

测量与信息技术

张国雄

(天津大学, 天津 300072)

[摘要] 测量是获取信息的重要手段。科学研究、生产、高科技发展都离不开测量。测量技术发展的重要特点是它与信息技术的融合,这是提高测量精度、在线和动态测量、复杂参数和复杂环境下测量、智能测量的需要。这一融合贯穿始终,它包括信号调制与解调、采样与重构、信号融合、数据压缩、滤波、信号变换、时间序列分析、谱分析、数据拟合与建模、模式识别、神经网络、仿真与虚拟、误差分离、误差补偿、冗余技术、决策与智能技术等,它们互相支持。文章通过三坐标测量机误差补偿、圆度和轴系误差测量,以及大型工程的柔性坐标测量系统,介绍其在提高测量精度、优化、自标定、丢失信息自恢复、系统重组等方面的作用及其关键技术。

[关键词] 测量;信息技术;误差补偿;建模;冗余技术;误差分离

1 测量是获取信息的重要手段

当今的时代是信息时代。在工业和科技领域主要通过测量获取信息。门德列耶夫说过:“没有测量就没有科学。”要对世界有精确的认识必须有测量。牛顿曾预言万有引力使月球环绕地球转动。但由于当时测量技术的限制未得证实。测量技术的进步证明了他的预言,万有引力学说真正成为科学。

生产发展的主要指标是产品质量和生产效率。没有测量就无从控制产品的质量。高速运转对机器精度提出很高的要求,测量起着重要的作用。现代的自动化是柔性自动化,越是柔性的系统越需要测量。测量信息是控制和智能化的依据。物质流和能量流在信息流指挥和控制下运动。

高科技离不开测量。火箭姿态角的微小偏差会使它的飞行轨迹发生巨大偏离,需通过测量对它的轨迹不断校正。纳米技术以纳米测量技术为支撑。

作为信息时代的标志,是高速度大容量计算机的发展,其关键是大规模集成电路制作技术。高精度的重复定位和曝光的支柱是精密测量。

2 测量与信息技术的融合是测量技术发展的方向

测量技术发展的一个重要特点是它与信息技术的融合。这种融合的必然性可归纳为如下5个方面。

1) 提高测量精度的需要 测量总是伴随着噪声,需要通过优化测量布局与信号处理来分离。

2) 自动、在线和动态测量的需要 在线测量条件差,各种因素影响大,要在运动情况下捕捉快速变化的信息,需要测量与信息技术的融合。

3) 复杂参数测量的需要 如曲面测量,从编程到数据处理都要求测量与信息技术的融合。刀具磨损需通过切削力或功率消耗增大和声发射频率变化等征兆来综合判断。在故障诊断中也有大量类似情况。

4) 复杂环境下测量的需要 如野外、高温下、高速运转下测量,宇宙空间、地下测量等。如地下管道泄漏及预报,由于在地下,管道又长,需在几个泵站测量管道压力波、流量、热力传输等的变

化，通过信息融合判定泄漏。

5) 智能测量的需要 要求能根据内部和外部条件实现自适应、优化。

测量与信息技术的融合贯穿在测量信息从拾取到决策、执行的全过程。

在信息的拾取中，为提高测量信噪比，常通过调制赋予测量信号某一特征，提高它的抗干扰能力。为了全面准确地反映被测量的情况。需要采取正确的采样策略。然后通过重构恢复被测量的全貌。当对象的状态不能靠单一的传感器测量确定时，就需要将若干信号以一定方式融合。在复杂参数测量和过程的监控中，数据量往往很大，可将平坦区数据压缩，需要时再恢复。为了滤除采样和载波频率信号、噪声，分离不同频率信号等，还需要滤波。

为了对信号进行各种处理，提取其特征，作出决策，常对信号进行各种变换，进行时间序列分析和各种谱分析；对数据进行拟合，通过理论分析与实验方法建模；利用模式识别的方法按测量结果确定被测对象的类属；神经网络通过“训练”使网络具有与系统接近的特性；它们在实验建模、过程控制、预报和故障诊断中得到广泛应用。

