

跟踪仪五轴联动激光机床空间精度检测

孔令辉 赵思雅 周铭尧* 程宇蓆

中国测试技术研究院, 四川 成都 610000

[摘要]针对高精度加工需求, 探索利用双激光跟踪仪检测五轴联动激光机床空间精度的新方法。采用 RTCP 联动精度测试技术, 通过双激光跟踪仪同步采集机床各轴运动数据, 运用多项式曲线拟合及最小二乘法计算误差, 对 B 轴、C 轴及整体空间轨迹进行综合分析。实验数据显示, B 轴和 C 轴误差均控制在 0.012~0.022 mm 范围内, 全轨迹最大误差约 0.057 mm, 经几何误差补偿后精度显著提升。该检测技术可有效评价机床在复杂加工过程中的运动特性, 为高精度加工提供可靠测量依据, 并为后续误差补偿与系统优化提供理论支持。

[关键词]双激光跟踪仪; 五轴联动激光机床; 曲线拟合; 空间精度; RTCP

DOI: 10.64635/ja.2026.1374

中图分类号: TG659

文献标识码: A

Spatial Accuracy Detection of Five-Axis Simultaneous Laser Machine Tools Using Dual Laser Trackers

Kong Linghui, Zhao Siya, Zhou Mingyao*, Cheng Yuxi

National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract: To meet the demands of high-precision machining, this paper explores a new method for detecting the spatial accuracy of five-axis simultaneous laser machine tools using dual laser trackers. Based on RTCP simultaneous accuracy testing technology, dual laser trackers are used to synchronously collect motion data from each axis of the machine tool. Polynomial curve fitting and the least squares method are then applied to calculate errors, followed by a comprehensive analysis of the B-axis, C-axis, and overall spatial trajectory. Experimental data show that the errors of both the B-axis and C-axis are controlled within the range of 0.012–0.022 mm, while the maximum error of the full trajectory is approximately 0.057 mm. After geometric error compensation, the accuracy is significantly improved. This detection technology can effectively evaluate the motion characteristics of machine tools during complex machining processes, provide a reliable measurement basis for high-precision machining, and offer theoretical support for subsequent error compensation and system optimization.

Keywords: dual laser trackers; five-axis simultaneous laser machine tool; curve fitting; spatial accuracy; RTCP

引言

随着制造技术的不断发展, 对机床精度的要求也愈加严格, 特别是在高精度零件加工以及复杂曲面加工等领域。机床精度的提升, 不仅仅是各个机械部件精度的提高, 还包括运动控制系统性能的改善。在众多评估机床精度的方法中, RTCP 联动精度测试作为关键技术之一, 主要考察了不同轴之间的协调性以及机床整体运动轨迹的精准度。通过对 B 轴与 C 轴联动精度的测试, 能够揭示机床在复杂工况下的运动特性与潜在的误差来源。高精度测量技术的应用, 如激光跟踪仪与干涉测距仪, 能够确保数据的精确记录与同步, 从而为机床精度控制提供可靠依据。几何误差补偿技术的引入, 进一步提高了机床在旋转轴运动中

的精度表现。

1 基本原理

1.1 双激光跟踪仪协同测量原理

通过同步跟踪机床运动部件上的光学靶球, 激光跟踪仪可以实时记录运动部件的三维坐标数据。与单台仪器相比, 双激光跟踪仪具备显著的优势, 尤其是在应对复杂机床结构时, 能够突破传统方法的限制, 提供更全面的测量覆盖。除此之外, 双激光跟踪仪的动态同步性能也大大提升了数据的准确性。通过匹配时间戳, 确保两台仪器的数据能够准确同步, 从而避免因运动状态差异所引发的测量误差。为了确保测量结果的一致性, 通过靶球标定及坐标系转换算法, 将两台仪器的测量数据映射至同一基准坐标

