

航空数控机床摆角头回转运动 误差分析

Error Analysis of Revolving Movement of Aviation NC Machine Tool Head

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司数控加工厂 赵宝成
中航工业北京航空制造工程研究所 王增新



赵宝成

工程师,长期从事数控机床维修工作,现任中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司数控加工厂数控维修室主任。曾多次出国参加数控设备验收培训,具有丰富的数控设备维修经验。

五轴联动数控机床是航空工业先进制造技术的重要组成部分,在现代飞机研制生产中具有举足轻重的作用。数控机床的精度水平直接影响着航空先进技术的发展,尤其是制约着现代飞机设计中广泛采用的复杂型面大型整体结构件的推广应用。具有优异性能的飞机钛合金结构件

数控机床的回转运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。本文作者根据实际工作经验,浅谈了用于航空领域的数控机床回转轴误差的分析,为相关类型机床相应误差因素的排查提供参考依据,为未来机床先进制造技术的发展尽微薄之力。

的发展,推动了具有强力加工特性的五轴联动数控机床的技术进步,对数控机床的五轴联动精度提出了越来越高的要求。

五轴联动精度的检测

五轴联动精度是数控机床性能评价中最重要的指标,能够综合反映机床的制造技术水平。

五轴联动机床五轴精度的验收检测一般采用圆锥试件切削加工的方法进行检验,如图1所示。但此检测方法需要工艺编程、试切加工和试件检验等环节。这种方法不仅操作复杂、测试周期长,而且容易带入试

件装夹、工艺编程、刀具尺寸和检测等多重误差。由此机床五轴联动的实际精度不能被准确反映出来,误差环节很难准确判定。

RTCP (Rotation Tool Centre Point, RTCP 是五轴数控机床旋转刀具中心编程方法)五轴联动的运动精度检测方法,可以通过对空间任一固定点的旋转运动编程来实现机床五轴插补运算;驱动各个坐标轴联动实现主轴刀具中心绕指定点旋转,实现五轴联动插补的精度检测。

RTCP 的运动精度,综合了机床各坐标轴的定位精度和插补精度,是机床传动精度、导向精度、闭环/开



图1 北京航空制造工程研究所A/B摆角立式加工中心的五轴试切

环控制精度的集中体现,也是对机床的结构刚性、驱动刚性、控制参数合理性等影响因素的综合体现。

RTCP运动精度的检测(图2),是通过在机床主轴上安装球头芯棒,使固定在工作台上的检测元件(如百分表或千分表)沿法向触及球头的

表面,通过编程驱动各坐标绕球头芯棒的球心旋转运动测得。此检测方法实施简单、方便快捷,而且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联动精度检测最常用的方法。

数控机床线性轴的传动一般采用齿轮齿条或滚珠丝杠传动、光栅尺闭环反馈,用激光干涉仪进行定位精度和反向误差的补偿,容易达到准确的定位精度和重复定位精度。数控机床线性坐标轴的误差,一般不是五轴联动误差的主要组成部分。数控机床五轴联动的误差,更多的是回转坐标精度不足导致的。

回转坐标误差分析

数控机床回转坐标精度的测量,在回转坐标能够360°旋转时可以采用多面体棱镜结合激光干涉仪进行,在回转坐标不能够360°旋转时一般

采用倾斜仪或高一个精度级别的圆光栅(或角度编码器)进行,然后对相应的传动系统、轴承支承系统等进行必要的调整和控制参数补偿,得到理想的传动精度。

数控机床回转坐标的精度考核,一般分为定位精度、重复定位精度和反向误差。从数控机床闭环传动的原理分析,误差的产生主要是闭环圆光栅(或角度编码器)的反馈精度、传动系的分度精度、传动环节的反向间隙、回转轴的配合误差、支承轴承和回转零部件的径向跳动、转心距(回转坐标转动中心到主轴端面的距离)测量不准等因素综合作用的结果。

其中反馈元件、传动副和支承轴承的误差因素,可以通过选用精度级别较高的元件来有效解决,回转零件的径向跳动误差可以通过更为严格的机械制造工艺来保证,这些误差因素仅靠机床制造厂商增加相应的生产成本就能够有效避免。

回转轴的配合误差,必须采用更为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承轴获得合适的配合精度和恰当的轴承预紧力。

