

叶片六轴联动数控砂带磨床 与数控砂带磨削单元化

6-Axis Hybrid NC Belt-Grinding Machine for Blade and Unitization of NC Belt-Grinding

北京胜为弘技数控装备有限公司 刘树生
华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心 杨建中



刘树生

北京胜为弘技数控装备有限公司总经理,长期致力于叶片多轴加工数控装备研究,主持和参加完成多项国家 863 计划项目,其中国家 863 计划项目“大型汽轮机叶片五轴联动加工中心研制”,获得中国机械工业科学技术一等奖。

随着计算机数字控制技术和磨削技术的迅速发展,叶片型面的数控加工经历了从少坐标点成形到多坐标控制线逼近的发展过程,叶片型面的磨削加工也经历了从手工砂轮打磨、手工砂布抛光、砂轮磨削精加工、砂带液压仿形磨削到多坐标数控砂带磨削加工的发展阶段。

叶片类复杂曲面零件是汽轮机、燃气轮机、航空发动机等能源、动力装置的关键零件,其几何精度和表面质量直接影响能源动力设备的工作效率。相对于航空发动机这个“制造业的皇冠”,叶片更是不啻为“皇冠上的宝石”,叶片零件的制造装备及关键技术代表着国家制造业的核心竞争力。

对动力装置来说,叶片型面是决定其效率的一个重要因素,型面质量的高低影响其能耗水平。因此大量的开发研究工作被花在型面型线设计上,以期从流体动力学上提高动力

装置的效率,用更小的体积来获得更大的输出功率。这导致叶片型面由直面发展到弧面进而发展到扭曲弧面。另一方面,由于型面曲线越来越复杂,叶片加工工艺要求也就越来越高,因而对设备的要求也越来越高。早期的叶片全部是由手工完成的,随着计算机数字控制技术和磨削技术的迅速发展,叶片型面的数控加工经历了从少坐标点成形到多坐标控制线逼近的发展过程,叶片型面的磨削加工也经历了从手工砂轮打磨、手工砂布抛光、砂轮磨削精加工、砂带液压仿形磨削到多坐标数控砂带磨削

加工的发展阶段。

叶片磨削国内外发展趋势

1 从砂轮磨到砂带磨

通常,不复杂的叶片型面加工可采用砂轮磨削工艺方法,复杂叶片型面与难加工材料制造的叶片如钛镍合金和奥氏体不锈钢等,采用砂轮磨就相当困难,这主要是由于:

(1)砂轮易磨损,需要经常修整,线速度不恒定,表面质量不一致。采用CBN砂轮能够避免此问题,但成本过高,效率较低;

(2)对于复杂曲面,由于切削量变化较大,容易烧蚀工件甚至造成挤压破碎引起工伤事故;

(3)对曲面适应能力较差。砂轮为适应小的曲率半径必须做得很小,由此造成加工效率很低,不适合复杂曲面或大型叶片加工;

(4)对于钛合金叶片,砂轮磨削容易造成组织微裂纹,造成安全隐患。

相对砂轮磨削而言,砂带磨削具有易切削和“冷态”切削特性,不破坏机体组织,这在航空叶片抛磨加工中尤为重要,砂带磨削是叶片磨削的发展方向。

2 从手工砂带抛光到多坐标联动数控砂带磨

对于叶片型面加工而言,五坐标叶片铣能够精确加工出型面,一般国内叶片加工企业均已购置了相应的五轴加工机床,加工空间轮廓精度可达0.05mm,对于大多数叶片来说精度要求已经能够很好地满足。但即便是这样精度的叶片最终也将交由一双受体力、情绪控制的手里完成最终的加工,其质量、一致性可想而知。手工抛磨作为叶片型面精加工手段已经成为了叶片行业的瓶颈,迫切需要采用多坐标联动砂带磨床来解决型面精加工问题。

目前,在叶片制造行业,国外已经开发出几种实用的数控砂带磨床

和抛光机,典型的设备是以德国IBS公司为代表的,包括英国Cyril Adams和Rolls-Royce公司,日本三菱重工业株式会社,松田精机株式会社,美国ExCello等公司在内的涡轮叶片砂带磨床和汽轮机叶片砂带精抛光专用机床。此类设备的一大共同点就是均采用多轴联动(基本都是六轴联动)数控砂带磨削加工叶片型面;另一共同点是除IBS公司作为商品销售之外,其余各家均为汽轮机企业、航空发动机企业定向开发的产品,核心技术严格保密,且不向中国市场提供设备。

