

基于虚拟Y轴控制车铣复合加工中心精度测试及补偿技术试验

王喜运¹, 吴慧敏¹, 赵传芳¹, 王巨冰¹, 王鹏², 武洋²

1. 通用技术集团机床工程研究院有限公司大连分公司 辽宁大连 116620

2. 通用技术集团大连机床有限责任公司 辽宁大连 116620

摘要: 介绍了以虚拟Y轴控制的车铣复合加工中心为测试对象, 通过对机床虚拟Y轴垂直度、定位精度、插补精度和圆精度等相关精度进行测试, 并通过数控系统进行优化补偿, 从而提高机床加工精度的方法。

关键词: 虚拟Y轴; 车铣复合加工中心; 动态精度; 圆测试; 补偿

1 序言

目前, 我国数控机床生产能力及消费市场规模已全球领先, 但在中高端高精度、多轴联动复合加工机床市场上, 日本、德国等企业处于领先地位, 成为我国制造业发展的挑战。而随着国内航空航天、新能源、医疗器械等行业的不断发展, 目前在数控车床市场中, 对于中高端车铣复合加工中心类数控机床的需求, 特别是对带有Y轴的车削中心需求的客户日益增加^[1]。

车铣复合加工中心Y轴通常有正交Y轴和倾斜Y轴(即虚拟Y轴)两种结构形式。相较于正交Y轴结构, 虚拟Y轴具有高刚性、整体结构小型化等特点, 可灵活降低机床高度, 使机床整体结构更紧凑, 同时通过Y轴的移动可提高机床的外圆键槽铣削能力。具备虚拟Y轴形式的车铣复合加工中心可广泛应用于精密复杂沟槽、非中心钻孔以及攻螺纹等零部件加工领域。

我单位自主研发的带有虚拟Y轴结构的某型号车铣复合加工中心, Y轴床身导轨与水平方向呈40°倾斜, X轴与水平呈70°倾斜。该结构具备较高的刚性。控制系统采用日本FANUC Oi TF PLUS系统(或其他国内外优质系统)和AC交流伺服驱动, 操作方便, 运转可靠, 可对加工范围内各类零

件进行各种车削、钻削和铣削加工。

为了更好地对车铣复合加工中心虚拟Y轴结构进行相关功能的调试、试验、测试、应用以及优化补偿^[2], 从而使机床最终达到最佳的实际加工应用效果, 此次特进行下述试验。

2 虚拟Y轴联动插补控制技术调试

首先对虚拟Y轴联动插补控制进行调试。

机床结构如图1所示, 该车床轴构成为X+Y+Z+CS(第一主轴)+Sa(动力刀具轴), 机床X轴

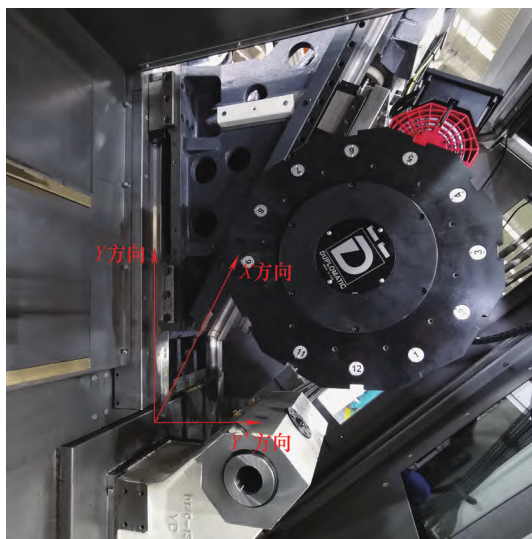


图1 虚拟Y轴车铣复合机床结构

基金项目: 通用技术集团科技重大专项(GTZD-2022-015)。

与水平方向夹角为 40° ，Y轴平面与X轴平面夹角为 30° 。

当直接使用倾斜Y轴进行编程加工时，假设需要刀塔在垂直于X轴的虚拟Y轴（以Y'轴代替）方向移动距离 Y_L' ，其他轴位置保持不变，则实际编程时需要同时移动X轴和Y轴进行联动插补，移动距离 X_L 、 Y_L 分别为：

$$X_L = Y_L' / \tan 30^\circ \quad (1)$$

$$Y_L = Y_L' / \sin 30^\circ \quad (2)$$

对于直接进行程序编写，尤其是当X轴与Y'轴联动时难度较高，因此需要通过数控系统的倾斜轴功能调试，可使X轴和Y轴以正交的方式进行编程和控制，降低程序编写难度。控制时应保证Y轴假想轴与X轴垂直且正方向向上，如图2所示。

