

# 激光校准仪测量双主轴镗铣机床同轴度误差分析



赵红

沈阳机床(集团)有限责任公司设计研究院, 沈阳 110042

**【摘要】** 对激光校准仪测量双主轴镗铣机床同轴度误差进行了研究, 根据双主轴镗铣机床结构特点, 从立柱直线度、垂直度、定位精度三个主要方面分析对同轴度误差的影响。通过对同轴度误差测量结果分析, 确定立柱的定位精度偏差方向、立柱对工作台垂直度偏差方向为主要影响因素, 根据此结论, 可有针对性地进行双主轴镗铣机床装配过程优化, 降低同轴度误差。

**【关键词】** 同心度; 激光校准仪; 回转轴线法; 最小包容区域; 不确定度评定

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0665

**【引用本文】** 赵红. 激光校准仪测量双主轴镗铣机床同轴度误差分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(7): 65-69.

## Study and Error Analysis on Coaxiality Test of Dual-Spindle Boring and Milling Machine by Laser Calibrator

ZHAO Hong

Shenyang Machine Tool (Group) Co., Ltd. Design and Research Institute, Shenyang 110042, China

**【Abstract】** In this paper, the coaxiality error of dual-spindle boring and milling machine measured by laser calibrator is studied, and the error factors affecting the measurement results are analyzed. According to the structure characteristics of dual-spindle boring and milling machine, the influences on the coaxiality error are analyzed from three main aspects: column straightness, verticality, and positioning accuracy. Based on the analysis of coaxiality measurement results, it is determined that the direction of deviation of the positioning accuracy of the column and the direction of deviation of the verticality of the column to the table are the main influencing factors. Based on the analysis results, the assembly process of dual-spindle boring and milling machine can be optimized in a targeted manner to reduce the coaxiality error.

**【Key words】** concentricity, laser calibrator, Rotary axis method, minimum containment area, evaluation of uncertainty

## 0 引言

随着智能化、信息化时代的到来, 市场对大型、高精度机床的需求量较大。在国家大力支持振兴制造业的有利环境下, 机床的研发和制造能力迅速提升, 即将跻身世界前列。双主轴镗铣机床如图 1 所示, 其具有精度高、加工效率高等特点, 深受航空航天、交通运输等行业信赖。通过数控编程设置, 双主轴镗铣机床可从大型工件两侧同时进行加工, 是加工大型箱体等精度较高的深孔类零件的关键设备。双主轴镗铣机床同轴度的检测是机床制造中的重点, 英国雷尼绍公司研发了可以测量同轴度、垂直度、平行度等指标的激光校准仪, 可应用于检测双主轴机床同轴度。同轴度误差是描述被测轴线偏离基准轴线的一项指标, 在基准轴线距离较短或者

特定情况下, 同轴度误差可以用同心度误差来代替。同心度误差是指实际被测轴线相对基准轴线的中心偏差, 基准轴线是实际基准要素回转面的理想轴线, 这个理想轴线可以是最小区域回转面轴线、最小二乘回转面轴线、最小外接回转面轴线或最大内接回转面轴线。本文对激光校准仪测量双主轴镗铣机床同轴度误差进行了研究, 其中同轴度误差均用同心度误差代替。

## 1 激光校准仪测量同心度误差

### 1.1 测量原理

同心度误差为同心度最小包容区域的直径, 用轴线为基准轴线的圆柱面包容实际被测轴线, 实际被测轴线与该圆柱面至少有一点接触, 该圆柱面内的区域即为同心度最小包容区域, 最小包容区域的

直径即为同心度误差。

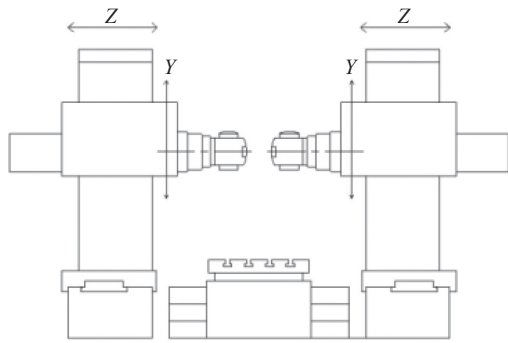


图 1 双主轴镗铣机床示意图

Fig.1 Schematic diagram of dual-spindle boring and milling machine

激光校准仪采用模拟法,利用激光束的发射、接收原理,通过计算激光束在不同旋转位置上坐标的变化来表示圆柱中心相对位置。如图 2 所示,将发光接收器 S 固定在第一支主轴上,发光接收器 M 固定在另一支主轴上,两支主轴同时旋转相同角度,重复数次,通过两个光电探测器件采集角度值,测量激光束中心位置误差,通过分析软件计算两主轴的同心度误差。

