

混联机床并联轴定位精度的激光测量与误差补偿^{*}

张立新 黄玉美 乔雁龙

【摘要】 在分析混联机床并联轴定位精度的激光干涉测量原理和方法的基础上,采用干涉法检测了并联轴 Z 向的定位精度和重复定位精度,做出了并联轴的平均偏差特性曲线,获得了其线性位移定位误差数学模型;利用最小二乘法得到了混联机床并联轴定位误差补偿模型和增量补偿特性曲线;推导了并联机构动平台位姿和各驱动杆杆长的求解过程,进而对混联机床并联轴定位精度进行了有效补偿,得到了一种并联轴定位精度激光干涉测量方法和误差补偿模型的建立方法。

关键词: 混联机床 并联轴 精度 激光测量 误差补偿

中图分类号: TH161⁺.5; TN249; TH113.2⁺1

文献标识码: A

Laser Measurement and Errors Compensation of Position Accuracy for Parallel Axis on Hybrid NC Machine Tools

Zhang Lixin Huang Yumei Qiao Yanlong

(Xi'an University of Technology)

Abstract

Based on the detailed studying on the principles and methods of laser interferometry for setting accuracy of parallel axis on hybrid NC machine tools, the setting accuracy and resetting accuracy of parallel axis in Z direction has been inspected by interferometry and the characteristic curve of mean position deviation for parallel axis was plotted, by which the mathematical model of positional error for parallel axis in linear displacement was derived. The positional errors compensation model and increment compensation curve of parallel axis have been obtained by making use of least squares fitting. The position of parallel apparatus moving platform and length of the drive rods have been solved. The setting accuracy of parallel axis on hybrid NC machine tools was compensated. The methods of laser interferometry of setting accuracy and model building of error compensation for parallel axis were proposed.

Key words Hybrid NC machine tools, Parallel axis, Accuracy, Laser measurement, Errors compensation

引言

与传统数控机床相比,并联机床的运动精度偏低,限制了其应用范围^[1]。加工精度反映了机床工作性能的优劣^[2],机床定位精度和重复定位精度是影响加工精度的重要因素,通过检测建立其误差数学模型^[3],在工作过程中由数控系统进行误差补偿以提高各轴运动精度是提高机床精度的重要措施之

一。针对实验室开发的混联镗铣床,采用干涉法对其并联轴 Z 向定位精度进行检测,提出其检测方法,建立并联轴 Z 向定位精度的误差模型,并对机床进行误差补偿。

1 并联轴定位精度检测原理方法

将干涉仪激光器、线性干涉镜、反射镜按图 1 所示布置,线性干涉镜作为固定光学镜放置在机床工

收稿日期: 2007-09-25

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(项目编号:20050700007)和国际合作项目(项目编号:2004KW-13)

张立新 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 博士生 副教授(石河子大学), 710048 西安市

黄玉美 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 教授 博士生导师

乔雁龙 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 硕士生

作台上,测量反射镜作为移动光学镜安装在混联机床并联机构动平台上随 Z 轴上下移动,使干涉镜、反射镜互相准直并与机床 Z 轴垂直。联接激光器、EC10 环境补偿装置、PCM20 接口卡和测量计算机。

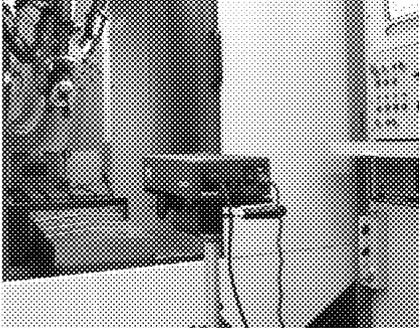


图1 并联机床 Z 轴定位精度检测示意图

Fig.1 Measurement of position accuracy for Z axis

Z 轴测量目标范围为 0~167 mm,测量目标位置 S_i 为

$$S_i = \Delta S_i + S_0 \quad (1)$$

式中 ΔS ——测量间距

i ——所取 Z 轴上的测量目标数

S_0 ——消除反向间隙的越程

安装在并联轴动平台上的反射镜按照根据式(1)编制的程序随并联轴相对固定的干涉镜间歇时间 T 移动一个采样间距 ΔL ,一个测量循环为混联机床并联轴动平台上、下间歇往返移动 167 mm。测量时,激光器光束射入干涉镜,被其内的分光镜分为射向连接分光镜的反射镜的参考光束和射向连接