系中,从而使得最终的测量数据更具可比性和一致性。

1.2 空间轨迹拟合模型

机床的运动轨迹通常由一组离散的测量点所构成。为准确再现这些轨迹,采用空间曲线拟合方法,通过多项式拟合构建描述机床运动轨迹的数学模型^[1]。假设机床的运动轨迹由坐标点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 表示,那么基于多项式拟合,可以构建一条空间曲线来描述这些点之间的关系。该空间拟合模型表示为:

$$Z = F(X, Y) = \sum_{k=0}^m a_k X^k + \sum_{k=0}^n b_k Y^k$$

在模型中, a_k 和 b_k 是拟合系数, X 与 Y 为自变量, Z 为响应变量。通过多项式拟合,能够将离散的测量点转换为连续的空间曲线,从而为进一步的误差分析提供精确的数学依据。

拟合过程中,最小二乘法被用来优化拟合系数,其目的是最小化实测点与拟合曲线之间的残差平方和。优化过程通过矩阵运算来求解,公式如下:

$$A = (X^T Y)^{-1} X^T Y$$

其中, X 表示自变量矩阵, Y 为观测值矩阵, A 则是最终的拟合系数矩阵。这一优化过程能够保证拟合曲线与机床运动轨迹的最大程度匹配,提升测量精度。

1.3 误差量化方法

为了对机床的空间精度进行量化评估,必须将理论轨迹与实际测量轨迹进行对比。空间精度误差的计算公式为:

$$\Delta = \sqrt{(X_{\text{理论}} - X_{\text{实测}})^2 + (Y_{\text{理论}} - Y_{\text{实测}})^2 + (Z_{\text{理论}} - Z_{\text{实测}})^2}$$

其中, $X_{\text{理论}}$ 、 $Y_{\text{理论}}$ 和 $Z_{\text{理论}}$ 分别代表理论轨迹在三个方向上的坐标,而 $X_{\text{实测}}$ 、 $Y_{\text{实测}}$ 和 $Z_{\text{实测}}$ 则为实测坐标。该公式能够计算出每个测量点的精度误差,为机床整体精度评估提供重要参考。在实际应用中,最大误差值被用来衡量机床的整体精度表现。它代表了机床在运动过程中可能出现的最大偏差,通常用于综合评价机床的精度水平。通过此指标,能够有效识别出机床性能中的潜在问题,并为后续的精度提升和优化工作提供依据。

2 实验与方法

2.1 实验设备与配置

为了实现高精度的轨迹测量,实验中选用了五轴联动激光机床。这款机床的配置包括 X 、 Y 、 Z 三个直线轴以及 B 、 C 两个旋转轴,且其最大联动速度可达到 3m/s 。在机床高速运动的情况下,仍能够维持较高的测量精度,尤其在处理复杂的运动轨迹时,表现出了卓越的性能。因此,

这种机床为实验数据的准确性提供了可靠的基础。测量过程中,双激光跟踪仪的应用至关重要。本实验采用了GTS3300型号的激光跟踪仪(如图1所示),其具备 $0.5\mu\text{m/m}$ 的干涉测距精度,并能够进行动态跟踪^[2]。这使得其能够实时记录机床运动的位置信息,且两台跟踪仪在协同工作的过程中,成功消除了单台仪器可能产生的视角盲区问题,从而有效保证了测量结果的完整性与精确性。在数据处理方面,所使用的软件基于MATLAB平台进行开发,集成了坐标匹配、曲线拟合及误差分析等多项功能。这一软件工具能够高效地对收集到的数据进行分析,并通过拟合机床运动轨迹,进一步评估理论与实际数据之间的差异。数据的处理与分析为后续的精度评估提供了坚实的理论依据。

