

三坐标测量机误差修正的研究

杨 登 清 卞 铭 健

(机械系)

提 要

应用计算机对三坐标测量机的误差修正进行研究, 提出误差修正的点阵计算法, 建立误差修正的数学模型, 编制了程序, 并以A221三坐标测量机为例进行了模拟修正, 使测点的座标误差可以控制在 $2\mu\text{m}$ 内。为提高检测的精度和速度, 设计了一种新的检具——移动球检具。

关键词: 三坐标测量机, 误差修正, 点阵计算法, 移动球检具

一、误差修正模型设定

现有三坐标测量机(以下简称座标机)误差修正的方法主要有分量法和点阵法。由于分量法一般只能修正座标机的几何误差及检测系统误差, 其精度除与数学模型有关外, 还受检测各项误差时检定精度的影响, 当修正的误差项目比较多时, 其影响是不容忽视的。但这种方法需要的检测工作量和占用的计算机内存较少, 而后一点对使用小型计算机和专用计算机的系统来说是影响较大的。用点阵法修正时所检测出的座标系统误差更接近于座标机的实际使用情况, 因而修正效果较好。但它所需的检测工作量和占用的计算机内存都很大。如A221座标机(测量范围为 $700 \times 500 \times 400$), 当划分的小区间边长为 10mm 的立方体时, 需检测近十五万个节点的三维误差。

为做到既有足够的修正精度, 又能减少检测工作量和所占的计算机内存, 提出了点阵计算法。这种方法的做法是: 把XY平面等分为正方形的小网格(如图1所示), 检测出网格上各节点的座标系统误差, 作为修正时的原始数据之一。位于该平面上且与节点重合的测点就可以直接用上上述数据进行修正, 而对平面上非节点的测点, 可用平面二维插值法求出它们的误差量给予修正。

而对位于平面外的测点, 修正时是以它在XY平面上的投影点为基础, 先求出投影点的误差, 然后再考虑各轴直线度的角度误差和座标轴间垂直度误差的影响, 以它们的综合结果作为该点座标误差而给予修正。对非节点的直线度误差也可用插值的方法来求出。

为导出空间点座标误差修正的数学模型, 必须对被修正的座标机及其误差状况作如下假定:

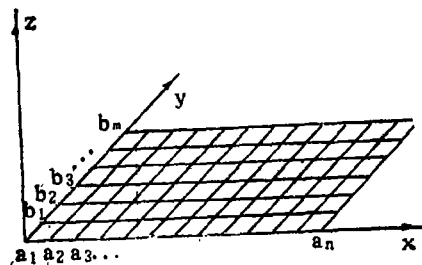


图1 XY座标平面的划分

本文1985年11月26日收到。

(1) 座标机上各部件都可以看作是刚体，它们的运动可以认为是刚体的运动，因而可以用刚体运动学的模型对它们进行分析。

(2) 测量空间内点的误差矢量可以用该点的座标误差来表示。由于座标误差相对于不同的原点而言，其值是不一样的，只是它们之间的相对值保持不变。因此在误差修正中，从一开始就必须设定合适的原点，并在误差检测和修正的整个过程中始终保持不变；

(3) 由于运动件工作面的磨损，及机构的受力变形和材料的物理机械稳定性等原因，使导整的直线度、垂直度等系统误差随使用时间发生变化，导致空间点的座标误差发生变化。然而，它们的变化是十分缓慢的，故在一段时间内，可把它们看为是常值的误差。

(4) 各项误差在它们的分布范围内可以看成是连续的。

有了上述假定，就可以用刚体运动学的方法来分析位移，并把各项误差预先检测出来，贮入计算机，作为误差修正的原始数据。然后应用插值原理从有限的被检点的座标误差中获得整个测量空间内所有点的座标误差。

