

国产华中数控系统在不同构型五轴机床上的应用验证

王华侨¹, 王宇飞², 赵华军³, 刘东青³, 张守明³, 高嵩¹, 郑武⁴, 王浩志⁴

1. 华中科技大学 湖北武汉 430074

2. 厦门大学 福建厦门 361005

3. 湖北三江航天红阳机电有限公司 湖北孝感 432000

4. 武汉华中数控股份有限公司 湖北武汉 430074

摘要: 简要介绍了国产华中数控系统HNC848在不同构型五轴机床加工NAS件及S件综合测试中的应用验证, 包含大型六轴双模式五坐标联动加工中心、大型七轴五联动立式车铣复合加工中心、大型主轴复合摆动式铣车复合加工中心及摇篮式五坐标联动加工中心等。实践证明, 在五坐标联动加工方面, 国产华中数控系统HNC848的控制加工精度满足NAS件及S件综合考核要求, 达到了与国外数控系统同等的水平, 推动了国产高档数控系统在航空航天领域的广泛应用。

关键词: 五坐标; 数控铣削; 车铣复合; 铣车复合; 数控系统; HNC848; NAS件; S件

1 序言

华中数控系统HNC848是全数字总线式高档数控装置, 采用模块化、开放式体系结构, 基于具有自主知识产权的NCUC工业现场总线技术, 具备多轴、多通道及同步轴同步等功能。华中数控系统HNC848配套不同构型五轴机床的操作界面如图1



a) 七轴五坐标联动车铣复合控制 b) 六轴双模式五坐标联动镗铣控制 c) 五轴五坐标联动控制

图1 华中数控系统HNC848操作界面

所示, 其界面设计友好、操作方便。HNC848在车铣复合加工中心、高速精密卧式加工中心、龙门五轴加工中心等高档数控机床上均适用, 在航空、航天、能源等大型企业批量应用, 取得了良好的效果, 加工效果达到国外知名数控系统水平, 加工效率大大提高, 实现了国产数控系统在航天领域的重大突破, 打破了国外知名品牌数控系统的长期垄断局面。

2 NAS件及S件简介

NAS件是通过加工圆锥台试件产生的面粗糙度、圆度、角度及尺寸精度等指标, 来检验机床的动态精度, 是目前国内外数控机床动态精度验收的常用方法。标准要求圆度 0.1mm , 同轴度 0.1mm , 角度公差 $30^\circ \pm 0.035^\circ$ 。

S件的主体是一个呈“S”形走向的扭曲曲面形

零件的加工时间从 30min/件 缩短到 20min/件 。

参考文献:

[1] 侯祖刚, 骆亚敏, 王宗雷. 模具加工中提高曲面编程效率的技巧[J]. 金属加工(冷加工), 2014(3): 59-61.

[2] 胥光蕙. 宏程序编程模板在车削非圆曲线轮廓上的应用[J]. 计算机仿真, 2017(6): 191-196.

[3] 冯志刚. 数控宏程序编程方法、技巧与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

MW 20210817

项目支持: “高档数控机床与基础制造装备” 国家科技重大专项(课题编号2017ZX04009001)。

成的等厚度缘条，曲面形状复杂。使用立铣刀侧刃加工时，刀具轴向必须连续变换，同时机床必须能完美执行五轴联动的坐标连续换向。加工中，机床进行五轴联动的坐标连续换向，能集中反应机床的几何精度、定位精度、动态特性以及反向误差等特性。切削完成后的S件对缘条型面尺寸精度要求较高，为 $\pm 0.05\text{mm}$ ，缘条厚度公差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，缘条表面粗糙度值 $Ra=3.2\mu\text{m}$ ，总体技术难度较高。

3 大型六轴双模式五坐标联动加工中心应用验证

3.1 总体结构

大型六轴双模式五坐标联动加工中心（见图2）采用高架式龙门结构，固定式工作台中间镶嵌旋转工作台，横梁沿左、右床身导轨水平纵向移动（X轴）；横梁上配置有溜板，铣头滑枕既可随铣头溜板沿横梁导轨水平横向移动（Y轴），也可沿溜板导轨垂直升降（Z轴）。双摆角数控万能铣头的主轴随铣头摆动体在垂直面内绕X轴摆动（A轴），随铣头叉形体在水平面内绕Z轴回转（C轴）；配备 $\phi 2000\text{mm}$ 数控分度转台（B轴），配备链式刀库。数控系统采用华中五轴数控系统HNC848，可实现五轴联动。



