

AB 双摆角数控铣头运动误差分析*

Movement Error Analysis of AB Bi-Rotary NC Milling Head

中航工业北京航空制造工程研究所 王增新 孙彩霞 李初晔

[摘要] 运用 RTCP 功能获取机床的五轴联动精度,分析了 AB 双摆角数控铣头联动误差的各个影响因素,为关键部件优化设计和整机精度调试提供参考依据,提升相关高档数控机床的自主原创能力。

关键词: AB 双摆角铣头 五轴联动精度 误差分析 RTCP 精度

[ABSTRACT] Based on the method of RTCP, the five-axis linkage precision is obtained. The paper analyzes the various factors of movement error about AB bi-rotary NC milling head, provides some references for the optimum structure design and precision adjustment of the key parts, improves the independent innovative capacity of domestic high-grade CNC machine.

Keywords: AB bi-rotary milling head Five-axis linkage precision Error analysis RTCP precision

五轴联动数控机床是高端制造领域关键配套设备,技术水平直接影响和制约着先进制造技术的发展和运用。双摆角数控铣头是五轴联动数控机床的核心功能部件,其性能和品质代表了高端数控机床的技术水平,日益成为高档数控机床研究的热点和市场竞争的焦点。

双摆角数控铣头,主要分为 AC (或 BC) 双摆角铣头和 AB 双摆角铣头两类。AC 双摆角铣头一般采用谐波齿轮或力矩电机驱动摆角运动,摆角扭矩偏小,结构紧凑,主要应用于以铝合金材料为代表的小切削负载高速数控加工,动态性能好,在高速数控机床领域应用比较广泛。

AB 双摆角铣头一般采用蜗轮蜗杆、齿轮齿条驱动,摆角扭矩甚至可达数万 N·m,主要应用于以钛合金、高温合金等难加工材料为代表的大切削负载高效数控加工。中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所研制的 AB 双摆角数控铣头(图 1)采用现代设计优化方法和精度保持技术,摆角扭矩大,联动精度高,配备于五轴联动龙门铣床和五坐标立式加工中心,成功应用于航空钛合金复杂结构件的强力数控加工,可替代同类进口设备。



图1 AB双摆角数控铣头
Fig.1 AB bi-rotary NC milling head

1 五轴联动精度的检测

五轴联动精度是高档数控机床性能评价中最重要指标,能够综合反映机床设计、制造、装配、调试及性能优化的技术水平。

五轴联动精度检测一般采用 NAS979 标准圆锥试件加工(图 2)的测试方法。近年来国内航空制造企业发明的“S”形渐变曲面试件加工(图 3)的测试方法广泛用于五轴联动高档数控机床切削精度和性能测试,同时该试件被纳入 ISO 10791-7 标准组作为附加测试件,成为国际标准测试件。试切检验的方法虽能够准确反映机床的实际加工精度,但涉及工艺编程、试件装夹、切削加工、精度检验等多个环节,操作复杂,测试周期长,

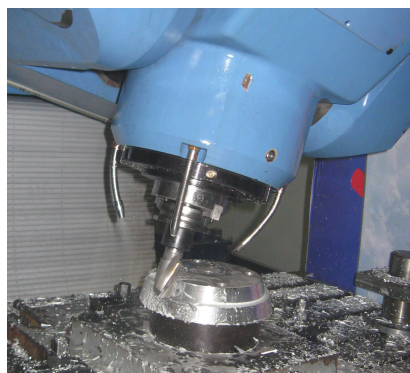


图2 NAS979圆锥试件加工测试
Fig.2 Detection of conical test-piece machining according to NAS979

* 航空基金项目(KZ361304115)资助。



图3 “S”形试件加工测试
Fig.3 Detection of S-shape test-piece

而且检测结果容易被编程轨迹误差、刀具尺寸误差、测量误差等多重因素叠加干扰,使机床本身精度不能准确反映,误差环节难以准确判定,无法对误差原因进行诊断,不适用于机床调试过程中的运动误差分析和调试。

