

三坐标测量机空间几何误差分区域检测方法研究

卓军

(上海萨斐测量技术有限公司 上海 201515)

摘要: 为了提高三坐标测量机空间几何误差检测精度, 增强三坐标测量机的使用性能, 本文提出三坐标测量机空间几何误差分区域检测方法。通过三坐标测量机运动学模型获取导轨运动轨迹, 基于逐次二点法分离导轨直线度, 通过桥架振动变形公式获取直线度运动误差传递路径, 利用最小二乘法基于传感器测头高度误差构建导轨直线度运动误差数学模型; 选取二维激光干涉仪与四象限硅光电池实现空间几何误差分区域检测。实验结果表明, 本文所提方法 15 个测量点的检测结果与实际数据平均差值为 $0.029\mu\text{m}$, 证明本文方法的检测精度较高。

关键词: 三坐标测量机; 空间几何误差; 分区域检测; 检测方法; 直线度运动误差

0 引言

三坐标测量机是一种大型的测量仪器, 它可以实现空间尺寸的自动化测量工作, 具有通用性强、测量精度高可靠等优点。三坐标测量机逐渐受到各行各业的重视, 我国众多学者对其实际应用效果进行了关注与研究, 马海钊等人^[1]将三坐标测量机应用于飞机导管构件的测量中, 实现了导管的全方位、自动化检测; 曾彪等人^[2]通过三坐标测量机建立一种迭代测量坐标系, 实现了面齿轮齿形误差的精准测量; 唐宇存等人^[3]将三坐标测量机应用于医疗行业中, 实现了手术机器人位姿距离的精准测量; 陈思涛等人^[4]将三坐标测量机应用于自动化生产单元中, 提高了生产效率。然而随着科学技术的进步, 航空航天等行业对测量精度的要求逐渐严格。如果从三坐标测量机自身的机体装配精度入手来提升测量精度, 不仅测量精度提升效果不明显, 而且需要耗费大量人力与财力, 所以, 本文对三坐标测量机的误差检测进行深入研究, 通过分区域检测方式, 来保证三坐标测量机的误差测量精度。

1 三坐标测量机空间几何误差建模

作为高精度测量仪器的三坐标测量机^[5], 关键要求就是实现高精度测量。然而无论三坐标测量机的自身精度多高, 都会存在一定误差。三坐标测量机的误差不仅有制造仪器时的自身结构误差, 还有一些因测量环境以及测量方法等因素造成的误差。所以为了提升三坐标测量机的测量精度, 对误差的精准检测是必不可少的一个环节。三坐标测量机的直线度运动几何误差产生原因包括导轨运动轨迹误差、测量支架的扫描误差、三坐标测量机振动变形误差、传感器测头高度误差等。

根据上述产生原因构建空间几何误差模型。

1.1 获取三坐标测量机导轨运动轨迹

导轨是三坐标测量机中最重要的测量基准, 也是精密仪器中关键部件之一。当导轨上的滑块沿水平方向运动时, 三坐标测量机的运动平台会因为额外的平移以及倾斜等原因而产生测量误差, 这种误差就是直线度运动误差^[6]。所以本文在进行三坐标测量机的直线度运动误差检测时, 需要获取三坐标测量机的导轨运动轨迹。这里引入三坐标测量机的运动学模型, 此模型可以展现运动平台位置与姿态的坐标值。利用运动平台的位姿坐标数据就可以获取导轨上滑块的位姿坐标数据, 进而获取导轨的运动轨迹。三坐标测量机的运动学正解模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} X_c = \frac{X_{c1} + X_{c3} + X_x - X_Q}{2} + \frac{D_3^2 - D_1^2 - D_2^2}{X_Q - X_{c3} + X_{c1}} \\ Y_c = \frac{D_3^2 - D_1^2 + (X_c - X_{c1})^2 - (X_c + X_Q - X_{c2})^2 + Y_x}{2} \\ Z_c = \sqrt{D_1^2 - (X_c - X_{c1})^2 - Y_c^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_c 、 Y_c 、 Z_c — 三坐标测量机运动的空间坐标点;