图2 大型六轴双模式五坐标联动加工中心

该铣头主体方案采用A/C双摆角铣头（见图3）与滑枕一体化结构，C轴传动部分安装在滑枕内

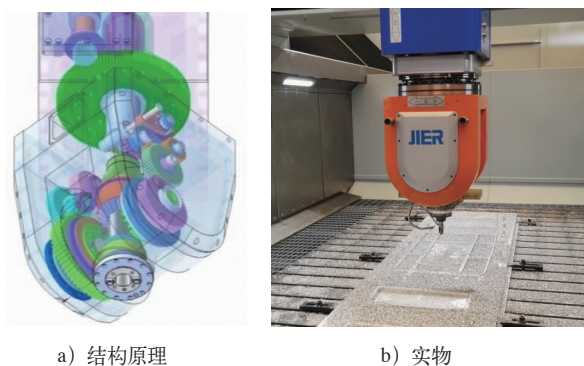


图3 A/C双摆角铣头

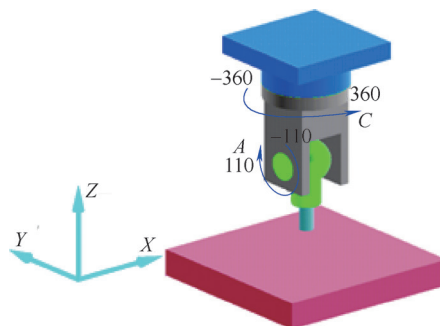
部，主运动由电主轴单元实现。铣头的A、C轴驱动采用德国IDAM力矩电动机直接驱动技术，并且可通过液压夹紧装置将A、C轴锁定在任意位置上；另外还采用HEIDENHAIN高精度角度编码器，实现全闭环位置反馈。铣头的A轴摆动体内安装大功率高速电主轴，主轴功率52kW，最高转速18000r/min。

3.2 五坐标编程后处理

大型六轴双模式五坐标联动龙门玻璃钢加工中心机床结构：X轴横梁沿固定立柱床身导轨纵向运动，Y轴滑铣头溜板沿横梁导轨往复运动，Z轴滑枕式铣头沿溜板导轨垂直运动，主轴头为A/C双摆角数控万能铣头。底座固定在地基上，回转工作台B轴（先期设置为B轴，后由于与攻螺纹功能冲突，将B轴改为U轴）位于底座工作台中部，六轴双模式五坐标机床运动轴如图4所示。通过UG自带的后置处理构造器，配置此机床的后置处理，其中限制了C轴行程为 $-360^\circ \sim 360^\circ$ ，A轴行程为 $-110^\circ \sim 110^\circ$ 。若A、C轴超程，后置处理程序将自动退刀并重新进行刀具路径处理，输出接续程序实现安全加工。



a) 运动结构配置



b) 五坐标联动几何运动关系

图4 六轴双模式五坐标机床运动轴

3.3 综合加工测试

(1) 国家标准三坐标立式与卧式综合测试 针对五坐标机床需同时加工立式和卧式两种状态的情况，需按照标准的三轴方圆试件进行加工；另外增加了2处3°斜角检测斜面的精度、4处圆孔检测孔的位置度，圆孔中增加台阶孔，检测两孔的同轴度。经加工及检测，精度全部合格，实物如图5所示。

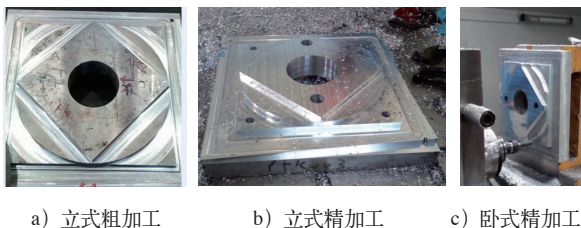


图5 国家标准方圆试件测试实物

(2) NAS及S件加工测试 采用国产华中数控系统HNC848控制六轴双模式五坐标联动加工中心进行应用测试。各伺服驱动电动机采用配套国产电动机，采用RTCP五轴刀心编程控制，基于UG NX模式进行双模式五坐标联动后处理开发，双模式五轴联动自行切换，最终完成了NAS和S件测试（见图6、图7），经过检测全部合格。