RTCP (Rotation Around Tool Center Point: 绕刀具中心点旋转功能^[1])是五轴联动数控机床刀具旋转中心编程方法。RTCP是针对五轴联动数控机床的刀具旋转中心进行编程,使刀具旋转中心贴合工件加工表面移动,数控系统通过调用刀具长度、刀具半径、旋转中心距等参数生成控制指令,驱动各坐标轴插补运动完成零件的加工。由于刀具轨迹直观反映被加工零件的轮廓形状,数控编程工艺人员和机床操作人员很容易理解和掌握,目前在五轴联动数控机床上应用广泛。

五轴联动数控机床可以借助RTCP功能进行五轴联动精度检测。RTCP运动精度检测(图4)是通过在主轴上安装同轴的球头检具,采用RTCP方式编程驱动各伺服坐标绕球头检具的球心作插补运动,用固定于工作台上的检测元件(百分表或千分表)法向测量球头检具

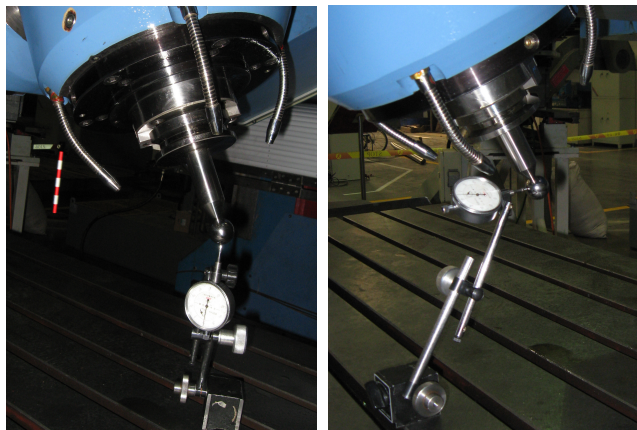


图4 RTCP运动精度检测
Fig.4 Movement precision evaluation by RTCP

的球面获得五轴联动误差。

RTCP运动精度检测方法方便快捷,易于掌握,能够直观反映五轴联动的插补精度,是机床各坐标传动精度、导轨精度、坐标垂直度、机床动态刚性、闭环/开环控制精度、驱动参数、控制参数合理性的综合体现,能够有效避免其他因素带入的干扰误差,是目前五轴数控机床调试过程中经常采用的测试方法。

五轴联动精度调试过程中,运用RTCP运动精度检测方法分别检测球头检具球面底部和两侧面,获得测量数值,通过对数据进行计算分析,结合实际调试经验,对误差进行分解,判定误差因素,采取针对性的措施进行调整,最终获得理想的五轴联动插补精度。检测机床的RTCP精度比较简单,但是由于RTCP精度是五轴联动的一个综合空间精度,涉及多方面的因素,校正其精度则相对复杂,需要针对具体情况分布进行^[2]。

五轴联动精度检测一般是在单个运动坐标精度调试完成后进行的,主要检查部件之间的装配精度、坐标间的插补精度、控制参数优化情况等。常规机床线性坐标的制造、装配、调试已经不存在困难,问题主要集中在部件间的集成、摆角机构的装配调试以及控制参数优化等环节。双摆角铣头的装配和调试是主轴摆头类五轴联动机床精度调试的关键环节,双摆角铣头的运动误差分析是精度调试的前提。

2 AB双摆角铣头的运动误差分析

AB双摆角铣头主要由摆角滑板、传动系统、导向系统、转轴支撑系统、闭环反馈系统、主轴等零部件构成。AB双摆角铣头的运动误差主要包括:摆角机构动态运动的刚性变形、传动误差、导向误差、转轴误差、角度编码器安装偏差、摆角间几何误差等。

摆角机构的主要承力结构件包括垂滑板、摆角滑板、转轴和主轴箱。摆角滑板因结构和功能所限,空间紧凑,形状复杂,结构设计难以实现很高的强度和刚度,故而成为AB双摆角铣头刚度最薄弱部分。为提高摆角滑板的结构刚性,采用现代有限元分析技术进行优化设计(图5),充分利用有限空间对结构进行加强,获得尽可能大的结构刚性,降低对摆角运动误差的影响。