双激光跟踪仪五轴联动激光机床空间精度检测

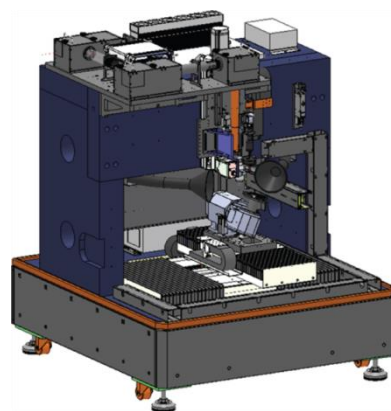


图1 五轴联动激光机床模型

2.2 实验流程

在实验开始之前,必须先进行标定与坐标系的建立。为了确保精确度,采用了三点标定法,并在两台激光跟踪仪的视野内安装靶球,从而完成了坐标系的初始化。通过这种方法,实验能够为后续数据的处理奠定坚实的基础,从而确保了在进行轨迹测量时能够避免任何由坐标系不一致造成的误差。为了保证实验结果的可靠性,实验采用了严格的检验标准,确保误差在 $1\mu\text{m}$ 以内。通过标定精度的控制,可以最大限度地减少测量中的潜在误差,从而提高数据的准确性与可靠性。确保坐标系的正确性,是实验中不可忽视的重要步骤。标定完成后,进入了数据采集阶段。此时,机床按照预设轨迹进行运动,双激光跟踪仪同步记录 X 、 Y 、 Z 轴的坐标数据。在此阶段,特别对 B 、 C 轴进行了RTCP测试,并在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 及 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的区间内,以等间距的方式取样。数据采集过程中,通过时间戳对每一组数据进行精确标定,确保了双仪器所采集的

数据能够同步对齐。这一方法不仅有效避免了因时间错配导致的误差，还能够保证在不同仪器之间传输的数据在时间上的一致性。此外，采集的空间坐标数据还经过位置插值算法的处理，从而平滑了数据的过渡，避免了因不连续性造成的数据异常。在完成数据采集后，进入了数据处理阶段，主要包括坐标匹配、曲线拟合以及误差计算三个环节。由于实验使用了两台激光跟踪仪，因此，采集的数据需要进行坐标匹配，以确保两台仪器的数据在同一坐标系中进行比较。通过基于时间戳和位置插值算法的坐标对齐处理，可以保证两台仪器所采集的数据保持一致，从而避免由于数据偏差或时间差异造成的不准确性。数据匹配后，接下来进行的是轨迹拟合工作。为了准确描述机床的空间运动轨迹，采用了三次多项式拟和方法。通过最小二乘法优化拟合系数，可以得到一条尽量接近实际测量数据的空间曲线^[3]。这种方法有效地减少了由离散点带来的误差，使得轨迹呈现出更加平滑的特性，从而提高了拟合结果的精度。

双激光跟踪仪五轴联动激光机床空间精度检测



图 2 双激光跟踪仪五轴联动激光空间精度测试

拟合完成后，下一步是进行误差计算。误差计算的目的是通过比较理论轨迹与实际拟合轨迹之间的差异来量化精度。使用下列公式计算误差：

$$\Delta = \sqrt{(X_{\text{理论}} - X_{\text{实测}})^2 + (Y_{\text{理论}} - Y_{\text{实测}})^2 + (Z_{\text{理论}} - Z_{\text{实测}})^2}$$

整个数据处理流程通过精细的计算与分析，确保了测量数据的高精度与高可靠性。在每一个环节中，实验设计都遵循了严谨的科学方法，为最终精度评估提供了充分的数据支持。这些处理结果为机床的运动精度控制提供了重要参考，也为未来相关领域的研究提供了宝贵经验。

3 分析与讨论

3.1 B 轴 RTCP 联动精度

B 轴 RTCP（轮廓切削平面坐标）联动精度的测试结果显示，实测轨迹与理论轨迹之间的 X 轴偏差均值为 0.008mm，最大偏差为 0.012mm（见表 1）。从数据可以看出，机床在 B 轴的动态响应过程中展现出优异的稳定性，误差控制在极小的范围内，足以满足高精度加工要求。进一步分析表明，B 轴的联动精度在不同测试条件下都能稳定保持高水平，充分满足复杂加工任务的需求。