转心距测量不准造成的五轴联动误差过大,可以修正转心距的数值重复进行五轴联动精度检测验证,以获得准确的转心距。

数控机床回转坐标的运动误差,有相当大的因素是传动环节造成的,主要有传动系分度不均造成定位不准、反向间隙过大导致重复定位精度低和反向误差大。传动系的分度精度可以通过提高相关传动元件的精度来保证;反向间隙则必须对相关机械结构进行调整。



图2 RTCP运动精度的检测

数控机床回转轴的传动机构比较典型的是齿轮传动副和蜗杆传动副,能够通过各种机械手段有效地消除传动环节的反向间隙,以实现高精度的坐标回转运动。

转心距的测量

数控机床回转坐标为主轴旋转的机床,在回转坐标能够 $\pm 90^\circ$ 旋转时,转心距的测量方法如图 3 所示。

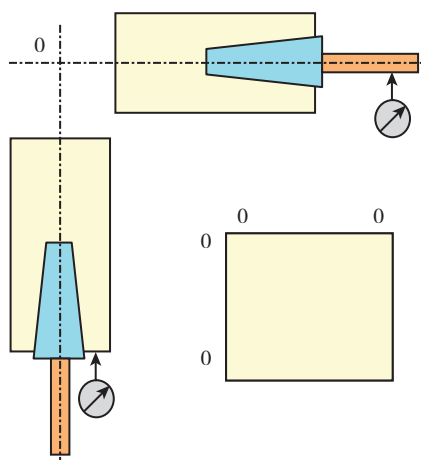


图3 $\pm 90^\circ$ 旋转的回转坐标转心距的测量

首先,将百分表固定于机床工作台上,用百分表和方尺确定主轴的 0° 位置,使主轴芯棒(直径 D)的侧母线与方尺侧面平行,用百分表测量记录主轴端面的 Z 向坐标值 Z_1 ,保持百分表位置不变,用手动操作方式使主轴旋转 90° ,使主轴芯棒侧母线与方尺的相邻面平行;然后,手动操

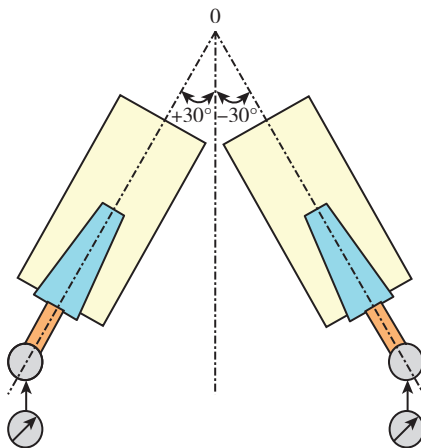


图4 $\pm 30^\circ$ 旋转的回转坐标转心距的测量

作机床相关线性坐标轴运动,使主轴芯棒侧母线最低点触及百分表,记录百分表的 Z 向坐标值 Z_2 ,转心距即为: $Z_1 - Z_2 + D/2$ 。

数控机床回转坐标为主轴旋转的机床,在回转坐标能够 $\pm 30^\circ$ 旋转时,转心距的测量方法如图 4 所示。

首先,将百分表固定于机床工作台上,用百分表和方尺确定主轴的 0° 位置,摆动主轴处于 $+30^\circ$ 位置使安装于主轴的球头芯棒的最低点触及百分表,记录横向坐标值 X_1 ,同时保持百分表位置不变;然后,操作摆动角旋转使主轴处于 -30° 位置并手动操作横向坐标轴运动使安装于主轴的球头芯棒的最低点触及百分表,记录横向坐标值 X_2 ,球头芯棒球心到主轴端面的距离记为 L ,则转心距即为: $|X_1 - X_2| - L$ 。

回转坐标传动系的反向间隙

回转轴为机械传动的五轴联动数控机床,往往在长时间使用后因各种原因使反向间隙变大,影响回转轴的运行精度,直接反映为五轴联动加工的零件尺寸超差、表面粗糙度降低等。

回转坐标传动常

用的消除反向间隙的机械装置,主要有齿轮副和蜗杆副 2 种。

齿轮传动消除机构分为直齿轮、斜齿轮和双齿轮传动 3 种。

直齿轮消除机构为偏心法原理,主动齿轮安装于伺服电机的输出轴上,从动齿轮安装在传动轴上,电机的止口通过偏心套与传动箱体孔配合,通过转动偏心套一定角度改变齿轮的中心距,减小齿侧间隙。