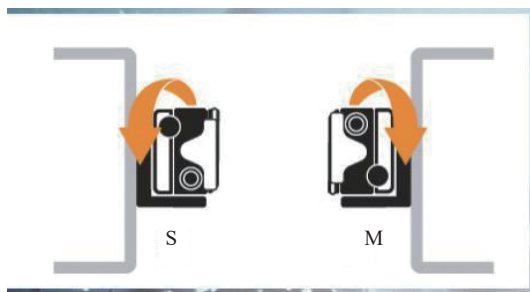


图 2 激光校准仪测量双主轴机床同心度误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser calibrator measuring concentricity error of dual-spindle machine

主轴旋转时,测量被测要素横向截面轮廓的半径差值,计算两回转轴相对轮廓中心点的坐标。由于这种检测方法是以前两主轴的回转中心点来体现基准中心点的,因此检测被测要素的同心度误差,应同步旋转接收器,在几个不同角度位置进行测量,以发光接收器 S、发光接收器 M 互为发射和接收光源,读取两个发光接收器在 X 轴方向、Y 轴方向的距离偏差  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ,计算实际被测轴线到回转轴线的距离  $R(R = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2})$ ,其中 R 的最大值为  $R_{max}$ ,  $R_{max}$  的 2 倍即为被测零件的同心度误差。

### 1.2 与传统方法的比较

目前应用较为广泛的方法是利用打表法测量双

主轴镗铣机床镗杆的同心度误差,将双主轴镗铣机床的镗杆分别伸出至极限,将千分表装夹固定在一支主轴上,再利用千分表测量另一支主轴,旋转被测主轴,读取千分表数据变化值,以此测量双主轴镗铣机床镗杆的同心度误差。

打表法测量同心度误差采用的是回转轴线法,两主轴的基准要素和被测要素在设定的若干个横向截面上测量,测得各截面轮廓的半径差值,计算各横向截面轮廓中心点的坐标,最后计算出实际被测轴线上各点至基准轴线的距离  $R$ ,  $R_{max}$  的 2 倍为所测零件的同心度误差。

传统方法的优点在于适用于双主轴工作台较小的情况,且方便易操作、检测设备成本低;缺点是只能检测同心度误差精度指标较大的参数,人工计算误差风险较大,测量过程影响因素较多,表架加长杆的挠曲度导致变形影响测量结果。

利用激光校准仪测量同心度误差的方法,优点是激光束的发射、接收方便快捷,检测效率和精度较高,不受工作台间距的影响,软件自动计算同心度误差测量结果,测量过程受外界干扰影响因素较小,适用于同心度误差精度指标要求较高,并且两主轴间距较大的情况;缺点是检测设备成本相对高,操作过程要求精细,需要专业人员来完成检测。

## 2 同心度误差的测量过程

将激光校准仪的发光接收器 S、发光接收器 M 安装在专用夹具,再分别装在主轴镗杆的侧面,调整光源强度,保证检测过程中的发射和接收光源不受光线的影响。待测量数据和光源稳定后,进入正式测量过程。

以 Y 轴方向靠近工作台位置为零点,向上移动 Y 轴模拟测量过程,每移动 200 mm 进行一个位置的相对中心点测量。测量时,沿主轴顺时针在横向截面位置旋转,每旋转 30 度采集一点,共采集 12 点数据,经分析软件数据处理,记录该测量位置同心度误差、Y 轴方向各点定位平均值。向上移动至终点 1200 mm 处,分别记录每一个位置的测量数据,每个位置共测量 5 次。

## 3 同心度误差的测量结果

以机床测量范围 3000 mm×2000 mm×1200 mm,测量两主轴间距 2000 mm 为例。选择一台装配完成的双主轴镗铣机床,其检验结果均满足合格证上

的精度指标要求 (同轴度误差  $\leq 0.02$  mm), 具体数据如下。

两立柱(Y轴方向) I 轴、II 轴定位精度分别为 0.0138 mm 和 -0.0147 mm, 直线度分别为 0.01 mm 和 0.01 mm, 扭摆分别为 0.008 mm 和 0.009 mm, 滚摆分别为 0.007 mm 和 0.008 mm, 两立柱平行度为 0.01 mm, 立柱(Y轴方向)对工作台(X轴方向)的垂直度分别为 0.015/800 mm 和 -0.012/800 mm。