国内的砂带磨削技术是在20世纪70年代末才开始真正发展起来的。其中以清华大学、华中科技大学和重庆大学为代表,但是除了重庆大学在黄云教授的推动下成立重庆三磨海达公司进行了各类砂带磨削机床的产业化外,其他均限于基础研究层面,普及应用推广、深入研究等方面与国外仍然存在一定差距。在CCMT 2008展会上,由华中数控股份有限公司、北京胜为弘技数控装备有限公司和东方汽轮机有限公司联合参展的TX-6六轴联动数控砂带磨

床(见图1),获得CCMT 2008“春燕奖”,这是国内公开展示的第一台叶片六轴联动数控砂带磨床,具有软硬件和控制系统的完全自主知识产权。目前,该机床已经通过东方汽轮机厂的验收,安装在灾后重建的东汽八角新基地叶片分厂,主要加工对象为600-1000MW汽轮机末级次末级大型叶片。

TX-6 六轴联动数控砂带磨床关键技术

TX-6六轴联动数控砂带磨床的研制,解决了以汽轮机叶片为代表的复杂曲面磨削抛光的技术难题,形成了国内六轴联动叶片数控砂带磨床和相关关键技术的自主知识产权,填补了我国在该项技术上的空白,项目研究成果可用于大推力涡轮风扇发动机叶片的制造,对提高我国能源、动力、国防及重大装备的国际竞争力有着重要的战略意义。相对于已知的国内外同类设备而言,该机具有以下几方面的先进性。

1 高性能机床主机结构设计

TX-6主机设计之初提出了较常规叶片五轴铣更高的动态特性要



图1 TX6-CNC六轴联动叶片型面砂带磨床

求,这是因为叶片铣削一般的进给速度小于 3000mm/min,而砂带磨正常工作时的进给速度不低于 6000mm/min,要实现高效磨削各联动轴必须具有较高的加减速特性,为适应大型叶片型面磨削加工高动态特性响应的需求,在机床结构设计时采取了以下措施。

(1)各直线运动轴均采用 THK 带滚珠保持器的高速导轨,降低了静摩擦力,提高了动态加减速特性;

(2)Y轴、Z轴、A轴采用双驱动结构,提高了各轴的动态响应,提高了叶片加工效率,确保更高的叶片轮廓精度。双驱动部位尽可能靠近部件重心,确保传动的稳定性,从而减少机床振动,使磨削运动更加平稳,改善表面质量;

(3)Z轴双驱动,取消平衡机构,解决了液压或气体平衡装置不稳定性造成的型面误差问题。

按照上述设计宗旨,机床设置 X、Y、Z 三个平动轴和 A、B、C 三个旋转轴。A 轴为工件旋转轴,B 轴为磨削头摆动轴,C 轴为主轴摆动轴。机床底座为整体床身,工作台通过直

线滚柱导轨安装在床身的前部,沿 Y 轴方向运动。头架和尾架安装在工作台上,头架、尾架可在工作台长度方向移动,以适应不同规格尺寸叶片的加工。移动式立柱通过直线滚柱导轨安装在床身的后部,沿 X 轴方向运动。Z 轴滑板兼 B 轴减速箱,通过直线导轨安装在立柱前侧,沿上下方向运动。主轴箱装在 B 轴联接盘上、B 轴联接盘与 B 轴固联在一起。主轴箱可沿 B 轴中心摆动,也可以随同 Z 轴滑板兼 B 轴减速箱沿 Z 轴移动。B 轴上安装中空 C 轴,装置 B 轴上的主轴电机通过砂带传动机构带动砂带运动,同时砂带接触轮可沿 C 轴轴线旋转。图 2 为六轴联动数控砂带磨床结构图。