测量与信息技术的融合在测量的优化和智能测量中有重要作用。根据误差的某一特征，或改变其组合关系，可以将误差分离。利用平均、差分、反馈、标定、预报、冗余及各种信号处理技术实现误差补偿，降低成本，达到单纯依靠制造精度难以实现的高精度。虚拟测量通过仿真模拟测量过程，发现问题、估算精度、实现优化。根据对系统外部和内部状态的测量结果，利用知识库、专家系统等作出决策，实现系统的智能化。

下面结合作者的一些研究工作对误差补偿与冗余技术作些介绍。

3 三坐标测量机误差补偿

三坐标测量机将空间元素的测量一律转化为坐标测量，再利用软件实现元素的重构，具有很大通用性。由于制造误差，存在 3 个平移和 3 个转动误差，还有 3 轴间的正交误差及温度和力变形引起的误差。误差补偿利用精度更高的仪器或基准测出测量机各点误差，存于软件内，在运行中修正。几乎无需要成本，就可大幅度提高测量精度。三坐标测量机误差补偿的关键技术包括模型建立，误差测定

和补偿软件^[1,2]。

若直接测量在不同温度与力变形下的空间各点误差，工作量非常大。常通过建立模型，确定测量机误差与各原始误差之间的关系，在测得各原始误差后进行误差补偿。针对不同类型测量机，作者提出了准刚体模型与非刚体模型。

图 1 所示移动桥式三坐标测量机中薄弱环节是横梁 8，滑座 5 沿其运动时产生的力变形与横梁不变形但有同样大小的直线度误差影响相同。这时仍可按刚体处理，称之为准刚体模型。在误差测量中测得的也是二者的综合影响。

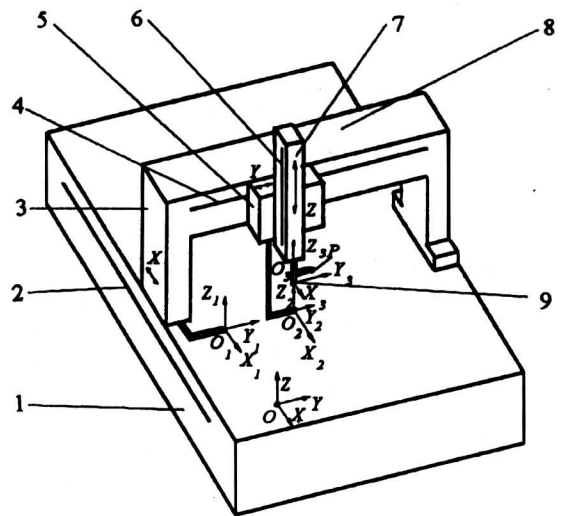


图 1 移动桥式三坐标测量机

Fig.1 Moving bridge type 3-D coordinate measuring machine

在工作台 1、移动桥 3、滑座 5 与主轴 7 上分别建立直角坐标系 $OXYZ$ 、 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2X_2Y_2Z_2$ 、 $O_3X_3Y_3Z_3$ 。测端 P 在工作坐标系 $OXYZ$ 的位置

$$OP = X + R^{-1}(x)\{Y + R^{-1}(y)[Z + R^{-1}(z)P]\}, \quad (1)$$

其中 P 是测端在主轴坐标系中的位置矢量，它由测头 9 的结构确定。 $R(x)$ 、 $R(y)$ 、 $R(z)$ 分别为移动桥 3、滑座 5 与主轴 7 沿 X、Y、Z 向运动时由于角运动误差产生的旋转矩阵

$$R(x) = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon_z(x) & -\epsilon_y(x) \\ -\epsilon_z(x) & 1 & \epsilon_x(x) \\ \epsilon_y(x) & -\epsilon_x(x) & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 $\epsilon_x(x)$ 、 $\epsilon_y(x)$ 、 $\epsilon_z(x)$ 分别为移动桥 3

沿 X 向运动时绕 X、Y、Z 轴转动的角运动误差。将 (2) 中自变量 x 改为 y 或 z ，就可以得到 $R(y)$ 或 $R(z)$ ， R^{-1} 为 R 的逆矩阵。X、Y、Z 分别为移动桥、滑座与主轴的实际位移。

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{pmatrix} x + \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} \delta_x(y) - y\alpha_{xy} \\ y + \delta_y(y) \\ \delta_z(y) \end{pmatrix}, \\
 Z &= \begin{pmatrix} \delta_x(z) - z\alpha_{xz} \\ \delta_y(z) - z\alpha_{yz} \\ z + \delta_z(z) \end{pmatrix}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中 $\delta_u(v)$ 为运动部件 v 向运动时在 u 向的误差， α_{uv} 为 u 、 v 运动间的垂直度误差； u 、 v 可为 x 、 y 或 z 。