主轴方向(Z轴方向)导轨直线度分别为 0.01 mm 和 0.008 mm, 扭摆分别为 0.008 mm 和 0.009 mm, 滚摆分别为 0.007 mm 和 0.008 mm, 两立柱平行度为 0.01 mm, 主轴(Z轴方向)对立柱(Y轴方向)的垂直度分别为 0.01 mm 和 0.011 mm。

### 3.1 初始状态机床同心度误差测量结果

在双主轴镗铣机床满足几何精度指标的情况下, 同心度误差测量结果见表 1。

表 1 初始状态下同心度误差测量结果  
Tab.1 Concentricity measurement results in the initial state (mm)

位置	同心度误差	5次测量Y轴方向各点定位平均值	
		I 轴	II 轴
0	0.0317	0	0
200	0.0159	0.0064	0.0037
400	0.0298	0.0087	-0.0052
600	0.0415	0.0021	-0.0089
800	0.0547	-0.0034	-0.0061
1000	0.0744	-0.0113	0.0112
1200	0.0849	-0.0147	0.0138

### 3.2 立柱直线度调整后同心度误差测量结果

从表 1 中测量数据可以得出几何精度满足要求时, 同心度误差测量结果超出合格证允许范围 (同轴度误差  $\leq 0.02$  mm)。更换两立柱, 使立柱直线度分别提升为 0.005 mm 和 0.007 mm, Y 轴对 X 轴垂直度的测量结果无变化, 左侧立柱 (I 轴) 仍为 0.015/800 mm, 右侧立柱 (II 轴) 仍为 -0.012/800 mm, 同心度误差测量结果见表 2。

### 3.3 立柱垂直度调整后同心度误差测量结果

从表 2 中测量数据可以得出, 更换立柱使直线度精度提高, 但同心度误差测量结果没有发生变化, 仍然超出允许误差。通过对数据的统计分析, 决定将立柱(Y轴方向)对工作台(X轴方向)的垂直度加修, 左侧立柱 (I 轴) 修后为 0.007/800 mm, 右侧立柱 (II 轴) 修后为 -0.004/800 mm, 其它精度指标暂时不调整, 测量结果见表 3。

表 2 直线度调整后同心度误差测量结果

Tab.2 Concentricity measurement results after straightness adjustment (mm)

位置	同心度误差	5次测量Y轴方向各点定位平均值	
		I 轴	II 轴
0	0.0317	0	0
200	0.0159	0.0064	0.0037
400	0.0298	0.0087	-0.0052
600	0.0415	0.0021	-0.0089
800	0.0547	-0.0034	-0.0061
1000	0.0744	-0.0113	0.0112
1200	0.0849	-0.0147	0.0138

表 3 垂直度调整后同心度误差测量结果

Tab.3 Concentricity measurement results after verticality adjustment (mm)

位置	同心度误差	5次测量Y轴方向各点定位平均值	
		I 轴	II 轴
0	0.0083	0	0
200	0.0069	0.0012	0.0008
400	0.0057	-0.0009	0.0004
600	0.0194	-0.0006	-0.0002
800	0.0276	0.0005	-0.0001
1000	0.0465	0.0011	0.0003
1200	0.0610	0.0007	0.0002

### 3.4 定位精度补偿后同心度误差测量结果

从表 3 中测量数据可以得出, 垂直度精度提升后, 同心度误差测量结果有所改善, 通过对数据二次分析, 决定将机床立柱方向 (Y 轴方向) 定位精度进行精度修正和补偿。Y 轴对 X 轴垂直度: 左侧立柱 (I 轴) 0.007/800 mm、右侧立柱 (II 轴) -0.004/800 mm, 精度指标没有变化, 测量结果如表 4。

表 4 定位精度补偿后同心度误差测量结果

Tab.4 Concentricity measurement results after positioning accuracy compensation (mm)

位置	同心度误差	5次测量Y轴方向各点定位平均值	
		I 轴	II 轴
0	0.0078	0	0
200	0.0024	0.0012	0.0008
400	0.0037	-0.0009	0.0004
600	0.0064	-0.0006	-0.0002
800	0.0146	0.0005	-0.0001
1000	0.0234	0.0011	0.0003
1200	0.0254	0.0007	0.0002

### 3.5 同向调整后同心度误差测量结果

立柱方向(Y轴方向)定位精度进行修正和补偿后,同心度误差测量结果有所提升,调整Y轴方向定位精度,使其结果在同向超出允许误差。Y轴对X轴垂直度:左侧立柱(I轴)0.007/800 mm、右侧立柱(II轴)-0.004/800 mm,精度指标暂时不调整,测量结果如表5。

