

面向航空领域数控系统关键技术研发与应用*

Key Technology Development and Application of CNC System in Aviation Industry

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 刘本刚 房志亮 方柏鑫

[摘要] 针对航空领域关键零件的加工特点,在开展高档数控系统高速高精控制、五轴机床校验和优化补偿等关键技术研发基础上,面向航空领域进行国产高档数控系统的应用验证与示范。目前,共完成了20套国产高档数控系统的安装调试,经试切合格后已全部投入正式生产,成功替代了进口系统,实现了国产高档数控系统在航空领域生产应用中的重大突破。

关键词: 航空制造 国产数控系统 五轴联动 S 试件

[ABSTRACT] Based on high speed and high precision control, five-axis machine tool calibration, optimization of compensation and the development of other key technologies, the performance of domestic high-end CNC system is validated. After that, according to the processing characteristics of key works in aviation industry, the application of CNC systems in the field of aviation is demonstrated. Currently, with installation and commissioning of 20 domestic high-end CNC systems completed, they all have been put into full production after passing the test. It means they have successfully replaced the imported systems, which makes a major breakthrough of the application of domestic high-end CNC systems in the field of aviation.

Keywords: Aeronautical manufacturing Domestic CNC system 5-axis S testing specimen

高档数控系统是国家战略性物资,是高端制造产业链的核心,是决定数控设备功能和性能的关键部件。由于高档数控系统关系到产业安全与国家安全,即使在全球一体化的今天,西方国家和日本仍对中国实行出口限制和监督使用政策,并且有更加严格的趋势以限制中国国防技术的发展。当前,国际形势复杂、地缘环境恶化,国防安全面临挑战,从“考斯克报告”、“伊朗离心机事件”到“棱镜门事件”,似乎都在印证工业控制系统存在巨大的安全隐患。

我国的高档数控系统技术经过几个五年计划的技术攻关,已开始在国内重点企业推广应用。但因缺少成套解决方案,目前国内航空制造企业所使用的数控系统仍以进口为主,即使应用国产数控系统也只在粗加工中使用。因此,在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项中,特别将掌握高档数控系统等关键部件核心技术作为专项“十二五”的重点任务,并将全数字高档数控系统、飞机结构件加工生产线作为标志性成果。同时,其他相关重大专项和重大工程的开展对国产数控系统,特别是对满足航空等领域的国产高性能数控系统提出了前所未有的迫切需求。

1 面向航空领域的国产数控系统解决方案研究及关键技术开发

在航空制造领域,因加工工件的复杂性,要求数控系统厂商具有系列化产品的同时,应能提供成套解决方案,如 Siemens 公司基于其 840D 产品形成的面向航空领域的成套解决方案(SINUMERIK for Aerospace)。目前,国产系统已在关键技术研发和五轴联动高档数控系统应用方面取得了重大阶段性成果。

1.1 高速高精度加工控制技术

(1) 高速高精集成控制技术。

数控加工追求的是高速、高精和高表面质量,但在实际加工中,它们相互制约,并不能同时达到最优。若将加工类型与不同需求相匹配的加工工艺组合起来,即可组成一个高速加工循环。该循环为3种不同的加工需求分别设置与之相适应的加工策略,使用时仅需根据需求调用一个预定义的程序指令即可自动实现相关的参数设置和加工工艺匹配。国内现有的数控系统并不支持该功能,且现有对速度规划算法的研究大都仅考虑当前路径的速度平滑过渡,未考虑相邻轨迹间的关系,导致轨迹间相邻点速度差异较大,影响了加工表面的质量^[1]。针对上述问题,建立如图1所示的高速加工循环以及专家系统数据库,实现系统加工参数的自适应调整。