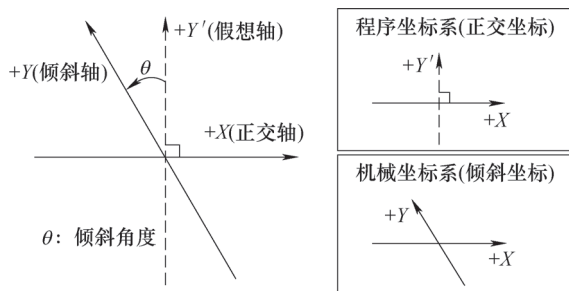


图2 倾斜Y轴控制

使用Y轴作为倾斜轴控制，需要选择并开通“倾斜轴控制”功能，FANUC 0i TF PLUS数控系统中，可通过参数诊断号1270 #0判断系统是否开通此项功能。

主要参数设定：FANUC 0i TF PLUS系统中，主要调整参数^[3]见表1。

表1 Y轴定位精度对比

参数号	参数说明	设定值
8200#1	打开倾斜轴控制功能：设定为1时，Y轴以假想轴方向移动（X轴、Y轴联动）；设定为0时，Y轴按照实际轴方向移动（Y轴单独移动）	1
8210	倾斜轴角度设定	60.000
8211	倾斜轴控制中的倾斜轴轴号（2为Y轴）	2
8212	倾斜轴控制中的倾斜轴轴号（1为X轴）	1

3 虚拟Y轴垂直补偿

X轴与真实Y轴之间的夹角为 30° ，通过系统插补运算，虚拟Y轴移动时与X轴之间夹角为 90° 。

但是由于在零件加工、装配过程中必然存在微小误差，X轴和Y轴的实际夹角不一定完全精确为 30° ，因此需要确定X轴及Y轴之间的实际夹角，补偿至FANUC数控系统8210参数中，以确保虚拟Y轴运动时与X轴之间的垂直度能够满足标准要求。

有两种方法可以完成：工件试切法和检具测量调试法。

3.1 工件试切法

通过在机床上对工件进行实际试切加工，分别沿X轴、真实Y轴方向进行铣削加工，确定X轴、真实Y轴实际运动轨迹，再通过三坐标测量仪等测量仪器，对轨迹之间夹角进行测量，将实际测量值补偿至倾斜轴角度8210参数中，如图3所示。



图3 X轴-Y轴角度测试补偿

3.2 检具测量调试法

为简化测试调试流程，此次设计了虚拟Y轴垂直度专用检测检具，如图4所示，用检具代替实际切削进行垂直度调整。

检具自身两相邻边互相垂直（ $<0.003/200$ ）。

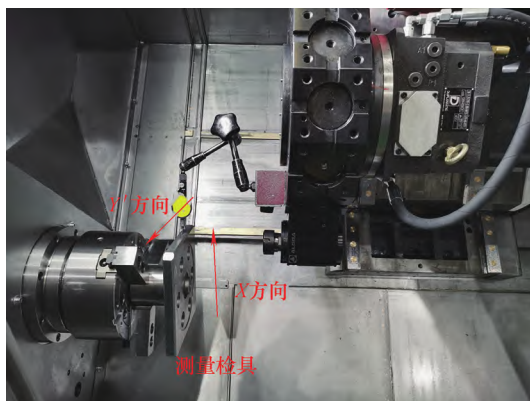


图4 X轴-Y轴垂直度测量检具

检测时,将主轴切换至C轴模式,调整C轴角度,沿X方向移动刀塔,通过千分表检测读数,使检具X向直角边与X轴运动平行,再保持C轴位置不动,沿虚拟Y轴Y'方向移动刀塔,读取千分表在检具Y'方向上的两端差值a,通过计算得出理论角度偏差值 θ' ,并将此偏差值叠加补偿至参数8210中。