表5 定位精度调整后同心度误差测量结果

Tab.5 Concentricity measurement results after positioning error adjustment (mm)

位置	同心度误差	5次测量Y轴方向各点定位平均值	
		I轴	II轴
0	0.0072	0	0
200	0.0017	0.0325	0.0314
400	0.0055	-0.0423	-0.0395
600	0.0080	-0.0612	-0.0632
800	0.0143	-0.0532	-0.0528
1000	0.0227	0.0712	0.0689
1200	0.0246	0.0332	0.0308

调整Y轴对X轴垂直度,使其结果在同向超出允许误差,两立柱垂直度分别为0.05/800 mm和0.054/800 mm,检测结果和表5结果一样。通过上述数据说明,垂直度超出允许误差,方向相同,不影响同心度误差测量结果。

## 4 不确定度评定

### 4.1 测量模型

$$y = \Delta$$

式中,y为同心度误差,μm;Δ为激光校准仪读数的最大变化量,μm;

### 4.2 不确定度来源

双主轴机床同心度误差检测结果的不确定度来源主要包括:激光校准仪引入的标准不确定度 $u_1$ ;重复性引入的标准不确定度 $u_2$ ;温度及线膨胀系数引入的标准不确定度 $u_3$ ;设备安装误差引入的标准不确定度 $u_4$ 。

### 4.3 标准不确定度评定

#### 4.3.1 激光校准仪引入的标准不确定度 $u_1$

查得激光校准仪的最大允许误差为±1 μm/1000 mm,被测对象为3000 mm×2000 mm×1200 mm规格机床,两主轴间距2000 mm,高度800 mm,即

被测点的激光校准仪的最大允许误差为±2 μm。概率分布为均匀分布,取其区间半宽,包含因子 $k = \sqrt{3}$ ,标准不确定度 $u_1$ 为式(1)。

$$u_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.16 \mu\text{m} \quad (1)$$

#### 4.3.2 重复性引入的标准不确定度 $u_2$

在重复性条件下测量5次,由于测量次数较少,采用极差法计算单次测量结果的实验标准差,读取5次数据,查表得 $C = 2.33$ ,故标准不确定度 $u_2$ 为式(2)。

$$u_2 = s(n) = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{C} = \frac{1}{2.33} = 0.43 \mu\text{m} \quad (2)$$

#### 4.3.3 温度及线膨胀系数引入的不确定度 $u_3$

由于激光校准仪自带温度及线膨胀系数补偿系统,故此项不确定度可忽略不计。

#### 4.3.4 设备安装误差引入的不确定度 $u_4$

由于激光校准仪发光接收器S、发光接收器M均可接收激光束进行测量,并未影响测量结果,故此项不确定度可忽略不计。

### 4.4 合成标准不确定度及扩展不确定度

合成标准不确定度如式(3)所示。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{1.16^2 + 0.43^2} = 1.3 \mu\text{m} \quad (3)$$

扩展不确定度如式(4)所示。

$$U = k \times u_c = 2 \times 1.3 = 2.6 \mu\text{m} \quad (4)$$

经评定,利用激光校准仪检测双主轴机床同心度误差的测量不确定度 $U = 2.6 \mu\text{m}$ ,可以满足双主轴机床同心度误差测量需求。

## 5 影响同心度误差测量结果的因素分析

### 5.1 两立柱定位误差影响

通过现场测试实验及不确定度的评定,同心度误差受Y轴方向定位精度影响较大,主要有两种情况:一是两分体立柱定位精度合格,偏差方向相反的情况,直接影响同心度误差的测量结果;二是两分体立柱定位精度超出合格精度要求,但两分体立柱定位精度偏差方向相同,不影响同心度误差的测量结果。由此可见,分体双主轴机床要同时保证单轴立柱定位精度合格,且定位精度的偏差方向一致。

### 5.2 两立柱垂直度偏差影响

通过现场测试实验及不确定度的评定得出,两主轴立柱的垂直度在同心度误差测量结果中起到至



关重要的作用。立柱 Y 轴对 X 轴垂直度,主要有两种情况:一是两分体立柱对工作台垂直度合格,偏差方向相反的情况,直接影响同心度误差的测量结果;二是两分体立柱对工作台垂直度超出合格精度要求,但两分体立柱对工作台的垂直度方向一致且差值较小的情况,不影响同心度误差的测量结果。由此可见,分体双主轴机床要同时保证单轴立柱对工作台的垂直度精度合格,且垂直度误差的偏差方向一致。