五轴联动机床设计时经常遇到的问题,是由于有 2 个回转轴的运动,直线轴坐标要有相应的附加行程,而附加行程的大小是由加工对象

的曲面特征决定的,为此 TX-6 的设计中遵循了由枝叶到主干、由局部到整体的顺序,这是完全不同于常规设计的面向加工对象的方法,见图 3。

在对加工对象 40~72 英寸 (101.6~182.9cm) 叶片磨削加工面特

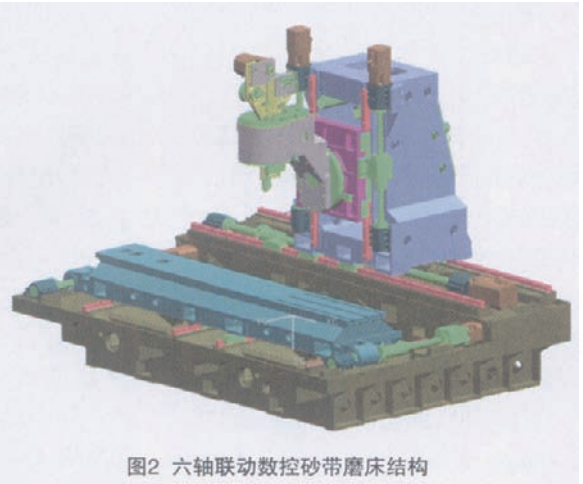


图2 六轴联动数控砂带磨床结构

征分析后,按照最小曲率半径决定的砂带接触轮进行仿真以确定与加工对象由近及远的相关尺寸,即曲面特征决定的可用的最大接触轮直径→接触轮杆的长度→C 轴箱体和夹具干涉区确定→C 轴轴线距立柱箱体距离→C 轴端面距 B 轴轴线距离→

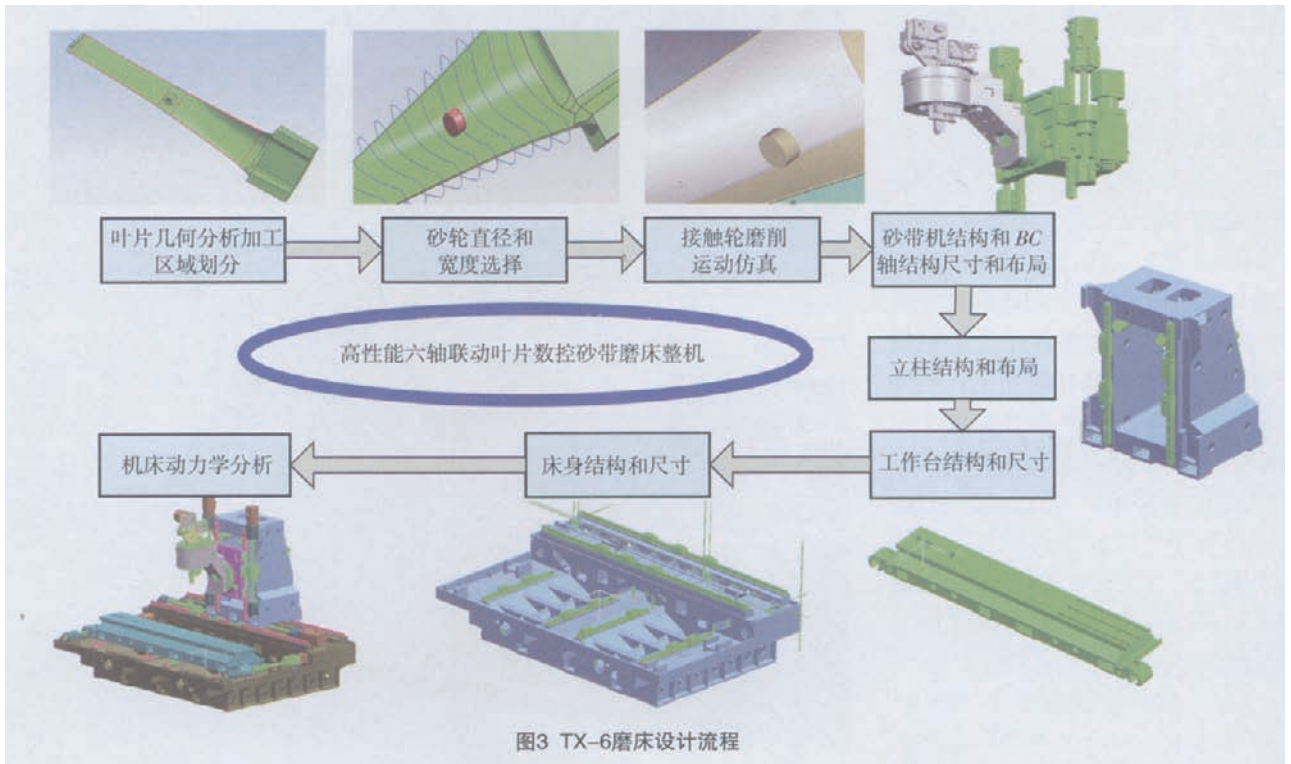


图3 TX-6磨床设计流程

B轴→立柱→工作台→床身→整机三维模型。在此基础上对机床各功能部件进行结构优化设计,包括主要结构尺寸、局部尺寸干涉检查乃至材料选择和截面尺寸的优化等,以满足机床高速运行下的动刚度要求。在原型机研制完成后,通过机床性能测

