

用干涉法进行轨迹测量的探讨

史秀荣

(长春光学精密机械学院计算机系, 长春 130022)

张二星

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 研究一种在大型空间内精确测量轨迹的干涉方法。用这种方法,能跟踪测量作空间曲线运动的目标。文中提出了数学模型以及实施过程中的相关理论。

关键词:干涉计量;计算机软件

1 引言

八十年代中后期,国外有少数发达国家开展了对曲线运动轨迹进行动态测量的研究工作^[1-2]。不久,国内科技界也提出类似的问题。例如,要精确测量一些复杂的大型结构,精确曲线运动轨迹等问题。

测量的原理与过去的不同。计算机要迅速地进行大量的计算,才能实时地给出一系列的空间坐标值,完成对运动轨迹的测量。

对曲线运动目标进行跟踪测量,要求测试仪器上有一套特殊的光学机械系统。首先,在干涉仪的测量光路中设置了一个可绕一点转动的半球反射镜,构成一个“活动的测量臂”,可实现大幅度的回转,其次,在干涉仪中安排了位置探测光路,可探知目标位置的变化。

得到质量较好的干涉信号是能进行动态测量的必要条件。文中用 Jones 矩阵法给出了在干涉仪中采用偏光系统的准则,遵循这条原则,采用适当的偏光系统,得到了质量较好的干涉信号,使动态测量成为可能。

本文还讨论了总体设计时应考虑的一些重要问题。如干涉仪总体布局的原则,干涉仪总的制造误差,设计“活动测量臂”中半球反射镜及其精密机械传动系统时要注意的问题等。

2 数学模型

对轨迹和结构的测量都归结为对空间坐标的测量。测量的原理可用图1说明。设已知直角坐标系 P_1xyz 。总可以这样选择三点 $P_1(0,0,0)$ 、 $P_2(A_2,0,0)$ 、 $P_3(A_3,B_3,0)$ 。这三点分别放置三台干涉仪。被测目标点 O 与点 P_1 、 P_2 、 P_3 间的距离 D_1 、 D_2 、 D_3 能实时地由干涉仪测得。为

确定点 O 的坐标,先列出下面的方程组:

$$D_1^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

$$D_2^2 = (X - A_2)^2 + Y^2 + Z^2$$

$$D_3^2 = (X - A_3)^2 + (Y - B_3)^2 + Z^2$$

解这个方程组,就得点 O 的三个坐标

$$X = \frac{D_1^2 - D_2^2 + A_2^2}{2A_2}$$

$$Y = \frac{D_1^2 - D_3^2 - 2A_3X + A_3^2 + B_3^2}{2B_3}$$

$$Z = (D_1^2 - X^2 - Y^2)^{\frac{1}{2}}$$

其中, A_2, A_3, B_3 是决定于干涉仪系统的常数, D_1, D_2, D_3 分别是被测目标点 O 与三台干涉仪上的点 P_1, P_2, P_3 的距离。因此可用上述三个公式确定点 O 的三个坐标值。

为了利用上述三个公式计算坐标值,还需确定结构的初始参数 A_2, A_3, B_3 。为此,被测目标要变换 10 个位置,见图 2,并列出方程组

$$\Delta D_{ij} = |D_{ij}| - |D_{i0}|$$

$$\Delta D_{ij} = ((x_j - A_i)^2 + (y_j - B_i)^2 + (z_j - C_i)^2)^{\frac{1}{2}} - ((x_0 - A_i)^2 + (y_0 - B_i)^2 + (z_0 - C_i)^2)^{\frac{1}{2}}$$

其中 i 为干涉仪的序号, $i=1, \dots, 4$

j 为被测目标空间位置序号, $j=1, \dots, 10$

D_{ij} 为第 i 台干涉仪与第 j 个目标位置间接距离,

ΔD_{ij} 为由 D_{ij} 与 $D_{i(j-1)}$ 决定的空间位移,

x_0, y_0, z_0 为第 0 个目标位置的坐标值,

x_j, y_j, z_j 为第 j 个目标位置的坐标值,

A_i, B_i, C_i 为第 i 台干涉仪的坐标值。

给出 x_0, y_0, z_0 值,目标变换 10 个位置,可得含有多个方程的方程组。此方程组为非线性的。通过线性变换,将上述方程组变换为标准型方程组^[3]。

$$f = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

其中 x_n 为变量, a_{nn} 为系数 $n=1, 2, \dots, n$ 。

于是解此方程组归结为矩阵运算问题。用计算机进行矩阵运算比较方便。解之,得 A_2, A_3, B_3 , 才能进入动态测量过程,实时给出三坐标值。

2 位置探测光路及活动的测量臂

干涉仪采用如图 3 所示的光学系统。来自激光器的频率为 f_1, f_2 的线偏振光,经扩束后进入偏

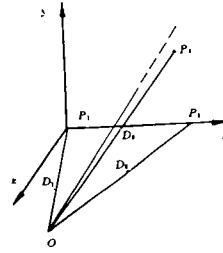


图 1 轨迹和结构测量原理图

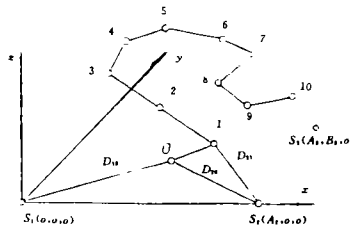
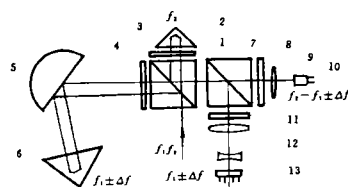