摆角传动系统(图6^[3])由伺服电机、同步带、蜗轮蜗杆、齿轮、齿条组成,其中蜗轮蜗杆为两套同轴布置,中间采用花键连接;远离电机端的蜗杆端部用碟形弹簧施加一定预载,保证与蜗轮同轴的两齿轮同输出端的扇形齿条消除啮合。传动系统误差是各传动元件误差累积产生的。各传动元件对总传动误差的影响,按远离输出端到接近输出端的顺序逐渐加大,其中输出端传动元件误差对整个传动链的影响最大^[4]。摆动执行元件扇

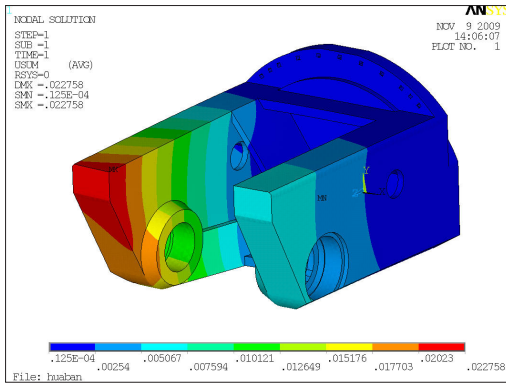


图5 摆角滑板的有限元分析优化
Fig.5 Optimization of swing slide based on FEA

形齿条由于处于传动系统的输出端,对传动精度影响最大,在综合考虑制造成本前提下应尽量提高其精度。

传动精度是传动元件精度、摆角机构加工精度和装配精度的综合反映。为提高传动精度,传动系统需要具有合适的预载,而预载的大小是综合传动元件精度、摆角机构加工精度、装配精度等因素在保证摆角机构传动精度和空载扭矩的前提下依据经验确定的。

A 摆角传动的导向系统采用滑动导轨结构设计,扇形齿条夹在压板和摆角滑板间滑动。A 摆角传动的导向误差主要是摆角滑板、扇形齿条、压板相应接触面的误差。为保证摆角运动的导向精度和精度稳定性,摆角滑板、扇形齿条、压板相应接触面都需要进行人工刮削

并严格检验,不仅要保证接触面的平面度,还要保证尺寸精度,使摆角运动在其垂直方向具有足够的刚性,同时运动平顺流畅。B 摆角运动是靠主轴两侧的转轴支撑于摆角滑板之间,无需导向机构。

转轴的支撑误差包括转轴制造误差、轴承误差、轴孔加工误差和配合误差。制造加工误差可以采取先进的加工手段和严格的精度检验保证。摆角转轴支撑采用进口高精度圆锥滚子轴承,配对安装并进行预紧。回转轴的配合误差必须采用合适的配合公差和适当的轴承预紧来解决,但是配合过紧和预紧过大都会带来回转运动的额外功率损耗,使机床回转轴的空载启动扭矩变大,影响机床的动态性能指标。数控机床回转坐标要获得良好的运行状态,必须通过足够的试验验证使旋转支撑轴获得合适的配合精度和恰当的轴承预紧力^[5]。在保证摆角机构启动扭矩前提下,应尽量增加转轴轴承的预紧,以保证旋转支撑的刚性和精度。

高精度角度编码器安装于摆角转轴的轴端,对摆角的回转运动进行角度检测,为摆角运动的闭环控制提供反馈。角度编码器对安装轴的精度具有较高要求,尤其是同轴度和安装端面的垂直度。同时,角度编码器必须工作在清洁的环境中,其安装结构必须能够有效防护冷却液、切屑、润滑油等。