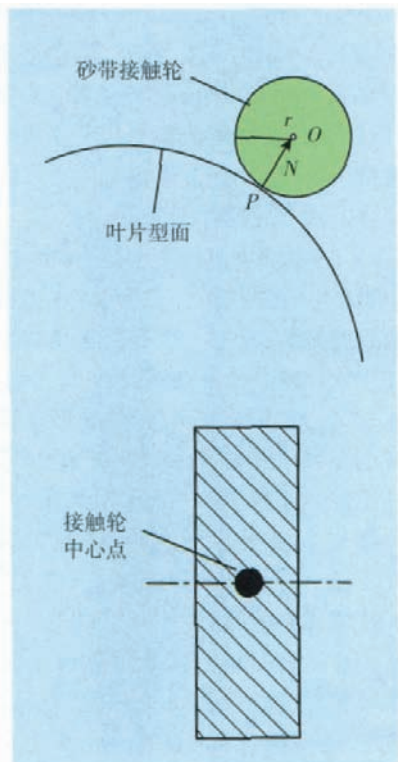


图4 刀位点确定

试试验以及试加工,确定机床的最终性能,同时建立和完善机床各项性能特别是动态性能的测试手段。

2 六轴联动双矢量控制技术

叶片铣削加工时为了获得准确的型面,刀具轴线需要位于被加工点的法向量方向,这是五轴加工的原理,但是对于砂带磨削就不适用了,因为砂带与叶片表面是线接触,为了获得准确的型面必须同时控制接触线的矢量方向。因此,叶片砂带磨削加工必须采用法向量和砂带接触线双矢量控制技术,通过六轴联动实现叶片数控砂带磨削运动。同样,六轴联动数控砂带磨削运动轨迹的生成方法不能简单套用通用CAD/CAM软件平台中的传统多轴加工运动轨

迹生成方法,目前的通用CAD/CAM软件中均无六轴联动数控编程功能,必须立足于自行开发。

实现六轴联动叶片砂带磨削编程首先要形成刀具轨迹文件,然后经后置处理成为六轴联动机床执行程序,它包含了以下几个内容。

(1)刀位点坐标计算。数控砂带加工叶片程序的运动轨迹实际上是刀具中心轨迹曲线,因此必须计算叶片加工点的刀具中心坐标。砂轮(或接触轮)的刀心点坐标是通过接触点沿法向偏置接触轮的半径 r 得到的。 P 点为待加工点,坐标为 $P(P_x, P_y, P_z)$, O 点为刀具的中心点,坐标设为 $O(O_x, O_y, O_z)$, N 是该点的单位法向量 $N(N_i, N_j, N_k)$,如图4所示,则 O 点的坐标为:

$$\begin{cases} O_x = P_x + r \cdot N_i \\ O_y = P_y + r \cdot N_j \\ O_z = P_z + r \cdot N_k \end{cases}$$

(2)叶片型面法向矢量计算。叶片型面法向矢量可直接由叶片型面属性直接获得,叶片型面法向矢量如图5所示。

(3)砂轮轴线矢量计算。由微分几何知识,为了使砂带与加工面在接触点处的接近程度最高、干涉最小,其刀轴矢量应位于接触点处曲面的最小曲率方向。如图6所示, P 点为接触点, O 点为刀具中心, O_1O_2 为接触轮轴线, O_1O_2 与该点最小主曲率方向平行。

