

激光准直测量就是利用光的直线传播定律及激光良好的直线性,以激光束作为直线基准来获取被测物体的各种形位误差。本章首先介绍光学准直测量的基本原理和系统组成;然后介绍激光直线度测量方法并进行误差分析;最后介绍激光多自由度误差同时测量和激光跟踪测量。



第22集
微课视频

3.1 概述

激光具有极好的方向性,一个经过准直连续输出的激光光束,其激光光束能量分布中心的连线可以认为是一条几何直线,并作为准直测量的空间基准线。激光准直测量就是利用激光束的直线性,以激光束作为直线基准,通过获取被测物体与基准光束之间的偏离量,得到被测几何量的偏差。

准直技术是大型几何参数与形位误差的测量基础,如直线度、同轴度、平面度、平行度、垂直度等几何量。因此,高精度准直技术是计量测试的重要研究领域,在生产和生活中有极其广泛的应用。例如,在电梯导轨的安装、大型平台的平面度测量、大型机械零部件轴孔同轴度和同心度测量、大坝外部变形监测等领域,准直技术都有着广泛的应用。

3.1.1 激光准直测量基本原理

1. 准直与自准直的基本原理

传统的平行光管又称为准直仪,它的作用是提供无限远的目标或给出一束平行光。平行光管主要由一个望远物镜和一个安置在物镜焦平面的分划板组成,平行光管常见与平面反射镜组合,通过读数目镜构成自准直仪。自准直仪是利用光学自准直原理,用于小角度测量或可以转换为小角度测量的一种常用计量测试仪器,在直线度等测量领域有着广泛的应用。早期的自准直仪以光学机械式为主,通过人眼观察进行测量,目前国内外均有多种型号的光电自准直仪产品,采用高分辨力的 CCD,测量灵敏度可以达到 $0.005''$,其基本构成和原理如图 3-1 所示。

光源发出的光束经过聚光镜均匀照明到位于物镜的焦平面上的十字分划板上,十字形刻线经分光镜、物镜、反射镜后,光线返回经物镜和分光镜,十字形刻线成像在置于物镜的焦平面上的面阵 CCD 器件上,十字形刻线图像经图像采集卡后输入计算机,经计算机分析处

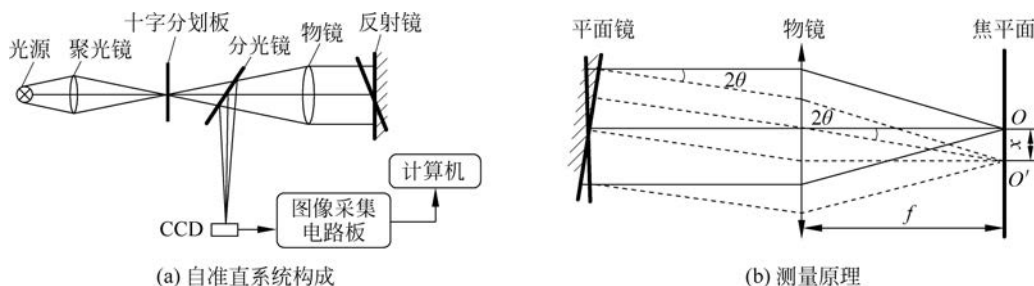


图 3-1 自准直测量系统构成及原理

理后给出测量结果。

如图 3-1(b)所示,根据平面镜的反射特性,若平面镜绕垂直于入射面的轴转动 θ 角,反射光线将转动 2θ 角,转动方向与平面反射镜的转动方向相同。因此,像 O' 相对应反射镜垂直于光轴时的像 O 有一个位移量 x ,这个位移量 x 与反射镜偏角 θ 的关系为

$$x = f \cdot \tan(2\theta) \quad (3-1)$$

其中, f 为准直物镜的焦距。

2. 激光准直测量的基本原理

激光由于具有很好的方向性,容易得到平行光束,因而在准直测量中得到了较广泛的应用。利用图 3-1 所示的自准直原理,使用半导体激光器构成的二维激光自准直原理如图 3-2 所示。半导体激光器发射的激光,经过单模光纤和准直镜后成为平行光,经过偏振分光镜分束,变为偏振光,射向移动部分。线偏振光经过 $\lambda/4$ 波片,变成了圆偏振光,经平面镜反射回来再次经过 $\lambda/4$ 波片,又变成了线偏振光,但偏振方向已旋转 90° ,返回偏振分光镜时,被偏振分光镜反射,经过透镜聚焦后,会聚到透镜像方焦平面处的 PSD 上。

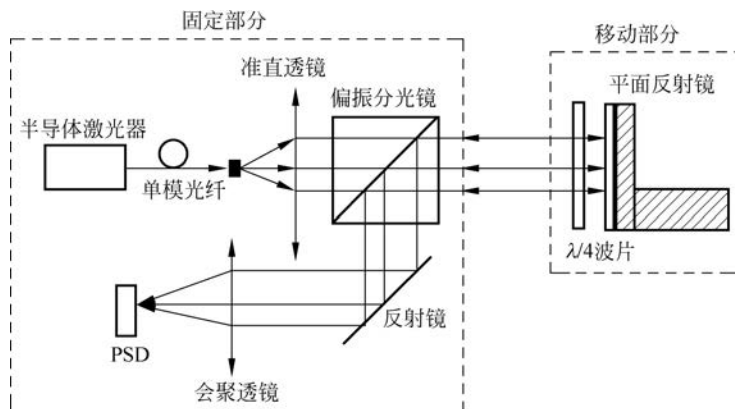


图 3-2 二维激光自准直原理

若移动部分随工件移动,被测物体偏摆和俯仰角变化,必然引起移动部分的平面反射镜同样角度的变化,造成反射回来的光 2 倍角度的对应变化,经过透镜后在 PSD 上的光点的位置变化为

$$\theta_x = \frac{\arctan(\Delta x / f)}{2} \quad (3-2)$$

$$\theta_y = \frac{\arctan(\Delta y / f)}{2} \quad (3-3)$$

其中, θ_x 和 θ_y 分别为俯仰角和偏摆角变化量; Δx 和 Δy 分别为俯仰角和偏摆角变化造成的在 PSD 上光点位置的改变量。

以上的激光自准直原理主要利用了激光的方向性和平面镜的反射特性,而激光准直测量则主要利用激光的方向性。根据激光准直测量原理的不同,可将激光准直测量分为 3 种类型,即振幅测量型、相位测量型和偏振测量型。

1) 振幅(光强)测量型

振幅(光强)测量型准直仪的特征是以激光束的强度中心作为直线基准,在需要准直的点上用光电探测器接收它,其测量原理如图 3-3 所示。由 He-Ne 激光器发出的一束光,通过扩束望远镜后射出直径一般为毫米级的激光束,此光束横断面的光能量分布为高斯分布。在一定条件下,相当长距离内各断面光能量的分布是一致的,这些能量分布中心的连线构成一条理想的直线,即为激光准直测量的基准直线。

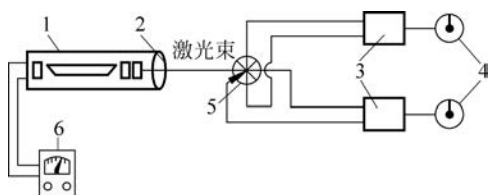


图 3-3 振幅(光强)测量型准直仪

1—激光器; 2—扩束望远镜; 3—运算放大器;
4—指示表; 5—接收靶; 6—电源

激光准直仪的接收靶中心有一个四象限光电探测器,两两相对的光电二极管接成差动式,其信号输入运算电路,这 4 块光电二极管中心与靶子的机械轴线重合。这样,上、下一对光电二极管,可以用来测量靶子相对于激光束在垂直方向上的偏移;左、右一对光电二极管,可用来测量靶子相对于激光束在水平方向上的偏移。

当光电接收靶中心与激光束能量中心重合时,相对的两个光电二极管接收能量相同,因此输出电信号相等,无信号输出,指示表为 0;当靶子中心偏离激光束能量中心,这时相对的两个光电二极管有差值信号输出,通过运算电路可以得到接收靶中心与激光光线能量中心的偏差。测量时首先将仪器与靶子调整好,然后将靶子沿被测表面测量方向移动,通过一系列测量可以得到直线度误差的原始数据。

这种方法的准直精度受到激光束漂移、大气扰动以及光束横截面内光强分布不对称性的影响,为有效克服上述影响,出现了多种方法以提高激光准直的对准精度。

(1) 单模光纤法

图 3-4 所示为基于半导体激光光纤组件的激光准直仪测量原理。激光器发出的光经过单模光纤后,单模光纤的出射端点相当于二次光源。理论上,激光光束的稳定性只取决于光纤出射端点在空间的稳定性,激光器输出的激光发生平行漂移和角度漂移只能影响耦合效

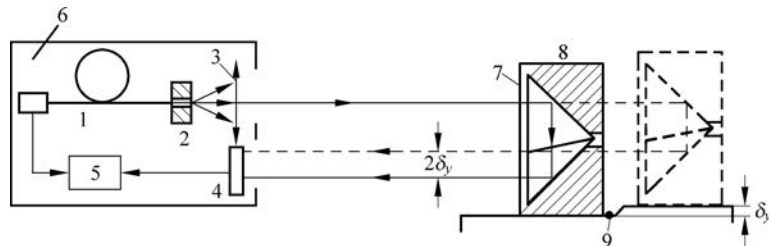


图 3-4 基于半导体激光光纤组件的激光准直仪测量原理

1—半导体激光光纤组件; 2—光纤固定器; 3—准直透镜; 4—四象限光电探测器;
5—信号处理器; 6—测量头; 7—角锥棱镜; 8—活动头; 9—被测工件

率,仅引起输出端光功率的变化,不引起输出端的光强分布的变化,这就起到了稳定准直基线的作用。采用半导体激光光纤组件主要就是激光器的漂移抑制到最小的程度,可提高其发射的激光光束的时间和空间稳定性。

如图 3-4 所示,当活动头随被测工件表面沿出射光线方向移动时,若被测表面在 y 方向存在一个位置改变 δ_y ,入射光线保持不变,则出射光线的位置变化为 $2\delta_y$,光电探测器可以测到此偏差,连续多点测量,就可以得到直线度误差。因此,使用角锥棱镜,可以将测量的灵敏度提高 2 倍,同时实现移动头和测量头的无电缆连接,给现场测量带来了方便。