根据精度分析，A221座标机由其本身的几何误差及检测系统误差引起的测点座标系统误差可用下式表示^[2]：

$$\begin{pmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \\ 0 \end{pmatrix}_G = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\gamma_x & \Delta\beta_x & \Delta x_x \\ 0 & 0 & -\Delta\alpha_x & \Delta y_x \\ 0 & \Delta\alpha_x & 0 & \Delta z_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\gamma_y & \Delta\beta_y & \Delta x_y \\ \Delta\gamma_y & 0 & -\Delta\alpha_y & \Delta y_y \\ -\Delta\beta_y & \Delta\alpha_y & 0 & \Delta z_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Delta\beta_z & \Delta x_z \\ 0 & 0 & -\Delta\alpha_z & \Delta y_z \\ 0 & 0 & 0 & \Delta z_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ -l \\ z \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\varphi_{xy} & \Delta\varphi_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta\varphi_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} l\Delta\gamma_x + z\Delta\beta_x + \Delta x_x + l\Delta\gamma_y + z\Delta\beta_y + \Delta x_y + z\Delta\beta_z + \Delta x_z - y\Delta\varphi_{xy} + z\Delta\varphi_{zx} \\ -z\Delta\alpha_x + \Delta y_x + x\Delta\gamma_y - z\Delta\alpha_y + \Delta y_y - z\Delta\alpha_z + \Delta y_z - z\Delta\varphi_{xy} \\ -l\Delta\alpha_x + \Delta z_x - x\Delta\beta_y - l\Delta\alpha_y + \Delta z_y + \Delta z_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

由于在 $z=0$ 的 XY 座标平面上已直接检测出了各节点的座标误差，取 $z=0$ 得：

$$\begin{pmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l\Delta\gamma_x + \Delta x_x + l\Delta\gamma_y + \Delta x_y + \Delta x_z - y\Delta\varphi_{xy} \\ \Delta y_x + x\Delta\gamma_y + \Delta y_y + \Delta y_z \\ -l\Delta\alpha_x + \Delta z_x - x\Delta\beta_y - l\Delta\alpha_y + \Delta z_y + \Delta z_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由检测确定的各节点座标误差实际上还包括了除几何和检测系统误差外的其他误差项目如变形等引起的座标系统误差。

式(2)中的 Δx_z 、 Δy_z 、 Δz_z 是与 z 轴伸出长度有关的误差量，当 $z=0$ 时，它们为0。而当 z 为其他值时，它们不为零，故对空间点的座标误差计算还需要考虑它们的影响。所以空间任意点的座标误差为：

$$\begin{pmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x'_0 + z\Delta\beta_x + z\Delta\beta_y + z\Delta\beta_z + z\Delta\varphi_{xx} + \Delta x_x \\ \Delta y'_0 - z\Delta\alpha_x - z\Delta\alpha_y - z\Delta\alpha_z - z\Delta\varphi_{xy} + \Delta y_x \\ \Delta z'_0 + \Delta z_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

那么, 所求测点的座标修正量(cx , cy , cz)为($\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$)的反号。
 (cx , cy , cz)即为点阵算法进行误差修正时求测点座标修正量的计算式。

二、误差数据的获得

为提高检测的精度和速度, 本文提出了一种新的检具——移动球检具, 其结构示意图如图2所示。

移动球检具主要由两大部分组成的:

(1) 滑动部分: 包括一个标准球和反射镜固定在一块可移动的滑动体上;

(2) 检具体部分: 包括检具体、导轨、夹紧机构、调整机构、微调机构等。

应用这种检具进行检测时, 要把它放在座标机的工作台上, 并调整它的导轨使之与 x 轴平行, 标准球的中心运动调整在 XY 座标平面内。同时还要用一台双频激光干涉仪配合使用, 并把激光束的光程也调整到球中心移动的直线上。由于检具有微调机构, 方便了调整过程。检具调好后,

