

基于正交两点法的精密数控镗铣床主轴回转精度研究

王林, 廖广宇, 赵彦鹏, 廖之溥, 杨军, 邱海莲

中国机械总院集团云南分院有限公司 / 云南省机电一体化应用技术重点实验室, 云南 昆明 650031

DOI:10.61369/ME.2025070015

摘 要 : 以精密数控镗铣床主轴为研究对象, 对其进行基于正交两点法的主轴回转精度试验, 通过主轴回转精度最小二乘法评定方法及平均值算法进行建模及误差评定, 准确、快速的计算出主轴的回转精度误差, 可为分析、查找影响主轴回转精度的因素提供科学、可靠、高效的试验数据支持。

关 键 词 : 机床; 主轴; 回转精度; 两点法

Research on Spindle Rotation Accuracy of Precision CNC Boring and Milling Machine Based on Orthogonal Two Point Method

Wang Lin, Liao Guangyu, Zhao Yanpeng, Liao Zhipu, Yang Jun, Qiu Hailian

China Academy of Machinery Science and Technology Group Yunnan Branch / Key Lab. of Electromechanical Integration Application Technology of Yunnan, Kunming, Yunnan 650031

Abstract : Taking the spindle of a precision CNC boring and milling machine as the research object, a rotation accuracy experiment based on the orthogonal two point method was conducted. The least squares method for spindle rotation accuracy evaluation and the average value algorithm were used for modeling and error evaluation, accurately and quickly calculating the spindle rotation accuracy error. This can provide scientific, reliable, and efficient experimental data support for analyzing and finding factors that affect the spindle rotation accuracy.

Keywords : machine tool; spindle; rotation accuracy; two-point method

高速、高精度、高可靠性是当代数控机床的发展方向^[1]。机床主轴是机床的主要部件之一, 由于机床主轴用于安装刀具或者工件, 因此它是刀具或者工件的相对位置基准和运动基准。机床主轴回转精度是机床精度的一项重要指标, 直接影响到被加工零件的几何形状精度、位置精度和表面粗糙度, 特别是在镗孔时将影响到被加工孔的圆度。

因此需要深入研究主轴回转精度的测量和评定方法, 分析主轴的运动状态和判断误差产生的原因, 为提高电主轴的回转精度奠定基础^[2]。根据机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度^[3]评定主轴的回转精度, 通过采用正交两点法对精密数控镗铣床的主轴回转精度进行测试分析。

通过主轴回转精度试验评价主轴在各级转速下的回转精度水平, 可为分析、查找影响主轴回转精度的因素提供科学、可靠、高效的试验数据支持, 便于持续改善结构设计和装配质量。

一、主轴回转精度测试原理 (正交两点法)

对于精密数控镗铣床主轴, 属于旋转敏感方向的机械加工主轴, 其加工误差敏感方向随着刀具的旋转在各个轴向横截面的360°上变化。安装在被测轴上的基准球, 在两个相互垂直的X、Y坐标方向上安装2个固定不动的电涡流传感器S1、S2, 此为正交两点法^[4]; 同时在Z方向上安装1个电涡流传感器S3, 在X向安装一个转速传感器S, 方便监测轴向窜动和实时转速, 见图1。电涡流传感器把主轴回转误差转变为电信号输入到测量设备, 以S1、S2产生的两个信号 $\Delta X(\theta)$ 和 $\Delta Y(\theta)$ 为基础数据计算和绘制误差运动极坐标曲线图。

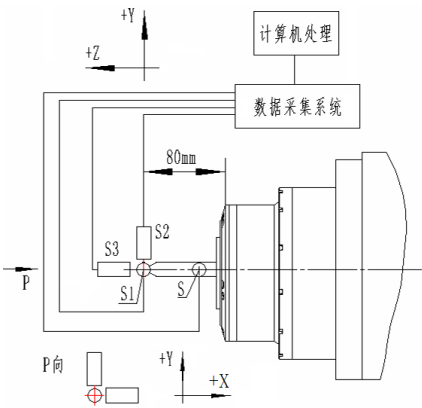


图1 试验系统示意图

作者简介: 王林(1987.7-), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 中国机械总院集团云南分院有限公司, 主要研究方向: 测试技术、机床性能试验、模态及可靠性试验。

计算和绘制误差运动极坐标曲线图按照下述公式进行:

$$r(\theta) = r_0 + \Delta X(\theta) \cos \theta + \Delta Y(\theta) \sin \theta \quad (1)$$

式中:

θ —— 主轴的角度位置;

$r(\theta)$ —— 在角度位置 θ 处的径向误差运动;

$\Delta X(\theta)$ —— 位于 X 轴的位移传感器的输出值;