斜齿轮消除机构为轴向位移原理,通过改变齿轮轴上的垫片厚度,减小轮齿的啮合间隙,提高传动精度。斜齿轮垫片消除的另一种机构(图 5),是将相互啮合的斜齿轮中的一个分成两瓣结构,通过调整中间垫片的厚度使两瓣齿轮的轴向距离发生变化,分别贴紧啮合齿轮的轮齿两侧,消除齿轮啮合的间隙。

双齿轮消除机构(图 6),是用安装在一个轴上的 2 个螺旋方向相反

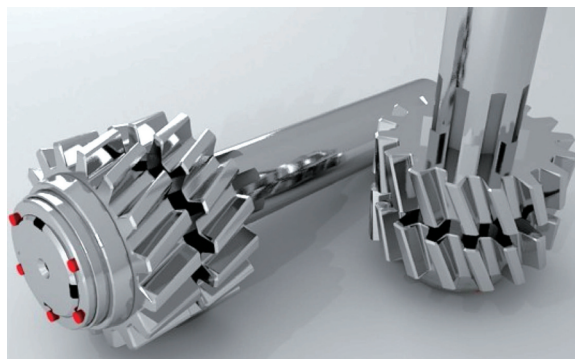


图5 垫片消除两瓣式斜齿轮

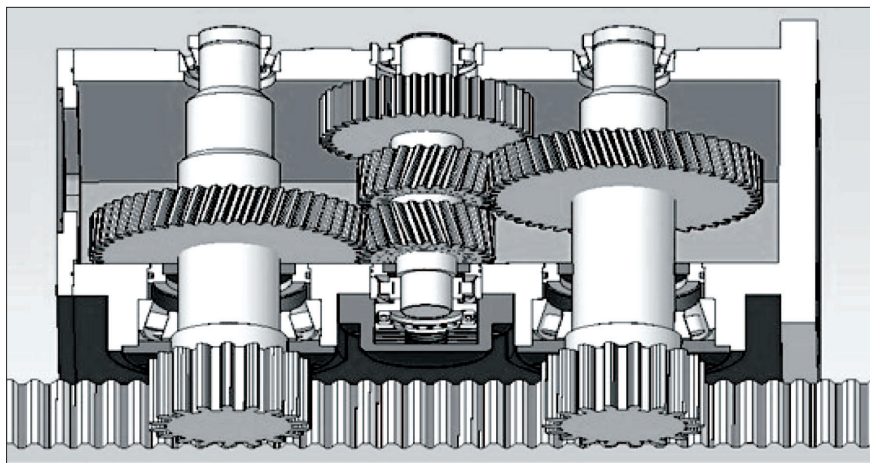


图6 双齿轮消除机构

的斜齿轮,通过预紧分别同另外两斜齿轮啮合输出,同时与从动齿条(或大齿轮)的轮齿两侧贴合进行啮合传动。

以上齿轮传动消隙机构,结构简单、调整方便,但必须保证齿轮的制造精度,且磨损后间隙不能自动补偿。

蜗轮蜗杆传动机构常采用变导程蜗杆蜗轮副、双蜗杆蜗轮副和分体蜗杆副结构等方法。

由于变导程蜗杆蜗轮的加工刀具制造困难,精度不高,采用较少。

双蜗杆蜗轮机构精度好、传递扭矩大,但是占用空间大,设计使用的成本较高。北京航空制造工程研究所研制的五坐标 A/B 摆角立式加工中心(图 7)和意大利 RAMBAUDI RAMMATIC 系列机床(图 8)的摆角传动均采用双蜗杆蜗轮消隙传动机

构,在航空结构件加工中均成功应用。两者区别是前者采用在蜗杆轴端加一定弹性预载,既保证精确传动又能有效避免传动链在切削力异常时的刚性冲击,能够确保摆角传动长期使用仍能保持良好的传动精度,并取得“机械驱动形式的带机械主轴的 A/B 摆角数控万能铣头”专有证书;后者采用一蜗轮旋转微小角度消除与蜗杆的啮合间隙后刚性固定的方式进行精确回转运动,此种消除间隙方法容易随着机床的长期使用磨损而效果变差。

分体蜗杆传动结构如图 9 所示,蜗杆制造成两体结构 1 和 2,中间部分的齿由 C 和 D 2 个半齿组成,装配时蜗杆套 1 固定,蜗杆轴 2 按图示方向转动微小角度,保证使齿侧 C 贴紧蜗轮的齿侧 A、齿侧 D 贴紧蜗轮的齿侧 B,消除啮合间隙。由于改

