W. Eere Bell, Gas laser technology, U. S. A., 1969.
- [5] G. Carey, P. A. Hickman, Development in laser alignment techniques, ISA Transactions, 1970. (9) No. 3.
- [6] U. S. Patent 3588737, Thermally stabilized laser.
- [7] U. S. Patent 3568088, Laser with improved power and frequency stability.
- [8] U. S. Patent 3617926, Laser using a cube corner reflector at one end of the discharge tube so that both cavity reflectors are at the other end to compensate for thermal distortion.
- [9] U. S. Patent, 3551057, Laser beam alignment apparatus.
- [10] U. S. Patent, 3603691, Laser control for automatic alignment.
- [11] Laser helps bore straight holes, American Machinist, 1971 (Aug.) 115, No. 16, 60~61.
- [12] U. S. Patent, 3486826, Three axis optical alignment apparatus.