其中,粗加工模式针对航空结构件中铝合金材料去除率大的要求,采用效率优先的加工策略,首先对加工路径动态链接,然后通过微小程序段预处理技术提高转

* “高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项(2013ZX04012-021)资助。

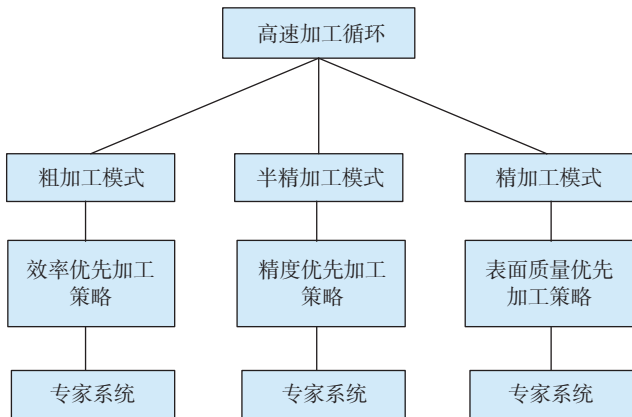


图1 高速加工循环结构

Fig.1 Structure of processing cycle with high-speed

角过渡速度,并采用速度优先插补技术加工链接后的路径。半精加工模式针对加工精度要求,采用精度优先的加工策略,首先采用程序段压缩技术,将多个程序段压缩成平滑的样条曲线,然后采用S曲线加减速控制方法对生成的样条曲线进行插补。精加工模式针对加工表面高质量的特殊要求,采用表面质量优先的加工策略,首先对加工路径做光顺处理,然后在插补时利用相邻加工路径之间的相似性,实现了相邻路径间速度的平滑过渡。专家系统数据库能在不断加工的过程中训练该系统,进而实现加工参数的自适应调整。

(2)平滑矢量控制技术。

线性插补通过控制旋转角度的线性变化完成旋转轴的插补运动,由于旋转轴角度与刀轴矢量间的非线性关系,刀轴矢量偏离加工表面产生非线性误差^[2]。在航空薄壁件外轮廓加工时(精度要求: $(1.6 \pm 0.01) \text{ mm}$),表面会产生周期性的起伏。平面矢量插补算法是旋转轴在相邻刀位点之间插补时,保证刀轴矢量按线性变化,完全修正了旋转轴角度线性插补产生的非线性误差,原理见图2。不同插补算法仿真结果对比如图3所示。

但是矢量插补存在以下问题:

- 在五轴联动加工中,刀轴矢量的平滑过渡不能保证旋转轴的平滑运动,尤其是当刀轴矢量接近机构奇异点时会引起旋转轴的剧烈震动,导致伺服报警,甚至损伤机床部件。如图4所示是采用线性插补和矢量插补时,在奇异点附近的旋转轴角速度曲线^[3]。

- 工件坐标系下矢量编程无法考虑机床的实际运动性能,如果进给速度较大,会导致刀具矢量较大变化,对机床的旋转轴运动产生较大冲击^[4]。

针对以上问题,在数控系统内实现了旋转轴矢量平滑控制功能,如图5所示, p 为加工位置刀具中心总位置矢量, q 为该处刀轴方向矢量。在矢量插值基础上,根据刀具姿态误差要求,通过增加线性插补段来实现五