(2) 菲涅耳波带片法

利用激光的相干性,采用方形菲涅耳波带片获得准直基线,如图 3-5 所示。当激光束通过望远系统后,均匀地照射在波带片上,并使其充满整个波带片,则在光轴的某一位置出现一个很细的十字亮线,当将观察屏放在该位置处,可以清晰地看到它,调节望远系统的焦距,则十字亮线会出现在光轴的不同位置上,这些十字亮线中心点的连线为一直线,这条线可作为基准进行准直测量。由于十字亮线是衍射与干涉的结果,所以具有良好的抗干扰性,同时,还可以克服光强分布不对称的影响。

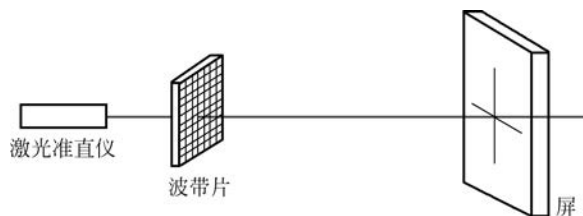


图 3-5 方形菲涅耳波带片法激光准直

(3) 相位板法

在激光束中放置一块二维对称相位板,它由 4 块扇形涂层组成,相邻涂层光程差为 $\lambda/2$ (即相位差为 π)。在相位板后面的光束任何截面上都出现暗十字条纹。暗十字条纹的中心连线是一条直线,利用这条直线作为基准可直接进行准直测量。若在暗十字中心处插入一方孔 P_A ,在孔后的屏幕 P_B 上可观察到一定的衍射分布,如图 3-6 所示,若方孔中心与光轴有偏移,那么在 P_B 上的衍射图像就不对称,这些亮点强度的不对称随着孔的偏移而增加。因此,这个偏移的大小和方向可以通过测量 P_B 上的 4 个亮点的强度来获得。

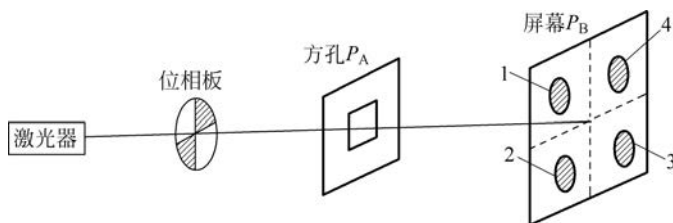


图 3-6 相位板法激光准直测量原理

在 P_B 处放置一个四象限光电探测器,若 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 分别表示探测器 4 个象限探测到的信号,则靶标的位移为

$$\Delta x = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) \quad (3-4)$$

$$\Delta y = (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) \quad (3-5)$$

菲涅耳波带片和相位板准直都采用三点准直方法,即连接光源、菲涅耳波带片的焦点(或方孔中心)和像点,从而降低了对激光束方向稳定性的要求。这里任何中间光学元件(如波带片或方孔)的偏移都将引起像的位移,为消除像移的影响,可以将中间光学元件装在被准直的工件上,而把靶标装在固定不动的位置上。

2) 相位测量型

相位测量法是在以激光束作为直线基准的基础上,又以光的干涉、衍射等原理将待测物理量的变化转换为光强的相位变化进行测量的。常用的相位测量型准直方案有双频激光干涉法、光栅衍射干涉法、激光准直干涉法等。相位测量法大多设计成干涉仪两臂测量光束与参考光束在传播方向上呈对称分布。因此,其准直基线不是激光束本身,而是测量光束与参考光束的对称轴,这在克服激光漂移的影响方面有较好的效果。当两束光靠得很近时,对大气扰动的影响也能有所减轻。

(1) 双频激光干涉法

干涉测量法是在以激光束作为直线基准的基础上,又以光的干涉原理进行读数进行直线度测量。图 3-7 所示为双频激光干涉仪测量直线度原理。

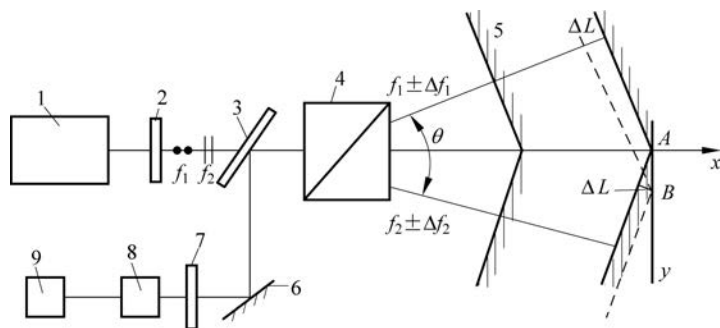


图 3-7 双频激光干涉仪测量直线度原理

1—激光器; 2— $\lambda/4$ 波片; 3—半反半透镜; 4—偏振分光器; 5—双面反射镜;
6—全反射镜; 7—检偏器; 8—光电探测器; 9—计算机

双频激光器发出的光束通过 $\lambda/4$ 波片后,变为两束正交线偏振光 f_1 和 f_2 ,经半反半透镜后射至渥拉斯顿偏振分光器上,正交线偏振光 f_1 和 f_2 被分开成夹角为 θ 的两束线偏振光,分别射向双面反射镜的两翼并原路返回,返回光在渥拉斯顿偏振分光器上重新会合,再经半反射镜、全反射镜反射到检偏器,两束光经过检偏器后形成拍频并被光电探测器接收。若双面反射镜沿 x 轴平移到 A 点,由于 f_1 和 f_2 光所走的光程相等,所以 $\Delta f_1 = \Delta f_2$,拍频互相抵消,频移值为 0;若在移动中由于导轨的直线度偏差而使反射镜沿 y 方向下落至 B 点,如图 3-7 中虚线所示, f_1 光的光程就会较原来减少 $2\Delta L$,而 f_2 光的光程却增加 $2\Delta L$,两者光程的总差值为 $4\Delta L$,这时频移值 $\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2$ 。据此可以计算出下落量为

$$|AB| = \frac{\Delta L}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\lambda \int_0^t \Delta f dt}{4 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3-6)$$

其中, $|AB|$ 为被测表面的起伏情况,即直线度变化情况。

(2) 光栅衍射干涉法

图 3-8 所示为光栅衍射干涉法准直测量系统。

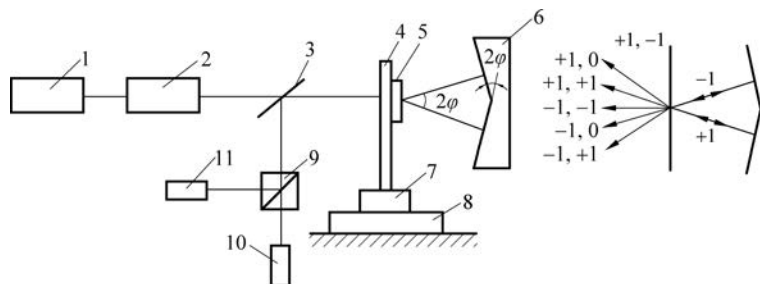


图 3-8 光栅衍射干涉法准直测量系统

1—激光器；2—扩束系统；3—分光镜；4—光栅；5—石英晶片；6—双面反射镜；
7—托板；8—滑板；9—偏振分光镜；10, 11—光电探测器

该系统以光栅作为敏感元件，以双面反射镜组两反射面夹角的中分线为直线基准。经过扩束的激光束通过分光镜射向光栅，光栅刻度方向垂直于纸面，平行于托板的底面。入射光经光栅调制，产生各级衍射光，其中 ± 1 级衍射光分别垂直投射到双面反射镜组的两个反射面上（双面反射镜组的两个反射面之间的夹角设计成与 ± 1 级衍射光之间的夹角互补）。这样， ± 1 级衍射光经双面反射镜组两个反射面反射后，沿原路返回到光栅，再次经光栅衍射； $+1$ 级衍射光与 -1 级衍射光沿原入射光方向反向射出并产生干涉。由于石英晶体的双折射特性，通过石英晶片的激光产生偏振方向相互垂直的两路偏振光，并使两路偏振光发生移相，两路相干光经分光镜反射后投射到偏振分光镜上，由偏振分光镜将偏振方向相互垂直且相位相差为 90° 的两路相干光束分开，这两束光分别由两个光电探测器接收。测量时，令光栅固定在托板上，托板下面的滑板匀速地从导轨一端移动到另一端，导轨在垂直平面内的直线度误差使滑板及光栅随之有垂直于栅线方向的上下位移，于是干涉光强信号发生变化。通过计算光强信号变化的周期，可以计算出导轨的直线度变化。

3) 偏振测量型

偏振测量型的代表是激光旋光准直仪，它以往返光束的对称中心作为准直基线，让直线度误差变成激光偏振方向变化的旋光而被检测出来。其构思独特，测量灵敏度高，往返光束的对称分布对克服激光平漂有一定效果，当往返光束靠得很近甚至重合时，也能在某种程度上减轻大气扰动的影响。偏振测量型准直测量的另一个优点是它的测量元件可在光路中移进移出，这是大多数相位测量型准直干涉仪所做不到的，这个特点可使它应用于同轴度测量。

激光旋光准直测量系统如图 3-9 所示，激光束经起偏器得到优于 10^{-5} 的偏振度，经磁光调制器（法拉第盒），出射光束的偏振矢量方向产生 θ 角的偏转，即

$$\theta = VLB \quad (3-7)$$

其中， V 为维尔德常数； L 为磁光棒的长度； B 为磁光线圈孔中的磁感应强度。

若磁光线圈以串联谐振方式驱动，则

$$B = C \sin \omega t \quad (3-8)$$

其中， C 为常数，与线圈结构及所加电压幅值有关。

代入式(3-7)得

$$\theta = VLC \sin \omega t = M \sin \omega t \quad (3-9)$$

其中， M 为调制度， $M = VLC$ 。

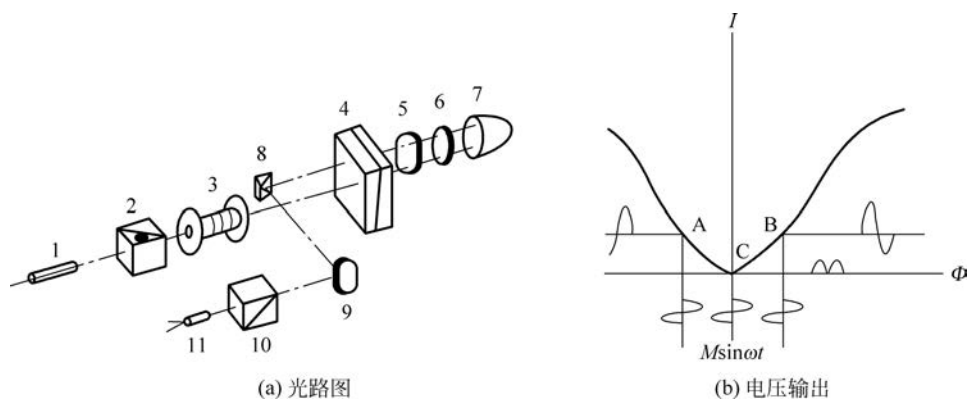


图 3-9 激光旋光准直测量系统

1—扩束器；2—起偏器；3—磁光调制器；4—位敏元件；5— $\lambda/4$ 波片；6—透镜；
7—球面反射镜；8、9—反射镜；10—检偏器；11—光电探测器