AB 双摆角铣头要实现高精度,必须使 A 摆角回转轴线、B 摆角回转轴线、主轴回转轴线 3 者垂直相交。

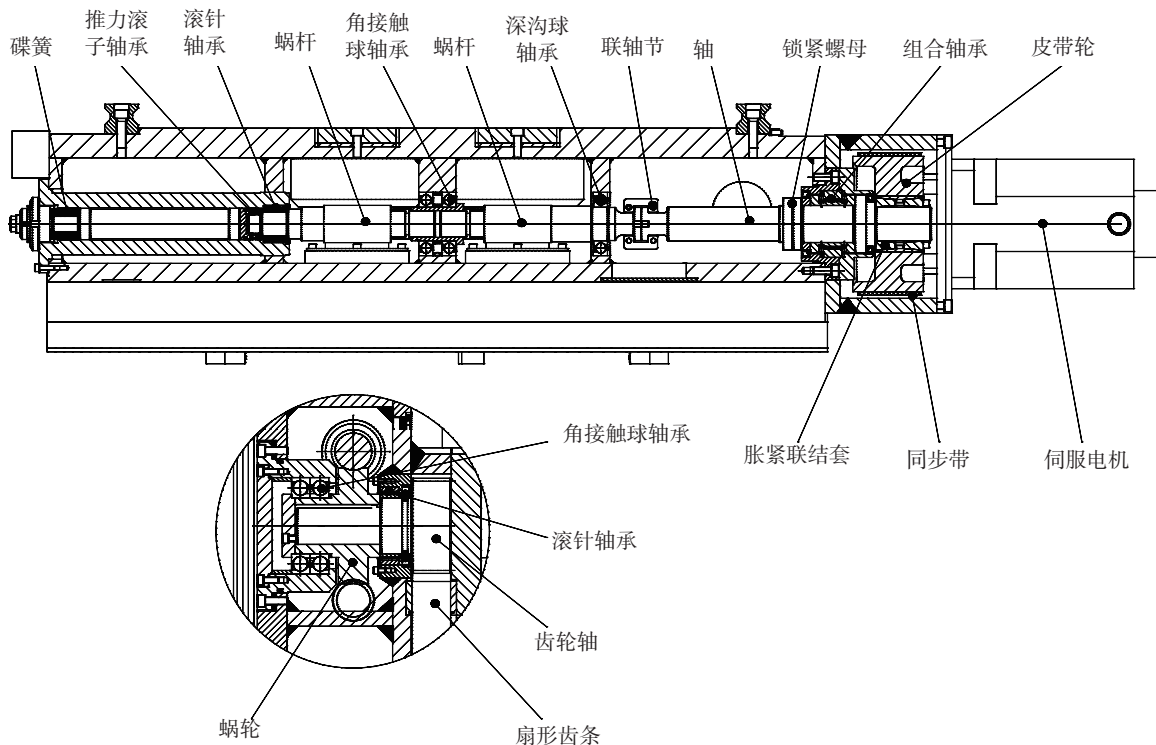


图6 A摆角传动系统
Fig.6 A-rotary drive system

(下转第 85 页)