X_{c1} 、 X_{c2} 、 X_{c3} — 三坐标测量机上的三个万向铰链在基准直角坐标系中的横坐标数据;

X_Q — 万向铰链球 Q 在横轴上的坐标参数;

X_x — 铰链球心在横轴上的坐标参数;

Y_x — 铰链球心在纵轴上的坐标参数;

D_1 、 D_2 、 D_3 — 三个万向铰链球心到基准直角坐标系原点之间的距离数据。

根据式(1)的三坐标测量机运动的空间坐标值(X_c , Y_c , Z_c)可以推出导轨上滑块运动的空间坐标(X_h , Y_h , Z_h), 如式(2)所示:

$$\begin{cases} X_h = X_c - \sqrt{D_1^2 - Y_c^2 - Z_c^2} \\ Y_h = X_c + \sqrt{D_3^2 - D_1^2 (X_c - X_{c1})^2 - (Y_c - X_c)^2 - 2(Y_c - X_c)Y_c} \\ Z_h = X_c + X_{c0} + \sqrt{D_3^2 - D_2^2 - D_1^2 + (X_c - X_{c1})^2} \end{cases} \quad (2)$$

根据此式获取到滑块运动时的空间坐标数据，可以将其转化为导轨运动轨迹的空间坐标数据。然后根据导轨运动的轨迹，可以获得三坐标测量机直线度运动误差。

1.2 分离导轨运动直线度

当利用三坐标测量机来测量物体时，首先将测量支架固定在导轨^[7]上，让其随导轨的运动轨迹一起运动。然后将三坐标测量机上的两个传感器之间剪切量调整为一个固定值，再将两个传感器测头设置在同一水平面上。当三坐标测量机开始工作时，导轨上的支架会随着运动轨迹进行扫描工作，并将扫描的步长调整成与两个传感器之间剪切量一致的数据。假设这两个传感器测头在水平距离为 w 的位置上测量获取的数据是 L_{w1} 与 L_{w2} ，那么该三坐标测量机的导轨直线度计算公式为：

$$G_d = \sum_{n=0}^w L_{w1} - \sum_{m=0}^{w-1} L_{w2} \quad (3)$$

$$G_z = \sum_{n=0}^{w-1} L_{w1} - \sum_{m=0}^{w-1} L_{w2} \quad (4)$$

式中： G_d - 三坐标测量机的导轨直线度数据；
 G_z - 三坐标测量机的工作直线度数据；
 m, n - 两个传感器在测量时距离物体的水平距离。

当三坐标测量机开始测量时，将仪器的初始直线度数据设为 $G_d=G_z=0$ ，这样就可以得到测量支架扫描一次时的直线度数据，进而分离出导轨运动时测量支架直线度误差数据。

1.3 获取直线度运动误差传递路径

一般三坐标测量机的运动导轨都采用交流伺服电机单边驱动^[8]形式。单边驱动虽然没有双边驱动复杂，但仍存在一定不足，当三坐标测量机的桥架跟随导轨运动时，驱动不经过桥架的质心，这样会导致三坐标测量机在水平方向移动时所产生的惯性力会呈不对称现象，并且由于导轨的刚度有限，使工作中的桥架发生变形，进而使三坐标测量机产生直线度运动误差。

如果三坐标测量机上滑架的位置以及主轴伸出长度是固定值，那么导轨刚度引发的直线度运动误差传递过程如下。三坐标测量机因水平方向单边驱动力，所发生变形现象的平面是水平平面。水平方向上的导轨整体变形阻尼较小，桥架受到垂直方向惯性力作用跨度加大，桥架横梁在水平方向上会出现测量误差，因此在获取直线度运动误差传递路径时，需要把水平方向上的变形振动也考虑进去。因为三坐标测量机导轨上的桥架振动效果极小，相当于微米级，所以桥梁振动导致的气隙改变