经过磁光调制的激光束经过由位敏元件、 $\lambda/4$ 波片及由透镜与球面反射镜组成的“猫眼”逆向反射系统后，由原路返回，被反射镜反射经检偏器后由光电探测器接收，位敏元件由两个角度均为 β 的左旋和右旋石英光楔组成，光楔的光轴与通光表面垂直，光束从光楔组的正中央穿过时，由于左旋和右旋石英的厚度相同，不产生附加的旋光量，当位敏元件在纸面内垂直于光轴方向（横向）发生位移时，即光束移开了中性面，于是出射光的偏振矢量方向产生偏转，设其偏转角为 Φ ，即

$$\Phi = 4A \tan\beta S \quad (3-10)$$

其中， A 为石英的旋光系数； S 为位敏元件的横向移动量。

式(3-10)中系数 4 是考虑了左、右两块光楔及光束往返的成倍效果。利用琼斯矩阵，计算得到当入射光强为 I_0 时，探测器上接收到的光强信号为

$$I = I_0 \sin^2(M\sin\omega t + \Phi) \quad (3-11)$$

式(3-11)的图像描述如图 3-9(b)所示，当 $\Phi=0$ 时，即光束从位敏元件中间通过，此时工作点为 C，若没有磁光调制，系统即处在消光状态，输出光强为 0。由于磁光调制信号 $M\sin\omega t$ 的存在，输出光强变为二倍频信号。当 $\Phi \neq 0$ 时，即位敏元件偏离中性面，此时工作点将根据位敏元件的偏移方向移到 A 或 B 点，输出光将是一个直流分量上叠加一个频率与调制信号基频相同的交流信号。A 点与 B 点信号相位正好相反，可用相敏检波方法予以识别。如图 3-9(b)所示，根据光电探测器输出的信号是基频还是二倍频，可以判断准直光束是否从位敏元件的中性面通过，根据基频信号的相位可以判断偏移的方向。

旋光准直仪采用往返光路的双端结构，准直基线是往返光束的对称中心线，这种设计对光束的平行漂移有明显的抑制能力。

3.1.2 激光准直测量系统的组成

激光准直测量原理不同，组成激光准直测量系统的具体结构也有所不同，简单的激光准直系统可以直接目测对准。为了便于控制和提高对准精度，一般的激光准直系统都采用光电探测器对准，因此激光准直系统的基本组成如图 3-10 所示。激光器主要采用 He-Ne 激

光器、半导体激光器等,光电位置接收器主要采用四象限光电探测器(QD)、位置敏感探测器(PSD)、CCD 探测器等。指示及控制系统可以根据光电靶标输出的电信号,指示靶标的对准情况,并自动控制靶标的对准。

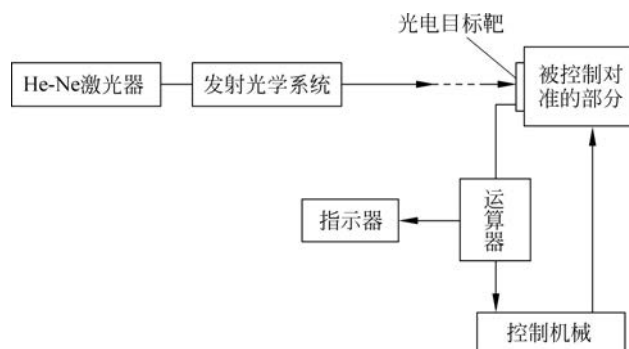


图 3-10 激光准直系统的基本组成

1. 激光准直光学系统

常用的激光准直器有倒置望远镜扩束准直器、零阶贝塞尔光束准直器等。倒置望远镜扩束准直器内容请参见第 1 章。下面介绍零阶贝塞尔光束准直器的基本原理。

高斯光束经过任何线性光学系统的变换仍然是高斯光束,随着光束的传播,高斯光束截面上光强迅速衰减。但是,激光器发出的光经过特殊的会聚元件而形成的零阶贝塞尔光束的光强几乎不随传播距离而衰减,是一条亮而细的光束。

由波动方程理论,在无限三维空间 xyz 中,赫姆霍兹方程存在一个近似的特殊解,即

$$E = e^{i\beta z} J_0(\alpha r) \quad (3-12)$$

其中, E 为电场强度; α, β 为波数, $\alpha^2 + \beta^2 = k^2$; r 为位矢,光束沿 z 轴传播, $r^2 = x^2 + y^2$; $J_0(\alpha r)$ 为零阶贝塞尔函数。

可以看出,这是一个在垂直于传播方向 z 的横截面上具有相同光强分布 $J_0(\alpha r)$ 的光束,即在某一范围内,光强分布不随 z 变化而变化,因此,具有光束无发散角的性质。

零阶贝塞尔光束准直器如图 3-11 所示,一个带有环形狭缝的屏置于一透镜的前焦面上,缝上每点发出的光经透镜变换为平行光束,所有点产生的平行光的波矢位于一个锥面上。

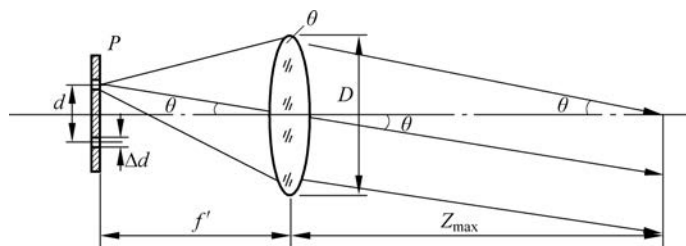


图 3-11 零阶贝塞尔光束准直器

当照明狭缝的光波长为 λ 时,得到参数 $\alpha = 2\pi \sin(\theta/\lambda)$ 的贝塞尔光束,其中 $\theta = \arctan(d/2f)$ 。当缝宽 $\Delta d \ll 2\lambda f/D$ 时,可以忽略衍射的调制效应。零阶贝塞尔光束无发散传输的最长距离为

$$Z_{\max} = \frac{D}{2 \tan \theta} \approx \frac{\pi D}{\alpha \lambda} \quad (3-13)$$

此外,还可以应用圆锥透镜生成零阶贝塞尔光束,或应用计算机产生的全息图生成无衍射光束。

2. 半导体激光准直系统

由于半导体激光器的非对称激活通道,使得它发出的光束在垂直于结平面方向的远场发散角和平行于结平面方向的远场发散角相差较大(在垂直和平行于结平面方向上的发散角

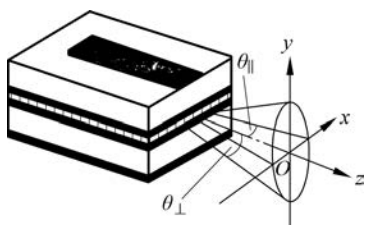


图 3-12 半导体激光器辐射光斑示意图

大小分别为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $10^\circ \sim 30^\circ$), 且有像散。如图 3-12 所示,单横模输出的半导体激光器发出的光束是椭圆高斯光束,这种光束必须予以一定的校正,才能在如精密测量等对光束的准直度及消像散均有较高要求的领域使用。

国内外已报道的一些消像散准直方法主要有单透镜法、组合透镜法、衍射法、渐变折射率透镜法、反射法、液体透镜法等。下面仅对单透镜法、组合透镜法和衍射法做简单介绍,其他方法请参考相应参考文献。

1) 单透镜法

实验装置如图 3-13 所示,在透镜的左边,高斯光束的束腰 W_{10} 可以近似认为位于半导体激光器的管芯处,高斯光束由管芯处出发,经过空气空间 h_1 和 h_3 及窗口玻璃 h_2 入射于单透镜上,厚度为 h_2 的玻璃平板对光束的变换作用相当于长度为 h_2/n' 的空气空间,其中 n' 为玻璃的折射率,所以

$$h = h_1 + h_3 + \frac{h_2}{n'} \quad (3-14)$$

只要准直透镜选择了合适的相对孔径 D/f ,以及透镜和半导体激光器调整到合适的相对位置,那么采用该准直法可以获得较满意的结果,但单透镜法准直对于半导体激光器两个方向的发散角有较大差别。

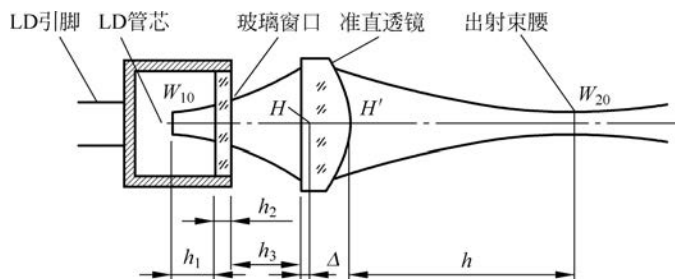


图 3-13 半导体激光器单透镜法准直

2) 组合透镜法

为解决单透镜法准直只能对半导体激光器一个方向的发散角进行压缩的弊端,可以采用相互垂直的椭圆截面柱透镜组分别对两个方向发散角进行压缩,从而达到准直效果。如图 3-14(a)所示,垂直于结平面方向上的光束经第 1 个柱透镜后变成平行光,第 2 个柱透镜在此方向上可看作平行玻璃板,不会改变光束的发散角;如图 3-14(b)所示,平行于结平面