在图 2 所示水平臂三坐标测量机中力变形引起的测端 P 的位移同时是水平臂 2 的 Y 向位置和滑套 1 的 z 向位置的函数。可在准刚体模型基础上，引入由于力变形而引起的附加位移 $\delta_y(y, z)$ 和 $\delta_z(y, z)$ 。这种模型属于非刚体模型。

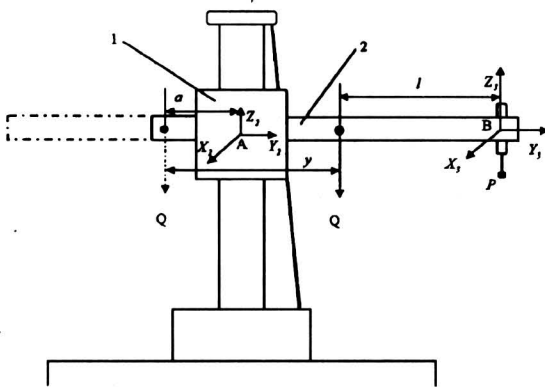


图 2 水平臂三坐标测量机

Fig.2 3-D coordinate measuring machine with horizontal arm

进行温度误差补偿需建立温度误差模型。在只有伸缩变形时，温度误差

$$\Delta l = l(\alpha_P \Delta t_P - \alpha_s \Delta t_s), \quad (4)$$

式中 l 为被测尺寸 (mm)； α_P 、 α_s 分别为被测件与标尺的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)； Δt_P 、 Δt_s 分别为被测件与标尺相对于 20°C 的温度偏差 ($^\circ\text{C}$)。

图 1 中三根标尺 (2、4、6) 不仅 Δt_s 不同，由于结构不同，三根轴的线膨胀系数 α_s 也可能不同，需按实测得到的线膨胀系数计算。在具有复杂热变形的情况下，可将由热变形引起的角运动误差

与垂直度误差如同几何运动误差一样，按数学模型计算它们对坐标测量精度的影响。

利用数学模型还可在测得一组综合误差后求得原始误差。作者提出了通过测量某 22 条线的线位移误差确定 21 项几何误差的方法^[3]。只测线位移误差大大简化了测量设备，用激光干涉仪测量位移可达很高精度。如用激光干涉仪测量坐标面上两条对角线的长度差，确定两轴间的垂直度误差可达 $0.1''$ 的精度。作者还提出了通过测量在单位温度变化下 $\delta_u(u)$ 曲线平均斜率的变化，来实测标尺线膨胀系数 α_s 。以上方法已为国际上广泛采用，并纳入一些国家标准。

为正确进行误差补偿，需在用户现场测量机器误差。为此作者研制了图 3 所示一维球列^[4]。它像步距规，但为三维量具，可同时用于检测测量机的定位误差与两个方向上的直线度运动误差。一维球列制作简单，球心位置的直线度误差的影响可以用 180° 转位法来消除。美国国家标准与技术研究院已在推广一维球列。

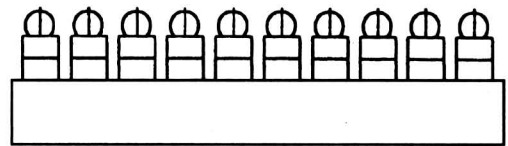


图 3 一维球列

Fig.3 1-D ball array

有了数学模型并测得所需误差后，编写误差补偿软件就不是一件难事。但为了改造已有的三坐标测量机，鉴于测量机的数据处理软件多已固化，作者开发了一种在上位机中按所需修正的误差值进行坐标系平移以实现误差补偿的方法^[5]。

采用误差补偿技术可使三坐标测量机测量误差减小 80% 左右，效果显著。

4 冗余技术在圆度和轴系测量中的应用

测量工件的圆度常以圆度仪轴系为基准。检测圆度仪的精度用标准球作基准。标准球又怎么检测呢？为解决这一问题发展了 180° 转位法、多步法等误差分离技术。它们要求圆度仪有很好的重复性，并且不能用于在线测量。

