

光学经纬仪三坐标测量系统的计算方法及误差分析*

喻彩丽 楼少敏 吴立军

浙江科技学院

摘要 :用光学经纬仪可以对超大工件的形状和位置进行检测。根据经纬仪测量系统的测量原理,对较大范围内检测点的空间坐标计算方法及其误差进行了探讨。通过对系统误差来源的分析,为超大工件三坐标测量系统性能检测规范的制定提供了帮助。

关键词 :光学经纬仪, 三坐标, 计算方法, 误差

Calculation Method and Erroranalysis of Optical Theodolite in 3D Measurement System

Yu Caili Lou Shaomin Wu Lijun

Abstract :The optical theodolite can be used in measuring the shape and position of a super-big workpiece. The calculating method for the space coordinates of monitoring point in big distant by optical theodolites in 3D system and its error are discussed. The analysis to the error source can help to get the detecting standard of the big distant by optical theodolites in 3D system.

Keywords :optical theodolite, three-coordinate, calculation method, error-analysis

1 引言

工业中经常需要在较大范围内对单点坐标、长度以及曲面型面特征进行测量(如在线检测汽车车身、飞机机身、轮船船体等),经纬仪测量系统的开发和应用,为解决工业测量中的上述难题提供了手段。但由于大尺寸坐标测量系统测量方法灵活、误差来源多,系统引进时无法验收,不能确定系统是否达到精度要求;无法进行周期检测和中间检测,难以了解系统的测量性能及其变化,给系统的使用带来了影响。鉴于此,美国 NIST 已将大尺寸坐标测量系统(主要是经纬仪系统和激光跟踪系统)检测方法和标准实物的研究列入 1997 ~ 2001 年发展计划,德国 PTB 也对此进行了研究。针对我国大尺寸三坐标测量系统的使用现状和技术水平,笔者对经纬仪测量系统测量过程中检测点坐标的计算方法及误差进行了详细的分析和研究,希望有利于大尺寸三坐标测量系统性能检测规范的制定。

2 系统测量原理与计算

2.1 测量原理

经纬仪测量系统主要由数台经纬仪(最少两台)和一台计算机以及标准尺、可粘贴标记或激光目标发生器等组成,其测量原理是定基线前方交会测量法。设两台经纬仪的三轴中心分别为 L 和 R ,建立

如图 1 所示的空间直角坐标系: L 点为坐标原点, LR 连线在水平方向的投影为 X 轴,过 L 点的铅垂方向为 Z 轴,由右手法来确定 Y 轴。

当两台经纬仪同时对准空间一点 $N(X, Y, Z)$ 时,可以得到两个水平角 α 、 β 和两个天顶角 ξ_L 、 ξ_R 。若已知 L 与 R 间的水平间距 b 和 R 到 X 轴的垂直高度差 ΔZ ,就可以由式(1)、式(2)和式(3)计算出 N 点的三维坐标:

$$X = \frac{b \sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{1}$$

$$Y = \frac{b \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{2}$$

$$Z = \frac{1}{2} [b (\sin \beta \cot \xi_L + \sin \alpha \cot \xi_R) / \sin(\alpha + \beta) + \Delta Z] \tag{3}$$

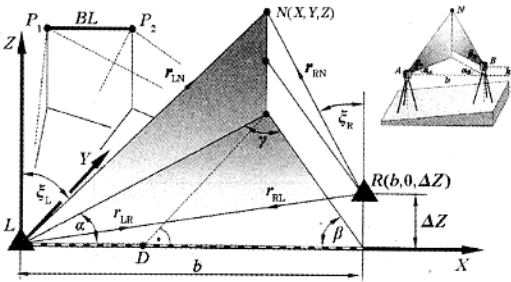


图 1 测量原理(N 为前方相交点)

2.2 基线 b 的确定及误差分析

(1) 基线 b 的确定

基线 b 可以采用以前方交会为基础的比例法间接测量得到。在如图 1 所示的测量布局中,长度为 BL 的标准尺被放置在两台经纬仪的同一侧,尽可能地放置在 XOY 平面内并使 BL 平行于 X 轴。如