图 2 被测目标位置变换图

振分束器 1。其中,频率为 f_2 的线偏振光,作为参考光,经四分之一波片 2,变成圆偏振光,射入角隅棱镜 3。频率为 f_1 的线偏振光,作为测量光,经四分之一波片 4,变成圆偏振光,又经半球反射镜 5,射向角隅棱镜 6(目标)。频率为 f_1 、 f_2 的两束光,分别经角隅棱镜 6 和 3 反射回来,改变旋向,经四分之一波片 4 和 2 后分别变为线偏振光(振动面都旋转了 90°),在偏振分束面上会合。有一部分光透过分束器 7,经检偏器 8 和物镜 9,由光敏二极管 10 接收。



另一部分光经分束器 7 进入位置探测光路,经检偏器 11,滤掉频率为 f_2 的光,剩下频率为 $f_1 \pm \Delta f$ 的光,经望远系统 12,由位置探测器 13 接收。如果目标沿测量光束运动,测量光束仍沿原路返回,在位置探测器上只产生零信号。如果目标在垂直于测量光束的方向上有位移,则返回光束也有同方向的位移(光束

1 偏振分束器;2 四分之一波片;3 角隅棱镜;4 四分之一波片;5 半球反;6 角隅棱镜;7 分束器;8 检偏器;9 物镜;10 光敏二极管;11 检偏器;12 望远系统;13 位置探测器

图 3 干涉仪的光学系统

位移是目标位移的 2 倍),同时在位置探测器上产生 $x-y$ 位移信号,经控制电路放大处理后反馈到微力矩电机组,带动精密机械传动系统,使半球反射镜旋转。结果,在位置探测器上信号为零,完成了控制过程的一个循环。如此往复,实现了跟踪。

半球反射镜可绕球心旋转,其反射面通过球心。测量光束对球心对称,以使半球反射镜旋转时产生的附加程差在允许的范围内。半球反射镜与目标共同构成干涉仪的活动的测量臂。半球反射镜及精密机械传动装置的转动惯量应控制在一个允许的数值以下。这主要决定于系统的动态响应时间。实际上,这部分构件的转动惯量核算到电机轴上,要比电机转子本身的转动惯量小得多。所以,干涉仪活动的测量臂的动态特性是很好的。这就是采用活动的测量臂而不采用干涉仪整体转动方案的原因。

4 偏振光系统

采用位置探测光路及活动的测量臂,可实现对目标跟踪。这只是完成了全部工作的前半部分。要完成后半部分工作,即进行动态测量还须在一定的动态范围之内都有好的干涉信号。为此,在干涉仪中设置了适当的偏振光系统。

按照 Jones 的方法,对于任一偏振元件,入射光波的 Jones 矢量 E_{in} 和出射光波的 Jones 矢量 E_o 之间的关系为

$$E_o = ME_{in}$$

其中, M 是一个复矩阵,叫做偏振元件的作用矩阵。对于干涉仪来说,要形成对比度好的干涉条纹或者说好的干涉信号,两条光路出射光波应当相同。这只有在两条光路的作用矩阵相等的条件下才成立。所以,我们得出,在干涉仪中采用偏光系统的准则是两条光路的作用矩阵相等。在这里,参考光路的作用矩阵是

$$\begin{bmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & Be^{-i\pi/2} \\ -Ce^{i\pi/2} & -D \end{bmatrix}$$

测量光路的作用矩阵是

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & Be^{-i\pi/2} \\ -Ce^{i\pi/2} & -D \end{bmatrix}$$

其中, $\begin{bmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$ 为四分之一波片的作用矩阵^[4]; $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为角隅棱镜的作用矩阵。若 δ 为在角隅棱镜中内反射时 S 分量与 P 分量间的位相差, 则 $A、B、C、D$ 是 δ 的函数。它们都与入射角有关^[5]。我们在这里不关心函数的具体形式和数值, 而是要看它们之间关系。 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 为在偏振分束膜反射时的作用矩阵。因为在这里反射时 E 矢量的 S 分量有相变 π , P 分量无相变。测量臂中的半球反射镜镀铝反射膜。当入射角不够大时, 它产生的位相差对偏振度的影响较小, 可以忽略不计。这样, 两条光路的作用矩阵相等, 干涉仪能得到较好的信号。实验证明, 干涉信号的动态范围比国外同类仪器的还要大。