方向上的光束经第 1 个柱透镜后,光束仅发生偏移,发散角不改变,通过第 2 个透镜后,平行于结平面方向的发散角得到大大压缩。这种方法对透镜的装调有较高的要求。

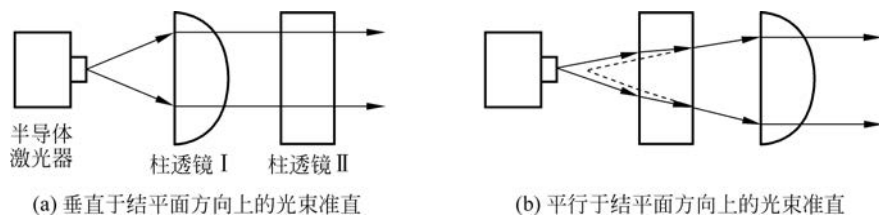


图 3-14 组合透镜法准直

3) 衍射法

衍射法准直是利用光波场的衍射理论和二元光学理论,制成二元消像散准直器件改善半导体激光光束质量的方法。由光波近场衍射理论可知,在理想光束情况下,菲涅耳波带板可以起到接近理想透镜的作用——将绝大部分能量集中到一个主焦点上。因此,根据半导体激光器发射光束的特点,利用二元光学设计原理,制成在 x 、 y 方向有不同焦距并且可以校正像散的二元光学波带透镜或相位型菲涅耳透镜,实现对光束的准直。

除上述 3 种方法外,随着加工工艺的提高,非球面透镜准直法也用于半导体激光器的准直,这种方法在提高光束质量的同时减轻了系统重量。

3.2 激光测量直线度原理

3.2.1 直线度测量概述

直线度测量主要是测量圆柱体和圆锥体的素线直线度误差、机床和其他机器的导轨面、工件直线导向面的直线度误差等,直线度测量是平面度、平行度、垂直度等形状位置误差测量的基础,是长度计量技术的重要内容之一。

1. 直线度定义

按中华人民共和国国家标准《直线度误差检测》(GB/T 11336—2004)的规定,直线度误差是被测的实际直线对其理想直线的变动量,而理想直线的位置应符合最小条件(实际被测量对其理想直线的最大变动量为最小值),测量原理是选择测量基准线作为理想直线,与被测实际直线相比较从而确定其变动量。实际测量过程中,由于测量基准和评定基准往往不一致,因此常采用两端点连线法、最佳平方逼近法(最小二乘法)或最小区域法的数据处理方法,使测量基准与评定基准一致。

2. 直线度测量方法

直线度测量方法有很多,按照测量方式,一般分为角差法和线差法,以下简要说明。

1) 角差法

角差法是用自然水平面或光线作为测量基准,将被测表面等距离分为若干段,每段的长度为 l ,用水平仪、自准直仪等小角度测量仪器,采用节距法逐段地测出每段前后两点连线与测量基准之间的角度 θ_i ($i=1,2,\dots,n$),如图 3-15 所示。

前后两点的高度差为

$$\Delta y_i = l \tan \theta_i \quad (3-15)$$



第 23 集
微课视频

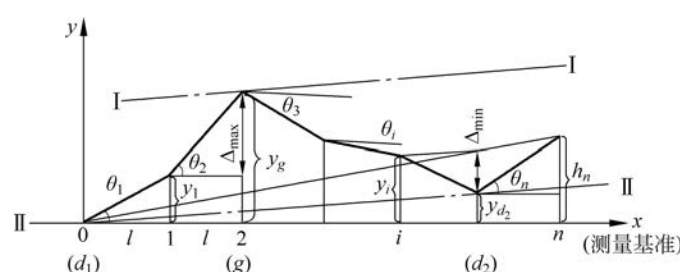


图 3-15 角差法测量原理

被测直线上各点到测量基准的高度为

$$y_i = \sum_{i=1}^n \Delta y_i = \sum_{i=1}^n l \tan \theta_i = l \sum_{i=1}^n \tan \theta_i \quad (3-16)$$

最后通过数据处理,求出直线度误差。

2) 线差法

线差法的实质是用模拟法建立理想直线,然后把被测实际线上各被测点与理想直线上相对应的点相比较,以确定实际线上各点的偏差值,最后通过数据处理求出直线度误差。理想直线可用实物、光线或水平面体现。实物基准法是用高精度的实物作为理想直线,如用刀口尺、标准平尺、拉紧的钢丝等。目前主要使用光线作为基准进行直线度测量。

直线法利用钢丝、激光束等直线基准测量直线度,如图 3-16 所示。长距离直线度的测量较早是采用钢丝法,它的优点是简单、直观,到目前为止,许多大型设备的安装和测量还使用这种方法,但钢丝下垂、钢丝扭结、风吹引起钢丝偏摆等情况会产生测量误差。20 世纪 60 年代激光出现后,随着大型机械设备安装和测量的精度要求越来越高,又由于激光具有能量集中、方向性好、相干性好等优点,目前广泛利用激光束测量直线度误差。这种直线度测量

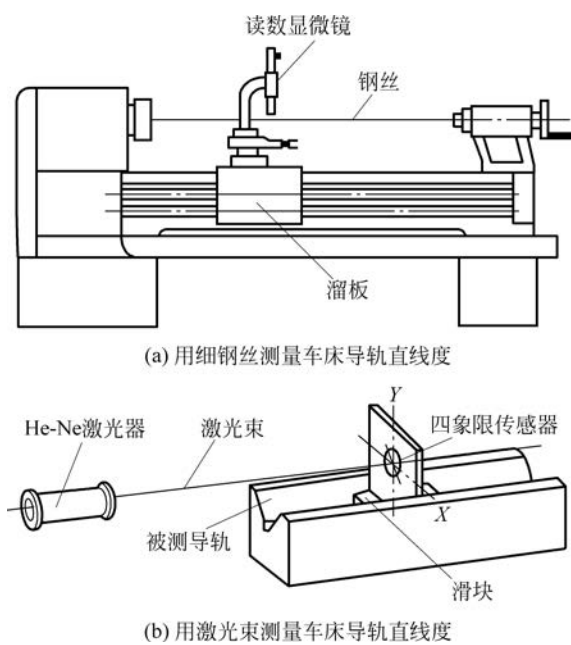


图 3-16 直线法测量车床导轨直线度

工具称为激光准直仪,它具有钢丝法的直观性和简单性以及普通光学准直的精度,并可实现自动控制。

3. 直线度的评定方法

《直线度误差检测》(GB/T 11336—2004)中规定直线度的评定方法有最小包容区域法、最小二乘法和两端点连线法 3 种。一般来说,最小包容区域法的评定结果数值要小于其他两种评定方法的评定结果。

3.2.2 激光测量直线度方法

虽然直线度测量有较多方法,但使用激光进行测量是目前主要的测量方法。如何提高激光准直测量的灵敏度和精度也是测量领域的一个重要研究课题。目前激光测量直线度方法主要利用激光的干涉、衍射等效应。

1. 双频激光测量直线度

若使用渥拉斯顿偏振分束器以及双面反射镜,则可以利用双频激光外差干涉进行直线度的测量。

图 3-17 所示为双频激光干涉仪测量直线度的原理图,实际测量导轨时也可使用渥拉斯顿棱镜作为直线度测量的敏感器件。使用渥拉斯顿棱镜作为直线度测量的敏感器件的优点在于渥拉斯顿棱镜体积小,动态测量误差小,能避免使用双平面镜时造成的误差串扰问题。

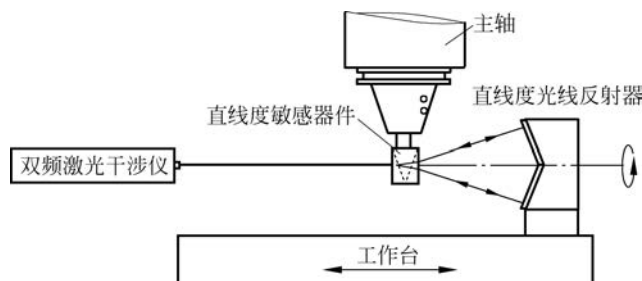


图 3-17 双频激光干涉仪测量直线度

双频激光测量直线度的主要不足如下。

(1) 测量系统中的渥拉斯顿棱镜为非对称器件,每个渥拉斯顿棱镜的特性受材料、形状等参数的影响较大。

(2) 检测距离受渥拉斯顿棱镜分束角 θ 的影响,当 θ 较大时,则随着检测距离的增大,尾端双面反射镜结构尺寸也要增大,因此 θ 不能太大;另外, θ 角也不能太小,当 θ 很小时,开始有一段两束光分不开,形成一段测量死区。所以,目前市场上双频激光干涉仪只能采用不同的附件分段测量直线度,除此以外,当检测距离较大时,由于两束光完全分开,易受大气扰动的影响。

(3) 采用双频激光器,由于频率与偏振的混合效应带来了非线性周期误差。

为解决以上问题,可采取如图 3-18 所示的测量光路图,稳频激光器输出的单频激光经过含有两个声光调制器的频移单元后,产生频差为 60kHz 的两束平行光,两光束的偏振方向相互垂直,其中 f_1 光束为测量光 f_2 光束为参考光。这两束光又被两个光束分束器分为 4 路光,其中测量光束经偏光分束器和 $\lambda/4$ 波片后,到达如图 3-19(a)所示的一对对称的直线度测量棱镜,反射后与参考光产生干涉,由两个光电探测器接收,得到直线度误差的信号。

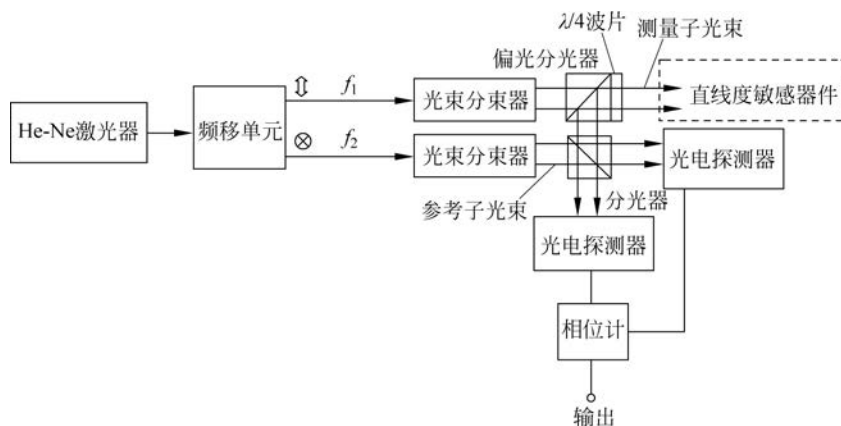


图 3-18 高精度测量直线度原理

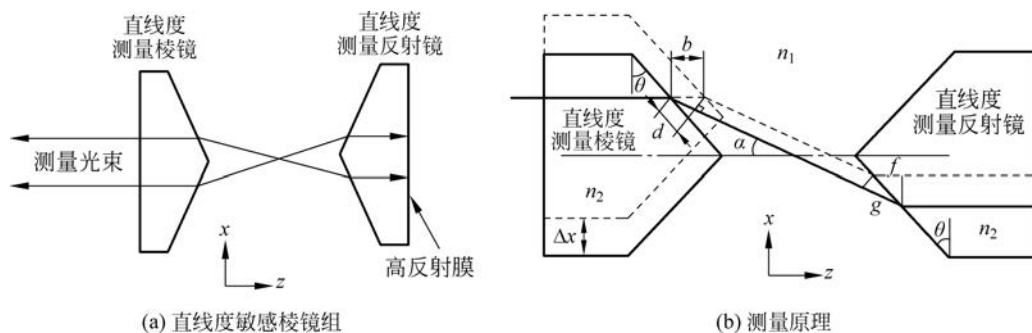


图 3-19 直线度误差测量原理

如图 3-19(b) 所示, 若被测工件存在直线度误差 Δx , 测量用的棱镜下移 Δx , 造成上、下两条光线的光程变化, $n_1 g = n_2 f$, 单路光的增益为

$$G = \frac{n_2 b - n_1 d}{\Delta x} = \tan \theta \cdot (n_2 - n_1 \cos \alpha) \quad (3-17)$$