* 浙江省教育厅科研基金资助项目(项目编号: J302102006)
收稿日期: 2004 年 11 月

图 2 所示,首先分别测量标准尺上的位置 P_1 和 P_2 :

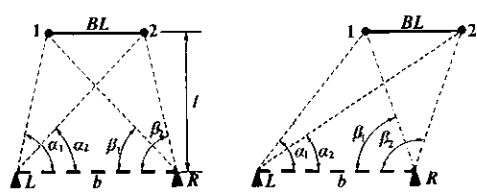


图 2 由标准尺 BL 确定基线 b 的长度

两台经纬仪分别瞄准点 1,点 2 得到角度 α_1 、 α_2 和 β_1 、 β_2 ,通过计算得 :

$$b = \frac{BL}{\sqrt{\left[\frac{\sin\alpha_1\sin\beta_1}{\sin(\alpha_1+\beta_1)} - \frac{\sin\alpha_2\sin\beta_2}{\sin(\alpha_2+\beta_2)}\right]^2 + \left[\frac{\sin\beta_1\cos\alpha_1}{\sin(\alpha_1+\beta_1)} - \frac{\sin\beta_2\cos\alpha_2}{\sin(\alpha_2+\beta_2)}\right]^2}} \tag{4}$$

(2)基线 b 的误差分析

基线 b 的函数方程为

$$b = F(BL, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \tag{5}$$

由差值方法的应用得到基线 b 的误差为

$$U_b = \pm \sqrt{U_{BL}^2 + U_{\alpha_1}^2 + U_{\alpha_2}^2 + U_{\beta_1}^2 + U_{\beta_2}^2} \tag{6}$$

($U_{BL} \rightarrow 10\mu\text{m}$, $U_{\alpha} \rightarrow 1''$)

图 3 反映了基线 b 的误差取决于基准的位置分布情况。此外,影响基线误差的因素还包括 :仪器本身的调试精度,相交点的角度 γ ,传递比 b/BL 的比值以及目标的不确定度等。

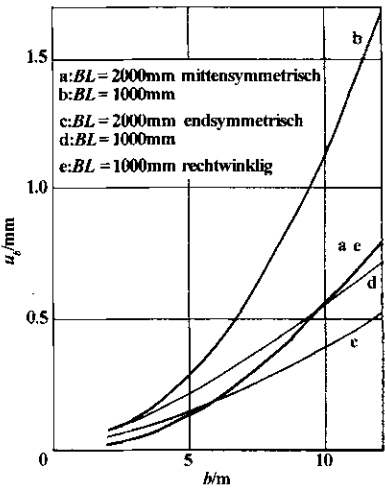


图 3 基线 b 的误差取决于基准的位置

2.3 高度差 ΔZ 的确定及交会点 N 平面内的坐标计算

(1) 如图 4 所示,两经纬仪高度差 :

$$\Delta Z = \Delta h_L - \Delta h_R \tag{7}$$

其中

$$\Delta h_L = \frac{b_{LN}}{\tan \xi_L} \quad \Delta h_R = \frac{b_{RN}}{\tan \xi_R} \tag{8}$$
$$b_{LN} = \frac{b \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$b_{RN} = \frac{b \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{9}$$

(2)点 N 的坐标计算

点 N 平面内的计算方法 : (见图 4)

$$\cos \alpha = X_N / b_{LN} \tag{10}$$

$$\sin \alpha = Y_N / b_{LN} \tag{11}$$

$$X_N = \frac{\cos \alpha b \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{12}$$

$$Y_N = \frac{\sin \alpha b \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{13}$$

$$\cot \xi_L = Z_{NL} / b_{LN} \tag{14}$$

$$\cot \xi_R = (Z_{NR} / b_{RN}) + \Delta Z \tag{15}$$

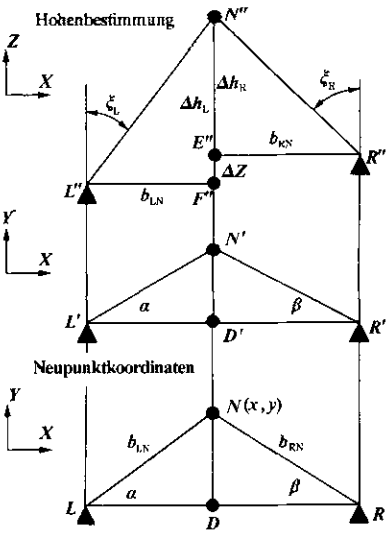


图 4 交会点的平面图

则

$$Z_{NL} = \frac{\cot \xi_L b \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \tag{16}$$