$$\theta' = \arctan(a/L) \quad (3)$$

式中,L为检具直角边测量长度(mm)。

经过实际应用测试,通过该检具可快速完成虚拟Y轴与X轴的垂直度调整。

4 虚拟Y轴定位精度测试补偿技术

因为具有虚拟Y轴结构的机床在实际加工应用中,Y轴实际运动为复合插补运动,因此需要对虚拟Y轴的定位精度进行测试、补偿。在FANUC数控系统中,螺距误差补偿、反向间隙补偿等参数,对应的均为真实X轴、真实Y轴。而实际测试补偿对象为虚拟Y轴,对于两者的不统一,可以采取两种方法解决:一是测试并补偿真实Y轴,靠X轴、真实Y轴的精度间接保证虚拟Y轴的联动精度;二是测试虚拟Y轴,按计算数据补偿至真实Y轴。以下为两种补偿方式的效果对比。

4.1 测试并补偿真实Y轴,间接保证虚拟Y轴

实际对真实X轴、真实Y轴进行定位精度测试并进行螺距误差补偿,然后再测试虚拟Y轴,测试结果如图5所示。采用RENISHAW XL80激光干涉仪,对机床Y轴定位精度进行测试。

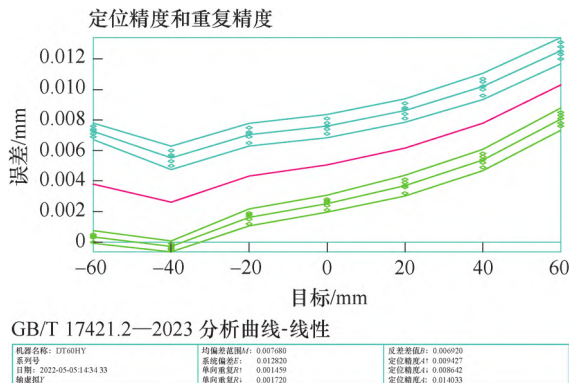


图5 测试并补偿真实Y轴后虚拟Y轴的定位精度

4.2 测试虚拟Y轴,按计算补偿至真实Y轴

补偿后虚拟Y轴定位精度测试结果如图6所示。

4.3 两种补偿方式效果对比

两种补偿方式效果对比见表2。

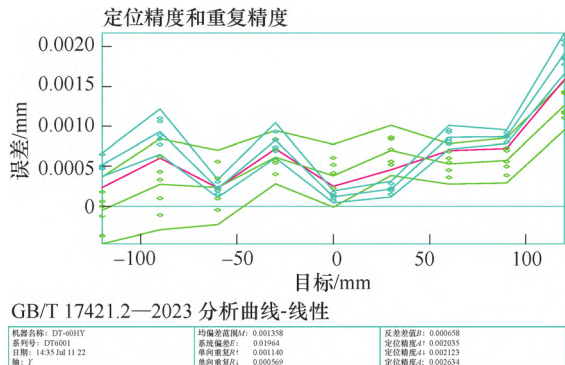


图6 测试虚拟Y轴后折算补偿至真实Y轴虚拟Y轴定位精度

表2 Y轴定位精度对比

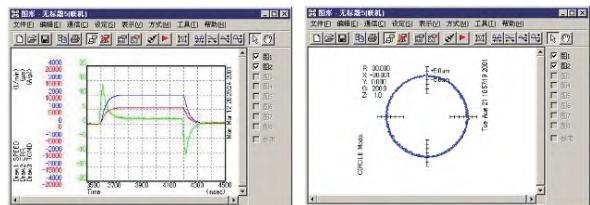
项目	标准/mm	补偿真实Y/mm	补偿虚拟Y/mm	变化率(%)
双向定位精度A	0.022	0.0140	0.0026	+81.4
单向重复定位精度R↑	0.006	0.0015	0.0011	+26.7
单向重复定位精度R↓	0.006	0.0017	0.0006	+64.7
反向差值B	0.010	0.0069	0.0007	+89.9
单向定位系统偏差E↑	0.010	0.0116	0.0013	+88.8
单向定位系统偏差E↓	0.010	0.0102	0.0018	+82.4