假设叶片型面的参数方程为:

$$\sum : r = r(u, v), (u, v) \in R,$$

则加工曲面在其接触点处的主曲率运用微分几何原理求得,经计算后得到的砂带磨削加工轨迹如图7所示。

(4)根据如下的双矢量轨迹文件进行后置处理,生成加工程序。

3 B、C复合摆头与数控砂带磨削装置复合单元

国内外在叶片的铣削加工中普遍采用B轴摆头和A轴旋转工作台

的五轴联动数控加工机床结构形式(见图8),数控砂带磨削要满足六轴联动数控砂带磨削的功能需求,增加的C轴用来控制砂带接触轮的接触线矢量方向,使该接触线始终指向曲面上某点的最小曲率方向。因此,为满足磨削的功能需求,同时力求结构紧凑,考虑将C轴放置于B轴摆动轴上,构成磨削用B、C双摆头结构,其结构如图所示。在结构中,将B轴放置于Z坐标滑板上,随Z轴上下运动,C轴采用中空结构,置于B轴的转盘上。

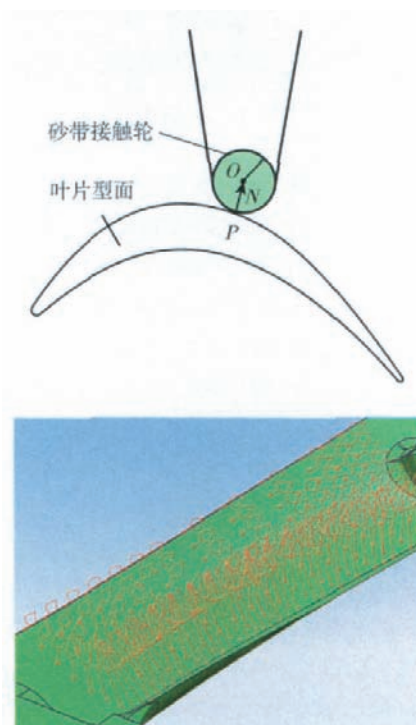


图5 叶片型面法向矢量

4 强力磨削与随形抛光一体的砂带装置

TX-6采用了中空C轴结构,砂带机布置在C轴中心,可通过锁死砂带机上的浮动装置实现与机床本体的刚性连接,以强力磨削方式迅速去除大量磨削余量,修正前道铣削工序后由于叶片扭曲造成的变形和余量不均匀等。在强力磨削过后,需要采用随形抛光,解除锁死机构,砂带机可沿曲面法向矢量方向浮动,满足随形抛光的要求。浮动装置在抛光

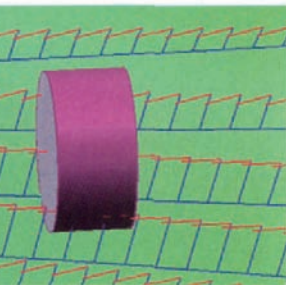
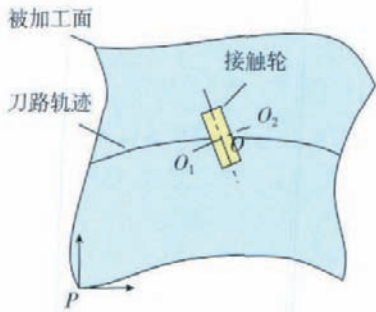


图6 接触轮轴线方向

过程中,整个浮动机构处于双向气缸的中间位置,并在该位置通过力传感器和比例阀信号控制气缸动作,该过程可通过PLC预定义M代码(模态功能)功能实现,在编程中可直接运用不同的M代码编程施加不同磨削内容对应的磨削压力。如进出气边厚度不足1mm,接触轮接触面积较小,磨削压力相应地不能超过1.2kg,对应的编程M代码为M81;内弧和背弧接触轮接触面积较大,压力大约4kg,对应的编程M代码为M84;而强力磨削时,可采用M89。

5 数控砂带磨削技术单元化

目前国外砂带机均以IBS为例采用悬臂式结构,其一端以铰接形式连接C轴,另一端悬伸,这样不仅结构刚性差,而且由于砂带机的宽度限制了C轴摆动角度,在扭曲较大的曲面磨削抛光时容易产生干涉。与国外同类磨床相比,B、C双摆头部件采用中空的C轴结构,将砂带机的运行轨道布置于中空C轴内,实现了无悬臂的砂带机布局,大大提高了结构刚性。