并联轴动平台的反射镜的测量光束。测量光束光程不断变化,而参考光束光程不变,二者光程差 ΔL 满足

$$\Delta L = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi} \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi$ ——参考光束与测量光束的位相差

λ ——激光波长

两束光被反射汇聚于干涉镜内的分光镜而发生干涉,之后返回激光器被其内探测器监测转换得到并联轴动平台的实际移动距离(图 2),则

$$\delta = Z - Z_0 \quad (3)$$

式中 δ ——测量目标点定位误差

Z ——并联轴实际移动距离

Z_0 ——给定的并联轴理论移动距离

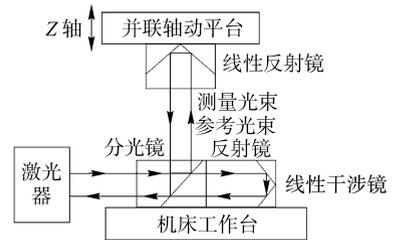


图2 并联轴定位精度测量原理图

Fig.2 Measurement principles of position accuracy

2 并联轴定位误差与补偿模型

根据上述检测原理和方法测得某次混联镗铣床并联直线轴半闭环控制情况下的定位精度和重复定位精度,如表 1 所示。

表 1 部分测量数据及精度表
Tab.1 Test data and accuracy table

参数	目标点数						...	6
	1	2	3	4	5	6		
位置	0.000	33.747	67.247	100.747	134.247	167.747	...	166.499
机床行驶方向	↓	↑	↓	↑	↓	↑	...	...
$j =$ 位置偏差 X_{ij}							...	...
1	-4.400	-0.500	-6.371	-2.471	-9.905	-8.505	...	...
2	-4.000	-2.300	-5.671	-5.271	-9.505	-9.405	...	...
3	-4.300	-3.600	-5.771	-5.071	-9.205	-8.605	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...
单向均值偏差	-4.233	-2.133	-5.938	-4.271	-9.538	-8.838	...	...
标准不确定度 S_j	0.208	1.557	0.379	1.562	0.351	0.493	...	...
平均 $\downarrow 2S_j$	-4.650	-5.247	-6.695	-7.395	-10.241	-9.825	...	...
平均 $\uparrow 2S_j$	-3.817	0.980	-5.180	-1.147	-8.836	-7.852	...	...
反向差值 B_j	2.100	1.667	0.700	...	...	...	...	...
双向重复精度 R_j	6.227	6.248	2.389	...	...	...	...	...
双向均值偏差	-3.183	-5.104	-9.188	...	...	...	...	...
	单向定位(↓)		单向定位(↑)		双向定位		...	...
Z 轴反向差值 B					6.233		...	...
Z 轴重复精度 R	3.402		6.417		9.442		...	...
Z 轴定位精度 A	21.762		24.642		26.559		...	...

据表 1 做出混联机床并联 Z 轴定位精度平均偏差特性曲线如图 3 所示。

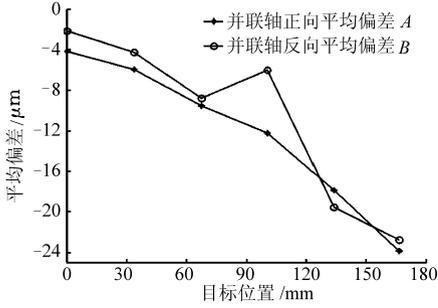


图 3 并联轴平均偏差特性曲线

Fig.3 Curves of mean deviation for parallel axis

根据最小二乘法进行曲线拟合得出混联机床并联轴正、反向 Z 向线性位移定位误差数学模型为

$$y_z = -4.18x^4 - 4.55 \times 10^{-2}x^3 - 4.0 \times 10^{-4}x^2 \quad (4)$$

$$y_f = -1.81x^4 - 3.41 \times 10^{-1}x^3 + 9.4 \times 10^{-3}x^2 - 1.0 \times 10^{-4}x \quad (5)$$