圆度和轴系测量中共有 3 个误差，轴系有 X 和 Y 方向两个运动误差，工件有圆度误差。利用 3

个测头得 3 组方程，可同时求得 3 个误差。问题是这 3 个测头无论如何布局都会使某些谐波受到抑制。为解决这一问题，作者提出了四点法^[6,7]（图 4），4 个测头 1、2、3、4 同时测量工件 5 的圆度，得到方程组（4 个方程）

$$S_i(\theta) = R_i - r(\theta - \phi_i) - y(\theta)\cos\phi_i + x(\theta)\sin\phi_i, \quad (5)$$

式中 θ 为轴系转角， $r(\theta)$ 为工件的圆度误差， $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ 分别为轴系的 X 和 Y 向的运动误差， $i=1\sim 4$ ， $\phi_1=0$ ， R_i 为在初始位置（ $\theta=0$ ）的测头示值。在这一位置， $r(\theta) = x(\theta) = y(\theta) = 0$ ，构造一个新函数

$$S_0(\theta) = S_1(\theta) + a_2S_2(\theta) + a_3S_3(\theta) + a_4S_4(\theta), \quad (6)$$

选取 a_2 、 a_3 、 a_4 的值使

$$a_1 = 1 + a_2\cos\phi_2 + a_3\cos\phi_3 + a_4\cos\phi_4 = 0, \quad (7)$$

$$\beta_1 = a_2\sin\phi_2 + a_3\sin\phi_3 + a_4\sin\phi_4 = 0, \quad (8)$$

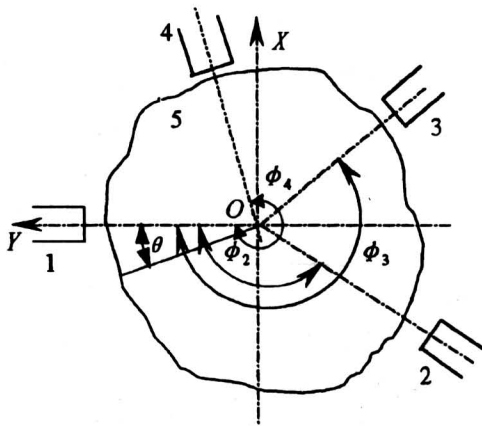


图 4 四点法测量圆度和轴系误差

Fig.4 4-point method of roundness and spindle error measurement

可以在式（6）中将 $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ 消除。在测得 $S_i(\theta)$ 后，可算出 $r(\theta)$ 。在三点法中，只有 a_2 、 a_3 两个系数。在测量布局确定后， a_2 、 a_3 也就确定，不可避免地会使某些谐波受到抑制。在四点法中，有三个系数 a_2 、 a_3 、 a_4 可供选择，只需满足两个方程，一个系数可任意选择，可对各次谐波分别优化。

5 冗余技术在大尺寸测量中的应用*

测量大型工程对象需在它的周围构作坐标测量系统。传统的方法是采用经纬仪，它基于角度测

量，这时需用长标尺定标。长标尺的制造、使用、标定都不方便，且容易变形。作者研制了一套激光跟踪柔性坐标测量系统。靶标 P_i 沿被测物体运动时（图 5），4 个激光跟踪干涉仪 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 跟踪它的运动，并测量 P_i 点的距离。若用 3 个干涉仪，必须知道它们的相对位置。较好的办法是采用冗余技术，用 4 个干涉仪。每测一个点 P_i 可以得到一个方程组（4 个方程）

$$(x_i - x_{A_j})^2 + (y_i - y_{A_j})^2 + (z_i - z_{A_j})^2 = (s_{ij} + l_j)^2, \quad (9)$$

这里 x_i 、 y_i 、 z_i 为点 P_i 的坐标； x_{A_j} 、 y_{A_j} 、 z_{A_j} ($j=1\sim 4$) 为干涉仪 A_j 的基点坐标； s_{ij} 为干涉仪 A_j 测量点 P_i 时的读数， l_j 为干涉仪 A_j 读数为零时的初始距离。测量 n 个点后有 $4n$ 个方程（9），被测点有 $3n$ 个未知坐标。坐标系可任意选择，总未知数为 $3n + 10$ ，只要 $4n \geq 3n + 10$ ，就可实现系统的自标定。