5 总体设计时应考虑的问题

在进行总体设计时, 搞好干涉仪的布局是很重要的。见图 4, S 为光源, BS 为分束器, M_1 为测量镜, M_1' 为测量镜移动 L 后的位置。 L_1 为测量开始时测量臂长。 M_2 为参考镜, L_2 为参考臂长。设测量开始时计数器计数

$$N_1 = 2n(L_1 - L_2)/\lambda$$

测量过程中, 由于环境的变化产生的误差为

$$\delta N_1 = \frac{2}{\lambda} \left[\int (L_1 - L_2) dn + \int dn(L_1 - L_2) - \int \frac{n}{\lambda} (L_1 - L_2) d\lambda \right]$$

可以看出, 误差 δN_1 与 $L_1 - L_2$ 有关, 而与测量过程中测量镜移动的距离 L 无关, 也就是与干涉仪的结构、布局有关, 而与被测长度无关。当 $L=0$, 不进行测量时, 它依然存在。我们称它为“空程误差”。它反映了在测量(或不测量)过程中, 与干涉仪的结构、布局有关的误差随环境的变化, 就是通常所说的“零点漂移”。减小这种误差的办法, 是一使 $L_1 - L_2 = 0$; 二是采用类似“同路干涉仪”的结构, 折转干涉仪的一个臂, 使二臂处于同一环境条件下; 再有, 可以这样布局, 使测量镜的起始位置尽量靠近分束镜, 也可减小这项误差。

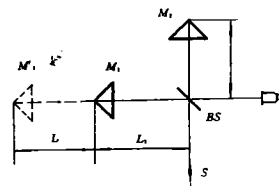


图 4 干涉仪的布局

在进行总体设计时, 除了要限制光学系统波象差计算的数值外, 还要限制光学系统的制造误差。光学零件制造时的面形误差为

$$\Delta W_1 = \left(\sum (h_1 \cos i)^2 + \sum (h_2 (n - 1))^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中 h_1 为反射面的误差, i 为入射角, h_2 为透射面的误差, n 为材料的折射率。光学材料不均匀性产生的波差为

$$\Delta W_2 = \left(\sum (\Delta N t / \lambda)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中, ΔN 为材料的光学均匀性, t 为材料的厚度, λ 为光波波长。由于采用双频激光干涉, 只计干涉场亮暗变化的次数。所以, 对上述误差的要求较宽。如果控制到四分之一波长, 已能满足使用要求。

在活动的测量臂中, 半球反射镜反射面对球心的偏离和旋转中心的变化, 都要产生附加的光程差, 直接影响测量精度。通过精密光学加工和采用空气轴承, 可以控制反射面对球心的偏

离及旋转中心的变化 $e < 0.001$ 毫米。产生的误差不大于 $\sqrt{2}e$ 。

带动半球反射镜转动的精密机械传动系统,转动惯量要小。这取决于对整个系统动态响应时间的要求,在前面已提过。对精密机械传动系统,还要求它无间隙,有足够的刚度。一个闭环控制系统,间隙会引起振动。刚度不足产生的弹性变形,在动态条件下,相当于间隙产生的效果。机构运动的平滑性也很重要。机构中出现的微小波动,在这里也可能带来测量的误差。

应该特别提出,干涉仪系统的支架要有足够的刚度。支架的固有频率应该达百周的数量级。这是仪器能正常工作的基本条件。

6 结束语

用这种方法进行三坐标测量,虽然不象普通的三坐标测量机那样有三个方向的直线导轨,但是它在技术上要比前者复杂、困难得多。

从功能上来看,普通的三坐标测量机适宜对不大的结构和位移进行测量,而本方法可以对大型结构和位移进行测量。普通的三坐标测量机适于静态测量,本方法可以进行静态和动态测量。

参 考 文 献

- [1] Allen H. Greenleaf, Self-calibrating Surface Measuring Machine. Opt. Eng., 1983, 22(2): 276—280
- [2] Tilo Pfeifer und Albrecht Hof. Aachen, Selbst-Kalibrierendes Räumliches Wegmeßsystem zur Koordinatenbestimmung im Raum, VDI—Z, 1985, Bd. 127, Nr 12, 441—444
- [3] 杨毓引等, 电子计算机应用数学, 北京: 冶金工业出版社, 1979, 170—188
- [4] W. A. Shurcliff, Polarized Light, Cambridge Massachusetts, Harvard University Press, 1962, 165—171
- [5] 沃敏政、王能鹤、王之江, 角隅棱镜干涉仪中光的偏振与干涉. 光学学报, 1981, 1(5): 415—422

Research into an Interferometric Technique for measuring Motion Loci

Shi Xiurong

(Dept. of computer, Changchun Institute of Optics
and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract

An interferometric technique for accurately measuring motion loci in a relatively large space is described. Using the technique, a target moving along a space curve can be traced and measured. The mathematical model and some principles which have to be followed in design are presented.

Key words: Interferometry, Software