量所引发的气模刚度变化也会非常小，将导轨左右两侧气隙刚度设为两个不变向量 q_1 与 q_2 ，那么侧向气隙对测量机桥架产生的力矩为：

$$P_z = 4q_1 d_1^2 \cos \alpha \quad (5)$$

$$P_y = 2q_2 d_2^2 \sin \alpha \quad (6)$$

式中： P_z - 桥架左端部力矩；
 P_y - 桥架右端部力矩；
 d_1, d_2 - 桥架左右两端长度；
 α - 导轨与桥架夹角。

由于桥架在垂直方向上没有受到外力作用，桥架质心不发生变化，所以桥架振动的表达式为：

$$F(m) = (4q_1 d_1^2 + 2q_2 d_2^2) \alpha + \delta \beta \quad (7)$$

式中： $F(m)$ - 桥架振动的数学模型；
 δ - 桥架的转动惯量系数；
 β - 桥架转动的角度数据。

当桥架的横梁振动变形时，假设横梁的坐标原点位于桥架左侧的对称中心，那么桥架横梁在垂直方向上振动的数学模型为：

$$\rho x_l + \left(x_l - \frac{\partial x_o(x_o, m)}{\partial m} \right) q_1 + (x_l - x_o) q_2 = 0 \quad (8)$$

式中： ρ - 桥架横梁的线密度数据；
 x_l - 桥架横梁的横坐标数据；
 x_o - 桥架左侧的对称中心横坐标数据；

$\frac{\partial x_o(x_o, m)}{\partial m}$ - 对称中心的求导函数。

利用此公式将三坐标测量机振动变形与直线度运动误差糅合在一起，相互作用，可以获得直线度运动误差的传递路径，基于误差传递路径构建直线度运动误差的数学模型。

1.4 构建直线度运动误差数学模型

在获取了直线度运动误差传递路径之后，本文引入最小二乘法，构建直线度运动误差^[9]的数学模型。直线度运动误差是被测量的实际物体数据对于理想数据的变动量，所以理想的测量数据可以当作评定直线度运动误差的标准。利用最小二乘法，按照三坐标测量机所测量的实际数据求解最小二乘直线度，以此作为标准来评定直线度运动误差。如果将传感器测头在空间中的高度数据当作直线度运动误差数学模型的因变量，那么传感器测头的横纵坐标数据就是该数学模型的两个自变量，然后构建直线度运动误差数学模型表达式如式(9)所示：

$$\begin{cases} z_{u,v} = \mu_1 x_{u,v} + \mu_2 y_{u,v} + \mu_3 + S_{u,v} \\ u = 1, 2, \dots, 20 \\ v = 1, 2, \dots, 10 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_{u,v}$ 、 $y_{u,v}$ 、 $z_{u,v}$ — 三坐标测量机实际测量点的相对空间坐标数据;

μ_1 、 μ_2 、 μ_3 — 正态分布参数;

$S_{u,v}$ — 测量点的随机变量数据;

u, v — 三坐标测量机的两个测量点。

式(9)可以准确反映三坐标测量机的直线度运动误差的真实值, 基于该数据来实现误差的精准检测, 进而保证三坐标测量机的测量精度。

2 空间几何误差分区域检测

本文在直线度运动误差数学模型的基础上, 采用分区域检测法, 实现三坐标测量机的空间几何误差^[10]检测。首先选取二维激光干涉仪与四象限硅光电池来构建一个误差检测模块, 在三坐标测量机的测头上对应设置二维激光干涉仪的测头, 并且这两个仪器的测头以垂直角度连接, 然后再连接激光器。设置好平面直角镜的位置, 通过激光器发出光线测量光束的反射, 实现三坐标测量机的空间几何误差检测。由于直接利用二维激光干涉仪来检测三坐标测量机空间几何误差比较复杂, 所以本文还添加了四象限硅光电池来辅助误差检测。四象限硅光电池的吸附依靠半导体激光器以及磁性表座来实现, 将四象限硅光电池当作探测器, 将直线度运动误差划分为四个象限, 分别为导轨区域运动轨迹误差、测量支架区域的扫描误差、三坐标测量机振动变形传递误差和传感器测头高度误差。通过分区域检测的方法进行空间几何误差的检测, 更加精准且方便快捷。那么将三坐标测量机的测量空间划分为4个子空间, 每一个测量子空间误差检测的结果都可以反映三坐标测量机的整体测量空间中几何误差检测情况, 所以本文将随意选择一个测量子空间进行误差检测分析。每一个子空间内, 都具备3个平面沿坐标轴方向的测量线, 共9条直线, 即可以检测到15项空间几何误差。以坐标Z轴为0的平面为例, 三坐标测量机沿水平方向上的两条直线轨迹运动时, 在Z方向上的直线度运动误差为:

$$C(X) = \frac{\zeta(x, y_2, z_1) - \zeta(x, y_1, z_1)}{(Y_2 - Y_1)} \quad (10)$$