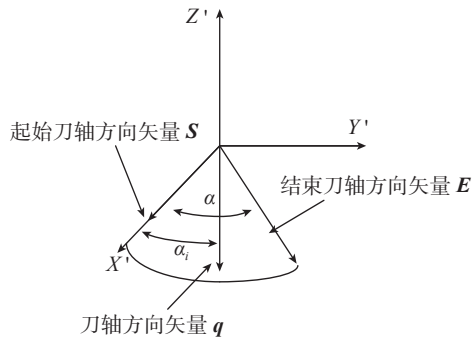


图2 刀轴矢量平面插补原理

Fig.2 Principle of plane interpolation for tool orientation

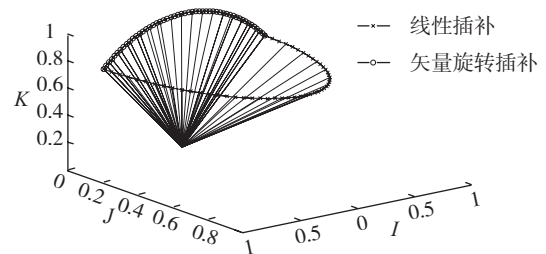


图3 空间刀具姿态示意图

Fig.3 Diagram of space tool posture

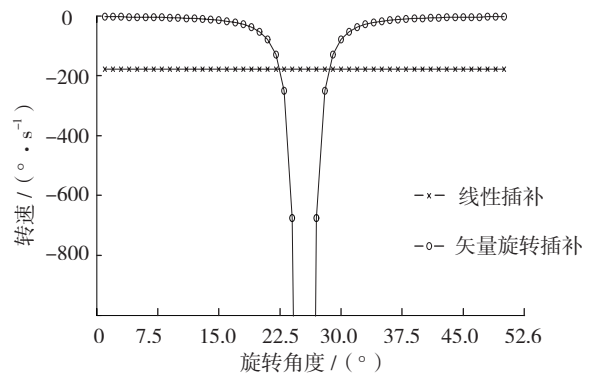


图4 旋转轴C轴角速度曲线

Fig.4 Angular velocity curve of rotation axis C

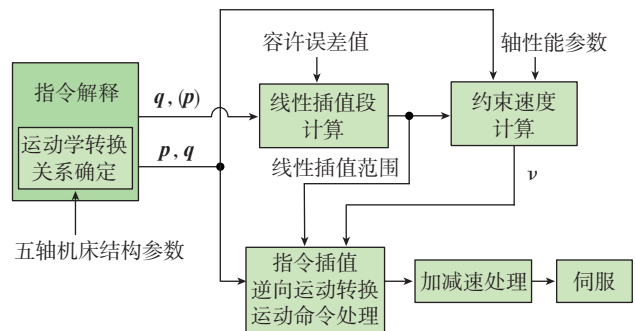


图5 控制器中的矢量平滑控制过程

Fig.5 Vector smoothing control process in controller

轴加工过程中刀轴矢量的连续平滑控制。采用了3项关键技术:

- 五轴数控系统刀心点插补路径插值方法:综合考虑机床动力学约束和加工路径约束,通过在实时插补中

完成工件坐标系下编程指令到机床控制点的转换,来实现平稳的五轴加工刀具中心点插补;

- 五轴加工刀具空间姿态误差分析;
- 基于刀具姿态误差控制的矢量插补,通过在矢量插值过程中插入线性插补段来保证奇异点附近矢量插补的平稳连续。

试验表明,使用矢量平滑处理后的旋转轴速度波动明显变小,在保证肋板精度的同时,矢量插补时间由 5.6s 缩短为 5s。

(3) 光滑 TCP 控制技术。

现有五轴数控系统依据 CAM 系统获得的微小多面体创建 CNC 程序段,并采用旋转轴跟随线性轴的插补方式来实现五轴高速加工^[5]。该方式实现简单,但由于未考虑机床轴速度平滑、加工稳定性等因素对加工质量的影响,在实际加工中易出现以下问题:

- 超出机床转动角速度与角加速度的限制;
- 进给速度与加速度的不连续性,导致工件平面出现棱角或波纹、机床加工误差大、加工效果粗糙等问题^[6];
- 加工中旋转轴的频繁加减速变化。

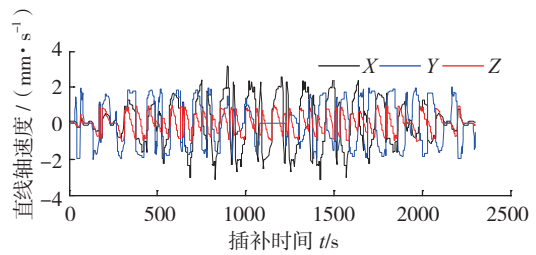
针对该问题,提出了基于旋转轴位置修正的高速光滑 TCP 方法,流程如图 6 所示。