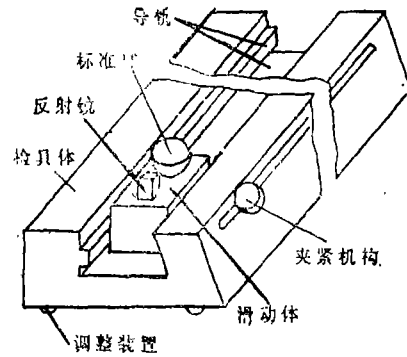


图2 移动球检具

用磁性内锥测头来检测标准球在高精度导轨内的位置, 并把它与激光干涉仪的测值比较, 以获得 XY 平面内的节点座标误差。这样在每个节点上, 只要测一次就可得到三维的座标误差。由于磁性测头可保持测力恒定, 采用高精度的导轨和以激光波长为标准等, 使检测的速度和精度要求获得保证。至于实际使用的测头与磁性测头的差别也可以用修正的方法使之大大地减小。

三、误差修正的讨论

综上所述, 座标机测出的测点座标的误差可以用修正的方法使之减小, 从而提高座标机测量结果的准确度。

修正的效果与修正方法的优劣密切相关, 而修正方法的好坏决定于它的物理数学模型与座标机实际情况的吻合程度。假定的模型越接近实际情况, 就越能准确地修正掉测点的座标误差, 修正的效果也就越好。点阵法的设想和仪器的实际情况比较接近, 因此它的修正精度高, 但它的节点相当多, 实用有一定困难。点阵算法既吸取了点阵法的优点, 又可减少检测工作量和占用的计算机内存。它用于A221座标机进行误差修正时, 考虑到该机的重复精度为 $1.5\mu\text{m}$, 对座标位置检定时时的检定误差可达 $0.5\mu\text{m}$, 故经过修正可使该机输出的测点座

标误差控制在 $2\mu\text{m}$ 以内。对于生产型的座标机,如果能达到这样的精度就可以保证实际测量的要求。从本例修正程序计算出的一千多个点的座标修正量来看,一般测点最大座标误差约为 $3\mu\text{m}$,修正后可达 $2\mu\text{m}$ 。应用此法主要可以修正掉座标机的几何、检测系统、测头,机构受力变形等误差中的系统误差成份对测点座标误差的影响。

当修正的方法选定时,所能修正掉的系统误差主要取决于检测的精度,故在误差修正中,误差的检测是关键的一步。本文提出的应用双频激光干涉仪和新设计的移动球检具检测XY平面上各节点的座标误差的方法,可以提高检测的精度和速度。

座标机在使用中,由于磨损、变形等的影响,使座标机的各项误差发生变化,但这些变化是很缓慢的,在一段时间内可以看做是不变的。因此,在误差修正程序中所用的各项误差的数据不能一直不变,而应随着它的变化在适当的时候重新更换。本文所编程序中采用数据文件的方法,可以很方便地实现这一要求。

参 考 文 献

- [1] 胡智容,关于桥式三座标测量机精度分析的探讨,上海市仪器仪表学会首届学术交流会,(1981)。
- [2] 卞铭健、杨澄清,三座标测量机座标精度分析计算,中国航空学会计量测试学术交流会,(1985)。
- [3] M Burdekin and C Voutsadopoulos, An Error Compensation System for Coordinate Measuring Machines, Int. Metrology Conf. NELEX82, (1982)。
- [4] 坦野義昭等5人,昭和57年度精机学会秋季大会学术演讲会论文集,第三分册,P.725—727,(1982)。

A Study of the Error Correction for the Three Coordinate Measuring Machines

Yang Dengging Bian Ming jing
(Department of Mechanical Engineering)

Abstract

This paper concerns with the error correction for the CMMs by a computer. The lattice computation is proposed and the mathematical model of error correction formulated and programmed. As an example the model of error correction for A221 CMMs is used. The coordinate error of measuring point can be controlled within two microns. It has been found that the new method is very useful. In order to improve the accuracy and the rate of detection, a new detecting device—translational ball detector—is being designed.

Keywords: three-coordinate measuring machine, error correction, lattice computation method, translational ball detecting tool