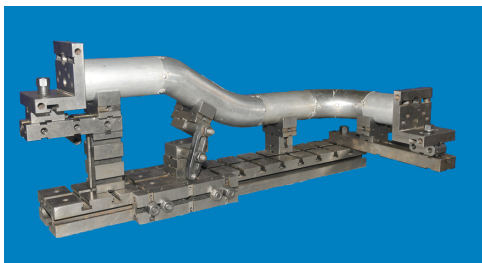


图5 拼装夹具

Fig.5 Assembled fixture

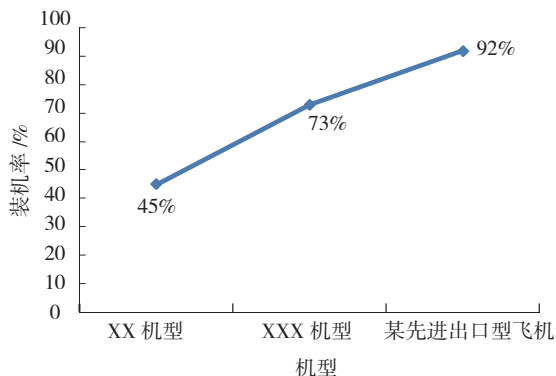


图6 数字化导管装机率对比

Fig.6 Comparisons of tube digital installation rate

飞机全机强度和清洗试验时,导管连接处漏油率仅为1%,正是由于导管数字化制造率的提高,制造精度和产品质量得到明显的提高和改善。装配厂在进行导管安装时几乎没有应力,避免了以前导管由于应力过大在机上补弯曲造成质量不好的现象。导管的数字化制造使导管的连接性能得到极大的优化,实现了导管无应力安装,漏油率降到了最低点。

对数字化导管安装后进行贴片应力试验,试验结果全部符合要求,与以往机型相比合格率有了进一步的提高,数字化导管精度高、质量高的优势再一次体现出来。

5 结束语

导管数字化技术实现了导管三维数模设计、工艺审查、成形制造、零件交检全过程数字化信息的传递,可降低制造成本、缩短飞机制造周期、保证产品质量。导管数字化技术在某新型飞机研究制造过程中取得了成功应用,达到促进航空制造企业数字化技术快速发展的目的。

参考文献

- [1] 毛燕,詹梅.数字化制造技术在ARJ21飞机导管研制中的应用.锻压技术,2008(4):120-124.
- [2] 石坚鲲,马艳玲,张森棠.数字化制造技术在航空发动机产品中的应用研究.航空制造技术,2012(1/2):44-47.

(责编 深蓝)

(上接第82页)

此项精度检验涉及3个部件,装配后的空间精度受误差叠加和重力引起刚性变形的双重影响。装配前单个部件的精度检测无法准确反映装配后的误差,可借助系统的RTCP功能进行检测(图7^[5])。通过对检测数据分析计算,辨识出各误差因素,采取相应措施进行调试。

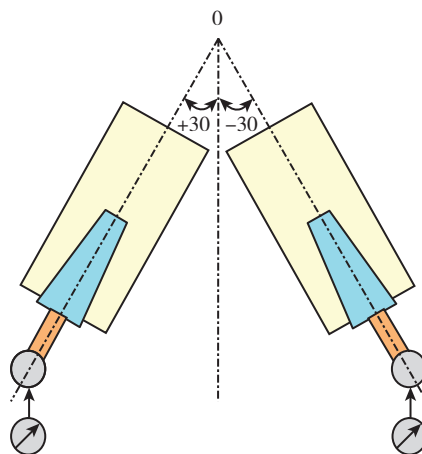


图7 旋转轴线重合度的测量方法

Fig.7 Contact radio measurement method of two rotation axes

3 结论

高档数控机床五轴联动误差的检测与调整是一项异常复杂的系统工程,需要在机床的研制生产和应用实践中不断探索。本文根据实际工作经验,简要分析了AB双摆角五轴联动数控机床的摆角运动误差,为相关类型机床的研制和调试提供参考。

虽然北京航空制造工程研究所研制的五坐标龙门数控机床和五坐标立式加工中心已经有数台成功应用于航空结构件数控加工,并取得良好使用效果,但是关于高档数控机床的五轴联动误差分析和辨识,还有许多问题需要研究和探讨。国产高档五轴联动数控机床设计研发和工程应用水平的提高任重而道远。

参考文献

- [1] 陈劲松. NUM数控系统在五轴插补上的特点.制造技术与机床,2000(6):54.
- [2] 张翔,程志.数控机床RTCP精度的分析.自动化与仪器仪表,2012(5):179-181.
- [3] 王增新,马岩,王茜,等.四坐标数控龙门加工中心进给传动系统设计.航空制造技术,2010(22):114-117.
- [4] 杨文通,李钊,赵永胜.重载摆角铣头摆链传动误差分布规律的研究与分析.现代制造工程,2011(4):66-72.
- [5] 赵宝成,王增新.航空数控机床摆角头回转运动误差分析.航空制造技术,2012(9):45-48.

(责编 深蓝)