该结构最大的好处就是形成数控砂带磨削技术单元化,最直接的应用就是使得铣削、磨削复合加工成为

可能,通过对比五轴铣削机床和数控砂带磨床,可以发现,在接口尺寸一致的情况下,铣削电主轴和磨削单元可以进行交换,这对于技术要求高、变形大的大型叶片来说,如果实现短时间的自动交换,将会具有很高的实用价值。事实上,我们在设计该机床时就已经充分考虑了自动交换的接口空间,可以根据用户要求提供自动交换式的复合机床,那将是大型叶片加工的完美解决方案。

数控砂带磨削单元化技术还极大地扩展了其使用范围和应用领域,如与大型车铣复合叶轮加工机床配合,作为一个附件头交换,可以实现大型船用螺旋桨、水轮机叶片的数控打磨;作为风电木工龙门铣的一个附件头,可以实现风电叶片打磨,甚至游艇、飞机大型结构件的打磨等。其单元化技术凝结的意义在于,从此大型工件打磨用户不用专门购买一个打磨专用设备,而是购买一个包括附件装置、软件和服务在内的解决方案施加在原有的加工设备上即可,从这个角度看,砂带磨削单元化对于许多汽轮机、航空发动机主机厂的叶片配套厂和外协厂具有高技术平民化的意义,他们也可以像主机厂一样,通过部分技改的实施,以较小的投入,改变手工打磨抛光的传统加工模式,降低工人的劳动强度,提高产品的品质。

数控砂带磨削用户关注的问题

通过与国内叶片行业用户交流,发现行业用户对于数控砂带磨削普

遍存在以下几个方面的疑问,在此做一简单汇总并针对目前的TX-6六轴数控砂带磨床加以简单说明,望能对叶片制造企业采用数控砂带磨削工艺的信心有所帮助。

1 适用范围问题

(1)强力磨还是浮动抛。600mm以上的大叶片变形较大,一般采用浮动抛光;小叶片可以强磨,但还是要五轴铣加工叶根圆角和凸台;大叶片如果强磨,必须在装夹状态测量后重构模型进行加工,但偏差太大可能要卸下校形后再加工。

(2)适用大叶片还是小叶片。一般小叶片手抛快一些,大叶片更适合数控抛磨,有些一致性要求高的小叶片数控抛磨质量会更好。

(3)叶根圆角、凸台的处理。目前正在做进一步研究,圆角、凸台暂时还需手工修,但一般叶根圆角、凸台加工余量很小,有些直接抛丸即可。

2 技术成熟度问题

(1)编程和后置处理软件。编程问题目前已经有自主知识产权的软件,运行环境UG或Pro-E,作为其中的一个插件功能使用,已在东汽有良好的使用验证。

(2)六轴联动控制。首台样机即采用华中世纪星系统,验证了六轴联动控制、小线段插补能力、伺服参数匹配等项目,使用良好,与西门子840D的对比试验表明,国产高档系统可以胜任,东汽新订8台均采用华中数控系统。

(3)在线(位)检测问题。如果

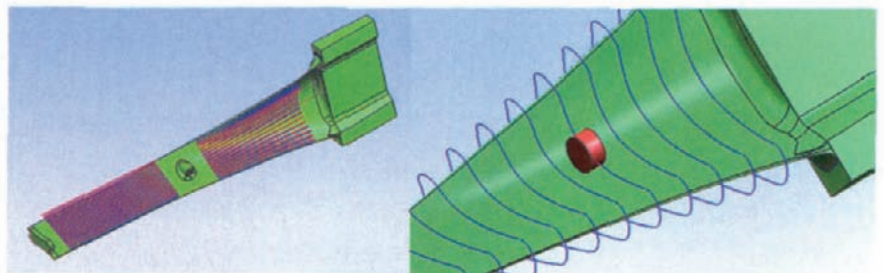


图7 磨削加工轨迹

可能,机床都应该配备在线(位)检测、线激光或者接触式测头。

3 可靠性问题

(1) 砂带运行稳定问题。理论上,砂带轮系中必须有调整轮,但实际使用中效果不理想;砂带运行稳定性主要取决于轮系轴线平行问题,一般情况下,槽轮的约束效果更好,只是砂带单边损耗增大。