由测试结果可得出结论,通过测试虚拟Y轴,以及比例计算后补偿真实Y轴,比直接测试、补偿真实Y轴的螺距误差小,精度有明显提升。

5 伺服优化测试

通过FANUC SERVO GUIDE软件,对包括虚拟Y轴在内的进给轴进行伺服优化测试调整,主要包括:各轴快移时间常数的调整、标准圆弧测试(X-Z平面)、对倾斜轴的圆弧测试(X-Y平面)、方形测试、方形带1/4圆弧测试、Cs轮廓控制测试、振动频率测试及伺服频率响应测试等,如图7~图9所示。

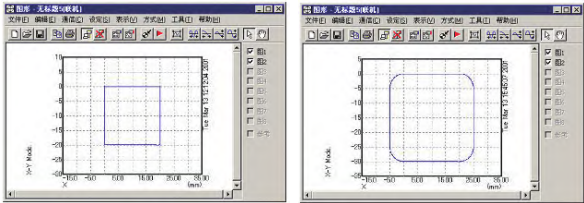
主要从速度和位置增益、插补后时间常数、圆弧半径减速、拐角减速允许速度差、切削进给时间常数和速度前馈等几个方面着手进行调整。



a) 快移时间常数的调整

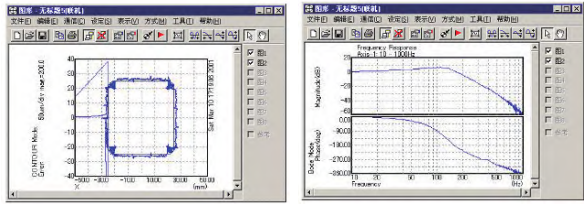
b) 圆弧测试

图7 快移时间常数的调整、圆弧测试



a) 方形测试 b) 方形带1/4圆弧测试

图8 方形测试、方形带1/4圆弧测试



a) C_s轮廓控制测试 b) 伺服频率响应测试

图9 C_s轮廓控制测试、伺服频率响应测试

通过反向间隙（Backlash）、反向越冲（Reversal peaks）、周期误差（Cyclic Error）、比例不匹配和伺服不匹配^[4]等方面，对FANUC系统主要参数进行优化调整，提升机床动态性能。参数包括：No.1622（各轴切削进给的插补后加减速时间常数）、No.1769（插补后加减速时间常数）、No.2005#1（前馈有效）、No.2092（先行前馈系数）及No.1825（位置环增益）等^[5]。