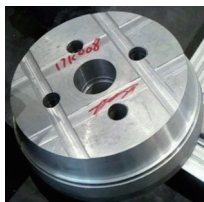


图6 NAS件测试

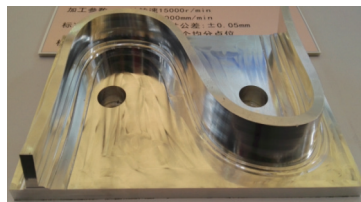


图7 S件测试

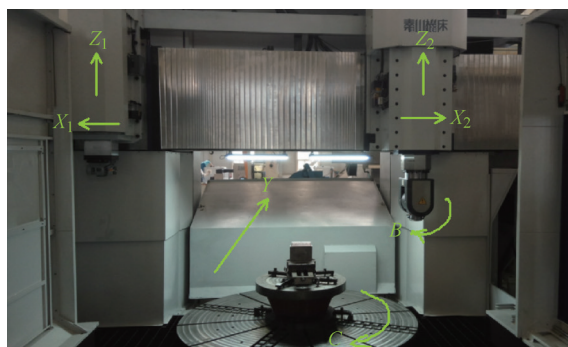
4 大型七轴五联动立式车铣复合加工中心应用验证

4.1 总体结构

图8为大型七轴五联动立式车铣复合加工中心，车削主轴箱沿横梁水平移动（ X_1 轴），铣削主轴箱沿横梁水平移动（ X_2 轴）；工作台沿床身前后移动（ Y 轴），摆动头固定于铣削主轴下方，绕 Y 轴旋转（ B 轴）；车削滑枕在主轴箱内上下移动（ Z_1 轴），铣削滑枕在主轴箱内上下移动（ Z_2 轴）；回转工作台（ C 轴）在车削工作时提供主切削力，在铣削工作时可实现数控旋转分度；横梁沿龙门立柱上下运动（ W 轴）。采用华中数控HNC848全数字数控系统，能实现 X 、 Y 、 Z 、 B 、 C 五轴联动的数控控制和插



a) 外观



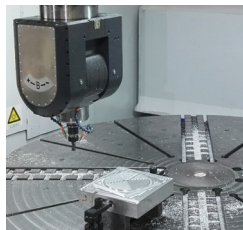
b) 坐标轴示意

图8 大型七轴五联动立式车铣复合加工中心

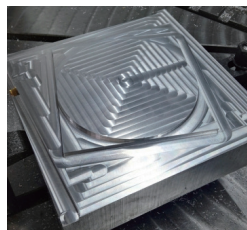
补运算功能，能够保证在整个加工区域内进行车削、镗削、钻削及铣削加工。

4.2 综合加工测试

(1) 国家标准三轴铣削方圆试件加工测试 针对机床特点，对机械部分及数控系统进行优化，并优化加工基准、数控程序，进行国家标准方圆试件三轴铣削加工测试（见图9），切削成品经过检测，尺寸全部合格。



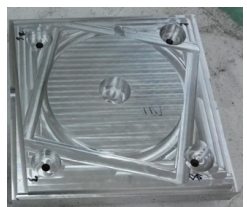
a) 轮廓铣削加工过程



b) 轮廓铣削加工实物



c) 孔系加工过程



d) 孔系加工实物

图9 国家标准方圆试件三轴铣削加工测试

(2) NAS件加工测试 针对NAS件标准要求,进行五轴侧铣综合测试。对数控系统插补周期、加工刀具、数控程序、进给量和主轴转速进行最优化摸索,加工NAS件(见图10)。经检测,加工精度满足标准要求,但是从摸索的情况来看,机床在不同进给速率和不同转速下加工出的产品,其外表面粗糙度存在差异,动态自适应调整功能还需要提高。

(3) S件加工测试 S件加工测试如图11所示,加工精度满足使用要求,但是在平面处出现了小的凹痕。经深入分析,原因是机床在闭环状态下增益调不上,需要通过改善机械摩擦力进行优化。

采用国产华中数控系统HNC848,各伺服驱动电动机全部采用配套国产电动机,X、Y、Z三个线性轴进给速度分别达到15m/min、12m/min、8m/min,复合摆头5r/min,实现回转工作台5r/min铣削和150r/min的车削控制。采用RTCP五轴刀心编程控制,完成了基于UG NX模式的五坐标联动铣削+立式端面车削+卧式外圆车削的车铣复合自行切换,实现了国产机床的安全自主可控。