$$Z_{NR} = \frac{\cot \xi_R b \sin \beta}{\sin(\alpha + \phi) + \Delta Z}$$

故有

$$Z_N = (Z_{NL} + Z_{NR}) / 2 \tag{17}$$

(3)交会点 N 的误差分析 (见图 5) :

测量点的误差包括 :经纬仪的精度,定位线(基线)的不确定度,目标对准的不确定度,仪器调整时产生的误差,偶然因素的影响以及人为因素等。

交会点 N 的测量不确定性计算 :

$$U_{Ni} = \sqrt{U_{Zi}^2 + U_b^2 + U_{\angle}^2}$$

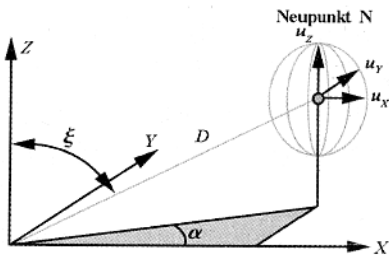


图 5 误差球

围绕点 N 的误差球 通过直径的计算得误差传递的平方。

3 曲面测量过程及误差分析

3.1 曲面测量实例

曲面的测量方法如图 6 所示 在曲面上取一定数量的特征点进行测量并对数据进行一定的处理,然后将测量值与被测曲面的基准值进行比较以得到被测曲面的型面误差。

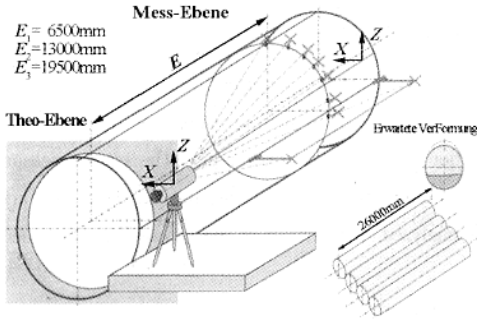


图 6 曲面测量实例

3.2 型面误差分析

下面分两种情况说明对不同型面误差分布情况的处理方法。

(1) 选取的采样区域与型面误差区域大小相当

当选取的采样区域与型面误差区域大小相当时,先在位置 1 测量各采样点,记为 $I1 \sim I7$ 。然后将样品向经纬仪方向移动 0.15mm 到位置 2,再测量第 8 号采样点,记为 $I8$ 。以 $I1 \sim I7$ 采样点确定的曲面为基准面,以 $I1 \sim I7, I8$ 和 $I5 \sim I7$ 采样点确定的曲面为有型面误差的曲面。已知这个曲面是二次曲面,所以可以设一个二次曲面方程的一般形式

$$Y = \alpha X^2 + bZ^2 + cXZ + dX + eZ + f \tag{18}$$

将基准曲面和有型面误差曲面的两组采样数据分别代入式(18),得到两个方程组:

$$Y_{1i} = \alpha_1 X_{1i}^2 + b_1 Z_{1i}^2 + c_1 X_{1i} Z_{1i} + d_1 X_{1i} + e_1 Z_{1i} + f_1 \tag{19}$$

$(i = 1 \dots 9)$

$$Y_{2i} = \alpha_2 X_{2i}^2 + b_2 Z_{2i}^2 + c_2 X_{2i} Z_{2i} + d_2 X_{2i} + e_2 Z_{2i} + f_2 \tag{20}$$

$(i = 1 \dots 9)$

式中 X_{1i}, Y_{1i}, Z_{1i} ——位置 1 所对应的各采样点坐标值

X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i} ——位置 2 所对应的各采样点坐标值

根据最小二乘法分别解出基准面方程系数的最佳解 $a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1$ 和有型面误差曲面方程系数的最佳解 $a_2 b_2 c_2 d_2 e_2 f_2$,即得到了两个曲面方程。