其中,对加工指令的扩充,能够根据不同的加工工艺要求采用对加工指令点进行平滑处理。待修正区域的确定主要根据加工精度要求和机床旋转轴最大角速度与角加速度限制,确定刀具姿态误差最大值和对应旋转轴转动幅度与转动速度限制条件,将不满足上述条件的区域确定为待修正区域。旋转轴位置修正对待修正区域依据等幅旋转法则实现旋转轴位置修正。轨迹重计算是在保证刀具切触点坐标不变的情况下,依据修正后的旋转轴

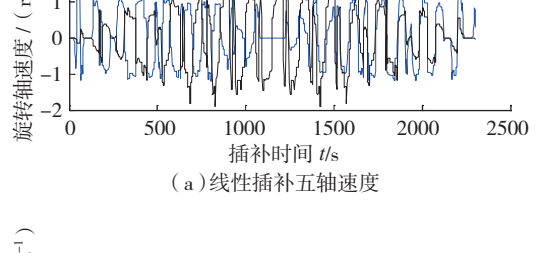
角度,重新计算各刀具切触点处刀轴矢量值。

以叶轮一个叶片为例,采用不同算法对叶片进行加工时的非线性加工误差曲线、五轴速度曲线如图 7 所示,性能参数对比见表 1。

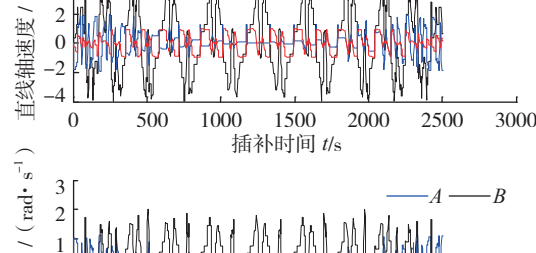
结果表明,采用 TCP 光滑控制技术明显减小了非线性



(a) 线性插补五轴速度



(b) 线性加密法五轴速度



(c) 本方法五轴速度

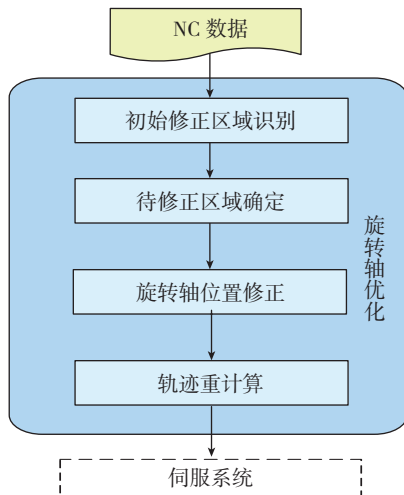


图6 算法流程图

Fig.6 Flow chart of algorithm

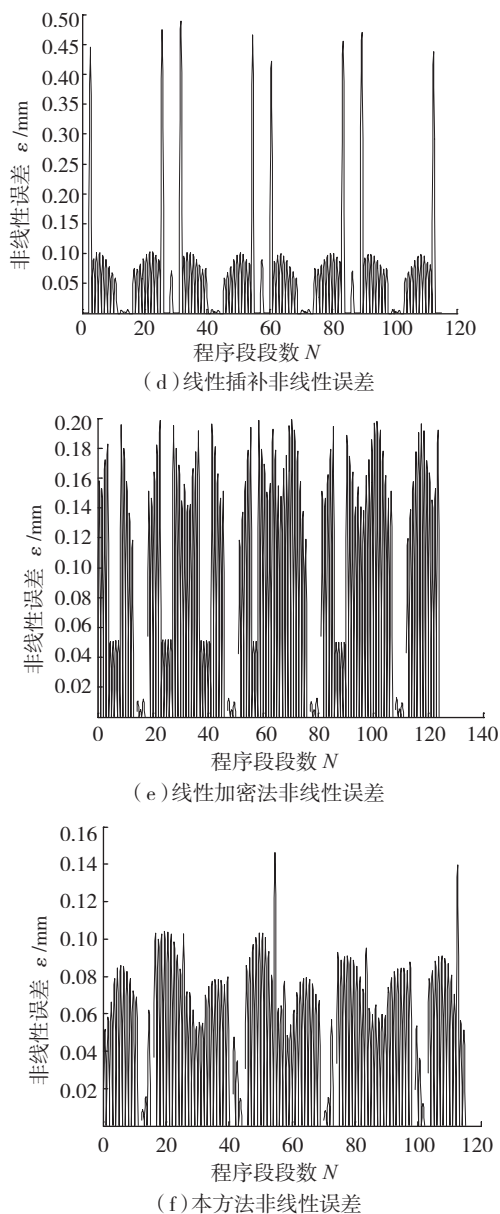


图7 五轴速度曲线及不同算法非线性加工误差
Fig.7 Five-axis speed curves and machining error of different nonlinear algorithms

表1 不同插补算法性能对比表

插补算法	线性插补算法	线性加密插补算法	高速光滑TCP方法
最大非线性误差/mm	0.4610	0.2	0.1426
加工周期数/个	1150	1252	786
加工耗时/s	2300	2504	1572