$\Delta Y(\theta)$ —— 位于 Y 轴的位移传感器的输出值;

r_0 —— 由位移传感器和基准检具校准确定的半径值。

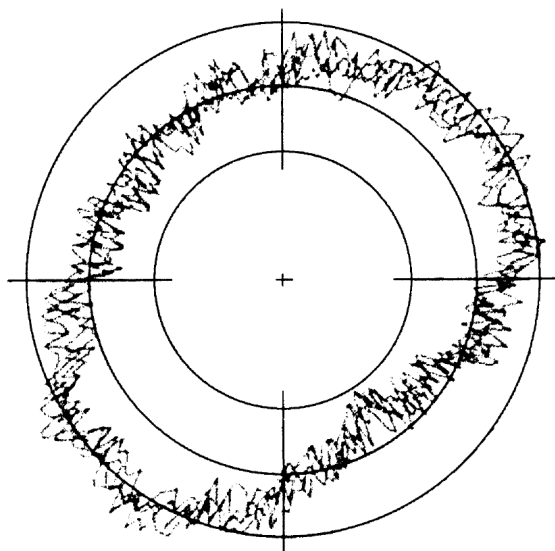


图2 误差运动极坐标曲线图（总误差）

二、主轴回转精度常用分析方法

本次实验采用最小二乘圆评价法进行精密数控镗铣床主轴的回转精度的评定, 原理图如图3。

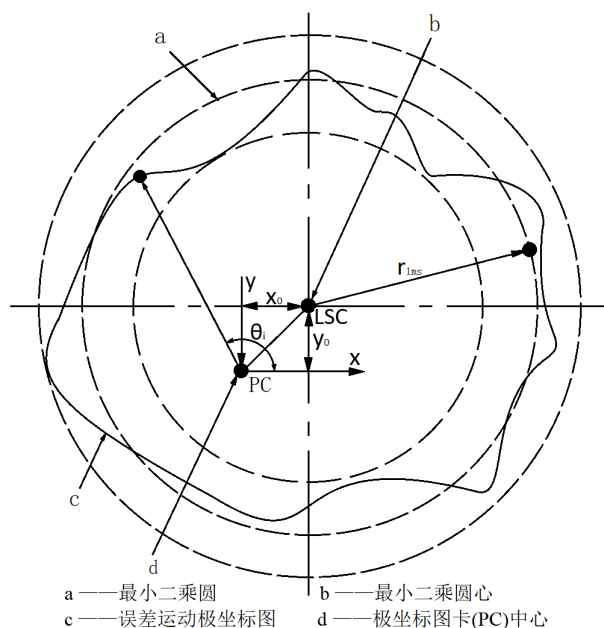


图3 最小二乘圆评价法原理图

最小二乘圆计算公式为:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_{lms} \right)^2 \quad (2)$$

通过求解方程中的 x_0 、 y_0 及 r_{lms} 使 $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ 值最小, 但由于依据最小二乘圆的计算分析方法无解析解, 一般采用迭代算法来获得精确的解, 常用的算法有最小二乘牛顿迭代算法、最小二乘近似算法和平均值算法, 本次将通过平均值算法来计算求解。平均值计算方法是通过直接求平均值作为最小二乘圆的方法^[5-6], 是一种最常见的算法, 有计算简单便捷、计算速度快、准确度到等优点。

平均值算法计算公式为:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (4)$$

$$r_{lms} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (5)$$

三、精密数控镗铣床主轴回转精度测试分析

测试精密数控镗铣床主轴相对工作台在各级转速下主轴轴线的运动轨迹, 计算出主轴轴线回转精度。试验前让主轴以中速 (3000r/min) 空运转 30min; 试验前校正测量棒, 在安装传感器位置处, 使测量棒的径向跳动小于 $15 \mu\text{m}$; S1、S2 传感器距主轴前定位端盘距离为 80mm; 试验时, 主轴在各级转速下做回转运动, X 轴、Y 轴、Z 轴及 B 轴不做进给运动。

记录主轴在个转速下正反转的 32 组实测数据, 选取其中较为典型的低、中、高转速的 3 组数据和镗孔常用转速 1 组组数据, 共 4 组数据, 画出径向运动轨迹图, 如图 4~7 所示。由图可得, 主轴在各转速下运动轨迹均是规则圆形。