如果 $\theta = 18.3^\circ$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1.51059$, 那么单路光的增益为 0.174, 实际上, 上、下光路的总增益为 0.348, 高于双频激光干涉仪的增益, 也克服了双频激光干涉测量直线度存在的不足。

2. 楔形板干涉法测量直线度

图 3-20 所示为楔形板干涉测量直线度原理。楔形板置于被测导轨上作为测量直线度

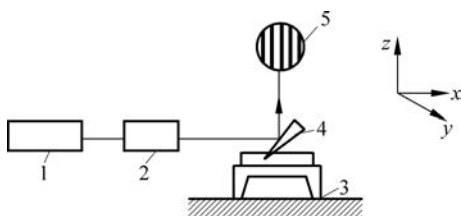


图 3-20 楔形板干涉测量直线度原理

1—激光器; 2—准直系统; 3—移动基座;
4—楔形板; 5—观察屏

敏感器件, 由激光器发射的光束经过准直后形成平行光束, 投射到楔形板上, 依次在楔形板上、下表面反射并干涉, 形成等厚干涉条纹; 当移动基座沿被测导轨移动时, 被测导轨存在的直线度误差会引起基座的微小角度变化, 造成楔形板与入射光线的角度变化, 使干涉条纹的间距发生变化, 从而实现对直线度的测量, 显然这是通过对微小角度的测量计算得到直线度误差, 因此要求移动基座每次移动的距离相同。

3. 无衍射光测量直线度

图 3-21 所示为无衍射光测量直线度原理。激光器发射的光经过扩束望远镜后照射到一个圆锥透镜上,该圆锥透镜锥角为 θ ,于是由圆锥透镜出射的光角度为 $(n-1)\theta$,并产生衍射图样。在沿出射轴方向 $0 \sim \frac{D}{2(n-1)\theta}$ 的任意截面内(其中 D 为圆锥透镜的通光口径),均可观察到一系列等距圆环衍射条纹和中心亮斑。利用中心亮斑空间位置不变的特性,按照如图 3-21 所示的原理即可实现对直线度误差的测量。

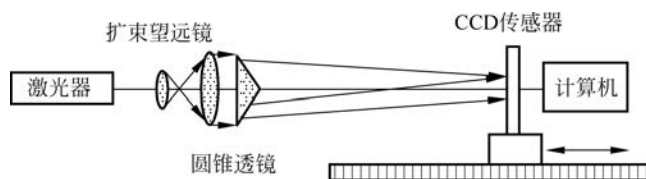


图 3-21 无衍射光测量直线度原理

3.2.3 直线度测量误差分析

影响直线度测量精度的因素大致可分为环境因素、光学系统因素和激光器光线稳定性。

1. 环境因素引起测量误差

在直线度测量过程中,环境参数的变化(如空气的温度、湿度、压力等的改变)将改变空气的折射率,使激光束在传播过程中偏离直线,进而影响测量结果,产生测量误差。在实际测量中,可以通过测出工作环境的压力、湿度和温度,然后根据 Edlen 经验公式计算出空气折射率,进行相应补偿,如果条件允许,应尽量选择恒定环境进行直线度测量,以提高测量精度。空气折射率变化造成的激光光线漂移将在后续介绍。

2. 光学系统因素对测量的影响

不同的直线度测量系统采用不同的光学元件实现激光的准直和光斑中心位置的测量,不同光学元件对测量的影响也不相同,应结合具体系统加以分析。例如,在双频激光测量直线度系统中,双面反射镜(R)和渥拉斯顿棱镜(W)在移动过程中倾角会对直线度测量带来误差,或者说导轨的俯仰角或偏摆角和直线度测量之间存在串扰问题。如图 3-22 所示,在

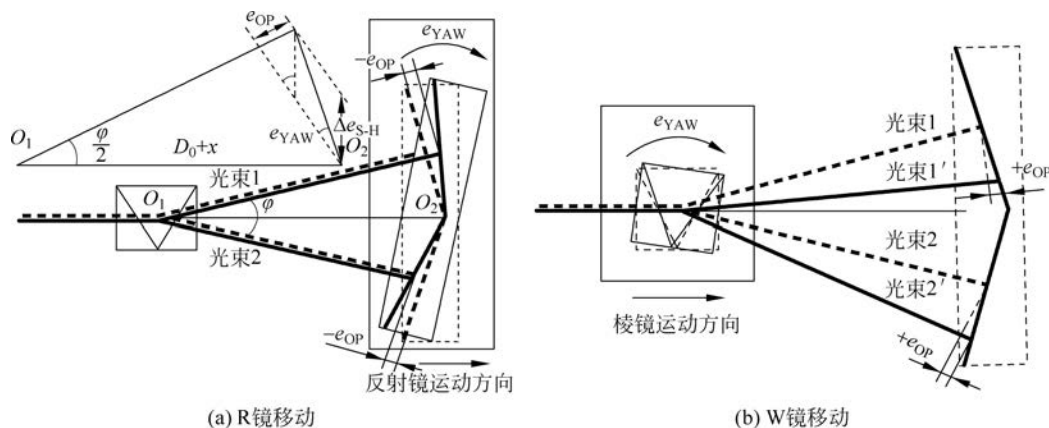


图 3-22 R 镜和 W 镜移动所引起的倾角

W 镜或 R 镜移动过程中,由于导轨存在俯仰角误差导致不可避免地会产生倾角 ϵ ,经过计算可以得到,当 W 镜倾角 $\epsilon < 10''$ 时,其引起测量误差相当于激光束有 $10''$ 角度漂移带来的误差,极其微小,实验中可略去不计,但 R 镜倾角引起的测量误差很大,不容忽视。

此外,角锥棱镜的面形加工精度也是影响测量精度的一个重要因素,角锥棱镜的制造角差、面形误差和测量过程中角锥棱镜的偏摆、俯仰和滚转对直线度测量均有影响。同时,由于四象限光电探测器和微弱电信号放大电路的噪声难以消除,对于探测器总是存在一个受限于噪声的最小相对检测量 $\Delta x/R$,其中 Δx 为绝对位置检测量, R 为光斑尺寸或探测器尺寸。因此,要提高测量灵敏度,就必须减小 Δx 。但是,若要进行较长距离的直线度误差测量,则光束直径就不能太小,光束直径越小,空气折射率变化对测量结果的影响越大,因此,光束直径和测量灵敏度相互矛盾。

3. 激光器光线稳定性的影响

激光准直测量的基准就是光线基准,即要求激光光束的能量中心连线为直线,且这一直线不随时间和空间位置变化。但是,由于各种因素的影响,激光光线的位置随时间变化,即发生了光线漂移,使激光能量中心的连线并非直线,这将严重影响激光准直测量精度。

1) 激光器本身引起光束漂移

激光束的漂移主要有平行漂移和角度漂移两种,它们主要是由激光器本身的不稳定性引起的,高精度的测量必须设法减小或补偿漂移。当激光管点亮后,激光器放电管内及其表面存在着温度梯度分布,且温度场还产生随机变化。另外,激光管材料的不均匀性等因素会引起激光器谐振腔发生变形,使两反射镜相对位置产生变化,特别是两反射镜之间夹角的变化,会直接给激光器输出的激光光束带来平行漂移和角度漂移。

由于激光器本身的光线漂移,直接利用激光本身作为准直基线的做法的相对稳定性最好也只能达到 10^{-5} 量级。为了消除或减少光束漂移对激光准直的影响,人们设计了多种方案,如菲涅耳波带法、零级条纹干涉法、零级衍射同心圆法、相位板法、海定格非定位干涉条纹法、对称双光束法、单模光纤法等,在一定程度上抑制了光线漂移对直线度测量的影响。图 3-4 所示的单模光纤激光准直方法就能很好消除激光器本身存在的各种漂移。

2) 大气扰动对激光光束传输的影响

光在真空或各向同性介质中才能沿直线传播,而实际的准直技术是在大气环境中应用的,大气空间不满足各向同性的条件,热流、风速、密度等变化会引起大气折射率的变化,使激光束传播过程中偏离直线。假设在垂直方向上空气折射率梯度保持常量,则沿水平方向传播的光束的弯曲量与传播距离的平方成比例,即

$$h = \frac{L^2}{2} \cdot \frac{dn}{dr} \quad (3-18)$$

其中, h 为弯曲量; L 为传播距离; $\frac{dn}{dr}$ 为折射率梯度。

这是一个静态模型,而实际上要复杂得多。

大气扰动的折射率变化可以用结构函数描述为

$$D_n(\rho) = \langle [n(r_2) - n(r_1)]^2 \rangle \quad (3-19)$$

其中, r_2, r_1 为空间位置; $n(r_2), n(r_1)$ 为相应位置的空气折射率; ρ 为距离, $\rho = r_2 - r_1$; $\langle \cdot \rangle$ 为时间平均函数。

从理论和实践中得出：折射率的随机变化和距离的 $3/2$ 次方成正比，即

$$D_n(\rho) = C_n^2 \rho^{\frac{3}{2}}, \quad l_0 \leq \rho \leq L_0 \quad (3-20)$$

其中, l_0 为最小非均匀旋涡的尺寸, 典型值为 $1 \sim 10\text{mm}$; L_0 为最大非均匀尺度, 它和离地面的高度有关, 近地表面处的干扰要大一些; C_n 为 l_0 到 L_0 区间的结构参数, 折射率起伏变化的描述, 与大气参数(如热流、风速、高度等)有关。

以上分析表明光线弯曲与距离的平方成正比, 随机抖动与距离的 $3/2$ 次方成正比, 随着准直距离的增大, 提高准直精度更加困难, 而且没有更有效的方法消除大气湍流效应产生的影响, 目前多采用以下几种措施。