性误差,提高了加工精度,还避免了旋转轴速度变化引起频繁加减速等,提高了加工效率。

1.2 配套应用技术研发及应用

(1) 五轴机床校验与优化补偿技术。

五轴 RTCP 加工时,加工程序基于没有误差的机床

结构模型和工件的基准位置^[7],但在实际加工中存在机床结构机械误差,如主轴旋转中心的同心度偏移、旋转轴中心位置误差等结构性误差(图8);工件安装位置误差如图9所示。

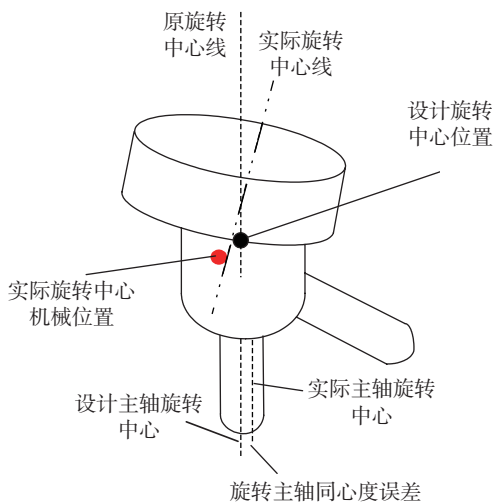


图8 五轴机床结构误差
Fig.8 Mechanical structural error of five-axis machine tool

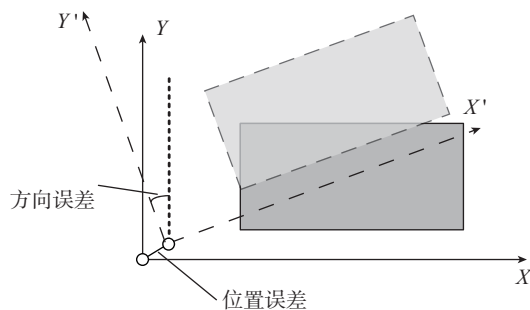


图9 工件安装误差示意图
Fig.9 Installation error diagram of workpiece

针对上述问题,提出了一种智能误差补偿方法。通过对测量出的空间内刀具运动轨迹进行回归分析,计算出各参数实际位置与基准位置的偏离矢量,并自动输入到结构补偿参数表中,由数控系统自动完成补偿(图10)。解决以下问题:

- 运动测量循环指令扩充可以方便快捷地对机床结构误差进行校对,同时系统对测量结果进行记录保存;
- 结构误差智能求解方法主要是根据运动测量循环得到的刀具相对于机床空间的实际运动轨迹,使用智能回归方程进行回归分析,求机床实际结构相对于基准结构的位置偏置量,并输入到机床结构补偿参数表中;
- 工件位置测量循环指令扩充可以快捷地确定工件是否夹紧和工件实际装夹位置与编程时的工件基准位置的位置和方向误差,确定装夹工件坐标系相对于编程基准坐标系的原点偏移量、方向偏移量;
- 工件位置误差补偿方法主要是根据编程指令计