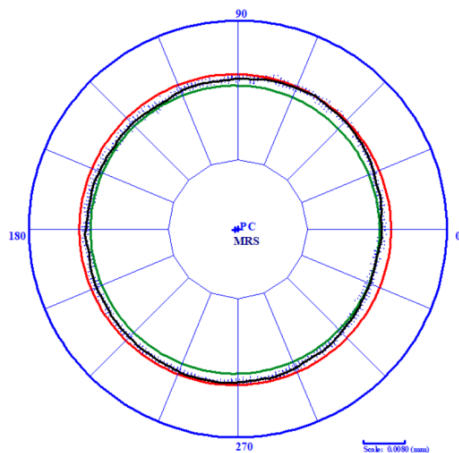


图4 20r/min 正转回转精度

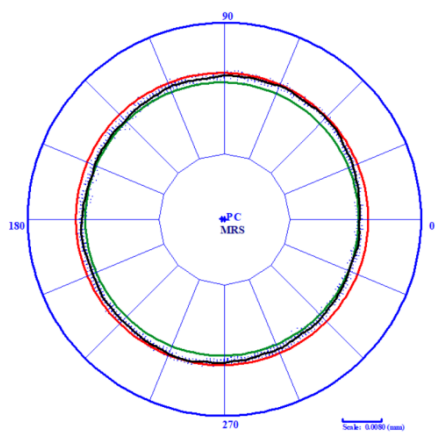


图5 160r/min正转回转精度

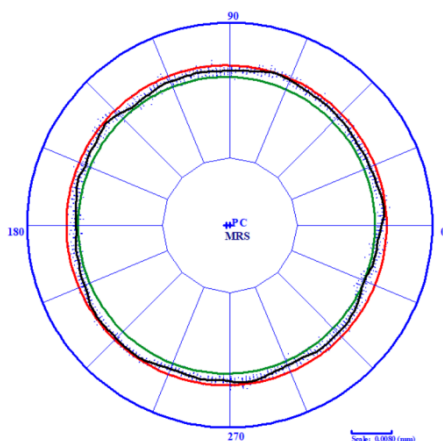


图6 3200r/min正转回转精度

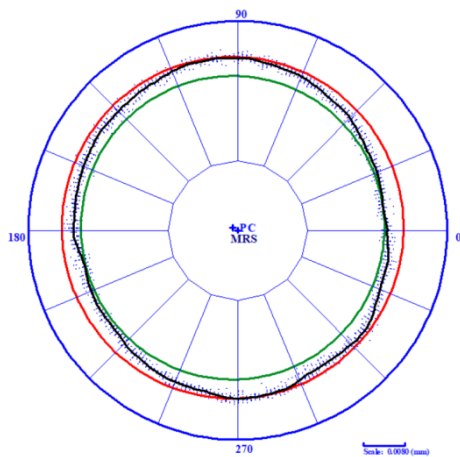


图7 6000r/min正转回转精度

精密数控镗铣床主轴在各测试转速下的回转精度误差见表1, 机床主轴装配质量及回转精度水平总体良好。

表1 主轴回转精度分析值

转速 r/min	回转精度径向误差 μm		转速 r/min	回转精度径向误差 μm	
	正转	反转		正转	反转
20	6	6	500	7	6
50	7	6	630	6	6
80	6	6	800	6	6
125	6	5	1250	6	5
160	7	6	2000	6	6
200	6	6	3200	6	6
320	6	6	4000	6	5
400	6	5	6000	3	4

四、总结

本文介绍了基于正交两点法的机床主轴回转误差的理论模型及测试分析方法, 主要依据国家标准 GB/T 17421.7-2016《机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度》。本次测试采用的电涡流传感器分辨率高、线性度及抗干扰能力强, 近年在主轴回转精度测试中应用较为广泛。

采用正交两点法的测试, 因使用2个传感器且夹角呈 90° , 同时搭配专用工装夹具, 使得传感器安装、测试过程及数据处理均较简单、快捷, 且测试误差较小, 数据处理效率高, 可为主轴轴承精度选择、轴承布置方案、主轴动平衡、轴承间隙调整及轴承润滑等提供支持。对提高机床动态精度、加工质量、以及对于精密机床与精密加工具有重要意义。

参考文献

- [1] 王立平. 数控机床先进技术浅谈 [J]. 航空制造技术, 2010(10): 49-52.
- [2] 王立平. 基于最小二乘法的电主轴回转精度评价 [J]. 制造技术与机床, 2018(2): 54-59.
- [3] GB/T 17421.7-2016, 全国金属切削机床标准化技术委员会, 机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度 [S]. 北京中国标准出版社, 2016.
- [4] 姚俊. 主轴回转精度测量方法 [J]. 制造技术与机床, 2011(12): 176-180.
- [5] 丁要文. 转轴径向运动误差干涉测量的信号处理方法 [J]. 红外与激光工程, 2022, (12): 56-60.
- [6] 靳岚, 燕昭阳, 谢黎明, 等. 高速主轴回转误差动态测试与分析 [J]. 制造技术与机床, 2012(4): 93-95.