变了蜗杆传动齿的整体性,传动时啮合齿厚相对减少了一半,传递扭矩较小。目前,西班牙 PM-60 和德国 UNISPEED3 系列机床采用此种结构。

以上机械结构理论上能够有效消除传动误差和反向间隙,但还不能完全满足航空结构件的数控加工精度要求,实际工程应用中还需要通过对控制系统的相关参数进行补偿修正,获得更高的传动定位精度和更小的反向误差。

结束语

数控机床的回转运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。本文作者根据实际工作经验,浅谈了用于航空领域的数控机床回转轴误差的分析,为相关类

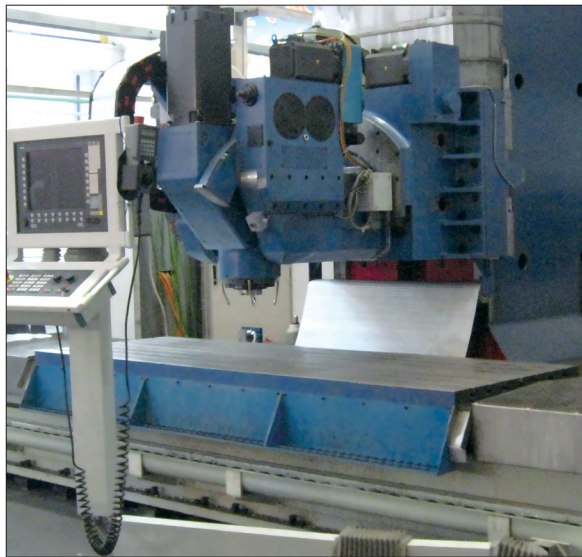


图7 北京航空制造工程研究所 A/B 摆角立式加工中心

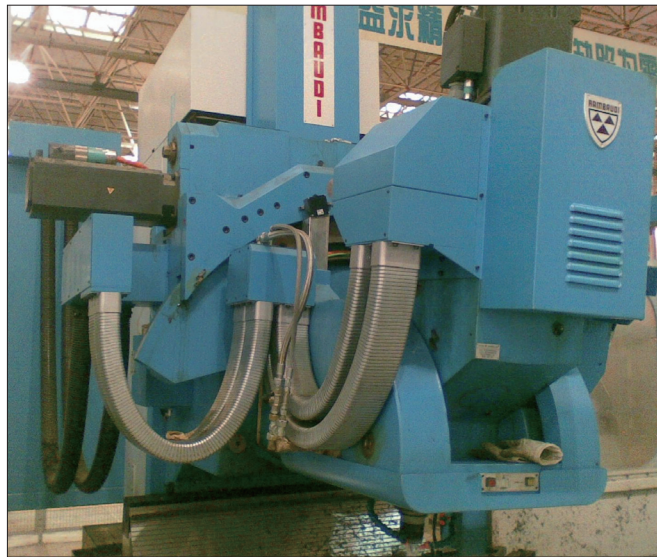


图8 意大利 RAMBAUDI 五坐标立式加工中心

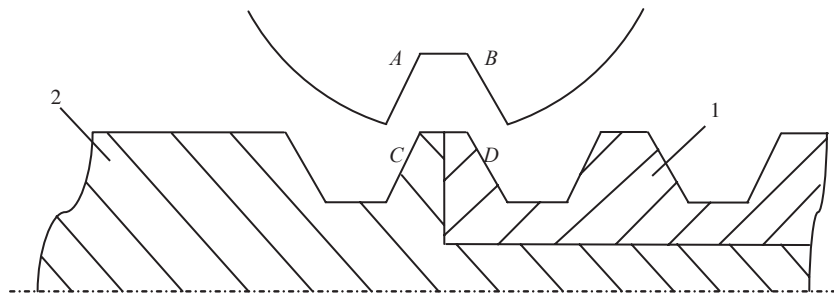


图9 分体蜗杆传动机构

型机床相应误差因素的排查提供参考依据,为未来机床先进制造技术的发展尽微薄之力。

数控机床的五轴联动误差分析,还有许多问题需要研究和攻关。高档五轴联动数控机床在航空先进制造领域的性能发挥和工程应用水平的提高,任重而道远。(责编 三丰)