(1) 选择在空气扰动最小的时间工作, 如在太阳升起之前。另外, 控制外界环境也能起到一定作用, 如在光束传输路程上避免有热源和温度梯度及气流等的影响。

(2) 将光束用套管屏蔽, 甚至将管子内抽成真空。

(3) 沿着激光束前进的方向以适当流速的空气流喷射, 因为空气流提高空气扰动的频率, 可用时间常数比较小的低通滤波器, 消除输出信号的交变成分。

(4) 对频率为 $50 \sim 60\text{Hz}$ 的扰动可采取积分电路消除。

此外, 还可采用光学方法予以补偿, 如在测量光路中固定几个点, 实时测量激光的漂移量, 并加以补偿; 或采用足够靠近的相邻光束, 一束用于测量, 另一束专门用于采集噪声, 由于两束光很靠近, 大气扰动引起的光线漂移在两路信号中是相关的, 通过一定的算法消除或减少激光的漂移; 或采用多波长的激光, 不同波长的激光在空气中的折射率不同, 通过计算得到漂移量, 并进行补偿。

3.3 激光同时测量多自由度误差

数控机床和加工中心精度的检测是机床工具行业和机械加工行业的关键环节, 也是保证加工精度及产品质量的重要手段。目前, 测量数控机床与加工中心导轨几何位置误差的主要手段是采用激光干涉仪, 这些激光干涉仪采用先进的光学技术, 简化了安装过程, 加强了数据采集、处理等功能, 使测量较为简单, 但每次只能测量单个参数, 测量其他参数时需要重新安装附件, 重新调整光路和重新测量。例如, 一般三轴(即 3 根导轨)数控类加工设备总共需要检测 21 项误差分量, 安装一次仅能测量一项误差分量, 其检测过程烦琐、费时, 利用激光多自由度误差同时测量系统同时测量几个几何位置误差不仅可大大缩短检测时间, 还可减少人为调整误差。

任何一个物体在空间都具有 6 个自由度, 即 3 个方向的平动自由度和绕 3 个方向轴的转动自由度。被加工工件的定位、精密零部件的安装及目标物体在空间的运动位置和姿态, 都需要多至 6 个自由度的测量、调整或控制。由于生产加工技术自动化程度的提高, 对多自由度的检测提出了更高要求, 希望能同时检测到目标物体在空间的多个自由度误差。

机床是通过工作台在导轨上移动改变工件相对于切削刀具的相对位置, 同一般物体一样, 工作台也具有 6 个自由度, 但常常只允许它们沿导轨方向这一个自由度运动, 不允许在其他 5 个自由度方向运动。如图 3-23 所示, 工作台移动时存在 6 个方向的位置误差, 统称为几何位置误差, 包括 3 个平动误差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和 3 个角度误差 θ_X 、 θ_Y 、 θ_Z 。其中, ΔZ 称



第 24 集
微课视频

为位置误差, ΔX 、 ΔY 称为直线度误差, θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别称为俯仰误差、偏摆误差、滚转误差, 这几个几何位置误差直接影响机床的加工精度。

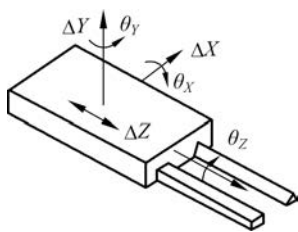


图 3-23 机床工作台的 6 维几何误差

前面讲述了如何利用激光准直、激光干涉、无衍射光等方法实现对导轨的直线度测量：利用如图 3-1 和图 3-2 所示的原理可以实现对导轨俯仰和偏转角的测量，利用激光干涉的原理可以实现对导轨位置误差的测量。图 3-24 所示为目前最常用的双频激光干涉仪分别测量导轨位置误差、单个方向导轨直线度、导轨俯仰角的测量示意图，可以看出，双频激光干涉仪是单参数测量，每次安装调整只能测量一种误差分量，而每个测量过程又需要使用不同类型的测量附件和重新调整干涉仪，检测

一台设备所需的时间有时需要几天，甚至几周，费时费力，而且正常生产过程受到破坏，结果是使用者往往不对设备进行定期检测，造成加工精度下降，加工质量得不到保障。因此，研究激光六自由度误差同时测量方法与仪器，实现在现场对这类数控设备的快速检测，成为该领域亟待解决的关键测量科学问题之一。多自由度误差同时测量一直作为测量领域内的一个重要课题进行研究。

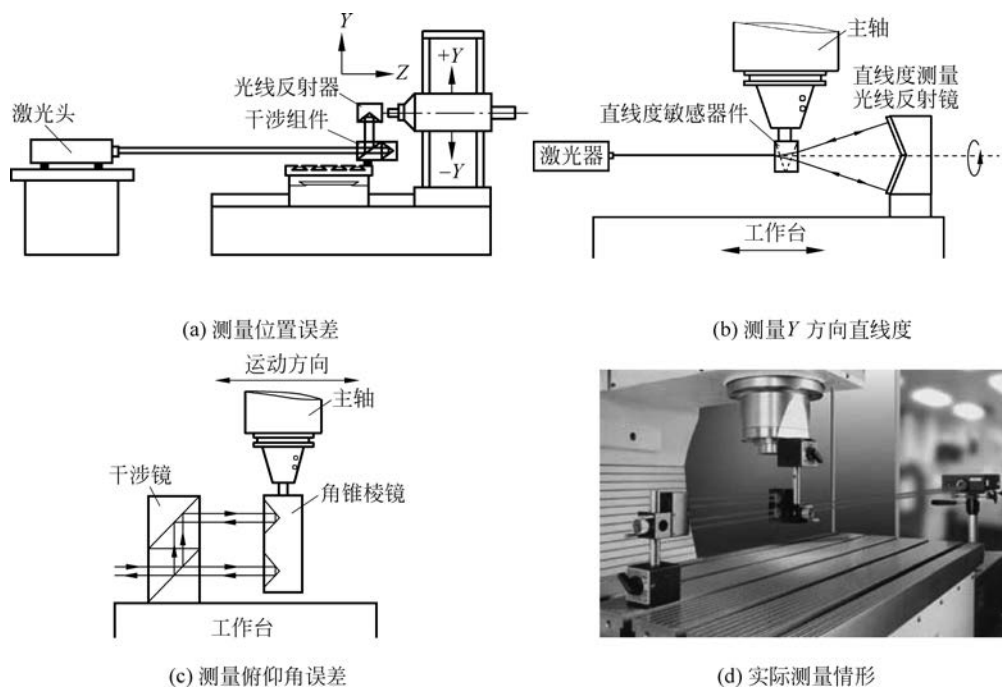


图 3-24 双频激光干涉仪测量导轨

本节先介绍滚转角的测量方法，在此基础上分别介绍几种四自由度、五自由度和六自由度误差同时测量方法。

3.3.1 滚转角测量

在机床导轨 3 种角运动误差中，滚转角的测量是最困难的，目前主要有准直测量方法、偏振测量法、基于外差干涉的测量方法。

1. 准直测量方法

以激光光线为基准,通过探测运动部件两个不同位置的直线度误差,计算得到滚转角误差。测量原理如图 3-25 所示。

通过对两个四象限探测器 QD1、QD2 的读数可以得到两束光线所在位置的直线度误差,进行处理可以得到滚转角误差 θ 为

$$\theta = \frac{H_2 - H_1}{L} \quad (3-21)$$

其中: H_1 为四象限光电探测器 QD1 得到的垂直于纸面的直线度误差分量; H_2 为四象限光电探测器 QD2 得到的垂直于纸面的直线度误差分量; L 为两个光电探测器 QD₁ 和 QD₂ 中心之间的距离。

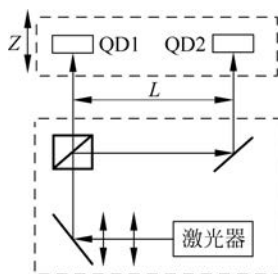


图 3-25 激光准直测量滚转角

如何保证两条光线的平行性是获得高精度测量滚转角的关键。

2. 偏振测量法

使用偏振器件测量滚转角是最早的滚转角测量方法之一。图 3-26 所示为偏振能量法测量滚转角原理。激光器出射的激光经过格兰-汤普逊起偏器变为线偏振光,再经第 2 个格兰-汤普逊偏振分光器变为两束偏振方向相互垂直的线偏振光,分别到达两个光电探测器。格兰-汤普逊偏振分光器作为滚转角敏感器件,当其随被测物体一起移动时,滚转角的变化引起其出射的两束线偏振光能量的变化,通过计算处理,得到滚转角大小。

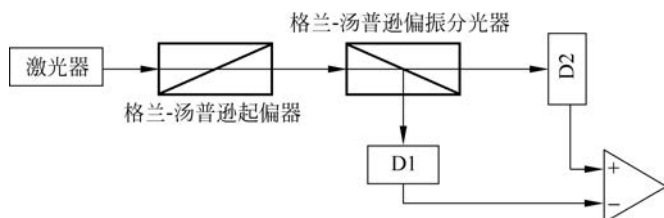


图 3-26 偏振能量法测量滚转角原理

3. 基于外差干涉的测量方法

一种基于外差干涉的滚转角测量原理如图 3-27 所示。

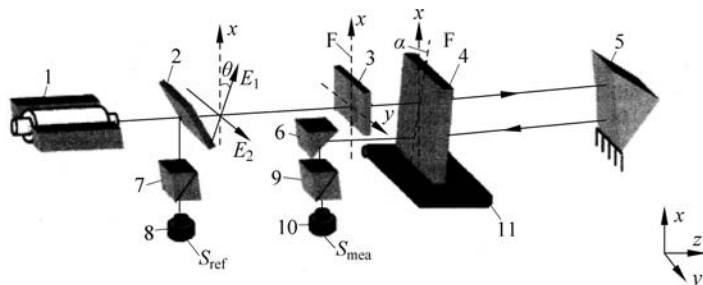


图 3-27 基于外差干涉的滚转角测量原理

1—双频激光器; 2—分光器; 3— $\lambda/4$ 波片; 4—半波片; 5—直角棱镜;
6—反射镜; 7, 9—检偏器; 8, 10—探测器; 11—工作台; F—快轴