然后,在这两个曲面上分别进行二次采样,求出对应于相同 (X_i, Z_i) 坐标下 Y_i 的差值,这些差值反映了型面误差。图 7 的测量结果表明使用这样的检测可满足型面误差为 0.15mm 的检测精度要求。

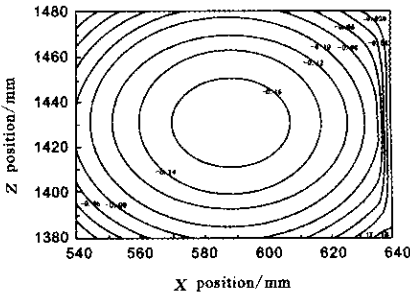


图 7 误差区域小

(2) 选取的采样区域小于型面误差区域

试验表明 :当选取的采样区域面积小于型面误差区域时,宜采取以下处理方法 在位置 1 处测量各个采样点,记为 $I1 \sim I7$ 然后同样将样品向经纬仪方向移动 0.15mm 到位置 2,同样测量各采样点,记为 $I9 \sim I15$ 。以 $I1 \sim I7$ 采样点确定的曲面为基准面,以 $I9 \sim I15$ 采样点确定的曲面为有型面误差的曲面,然后用同样的方法求出基准曲面和有型面误差曲面的方程。当仍然用前面的方法来表示面型时,各点的误差虽然仍在 -0.15mm 附近,但是有一些采样点的偏差较大(见图 3)。其主要原因是由于两个曲面的基本特征完全相同,不同之处仅仅是在一个方向上有平移,这时的单点测量误差对所拟合曲面的影响比较突出。在实际分布中,一般对大区域内的型面误差区域主要是考虑总体分布。因此,处理这类问题将不采用将单个二次采样点的 Y 坐标差值作为型面误差的衡量标准,而是将这些差值的平均值作为这一块测量区域的型面误差值。通过多次实验验证,虽然每次计算的型面误差分布状况不同(图 8),但是型面误差都在 -0.15mm 左右,所以这样处理的结果能很好地符合实际要求。

4 结语

经纬仪测量系统可以完成在工业测量中常用的点、线、面的测量;其曲面测量精度可以达到 0.15mm 。

通过对整个测量系统原理的分析和实际测量试验的操作,笔者认为在今后该领域研究应特别注意以下几点:(1)经纬仪测量系统的直接测量结果表现为被测点的空间三维坐标,因此将要求的被测量转化为空间坐标的形式是解决问题的关键;(2)针对具

图像技术在微小零件几何尺寸测量中的应用

陈向伟 王龙山 刘庆民

吉林大学

摘 要 介绍了一种基于 CCD 图像的微小零件几何尺寸测量系统 给出了利用数字图像处理技术进行几何尺寸非接触测量的方法,主要包括图像的采集、预处理、二值化、边缘检测及轮廓提取等,从而得到被测物体参数的精确结果,并对测量精度进行了分析。通过实例证明了该方法的可行性和正确性。

关键词 边缘检测, 图像测量, 随机 Hough 变换

Application of CCD Image Technology on Measuring Size of Micro Part

Chen xiangwei Wang longshan Liu qingmin

Abstract : A new non-contact measurement system for micro size based on CCD image is put forward. The non-contact measurement principle for geometry of part using image measurement technology is introduced. The main measurement approaches include : image collecting, image pre-processing, image binaryzation, edge detection and system calibration etc. The system measuring micro accessory geometrical size by non-contact method are designed and the components of the system, the key technology and the actual measuring experiment are explained. The measurement precision is analyzed. The results of the practical measurement show : the method is correct and feasible.

Keywords : edge detection, image measurement, randomized Hough transform

1 引言

近年来,随着计算机图像处理技术的发展,图像测量技术作为非接触测量手段有了长足的进步。图

像测量方法具有非接触、高速度、动态范围大、信息量丰富等优点,非常适合传统方法难以测量的场合,如易变形零件尺寸、微小尺寸及零件孔心距等的测量。本文介绍了一种以 CCD 作为图像传感器的图像测量系统,给出了利用数字图像处理技术进行非

收稿日期 2004 年 11 月