6 实际加工应用测试

为验证Y轴精度调试效果，在调整前后，对NAS试件进行试切（见图10），进行加工精度对比和表面质量对比。

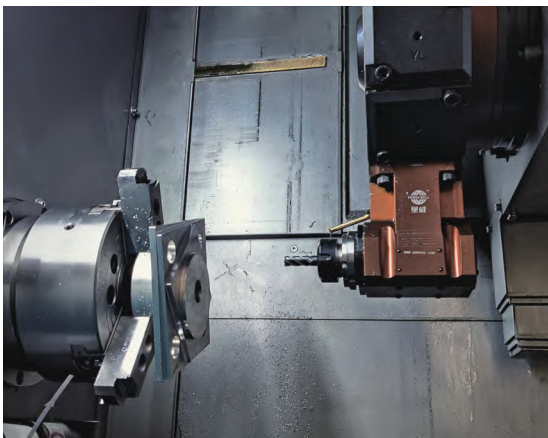


图10 NAS试件加工

6.1 加工精度对比测试

加工精度对比见表3。

表3 NAS试件精度对比

项目	国标允差/ mm	调试前实测值/ mm	调试后实测值/ mm	变化率 (%)
直边直线度	0.03	0.0128	0.0082	+35.9
邻边垂直度	0.04	0.0140	0.0065	+53.6
直边平行度	0.04	0.0109	0.0070	+35.8
斜边直线度	0.03	0.0111	0.0074	+33.3
斜边倾斜度	0.04	0.0136	0.0112	+17.4
铣圆圆度	0.03	0.0106	0.0083	+21.7
铣圆位置度	φ0.04	φ0.0115	φ0.0062	+46.1
镗孔位置度	φ0.02	φ0.0185	φ0.0087	+53.0
镗孔同轴度	φ0.05	φ0.0048	φ0.0050	+4.0

从试验结果可得出，经过优化调整后加工精度有明显提升。

6.2 加工表面质量对比测试

伺服优化前后，对虚拟Y轴铣削加工表面质量对比见表4。

伺服优化前，加工表面有较明显切削振纹，经过优化调整后，表面振纹得到明显改善。

优化调整前，表面粗糙度值 $Ra=1.3\mu m$ ，经过优化调整后表面粗糙度值 Ra 降为 $0.7\mu m$ 。

由上述试验测试结果可得出，经过伺服优化测试调整，切削零件相关精度和表面质量得到显著改善和提升。

表4 虚拟Y轴加工表面质量对比

项目	优化前实测值/ μm	优化后实测值/ μm
表面粗糙度 Ra	1.12	0.73
表面质量	表面有明显切削振纹	表面均匀，无明显振纹
图示		

7 结束语

本文介绍了带虚拟Y轴的车削中心结构，以及进行X-Y平面垂直度测试及补偿，虚拟Y轴定位精度测试及补偿，相关伺服优化调整，实际切削NAS工

件对比等,得出如下主要结论。

1) 通过两种方法测试X轴和真实Y轴之间的实际夹角,或通过系统参数进行补偿,都可保证X轴和虚拟Y轴之间的垂直度满足标准和使用要求。

2) 通过对两种虚拟Y轴定位精度的螺距误差补偿方法实际的应用对比,证明通过直接测试虚拟Y轴定位精度,经过比例计算后补偿真实Y轴的螺距误差补偿数据,优于测试真实Y轴定位精度并进行螺距误差补偿,间接保证虚拟Y轴定位精度,效果有明显提升。

3) 通过FANUC系统SERVO GUIDE软件,对机床系统相关伺服参数进行优化调整,可显著提高机床运动插补精度,机床加工试件的插补铣圆圆度精度、Y轴插补直线度和零件拐角处轮廓度误差等精度也可明显提升。

4) 经过对机床进行优化前、后加工NAS试件精

度的对比,加工精度和加工表面质量都得到明显提升。可以得出结论:经过相关优化、补偿调整后的虚拟Y轴,可达到比较满意的实际应用效果。

参考文献:

- [1] 李军, 孙建刚, 罗德军. 采用虚拟“Y”轴的车铣复合加工中心[J]. 制造技术与机床, 2007 (4): 60-62.
- [2] 谢春, 张为民. 车铣复合加工中心综合误差检测及补偿策略[J]. 光学精密工程, 2014, 22 (4): 1004-1011.
- [3] FANUC. Series 0i-MODEL F PLUS参数说明书[Z]. 2019.
- [4] 王喜运. 基于KGM182的机床动态精度测量及伺服调整[J]. 金属加工 (冷加工), 2016 (6): 67-69.
- [5] FANUC. Read me file for FANUC SERVO GUIDE Version8.4[EB]. 2015.

MW 20240430

金属加工视频号开通了, 欢迎关注!

金属加工视频号是装备制造业领域的专业视频号,由创刊于1950年的《金属加工》(包括冷加工和热加工两刊)和金属加工在线(mw1950.com)共同运营,开通以来陆续形成系列栏目,包括金属加工要闻、金属加工对话、金属加工快讯、金属加工在线论坛、加工真奇妙和金粉小讲堂等。



扫描二维码,
关注金属加工视频号