式中: $\zeta(X, Y_2, Z_1)$ — 三坐标测量机在水平方向直线2上的直线度误差;

$\zeta(X, Y_1, Z_1)$ — 三坐标测量机在水平方向直线1上的直线度误差, 并且这两条直线的直线度误差数据可以利用最小二乘法计算平均轴线的偏差来获取。

同理, Z轴为0, 三坐标测量机沿垂直方向上的两条直线轨迹运动时, 在Z方向上的直线度运动误差为:

$$C(Y) = \frac{\zeta(X_2, Y, Z_1) - \zeta(X_1, Y, Z_1)}{(X_2 - X_1)} \quad (11)$$

式中: $\zeta(X_2, Y, Z_1)$ — 测量机在垂直方向直线2上的直线度运动误差;

$\zeta(X_1, Y, Z_1)$ — 测量机在垂直方向直线1上的直线度运动误差。

因为本文利用数学模型将测量机4个区域的直线度运动误差转换为同一空间, 所以基于该误差模型, 就可以通过单独子空间获取三坐标测量机的全部几何误差。而且利用直线度运动误差数学模型, 也可以获取三坐标测量机在整个测量空间中每个单独点的误差。

3 实验验证

3.1 实验准备

为了验证本文所提三坐标测量机空间几何误差分区域检测方法的精准性, 选取二维激光干涉仪 Renishaw XL-80 型进行三坐标测量机的空间几何误差检测对比实验。首先将二维激光干涉仪的激光器固定在三脚架上, 光学镜固定在三坐标测量机的工作台上, 测量时先将三坐标测量机进行归零设置, 然后构建一个基准空间坐标系, 以此保证空间几何误差检测的精准。本次试验中二维激光干涉仪的试验参数如下表所示。

表 二维激光干涉仪试验参数

序号	参数	取值
1	X轴起始位置/mm	(0, 0, 40)
2	Y轴起始位置/mm	(0, 0, 40)
3	Z轴起始位置/mm	(0, 20, 40)
4	测量停止时间/s	12
5	误差检测耗时/min	1

基于二维激光干涉仪的试验参数, 利用本文所提方法与其他检测方法分别对实际工作中的三坐标测量机空间几何误差进行检测, 通过检测结果对比来判断本文方法的有效性。

3.2 实验结果

本次实验只对Y方向的直线度运动误差检测进行对比, 为避免偶然性, 对某已知的直线度运动误差数据进行多次测量, 每个检测方法下均采集15个测量点的数据, 那么这两种方法下直线度运动误差检测结果对比如图所示。

由图可知, 其他方法检测的直线度运动误差数据与实际数据15个点的平均差值为0.06 μm , 而本文方法检测的直线度运动误差数据与实际数据15个点的平均差值为0.029 μm , 比其他方法减少0.031 μm 。由此可以说明, 本文所提方法的误差检测精度更高, 验证了本文所提检测方法的有效性。