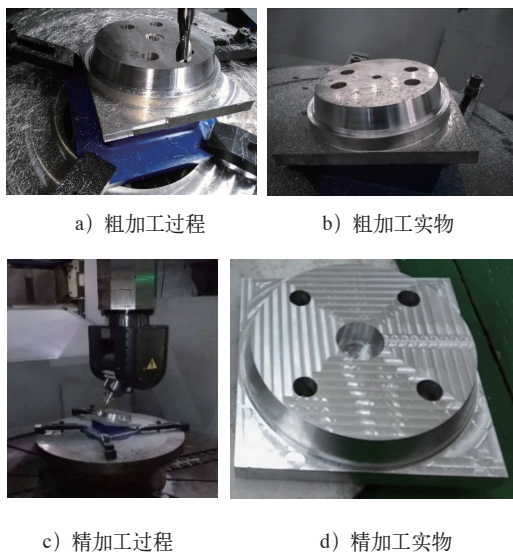


图10 NAS件加工测试

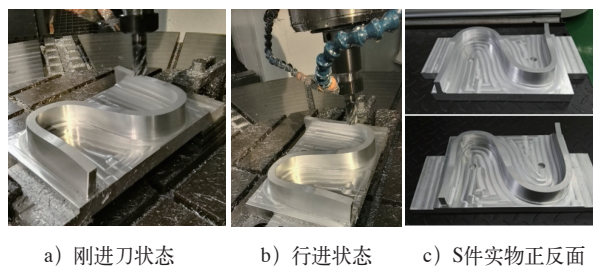


图11 S件加工测试

采用力矩电动机直接驱动A/C主轴摆头,配备HSK A63主轴刀柄,通过20kW的主轴电动机及37N·m的恒扭矩进行切削,既可以实现铝合金、复合材料的高速精密切削,也可以实现不锈钢、钛合金、高温合金等难加工材料的精密切削。

5 大型主轴复合摆动式铣车复合加工中心应用验证

5.1 总体结构

大型主轴复合摆动式铣车复合加工中心(见图12)配备国产华中数控系统HNC848,采用高精密光栅尺、圆钢栅尺,全闭环位置反馈控制。机床床身、立柱、横梁、滑座、旋转工作台和主轴箱等主要基础件及关键结构件均采用铸造结构,确保机床具有高的刚度和良好的精度稳定性。X、Y、Z直线轴均采用高精度直线导轨支承,移动由伺服电动机带动高精度滚珠丝杆来实现,对直线导轨和滚珠丝杠采用双层防护,以防止加工粉尘的污染。铣车复合旋转工作台支承采用交叉滚子轴承,驱动采用双电动机带动变速齿轮箱驱动工作台旋转,工作台在车削工作时提供主切削力,在铣削工作时可实现数控旋转分度。主轴系统采用B轴摆动头,使主轴实现立、卧转换(见图13)。安装车刀和旋转刀具的主轴具有车、铣复合功能,可实现车、铣加工;主轴配备HSK A100高速铣削刀柄及CAPTO车削刀柄;设备主轴转速可达到10000r/min;机床左侧配备40把链式自动换刀装置,换刀时间<5s。



图12 大型主轴复合摆动式铣车复合加工中心

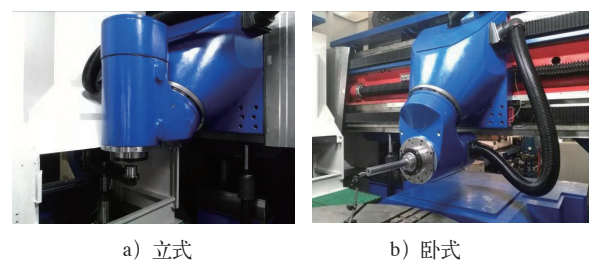


图13 主轴立卧转换

5.2 综合加工测试

针对该非正交坐标系统的特种结构形式五坐标机床,通过主轴立式和卧式两种方式同时进行标准三轴方圆试件加工(见图14),该方式可以通过检测结果有效推测出摆动头的动态摆动精度,两种状态下的检测结果均合格。然后进行NAS件及S件加工测试,试切的NAS件及S件(见图15、图16)均满足精度指标要求。