激光器发射的光由两个频率的光组成,且两个频率的光的偏振方向相互垂直,一部分光被分光器反射后并经过检偏器在光电探测器 8 上产生干涉,作为参考信号;另一部分经分光器透射,先经过 $\lambda/4$ 波片后变为椭圆光,然后经过置于被测工件表面的半波片,被直角棱镜反射,再通过半波片并经反射镜和检偏器 9 后,在光电探测器 10 上产生干涉。分析可以得到光电探测器 10 的信号为

$$I_m \propto k_1^2 + k_2^2 + 2k_1k_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\Psi] \quad (3-22)$$

测量信号与参考信号之间的位相差 $\Delta\Psi$ 实际上是滚转角 θ 以及 δ 波片相位延迟角 α 的函数,可表示为

$$\Delta\Psi = -[\arctan(\tan\theta \cdot \tan 4\alpha) + \arctan(c \cdot \tan\theta \cdot \tan 4\alpha)] \quad (3-23)$$

求得 $\Delta\Psi$ 后,就可以得到滚转角 θ 。

3.3.2 四自由度误差同时测量

利用激光准直进行四自由度误差同时测量的系统如图 3-28 所示。

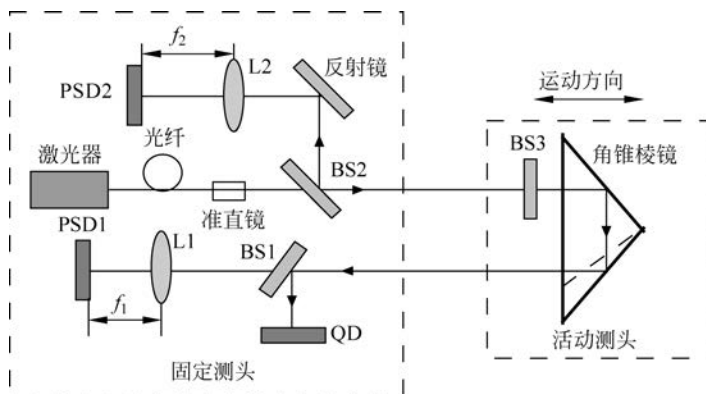


图 3-28 利用激光准直进行四自由度同时测量的系统

系统主要由固定测头和活动测头组成。固定测头集成了光学系统、四维传感单元以及激光器驱动、信号处理电路,测量基准为激光器发射的平行于被测件表面的光束。测量时,活动测头沿被测表面移动,从激光器发出的激光光束经扩束准直后,被活动测头中的半透半反镜分成两束,一束光经角锥反射棱镜后向反射,用作直线度的测量光束,传感器与该光束之间的相对位移由装在传感器内的四象限光电探测器测得,如果活动测头沿 z 轴的移动是直线性的,光束将保持在探测器的中心不动,而 x 、 y 轴方向上的任何对直线性的偏离都将导致光束偏离探测器中心位置,由此引起传感器输出信号的变化,经过信号处理并计算可得到两个方向上的直线度误差;另一束光由半透半反镜反射回测量头,用作角度误差的测量光束,由传感器内的位置敏感探测器接收,角度变化将导致探测器上光点的偏移,可得到俯仰角和偏摆角。探测器上测得信号经电路处理后进行模数转换,由微处理器通过串口发送到计算机中进行计算并显示出来,直线度误差和角度误差的分辨力可达 $0.1\mu\text{m}$ 和 $0.5''$ 。该测量系统具有结构简单、实时性强、测量头没有电缆连接和能满足长距离移动测量的优点。下面分别介绍其具体的测量原理。

1. 直线度测量

在如图 3-28 所示的测量原理中,直线度测量实际上采用的测量原理如图 3-29 所示。

测量时,角锥棱镜沿被测表面移动,被测表面的直线度误差使角锥棱镜与激光光束之间产生相对移动,如果产生 δ 的位移偏差,光线经过角锥棱镜反射后产生 2δ 的偏移,从而使后向反射的光束照射到四象限光电探测器的位置发生变化,探测器测量得到的光线偏离探测器中心位置的变化值就是直线度误差的变化值,即

$$\Delta x = \frac{x_1}{2}, \quad \Delta y = \frac{y_1}{2} \quad (3-24)$$

其中, x_1 为四象限探测器 QD 得到的光点在水平(x)方向的位移; y_1 为四象限探测器 QD 得到的光点在竖直(y)方向的位移; Δx 为 x 方向的直线度误差; Δy 为 y 方向的直线度误差。

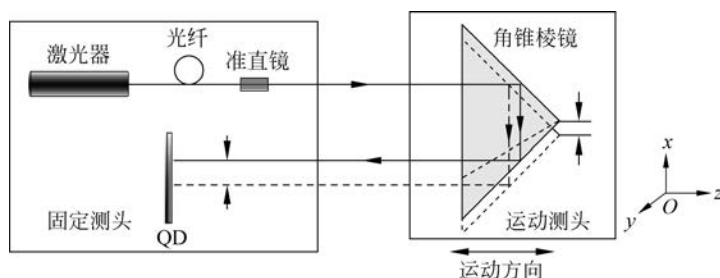


图 3-29 直线度测量原理

2. 角度测量

在如图 3-28 所示的测量原理中,测量俯仰角与偏摆角的原理与如图 3-2 所示的原理完全相同。当分光镜 BS3 随着靶镜沿着直线导轨运动时,反射光线对导轨运动副的平移和滚转不敏感,而只对俯仰、偏摆敏感,实现了误差分离,当分光镜有一个角度转动 α 时,反射光线则转动 2α ,经过透镜 L2 成像在位置敏感探测器 PSD2 上得到一个偏移量 Δ ,根据成像关系,在角度很小的情况下可以求出偏摆角和俯仰角的大小为

$$\alpha = \frac{x_2}{2f}, \quad \beta = \frac{y_2}{2f} \quad (3-25)$$

其中, f 为透镜 L2 的焦距; α 为俯仰角误差; β 为偏摆角误差; x_2 为探测器得到的光点在水平(x)方向的位移; y_2 为探测器得到的光点在竖直(y)方向的位移。

3. 激光光线漂移角测量与补偿

在激光准直测量中,激光光线的漂移(尤其是角度漂移)给直线度及偏转、俯仰角测量带来很大的测量误差,因此在如图 3-28 所示的四自由度误差同时测量方案中采用了共路光线用于测量和补偿,从而提高测量精度。

如图 3-28 所示,激光器发射的光经角锥棱镜反射后,一部分经 BS1 反射到达 QD 用于直线度误差测量,透过 BS1 的光线经 L1 汇集到 PDS1 上,按照如图 3-30 所示的原理可以直接测量得到激光光线两个方向的漂移角,即

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta x}{f_1}\right) \approx \frac{\Delta x}{f_1} \quad (3-26)$$

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{f_1}\right) \approx \frac{\Delta y}{f_1} \quad (3-27)$$

得到光线的漂移角后,就可以对计算直线度误差的式(3-24)和计算俯仰与偏摆角的

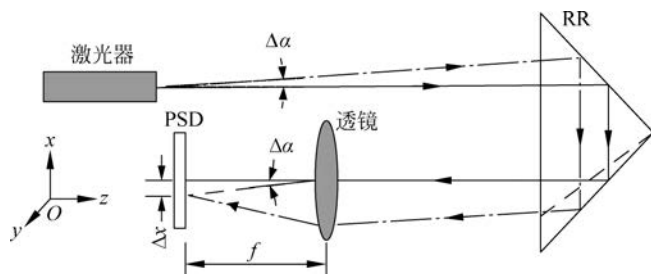


图 3-30 激光光线漂移测量原理

式(3-25)进行修正,得到

$$\Delta x = \frac{x_1}{2} \pm l \cdot \Delta\alpha \quad (3-28)$$

$$\Delta y = \frac{y_1}{2} \pm l \cdot \Delta\beta \quad (3-29)$$

$$\alpha = \frac{x_2}{2f} \pm \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (3-30)$$

$$\beta = \frac{y_2}{2f} \pm \frac{\Delta\beta}{2} \quad (3-31)$$

其中, l 为直线度测量光线到达探测器的传输距离。

由于测量直线度的光线与测量光线漂移角的光线共路,可以大大减少激光器本身漂移对直线度及俯仰、偏摆角测量的影响,提高测量精度。

3.3.3 五自由度误差同时测量

图 3-31 所示为美国 API 公司生产的激光五自由度同时测量系统。激光在移动测量单元内分为 3 束光,第 1 束光经角锥棱镜 R1,回射至干涉测量单元,构成激光干涉仪的测量信号,得到位置误差信息;第 2 束光由四象限光电探测器 QD 接收,得到移动测量单元两个方向的直线度误差信息;第 3 束光经反射镜 M1、M2、M3 反射后,再经过透镜将反射光会聚到光电探测器 PSD 上,从而得到偏摆角和俯仰角信息。

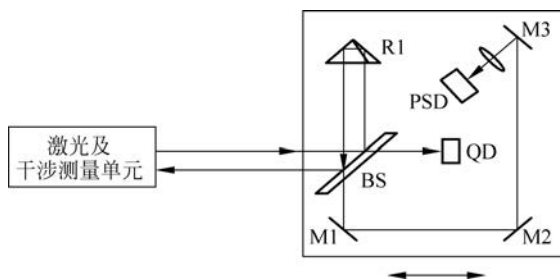


图 3-31 激光五自由度同时测量系统

图 3-32 所示为另一种基于衍射光栅的五自由度误差同时测量系统,线性偏振激光器发出的光经反射镜 RF 反射后入射到作为敏感器件的一维光栅上,一维光栅沿 x 方向运动,其 ± 1 级衍射光分别被 BS1 和 BS2 透射和反射,其中透射的光分别被四象限光电探测器 QPD_{+1} 和 QPD_{-1} 接收,形成四自由度同时测量单元,得到绕 3 个轴的角度误差,即俯仰、偏

图 3-34 所示为一个激光同时测量数控机床或三坐标测量机六自由度误差的系统,通过两个角锥棱镜得到位置误差;通过 QD1 和 QD2 可以得到入射到该探测上光线位置处的直线度误差,比较这两个直线度误差可以得到滚转角误差;通过透镜 L 和 PSD 可以得到俯仰角和偏转角误差;光源可采用线偏振 He-Ne 激光器或激光二极管。由于测量系统把光源发出的激光束作为测量基准测量角度误差和直线度误差,光源的稳定性直接影响最终的测量精度。