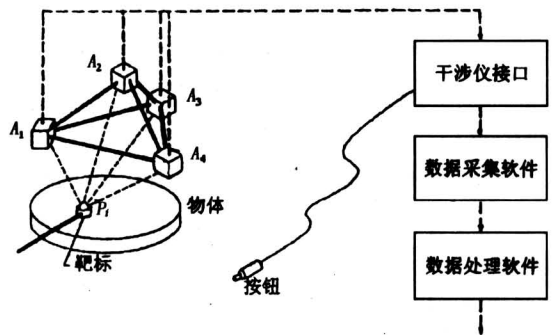


图 5 激光跟踪柔性坐标测量系统

Fig.5 Laser tracking flexible coordinate measuring system

利用冗余技术，还可实现下列功能：

1) 误差补偿 激光跟踪系统要求跟踪中基点位置不变。但实际上各跟踪干涉仪转镜上的光点很难通过它的回转中心，且光点偏离回转中心的量 b_j ($j=1\sim 4$) 难以精确确定，可将 b_j 带来的光程变化写入方程（9）。利用冗余技术，只要使测点数 $n \geq 14$ ，即可将 b_j 求出，实现误差补偿。

2) 丢失信息自恢复 激光干涉测量系统一旦发生挡光，就会把前面的测量信息全部丢失。在自标定后，只要有 3 台干涉仪正常工作，仍可确定动点 P_i 的坐标。在被挡光的干涉仪恢复通光后，由

* 国家自然科学基金资助项目（59875064）

于动点与基点坐标均已知, 可以按算出的方位恢复跟踪; 按算出的距离将干涉仪置数。

3) 系统的重组 4 台干涉仪很难同时探测到被测对象的各个侧面。完成标定后, 只要有 3 台干涉仪就可以保持原有坐标系。可逐步将干涉仪一一转移到新的位置, 再测 4 个点就可确定转移后的一个新基点位置, 保持坐标系统一。

参考文献

- [1] Zhang G, Veale R, Charlton T, et al. Error compensation of coordinate measuring machines [J]. Annals of the CIRP, 1985, 34 (1): 445~448
- [2] Zhang G. Improving the accuracy of angle measurement in machine calibration [J]. Annals of the CIRP, 1986, 35 (1): 369~372
- [3] Zhang G, Ouyang R, Lu B, et al. A displacement method for machine geometry calibration [J]. Annals of the CIRP, 1988, 37 (1): 515~518
- [4] Zhang G X, Zang Y F. A method for machine geometry calibration using 1-D ball array [J]. Annals of the CIRP, 1991, 40 (1): 519~522
- [5] 张国雄, 臧艳芬. 对具有固化数据处理软件的三坐标测量机误差修正技术 [J]. 计量学报, 1991, 12 (1): 1~6
- [6] Zhang G X, Wang R K. Four point method of roundness and spindle error measurement [J]. Annals of the CIRP, 1993, 42 (1): 593~596
- [7] Zhang G X, Zhang Y H, Yang S M, et al. A multi-point method of spindle error motion measurement [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46 (1): 441~445

Measurement and Information Technology

Zhang Guoxiong

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] Measurement is an important means for obtaining information in research and production. Both the quality of products and the productivity of production highly depend on measurement. An important trend in the development of measurement is its merging with information technology. The requirements in high accuracy of measurement, on-line and dynamic measurements, measurements of complicated parameters and under complex conditions and intelligent measurements ask for the merging of measurements with information technology. This merging is carried out through the whole process. Modulation and demodulation, data sampling and reconstruction, signal merging, data compression, filtering, signal transformation, time series analysis, spectrum analysis, data fitting and modeling, pattern recognition, neural network, simulation and virtual measurement, error separation, error compensation, redundancy technique, decision making, intelligent techniques, etc., are widely used in measurements. Some practical examples of this merging are given in the paper. The accuracy of coordinate measuring machines (CMMs) can be greatly enhanced by using error compensation technique. Modeling, error calibration and compensation software are three key techniques in error compensation of CMMs. Applications of redundancy technique in roundness and spindle error motion measurement, in large scale metrology are presented as well. Redundancy technique provides a powerful means in optimization of measurements, system self-calibration, error compensation, recovering the lost information and many other applications.

[Key words] measurement; information technology; error compensation; modeling; redundancy technique; error separation