4 结语

本文提出了一种分区域检测三坐标测量机空间几

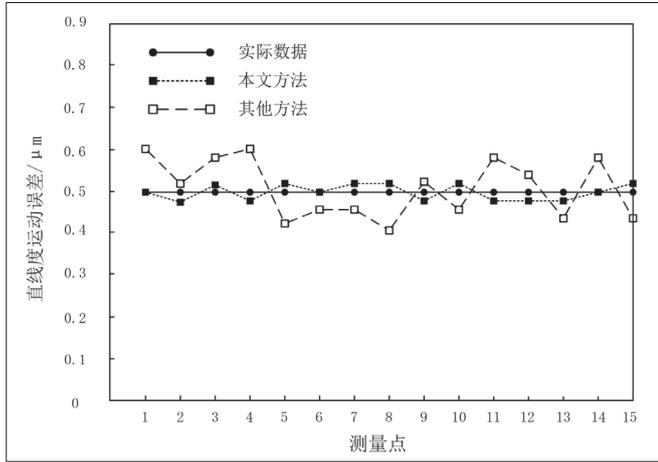


图 直线性运动误差检测结果对比图

何误差的方法，通过相关理论探讨以及真实测量实验，验证了该方法误差测量数据的准确可靠。由于时间有限，本文的研究还不够全面，例如三坐标测量机的温度等误差没有进行研究，今后将继续完善测量机的误差检测方法，为保证三坐标测量机的测量精度奠定基础。

参考文献:

[1] 马海钊, 陈雪梅, 李光俊, 等. 导管构件的三坐标测量机自动化检测技术的研究与应用 [J]. 锻压技术, 2021, 46(04): 172-179.

[2] 曾彪, 周元生, 王圣晖, 等. 基于通用三坐标测量机的面齿轮齿形误差测量 [J]. 航空动力学

报, 2022, 37(04): 856-868.

[3] 唐宇存, 李锦忠, 林安迪, 等. 基于三坐标测量机的机器人位姿精度检测方法 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(05): 257-262.

[4] 陈思涛, 温良, 苟绍轩, 等. 三坐标测量机在自动化生产单元中的应用 [J]. 工具技术, 2021, 55(12): 123-127.

[5] 魏双羽, 白跃伟, Paul de Vrieze. 基于坐标测量机数据互操作机制的检测数据管理及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(04): 1032-1039.

[6] 魏舜昊, 章家岩, 冯旭刚. 三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(05): 43-50.

[7] 戚玉海, 程荣俊, 叶运生, 等. 三坐标测量机气浮导轨滑块结构与仿真 [J]. 工具技术, 2022, 56(01): 100-103.

[8] 屈力刚, 胡宝慧, 李静. 基于三坐标测量机的规则曲面采样策略研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48(02): 35-39.

[9] 李瑞君, 李洁, 何亚雄, 等. 微纳米三坐标测量机三轴垂直度误差测量及建模补偿 [J]. 计量学报, 2022, 43(04): 452-456.

[10] 陈洪芳, 孙梦阳, 高毅, 等. 利用弹性网络算法求解大型三坐标测量机几何误差的方法 [J]. 中国机械工程, 2022, 33(09): 1077-1083.

作者简介: 卓军 (1977.01-), 男, 汉族, 安徽凤阳人, 硕士研究生, 研究方向: 先进制造技术、精密测量。

(上接第 26 页)

- (30) G0 X1=0 X2=0; 冲铆伺服返回
- (31) A1=0 A2=0 Y1=0 Y2=0; 转位伺服和斜契伺服返回原位
- (32) M83; 拉钩返回
- (33) M86; 法兰叉和焊接叉夹紧松开
- (34) C1=0; 中间转位伺服回零
- (35) B1=0 B2=0; 拉钩转位伺服返回
- (36) M30; 程序结束

3 结语

本文基于西门子 828D 数控系统设计了一套传动轴冲铆设备控制系统，经过系统调试和冲铆参数设定，设备能够针对每个零件自动测算冲铆行程，使冲铆装配过程变得简单，操作人员只需完成上下料和初定位，设备就能完成自动冲铆。利用此套系统装配的传动轴转动

灵活，十字轴与法兰叉、焊接叉铆压对称度都能够控制在 0.15mm 以内。传动轴与十字轴的连接采用冲铆装配工艺后，提高了装配效率，为企业节省了大量加工成本；而基于西门子 828D 数控系统的传动轴冲铆设备控制系统的开发保证了冲铆装配的精度要求和产品装配的一致性，为这项工艺的推广应用打下实践应用基础。

参考文献:

[1] 江苏格尔顿传动有限公司. 带冲铆点的传动轴和十字轴固定结构: CN202484109U[P]. 2012-10-10.

[2] 周兰, 陈建坤, 周树强, 等. 数控系统连接与调试 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.

作者简介: 张银桥 (1983.05-), 男, 汉族, 浙江宁波人, 本科, 工程师, 研究方向: 机床电气设计。