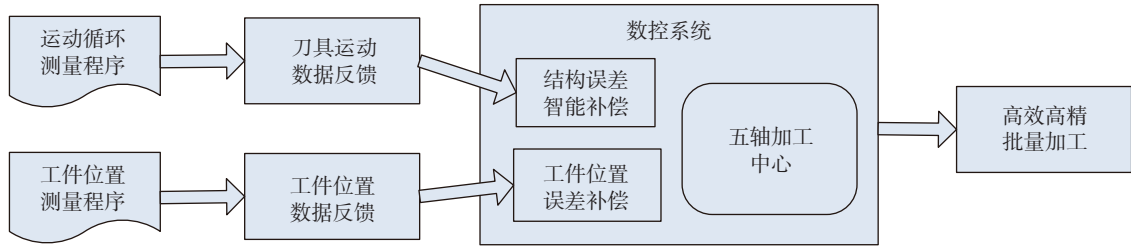


图10 机床结构与工件位置误差补偿流程图

Fig.10 Flow chart of mechanical structure and installation error compensation

算出刀具的位置和方向,结合测量出的工件位置偏移量进行编程坐标系重新定向,并对旋转轴进行最优运动求解,自动调整加工过程,缩短工件找正时间。

(2) 参数在线调试与优化技术。

伺服系统通常采用更复杂的控制方法来提高控制效果,在工程上根据实际工况需要调整的参数越来越多,且参数相互影响,关系复杂,所以要使伺服达到好的控制效果,调整参数是一项细致而且繁琐的工作,对技术人员要求比较高。为此,提出了一种采用重要参数识别和最优调整算法相结合的技术来解决伺服参数调整中的难点问题。

重要参数识别对伺服系统运行数据进行实时采集和分析。利用自适应辨识器来实现惯量辨识,利用负载扰动观测器实时观测负载扰动的变化,利用机械分析器获取振动特性,这些信息将成为参数调整算法的输入。最优调整算法对伺服参数进行最优化调整。根据重要参数识别所获取的信息,利用与受控对象等效的模型和整定机构,进行参数实时自调整,以使指定的伺服参数达到最优。将优化后的伺服系统参数保存并提供给用户,以作参考或进行人工二次特殊调整。

1.3 基于国产数控系统的 DNC 网络监控技术开发

网络 DNC 系统采用 B/S 与 C/S 架构,利用现有硬件设施接入。该系统重点解决以下难点:(1)数控系统网络化功能接口。(2)分布式程序网络化传输管理系统。采用高性能易扩展的软件架构,构建分布式程序网络传输服务器和客户端,满足数控系统加工程序高速、稳定的远程传输需要。(3)车间机床状态实施采集与监控系统,包括车间整体机床实时状态监控,单台机床实时监控等。(4)统计分析系统,包括设备利用率、故障统计和档案管理等功能。图 11 是基于以上开发的 DNC 系统界面截图。

2 国产高档数控系统在航空领域生产中的应用及最新进展

作为数控机床的“大脑”,数控系统历来是制约我国制造业向高端发展的技术瓶颈。为尽快实现国产高档

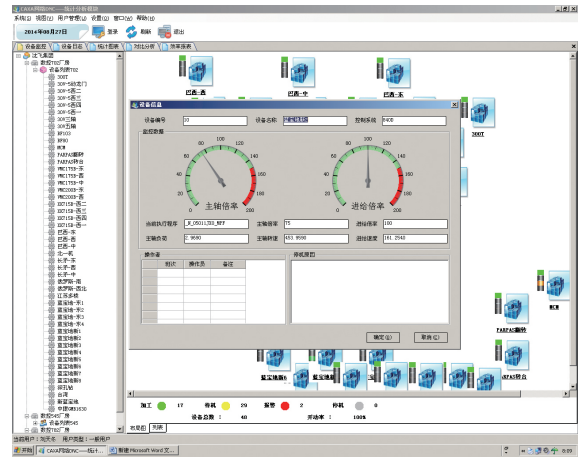


图11 DNC分析模块界面

Fig.11 Analysis module interface of DNC

数控系统在航空领域的应用,以现场运行的进口数控机床作为国产高档数控系统的应用对象,开展系统功能、性能应用验证,逐步替代进口系统。

2.1 国产数控系统在航空领域的应用示范

2013年2月,使用华中8型数控系统(图12)和电气系统完成了第一套进口三坐标立式加工中心(图13)的国产化数控系统替代。该加工中心已连续在生产线上使用14年,精度已基本丧失。系统替代后,该加工中心实现了全闭环控制,定位精度达到5μm,经NAS件试切合格后已投入正式生产。该套数控系统的成功应用