### 5.3 两立柱的直线度、扭摆、滚摆等精度影响

经过现场的测试实验及验证,两立柱本身的直线度、扭摆、滚摆等偏差对同心度误差测量结果影响较小,可以忽略不计。

## 6 结论

分析比对不同调整情况测得的双主轴镗铣机床主轴同心度误差发现,影响同心度误差测量的因素主要包括:立柱的定位精度偏差和立柱对工作台垂直度偏差两个方面。因此,双主轴镗铣机床装配时,应符合以下几点要求,以提高同心度误差精度:

- 1) 两分体立柱定位精度合格且偏差方向相同;
- 2) 两分体立柱对工作台垂直度合格且偏差方向相同;
- 3) 两立柱本身的直线度、扭摆、滚摆等偏差合格。

若两分体立柱对工作台垂直度、立柱方向定位精度超出合格的精度要求,但偏差方向一致且差值较小时,同心度误差精度仍可以得到保证。

## 参考文献

- [1] 胡安继,张健,赵东升,等.基于激光干涉法的斜导轨数控机床定位精度检测方法[J].计量技术,2020(1):34-37.
- [2] 汪恺.形状和位置公差标准应用指南[M].北京:中国标准出版社,2000:10-35.
- [3] 国家质量技术监督局.机床检验通则第2部分:数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定:GB/T 17421.2-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [4] 国家标准化管理委员会.产品几何量技术规范形状和位置公差检测规定:GB/T 1958-2004[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局.测量不确定度评定与表示:GB/T 27418-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [6] 宣安东.实用测量不确定度评定及案例[M].北京:中国计量出版社,2007:8-15.
- [7] 刘俊清.大型零件大跨度孔的同轴度测量方法[J].现代制造工程,2013(11):102-105.
- [8] 田建忠.基于对称加工技术应用中的同轴度误差在线检测[J].金属加工(冷加工),2016(1):51-54.
- [9] 王志国.机床狭小空间同轴度检测方法的研究[J].机械工程师,2019(5):78-79.
- [10] 周克媛,侯勇.底座零件支撑孔同轴度误差分析和改进[J].北京工业职业技术学院学报,2014,13(1):17-21.
- [11] 张笑雷,吴高位.加工中心加工箱体误差分析[J].金属加工(冷加工),2010(19):29-30.
- [12] 杨和仲.卧式镗床调头镗孔保证同轴度的技巧[J].金属加工(冷加工),2015(24):44-46.
- [13] 李云.卧式双面镗铣加工中心同轴度误差的检测与补偿[J].金属加工(冷加工),2014(17):70-72.
- [14] 张文生.镗床工作台调头镗孔同轴度的探讨[J].国防制造技术,2010(5):62-63.
- [15] 李峰.主轴前轴承外重力下垂对机床同轴度测量的影响[J].锅炉制造,2001(2):70-72.
- [16] 宋诗会.中间断开两孔加工同轴度超差原因分析及解决方案[J].内燃机与配件,2021(3):107-108.

本文编辑:霍祎炜

(上接第 32 页)

- [11] LEE S J, NAKAMURA H, KAWAHITO Y, et al. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(2): 111-118.
- [12] XIA C, LI Y, PUCHKOV U A, et al. Microstructure and phase constitution near the interface of Cu/Al vacuum brazing using Al-Si filler metal[J]. Vacuum, 2008, 82(8): 799-804.
- [13] 刘晓英,刘巨芬,王景辉,等.0.9 $\mu\text{m}$ 光电高温计应用单固定点延伸和多固定点内插的分度方法比较[J].计量学报,2021,42(8):1000-1005.
- [14] ANCSINJ.Non-uniqueness of ITS-90 at 548.2°C and at 156.6°C[J]. Metrologia, 2006, 43(5): 461-469.

- [15] LOWE D, HEUFELDER S. Effect of solid liquid interface velocity on the measured upper and lower limits of the liquidus temperature of cobalt-carbon eutectic fixed points[J]. Metrologia, 2013, 50(3): 227-234.
- [16] BLOEMBERGEN P, YAMADA Y, SASAJIMA N, et al. The effect of the eutectic structure and the residual effect of impurities on the uncertainty in the eutectic temperatures of Fe-C and Co-C[J]. Metrologia, 2007, 44(5): 279.
- [17] 卢小丰,张婷婷,董伟,等.Pd-C和Ru-C固定点的热力学和ITS-90温度测量[J].计量科学与技术,2021,65(5):50-54.

本文编辑:霍祎炜