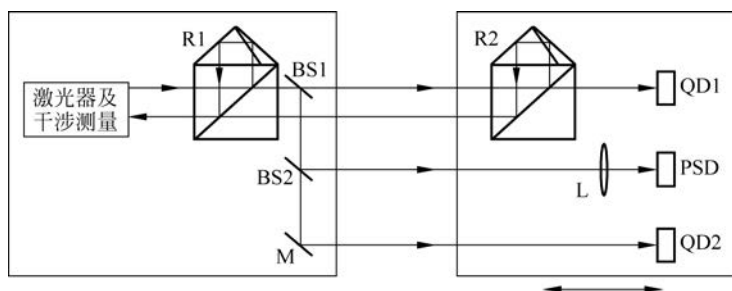


图 3-34 三光束六自由度激光测量

图 3-35 所示为双光束基准激光六自由度误差同时测量系统,稳频 He-Ne 激光器发出的单频偏振光经单模保偏光纤进入测量单元,敏感单元由两个角锥棱镜 RR2、RR3 组成,其中 RR2 的一半底面上镀有半反半透膜 BS5,BS5 的反射光线经透镜 L1 会聚到探测器 PSD1 得到俯仰角和偏摆角误差,经 RR2 或 RR3 反射的光线到达四象限探测器 QD1 或 QD2 得到两个直线度误差;通过 QD1 和 QD2 的直线度误差可以求得滚转角误差;经 RR1 和 RR3 反射的光线到达探测器 D,实现干涉测量位置误差;此外,L2 和 PSD2 的组合可以监测和补偿光线的角度漂移。特别需要指出的是,该系统不仅可以用于测量直线导轨的六自由度运动误差,通过配合使用高精度伺服回转系统,还可以测量转轴旋转运动的六自由度误差。

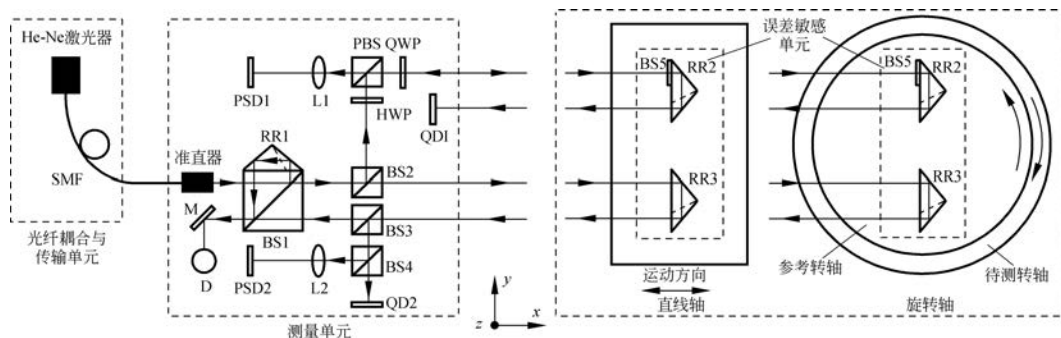


图 3-35 双光束基准激光六自由度误差同时测量系统

3.3.5 激光跟踪测量

激光跟踪测量技术最初是在机器人计量学领域发展起来的,当时主要用来解决机器人的标定问题,之后发展至目标空间位姿及多自由度误差测量。

激光跟踪干涉仪是在传统激光干涉仪的基础上加入了跟踪转镜机构,可以跟踪空间运动目标并实时测量目标到跟踪转镜中心的距离变化量,跟踪转镜机构由位置伺服系统控制,可以对空间目标点进行实时动态跟踪,实现了由静态测量到动态跟踪测量的转变。跟踪转

镜可以把激光束投向空间任意一点,从而使测量光路由固定方向的单一直线变为可以投向空间任意点的无数条光路,实现了从一维直线测量到空间三维坐标测量的转变,也实现了三维动态跟踪测量。

单路激光跟踪干涉测量光路如图 3-36 所示,激光器发出的光经偏振分光镜 PBS 分成两束,一束光经参考平面镜反射后返回到分光镜,由于两次经过 $\lambda/4$ 波片,成为透射光射出;另一束光经 $\lambda/4$ 波片、分光镜 BS 和双轴跟踪转镜射向目标靶镜猫眼 CER,光束经反射后沿原路返回,两束光在偏振分光镜处汇合,从同一侧出射,经角锥棱镜和平面镜反射回干涉测量单元,单元进行干涉计数。计数器可以显示出由目标靶镜移动而引起的距离变化数值,从而实现激光干涉测距,分光镜 BS 分出部分光返回光束,照射在四象限探测器 QD 上,目标靶镜的移动引起返回光线在四象限探测器上的移动,从而形成跟踪误差信号;跟踪控制系统驱动双轴转镜转动,使跟踪误差最小,从而实现对目标靶镜的动态跟踪;利用安装在双轴跟踪转镜上的两个精密测角传感器得到目标靶镜所在位置的方向角;利用激光干涉得到靶镜的距离,这样空间靶镜的位置就以极坐标的形式表现出来,实现了物体空间位置的测量与跟踪。

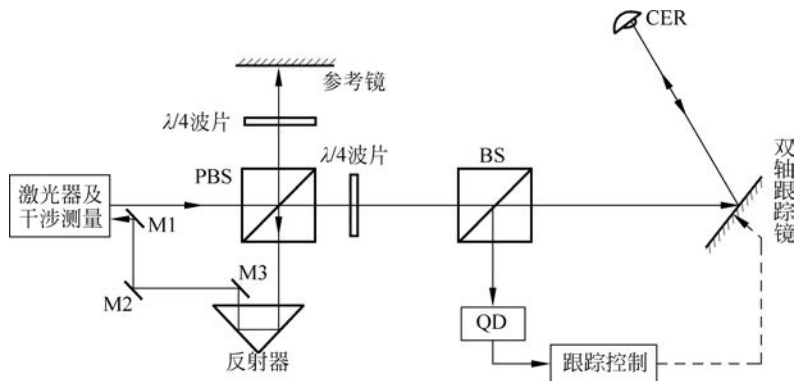


图 3-36 单路激光跟踪干涉测量光路

当采用 3 路上述激光跟踪干涉仪共同瞄准并跟踪三维空间某一运动目标时,每路都可以测出目标点到跟踪转镜中心的距离,那么只要 3 路激光跟踪干涉仪的位置关系已知,空间运动目标的位置也就确定了,这就是三边法测量的工作原理。由 3 路激光跟踪干涉仪组成的系统在实际测量前必须对各跟踪测量点的相互位置进行标定,这是一个相当困难的工作。另一个问题是,基于激光干涉技术的距离测量对测量过程中的挡光引起的跟踪中断非常敏感,测量过程中一旦跟踪中断,测量就无法继续,整个测量工作就必须重新开始。解决这两个问题比较理想的方法是在 3 路激光跟踪测量系统基础上再增加一路跟踪干涉仪,构成冗余系统,这样不仅可以完成系统自标定,提高测量精度,而且还可以实现系统的挡光自恢复,解决了系统标定困难和跟踪容易中断的问题,使系统具有实用价值。

由于激光干涉仪是目前世界上大范围位移测量精度最高的实用工具,以多路激光跟踪干涉仪为基础的柔性坐标测量系统摆脱了传统坐标测量机精密导轨的限制,它被认为是最有潜力、高精度、大范围、非接触、动态以及现场测量的工具,目前其应用已经延伸到各工业领域,如航空、航天、造船、重型机械、大型机组装等领域,既可完成大型零部件、组装件的外形几何参数和形位误差测量以及加工现场的在线测量,也适用于运动目标(如机器人手臂

等)空间运动轨迹、姿态的监测和标定。

图 3-37 所示为徕卡 AT960 型激光跟踪仪和激光扫描仪相互配合,从而实现直升机外形参数快速测量的现场。为了实现对飞机等大型部件外形或姿态的测量,激光跟踪仪往往与飞机部件(被测目标点)的距离较远,这对激光跟踪仪的伺服跟踪测角精度和远距离测距精度提出了很高的要求。



图 3-37 徕卡 AT960 型激光跟踪仪被用于测量空客直升机的外形参数

对于测角,目前激光跟踪仪的测角系统一般采用光栅度盘,该测角传感器具有分辨力高、动态精度高、抗干扰信号能力强等优点,保证了激光跟踪仪测量的速度和精度。随着技术的发展,现在激光跟踪仪选用的光栅度盘精度越来越高,整个度盘的刻线数量也大大增加,但度盘刻线的不均匀性无法避免,将对测角系统产生误差,称为度盘分划误差,目前很难对该误差进行完全消除。此外,激光跟踪仪的轴系加工误差、大气折光引入的跟踪误差等都会对测角产生影响。

对于测距,由于采用的是激光干涉测距原理,其影响因素及关键技术可参考本书第 2 章的分析。此外,目标靶球是激光跟踪仪的关键部件,而激光相对于靶球的入射角将对测距产生影响,因此实际测量中,要尽量保持跟踪仪与靶球的正对关系,减小入射角。事实上,除了测角和测距精度,诸如上述直升机外形参数的测量中所涉及的激光跟踪仪自身的位姿参数以及一系列相关坐标系(飞机坐标系、激光扫描仪坐标系、激光跟踪仪坐标系以及世界坐标系)的变换与统一等都将影响实际测量的精度。

目前比较典型的激光跟踪仪,如徕卡 AT960 型绝对激光跟踪仪,其标称精度如下:绝对测距精度为 $10\mu\text{m}$,干涉测距精度为 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$,角度测量精度为 $15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$,工作范围为 160m ,全量程坐标测量精度为 $15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ 。

习题与思考 3

- 3-1 简述激光准直测量原理及系统组成。
- 3-2 为了提高激光准直测试技术准确度,应注意哪些问题?可以采取哪些措施减小测试误差?
- 3-3 常用的半导体激光器准直方法有哪些?各有什么特点?
- 3-4 线阵 CCD 光斑中心有哪些提取方法?描述其提取算法。

3-5 什么叫直线度? 直线度测量方法有哪些?

3-6 详细分析如图 3-17 所示的直线度测量原理, 给出直线度误差的计算公式。

3-7 详细分析双频激光干涉仪使用渥拉斯顿棱镜和双面反射镜作为直线度敏感器件时, 俯仰角对直线度测量的影响, 给出计算公式。

3-8 分析如图 3-27 所示的外差法测量滚转角的测量原理, 给出具体的计算过程和计算公式。

3-9 详细分析如图 3-31 所示的测量各自由度误差的原理, 给出测量方程。

3-10 以如图 3-35 所示的六自由度误差同时测量系统为例, 分别说明针对直线轴或转轴的各自由度误差的测量原理, 分析是否存在误差串扰问题。

3-11 对于多自由度误差中的滚转角误差的测量, 除了利用准直方法外, 还有哪些方法及系统可以进行测量? 各自的优缺点是什么?