图14 方圆试件立式及卧式加工

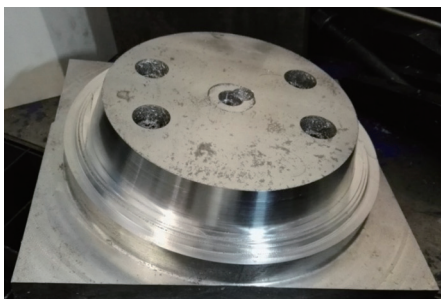


图15 NAS件试切

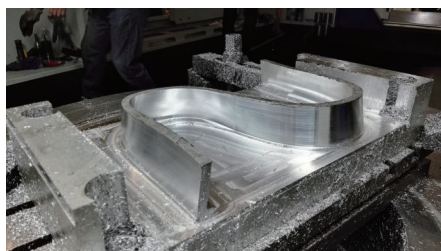


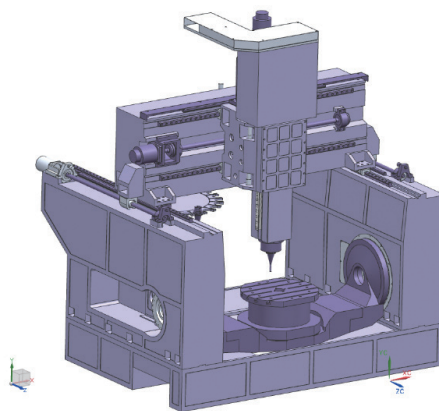
图16 S件试切

大型主轴复合摆动式铣车复合加工中心采用国产华中数控系统HNC848,各伺服驱动电机全部采用配套国产电动机, X 、 Y 、 Z 三个线性轴进给速度分别达到15m/min、12m/min、10m/min,复合摆头5r/min,实现回转工作台5r/min铣削和200r/min的车削控制。采用RTCP五轴刀心编程控制,完成了基于UG NX模式的五坐标联动铣削+立式端面车削+卧式外圆车削的车铣复合自行切换,实现了国产机床的安全自主可控。采用力矩电动机直接驱动 A/C 主轴

摆头,配备HSK A100主轴刀柄,通过20kW的主轴电动机及201N·m的恒扭矩进行切削,既可以实现铝合金、复合材料的高速精密切削,也可以实现不锈钢、钛合金、高温合金等难加工材料的强力切削。所加工的NAS件和S件均检测合格,满足航空航天产品五轴联动加工需求。

6 桥式龙门摇篮式五轴加工中心应用验证

图17所示的摇篮式五轴加工中心采用双立柱小龙门框架式结构,配备国产华中数控系统HNC848。机床 X 、 Y 、 Z 三轴行程分别 ≥ 1600 mm、800mm、800mm; C 轴 $-360^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 连续; A 轴 $-15^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 连续;主轴最高转速 ≥ 12000 r/min;定位精度 ≤ 0.008 mm;重复定位精度 ≤ 0.005 mm;回转轴定位精度10",重复定位精度7";倾斜轴定位精度12",重复定位精度8";快移速度 ≥ 24 m/min。其加工的NAS件及S件(见图18)经检测全部合格,满足航空航天五轴小型零部件精密高效加工的需求。

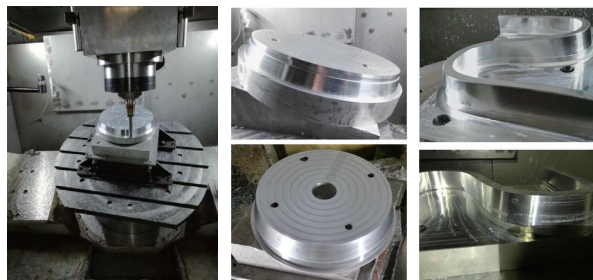


a) 三维模型



b) 实物外形

图17 摇篮式五轴加工中心



a) NAS件加工过程 b) NAS件半精加工实物 c) S件加工实物

图18 摇篮式五轴加工中心NAS件及S件加工测试

7 结束语

本文采用国产华中数控系统在A/C摆头五轴机床、单摆头五轴机床、复合摆头五轴机床、摇篮转台五轴机床四类典型五坐标高档机床上，分别加工测试国家标准方圆试件、NAS件及S件，均达到合格要求。结果表明，国产华中数控系统符合五轴机床的综合性能测试指标的要求，可以满足各行业五轴高档机床的数控系统需求。对标国外部分进口高档数控系统的先进功能，国产数控系统在高速高精插补控制、动态监测与碰撞控制、智能化加工控制、多轴联动高速高精插补控制、数控程序手动操

作控制、基于特征的循环编程、多坐标联动刚性攻螺纹以及系统操作界面等方面，均可以达到国外高档数控系统同等水平。

参考文献：

- [1] 王华侨, 张颖. 数控机床设备选型及其应用指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 王华侨, 张颖. 实用数控加工技术应用与开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 王华侨, 明先承, 张颖, 等. 航空制造车铣复合加工应用研发进展[J]. 金属加工 (冷加工), 2020 (5): 4-8.
- [4] 王华侨, 谢萍, 高俊红. 数控刀具在航空航天工业中的应用[J]. 金属加工 (冷加工), 2013 (15): 15-18.
- [5] 王华侨, 张颖, 钟志胜. 数控车铣复合加工中心典型设备选型对比应用 (上) [J]. 金属加工 (冷加工), 2012 (22): 38-41.
- [6] 王华侨, 张颖, 钟志胜. 数控车铣复合加工中心典型设备选型对比应用 (下) [J]. 金属加工 (冷加工), 2012 (23): 34-36.

MW 20210920

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领域专业视频号，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