表 1 列出了部分 B 轴 RTCP 测试数据，显示了不同测试点的理论值与实测值之间的差异。从中可以观察到，绝大多数测试点的偏差在 0.002mm~0.005mm 之间，表明 B 轴运动中的精度稳定性较高。虽然少数测试点的误差超过了 0.01mm，但这些偏差的占比微小，未对整体性能产生显著影响。因此，可以推断 B 轴在动态加工中的精度保持高水平，满足精密加工的需求。双激光跟踪仪结合高精度干涉测距技术，确保了数据的实时同步和精准记录，从而大大提高了测试的可靠性。激光跟踪仪能够精确捕捉高速运动中的每一个点，确保数据的精确同步，这进一步验证了 B 轴在加工过程中的稳定表现，为机床的高精度操作提供了重要保障。

表 1 B 轴 RTCP 测试数据

点	X 理论(mm)	X 实测(mm)	偏差(mm)
1	0.000	-0.002	0.002
2	-0.005	-0.008	0.003
3	-0.010	-0.010	0.000
4	-0.012	-0.008	0.004
5	-0.007	-0.016	0.009
6	-0.012	-0.014	0.002
7	-0.015	-0.013	0.002
8	-0.012	-0.015	0.003
9	-0.015	-0.010	0.005
10	-0.012	-0.014	0.002
11	-0.011	-0.006	0.005
12	-0.007	-0.004	0.003
13	-0.001	-0.004	0.003
14	0.007	-0.001	0.008

3.2 C 轴 RTCP 联动精度

C 轴的全周 RTCP 联动精度测试中，Y 轴的最大偏差为 0.022mm（见表 2）。这一误差的主要来源为 C 轴与 Z 轴之间的平行度误差。在 C 轴大角度旋转时，Z 轴垂直度微小变化导致了几何误差的产生。经几何误差补偿后，测

试偏差降至 0.015mm, 表明补偿技术在提升机床精度方面起到了关键作用。表 2 中的数据表明, 几何误差得到补偿后, 机床的联动精度明显提高。测试结果显示, 几何误差补偿成功减少了由此带来的偏差, 提升了机床的整体精度。该补偿技术对于优化旋转轴联动精度具有实际应用价值。激光跟踪仪提供了精准的实时数据支持, 确保了 C 轴运动中每个位置的精确捕捉。双激光跟踪仪在测试中的使用, 使得动态过程的每个环节都得到了准确记录, 也为实施误差补偿提供了重要的数据依据。可以看出, 机床精度的提升与这些高精度测量设备的协同密切相关。

表 2 C 轴 RTCP 测试数据

点	Y 理(mm)	Y 实(mm)	偏(mm)	补偿后偏(mm)
1	0.000	0.010	0.010	0.006
2	0.000	-0.010	0.010	0.007
3	0.000	-0.015	0.015	0.009
4	0.000	-0.010	0.010	0.005
5	0.000	-0.015	0.015	0.008
6	0.000	-0.018	0.018	0.010
7	0.000	-0.017	0.017	0.009
8	0.000	-0.004	0.004	0.002
9	0.000	-0.003	0.003	0.001
10	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.010	0.010	0.005
12	0.000	0.011	0.011	0.006
13	0.000	0.020	0.020	0.012
14	0.000	-0.002	0.002	0.001

3.3 空间轨迹综合精度

通过对 200mm 长度轨迹的 1800 个实测点进行分析, 最大空间误差为 0.057mm, 主要集中在高速换向区域(如图 3 所示)。这表明机床在此阶段的动态响应存在轻微滞后。滞后现象的出现, 可能与驱动系统的惯性及反馈延迟相关, 尤其在高速换向时表现得更为明显。虽然在大部分操作条件下, 空间误差维持在较低水平, 但在高速换向过程中, 误差的增大显示了机床动态性能方面的潜在问题。这一现象反映了即使机床在常规操作下能够保持较小的空间误差, 但在某些极限操作中仍可能出现较大的偏差。分析结果显示, 机床在常规操作中的空间误差较小, 但在高速换向时, 惯性因素与控制系统响应延迟共同作用, 导致了误差的增加。为了解决这一问题, 未来的研究应重点优化驱动系统的响应能力及控制系统的实时性^[4]。为了减少高速换向时的误差, 未来的研究可以集中在提升驱动系统的响应速度及控制系统的精度, 特别是在高速换向过程