(2) 浮动装置灵敏度问题。用



图8 五轴联动数控加工机床结构

户通常都会担心出现卡死问题,定期检查低阻导向装置和汽缸部位是必要的,一般正常保养就能保证使用没问题。

(3) 砂带脱落、断裂防护问题。PLC 设定了逻辑保护、砂带张紧轮位监测,大幅度偏离视为砂带断裂或脱落,砂带机构即弹回脱离磨削,停机报警。

(4) 砂带张紧稳定性。砂带使用中都会伸长,设计中砂带机构能够补偿砂带的伸长,维持稳定磨削的必要条件。

(5) 故障报警保护问题。故障报警原则是先保护工件,故所有报警的首要动作是接触轮脱离工件表面;突然断电时,砂带机构自动弹回。

(6) 接触轮寿命。接触轮以及其他过渡轮都是消耗品,接触轮消耗得快一些,一般2周左右磨损1mm,需要更换,可用车床精车外圆后重复使用,橡胶层厚度差别不超过单边5mm,可不用调整程序(抛光状态)。

(7) 防护问题。砂带磨削较脏,而且水雾防护比较困难, TX-6 单元化砂带磨削装置解决此问题优于 IBS,机内清洁非常方便。

4 精度问题

(1) 表面质量。表面质量主要取决于砂带选择和工艺参数选择,实际加工效果基本上超出预期。以不锈钢叶片加工为例,按照砂带厂商 VSM 的数据,线速度要 25m/s 以上才合理,实际只有 16m/s;磨削表面粗糙度为 $R_a < 0.4$,实际 60% 以上的磨削表面为 $R_a < 0.2$,远好于预期。

(2) 型线精度。型线精度取决于铣削轮廓和型线精度,恒压磨削不改变型线。

(3) 压力控制精度。压力控制是砂带磨削的关键,根据使用情况,气动系统依靠比例阀的控制精度分辨率在 0.2kg 左右,气动控制对于

大多数型面和进出气边都是有效的,力传感器作用不明显;个别进出气边厚度低于 0.5mm 情况下,需要低于 1kg 的磨削压力,必须采用气动闭环控制和力传感器。

5 使用保养的人机工程问题

(1) 更换砂带是否方便。原来担心从中空 C 轴 $\phi 250$ 的半个圆筒里换砂带会不方便,实际使用中操作工反应非常方便,原因是砂带卷绕范围小,且基本在竖直方向卷绕,便于作业。

(2) 更换带轮是否方便。结构决定了不需专业人员,操作工自己即可更换而无需调整精度。

(3) 更换轴承是否方便。这是由轮系轴承支撑结构决定的,设计时必须考虑到非专业人员是否可轻松更换。

(4) 砂带装置清洁是否方便。基本可以做到免维护,积垢可以用水枪清洁,目标是做成枪械一样便于分解,容易组装。

(5) 机内清洁是否方便。不锈钢内衬覆盖,机内基本不用清洁,手持水枪冲水即可。

6 效率、成本问题

(1) 磨削加工效率。效率和编程方法直接相关,以核电次末级 905 叶片为例,采用沿叶片长度方向磨削,粗加工时间约 1h;采用沿宽度方向磨削,最快 12min 即可完成,刀具轨迹处理方法是影响磨削效率的关键因素。该 905 叶片磨削面积 378513.881mm^2 ,没有改变编程方法前粗精磨要 3 个多小时,改进之后为 121min (其中粗加工 22min)

(2) 砂带消耗。砂带消耗实际也是一个工艺问题,还以次末级 905 叶片为例,砂带宽度 25mm,周长 2820mm。原始的粗加工方法需要消耗一根 120 目粗磨砂带,改进后一根砂带可以磨削 4 片叶片;精加工没变,磨削一片叶片消耗一条 240 目砂带(包含进出气边磨削)。

(3) 机床价格。以大叶片机床为例,加工范围 $\phi 500 \times 2200$,与进口机床相比价格约为一半;随着数控砂带磨削单元化技术发展,用户可有多种选择、以较低成本实现叶片数控砂带磨削。

结束语

叶片数控砂带磨削在我国还是一个新的工艺方法,六轴联动数控砂带磨床也还是一种新机床,因为其新,故有其鄙,还需进一步研究、改进及完善。我们希望能够联合更多的业内同行,去共同研究、分享这方面的技术,而不是仅限于发展一种高新技术的机床,赢得荣誉,获取丰厚的利润。这正如一个国家全体公民都能读懂交通标志的意义远胜于出几个诺贝尔奖获得者,多坐标联动数控砂带磨的意义在于数控砂带磨削技术应用而不仅仅是机床,这也是我们致力于单元化技术的根本原因所在。

(责编 玉龙)