式中 x ——目标位置

y_z ——混联机床并联轴 Z 轴正向线性位移时所对应的目标点定位误差

y_f ——混联机床并联轴 Z 轴反向线性位移时所对应的目标点定位误差

对上述 Z 轴正向和反向定位误差数学模型取值,使误差为零,然后利用最小二乘法进行拟合即可得到目标位置的误差补偿模型

$$y_{zb} = -5.20 \times 10^{-1}x^4 + 6.13 \times 10^{-1}x^3 - 1.98 \times 10^{-2}x^2 + 2.0 \times 10^{-4}x \quad (6)$$

$$y_{fb} = 1.94x^4 + 4.70 \times 10^{-2}x^3 - 1.70 \times 10^{-3}x^2 \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得并联轴 Z 行程范围内相应位置的增量补偿值。增量补偿特性曲线如图 4 所示。

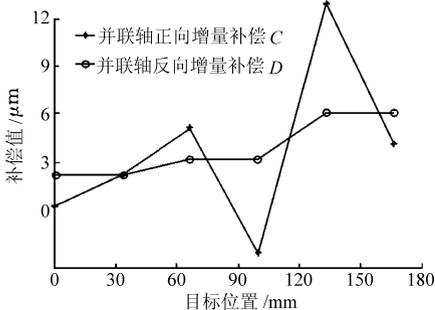


图 4 Z 轴增量补偿特性曲线

Fig.4 Curves of increment compensation for Z axis

3 并联轴定位精度的补偿

六轴串、并混联结构的并联机床,其 X 轴、Y 轴、C 轴运动由三自由度串联机构完成,Z 轴、A

轴、B 轴运动由 3-RPS 并联机构完成。3-RPS 并联机构由动平台(下平台)、定平台(上平台)和 3 个并联分支组成,每个并联分支由 1 个回转副、1 个移动副和 1 个球面副组成,如图 5 所示。动平台位姿由工艺需求或 CAM 刀位信息确定并决定刀具在 Z 轴、A 轴、B 轴上的运动量。并联轴 Z 轴的直线运动和定位精度最终由 3-RPS 机构各分支并联杆杆长值决定,这实际是混联机床 3-RPS 并联机构位置逆解的求解。

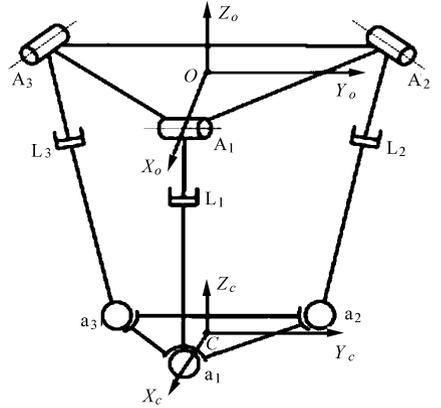


图 5 并联机构的坐标系

Fig.5 Coordinates of parallel mechanism

动平台的位姿为

$$T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} C_\gamma C_\beta C_\alpha - S_\gamma S_\alpha & -C_\gamma C_\beta S_\alpha - S_\gamma C_\alpha & C_\gamma S_\beta \\ S_\gamma C_\beta C_\alpha + C_\gamma S_\alpha & -S_\gamma C_\beta S_\alpha + C_\gamma C_\alpha & S_\gamma S_\beta \\ -S_\beta C_\alpha & S_\beta S_\alpha & C_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 R 、 P ——动平台坐标系在定平台坐标系中的姿态和位置描述

α 、 β 、 γ ——动平台坐标系从与定平台坐标系重合的位置开始沿其 X、Y、Z 轴旋转到当前姿态所转动的角度

P_x 、 P_y 、 P_z ——动平台坐标系原点在定平台坐标系中的 X、Y、Z 坐标值

根据并联机构特点和加工信息可知动平台坐标系 Z 轴与定平台坐标系 X、Y、Z 轴的方向余弦 R_{13} 、 R_{23} 、 R_{33} ,即

$$\begin{cases} \cos \gamma \sin \beta = R_{13} = \cos \phi \\ \sin \gamma \sin \beta = R_{23} = \cos \varphi \\ \cos \beta = R_{33} = \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