中, 驱动系统响应速度及反馈控制精度对机床精度的影响尤为重要。通过改进控制系统与驱动系统的协同作用, 有望进一步提高机床的动态响应精度, 减少误差。

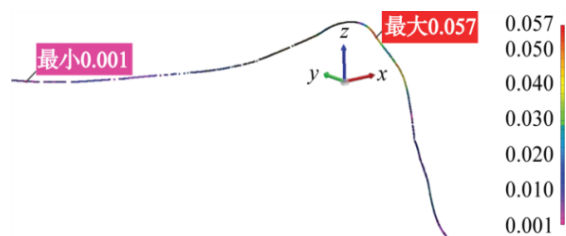


图 3 理论轨迹与实测拟合轨迹的差值

3.4 综合分析与展望

对 B 轴、C 轴及整体空间轨迹精度进行的分析表明, 机床在大部分常规操作中具有较好的精度稳定性, 满足高精度加工的需求。虽然在高速换向区域出现了少量误差, 整体精度仍保持在可接受范围内。B 轴和 C 轴的 RTCP 联动测试结果显示, 通过几何误差补偿能够有效降低机床误差, 同时双激光跟踪仪的使用为精度的保证提供了关键支持。高速换向时的精度问题表明, 仍需进一步改进驱动系统及控制算法。未来的研究应聚焦于提高驱动系统响应速度, 优化高动态运动中的精确控制, 特别是在高速换向时, 驱动系统与反馈精度对机床精度的影响较为突出。通过进一步提升控制系统与驱动系统的协同作用, 有望减少由惯性及反馈延迟引起的误差, 进一步提高机床精度。

综上所述, 机床在大多数操作条件下能够实现较理想的精度控制, 尽管在高速换向时精度略有下降。随着新技术的不断发展, 特别是在驱动系统、误差补偿技术及实时控制算法方面的进步, 机床的精度有望进一步提高, 为高精度制造提供更加有力的支持。

4 结束语

本文通过对 B 轴、C 轴及整体空间轨迹精度的全面测试与分析, 详细阐述了机床在实际操作中的精度表现及其提升策略。在常规操作条件下, 机床展现出了较为稳定的精度, 尤其在 B 轴与 C 轴的联动过程中, 几何误差补偿技术有效改善了联动精度。尽管在高速换向过程中出现了些许误差, 但总体精度仍保持在可接受范围内, 满足了高精度加工的需求。面对高速换向时出现的精度下降问题, 未来的研究可聚焦于优化驱动系统的响应速度与反馈精度, 以进一步提高机床的动态精度表现。随着新技术的发展, 尤其是在控制系统与驱动技术方面的创新, 机床精度的提升将进一步推动高精度制造技术的进步, 为更复杂的加工任务提供更强大的技术支持。

[参考文献]

- [1]唐永忠,唐亮,叶家福.基于激光跟踪仪的数控机床加工误差控制研究[J].激光杂志,2024,45(09):213-217.
- [2]肖域坤,曾治霖,唐越,等.基于激光球杆干涉仪的数控机床空间误差高效测量 辨识与补偿[J].仪器仪表学报,2024,45(10):222-233.
- [3]沈世星.激光跟踪仪在轧钢冶金设备的应用[J].冶金设

备,2024(06):127-130.

- [4]韩栋梁,冯汝栋,孔波.数控车床加工质量的工序处理与优化技术[J].大众汽车,2025(01):52-54.

作者简介:孔令辉(1986.02—),男,甘肃省平凉市人,工程师,硕士,主要从事几何量精密测量研究。

通讯作者:周铭尧(1990.02—),男,四川省成都市人,工程师,本科,主要从事几何量精密测量与材料测试研究。