图12 华中8型操作界面

Fig.12 Operation interface of Huazhong 8



图13 进口三坐标加工中心

Fig.13 Imported three coordinates processing center

填补了国产数控系统在航空关键零部件制造应用中的空白。

2.2 首套五坐标国产数控系统在航空结构件加工中应用成功

基于前期 19 台不同型号三坐标加工中心国产化数控系统替代的经验,2013 年 12 月起,对 90 年代进口法国 FOREST-LINE 公司的大型双龙门五坐标铣床(原数控系统 SIEMENS-840C)进行系统国产化替代,该机床曾是航空结构件加工的核心设备,如图 14 所示。



图14 FOREST-LINE公司的大型双龙门五坐标铣床

Fig.14 Large-scale five-axis milling machine with double gantry of FOREST-LINE company

此次采用华中 8 型 848C 系统,在上述关键技术研发上,该系统还使用了双轴同步控制技术、多种 RTCP 机床结构技术等,最终使机床性能、加工精度及稳定性恢复到了原机床出厂水平,经过标准 S 件试切检验,精度达 0.08mm,如图 15、16 所示。其五轴联动加工的静态和动态精度满足了对复杂航空结构件的加工精度要求,这是国产五轴联动高档数控系统在航空制造业中应用成功的首例,替代了进口高档数控系统,实现了国产五坐标高档数控系统在航空领域生产应用中“零”的突破。

3 结束语

国产高档数控系统成功替代进口系统,为国内航空



图15 系统替代后S件试切试验图

Fig.15 Testing chart of S workpiece by system replaced



图16 试切试验加工的S试件

Fig.16 S component by test processing

企业探索了一条替代进口数控系统以及系统深度应用开发的新途径。随着国产高档数控系统关键技术解决能力不断提升,系统应用性能会越来越高。国产数控系统与进口系统相比,具有显著优点:国产数控系统是全文中文操控界面,易于学习、掌握操作技巧;其次,国产数控系统操作符合国人逻辑,这为现场安装调试和维护提供了极大便利;更重要的是,国产数控系统能够开放足够多的数据交换接口,使系统功能扩展非常灵活、方便,还可避免植入后门程序等,保证系统软件纯净,极大提高了加工数据的安全性。此外,国产数控系统技术服务与支持非常便捷。同时,在经济效益方面优势突出,国产数控系统的性价比非常高。

参考文献

- [1] 盖丽蓉,林浒,黄艳,等.五轴联动数控加工中的微小程序段插补方法.小型微型计算机系统,2009,30(12):2374-2377.
- [2] 杨旭静,周元生,陈泽忠,等.五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析及控制.机械工程学报,2012,48(3):140-146.
- [3] 郑颺默,林浒,盖荣丽,等.五轴数控系统旋转轴快速平滑插补控制策略.机械工程学报,2012,47(9):107-111.
- [4] 樊留群,齐党进,沈斌,等.五轴联动刀轴矢量平面插补算法.机械工程学报,2012,47(19):158-162.
- [5] 叶佩青,赵慎良.微小直线的连续插补控制算法研究.中国机械工程,2004,15(15):1354-1356.
- [6] 周艳红,周济,周云飞,等.五坐标数控加工的理论误差分析与控制.机械工程学报,1999,35(5):54-57.
- [7] 樊曙天,杨伟平.双转台五坐标机床 RTCP 功能的研究.制造技术与机床,2009,12:74-77.

(责编 亿霖)