又根据 3-RPS 并联机构的结构和设计有

$$\begin{cases} R_{12} = R_{21} \\ P_x = \frac{r}{k}(R_{11} - R_{22}) \\ P_y = -R_{21}r \end{cases} \quad (12)$$

式(11)、(12)中 R 、 r 分别为定平台和动平台外接圆的半径, k 为并联机构的结构参数, 均为已知量。由式(11)、(12)可求得 α 、 β 、 γ 、 P_x 、 P_y , 根据加工信息可得 P_z 。则式(8)表示的动平台位姿已知。

根据结构设计参数, 球面副中心 i 在动平台坐标系的坐标值 a'_i 已知, 则由

$$\begin{bmatrix} a_i \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a'_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

可求出球面副中心 i 在定平台坐标系的坐标值 a_i 。

同理, 又知转动副中心 j 在定平台坐标系的坐标值 A_j , 则球面副中心到转动副中心的距离即为各并联杆杆长, 为

$$L_i = \sqrt{(A_{ix} - a_{ix})^2 + (A_{iy} - a_{iy})^2 + (A_{iz} - a_{iz})^2} \quad (14)$$

由式(6)、(7)获知并联轴 Z 相应位置增量补偿值, 再由式(14)确定各杆杆长。则通过各并联杆伺服电动机改变并联杆杆长即可实现并联轴 Z 的定位精度补偿。如图 6 所示, 采用式(6)、(7)误差补偿

数学模型对混联机床并联轴进行误差补偿后的定位精度和重复定位精度曲线。其中正、反向定位精度为 12.009、8.143 μm ; 正、反向重复定位精度为 12.009、4.027 μm ; 机床并联轴 Z 的定位精度为 12.138 μm 。达到了提升混联机床并联轴运动精度的目的。

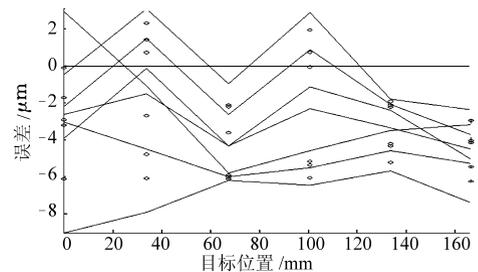


图 6 补偿后并联轴定位精度曲线

Fig. 6 Curves of position accuracy for parallel axis

4 结束语

对混联机床定位精度的干涉测量原理和方法进行了探讨; 运用此方法采用激光干涉仪检测了其定位精度、重复定位精度, 做出了其平均偏差特性曲线, 建立了其正、反 Z 向线性位移定位误差数学模型, 据此模型获取了目标点补偿值, 并利用最小二乘法拟合得到了混联机床 Z 向定位误差补偿模型和增量补偿特性曲线。然后据加工信息和结构参数求出了机床动平台位姿和并联机构各杆杆长, 最后对混联机床定位精度进行补偿, 使其运动精度得到了明显提高。

参 考 文 献

- 1 毕宇昭, 赵晓明. HexaM 并联机床的误差分析及补偿[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(5): 598~602.
- 2 徐礼钜, 范守文, 马咏梅, 等. 一种新型并联机床的精度建模与误差分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(4): 1~5.
- 3 郭宗和, 牛国栋, 孙术华, 等. 三平移并联机器人机构的精度分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 145~148.

(上接第 119 页)

参 考 文 献

- 1 Altschuller G S. Creativity as an exact science[M]. New York: Gordon & Breach, 1984.
- 2 Luke S R. A conceptual design tool for engineers: an amalgamation of theory of constraints, theory of inventive problem solving and logic [D]. Virginia: Old Dominion University, 2002.
- 3 Zlotin B, Zusman A. Directed evolution: philosophy, theory and practice[M]. Michigan: Ideation International Inc., 2001.
- 4 Mann D L. Better technology forecasting using systematic innovation methods[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2003, 70(8): 779~795.
- 5 张付英. 机械产品创新设计信息化建模、求解及其关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- 6 徐起贺. 现代机械产品创新设计集成化方法研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 102~105.
- 7 张付英, 徐燕申, 刘卉. 基于 TRIZ 物场变换法的液压活塞杆密封技术研究[J]. 润滑与密封, 2005, 171(9): 57~60.