

S形检测试件五轴联动数控加工方法研究

杜丽¹ 张信^{1,2} 赵爽宇¹ 李俊杰¹

1. 电子科技大学, 成都, 611731

2. 中国电子科技集团公司第三十研究所, 成都, 610041

摘要: 作为国际标准试件中的新成员, S形检测试件由于其造型复杂, 一直是加工领域中的一个难题。在UG NX环境下, 通过三维建模、工艺规划、数控编程得到了S形件加工后置指令。基于虚拟机床技术理论, 搭建了后置指令加工仿真通用平台, 并验证了S形件数控程序的准确性。提出并对比分析了多种编程加工方法下S形件的理论误差。选取最优编程方法进行切削实验, 实现了S形件的五轴联动加工。

关键词: S形检测试件; 五轴加工; 后置处理; 虚拟机床; 加工仿真

中图分类号: TH16; TG65

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.21.013

Research on Five-Axis CNC Machining Method of S Shaped Detection Test Piece

Du Li¹ Zhang Xin^{1,2} Zhao Shuangyu¹ Li Junjie¹

1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731

2. No. 30 Institute of China Electronic Technology Corporation, Chengdu, 610041

Abstract: As a new member of international standard specimens, "S" shape detection test piece became a problem in the processing area due to its complex shape. In the environment of UG NX, through some operations such as three-dimensional modeling, process planning, CNC programming, "S" piece post processing commands were derived. Based on virtual machine tool theory, a machining simulation universal platform was set up, and the accuracy of processing program was verified. A variety of methods of five-axis CNC programming were adopted, and theoretical errors of various programming methods were compared through the simulation platform. The post commands with minimum theoretical errors were selected to cutting experiments, they realized five-axis machining of "S" piece.

Key words: "S" shaped detection test piece; five-axis machining; post-processing; virtual machine tool; machining simulation

0 引言

五轴联动数控加工技术由于其加工灵活、材料去除率高、少装夹等优势, 被广泛应用于叶轮叶片及螺旋桨等复杂曲面的加工中。相对于三轴机床, 五轴联动数控机床的刀具有任意可达性, 在复杂曲面加工时, 具有更高的加工效率与加工质量。但是, 受旋转轴运动的影响, 五轴机床各轴在插补运动时会产生非线性误差, 为保证加工精度, 编程难度大^[1]。此外, 旋转轴的引入会引起刀轴矢量的突变, 在高速加工时会造成刀具破损甚至是工件报废^[2-3]。因此, 五轴联动加工一直是机械加工行业的难点。

S形检测试件多用于综合评价五轴机床多轴联动精度、伺服系统动态响应性能及机床动态刚度等性能^[4]。目前, 国内外涉及S形件的文献较

少。谢东等^[5]指出, 多轴数控机床转动轴进给系统动态响应精度是影响S形件加工精度的主要因素; 丁杰雄等^[6]研究了S形件型面误差处理、分析和显示技术; 崔海浪^[7]分析了进给伺服系统参数对S形件轮廓误差的影响; 杜丽等^[8]提出了基于S形件的数控机床动态精度影响因素辨识方法。整体而言, 研究的范围主要集中在S形件误差分析上, 对S形件的加工方法及工艺研究, 目前尚未检索到国内外的相关文献。因此, 本文详细介绍S形检测试件的定义、建模步骤及多种加工方法, 并对比研究各种编程方法产生的理论误差, 为机床制造商及用户提供技术参考。

1 S形件模型

S形检测试件在五轴联动数控机床精度检测上应用前景广阔。机床制造商在机床装配验收前、机床用户在购买机床时都有S形件的试加工应用。在大型贵重零件加工前, 通过先加工S形

件可以有效暴露机床缺陷,避免报废零件的产生。作为检验多轴联动机床整机综合性能的有效试件,S形件得到了行业的认可。

1.1 模型尺寸

S形检测试件由一个S形的等厚缘条和一个矩形基座组合而成。其中,矩形基座上有4个用于装夹的阶梯孔,2个用于安装定位及测量基准的定位孔,基本尺寸如图1所示。设矩形基座的上表面为 $Z=0$ mm平面,以矩形基准左边的定位孔 $\phi 16H9$ 为中心建立基准坐标系。矩形基座高30 mm,4个阶梯孔位于四角。S形等厚缘条位于矩形基座上,厚3 mm,与矩形基座不垂直。

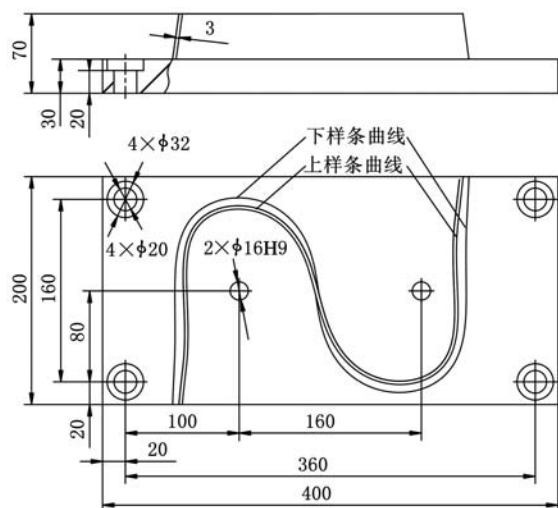


图1 S形试件尺寸

1.2 建模步骤

S形试件建模较为复杂,其具体步骤大致如下:首先进入三维建模环境,输入2组共计100个数据点(50个点位于 $Z=0$ mm平面,50个点位于 $Z=40$ mm平面)。通过2个平面的点集分别创建上下2条三阶样条曲线,如图1所示。以上下2条三阶样条曲线为导线,采用直线扫略指令,构造直纹面。将直纹面朝X轴正方向增厚3 mm,即可得到S形等厚缘条。最后,新建并拉伸草图创建矩形基座,用布尔求差指令创建用于装夹的阶梯孔和用于测量的基准定位孔。依据以上建模步骤,可得S形检测试件的三维CAD模型。

2 S形件数控编程

由S形件三维模型可知,缘条与基座不垂直,为非直壁零件,因此采用传统的三轴编程方法无法加工。本节将制定S形件加工工艺卡片,基于UG NX的CAM加工环境,采用多轴铣削编程加工方法,生成S形件加工刀路轨迹前置指令。并构造AB双摆头型五轴后置处理器,导入前置指

令进行后处理得到S形件数控加工后置G代码。

2.1 加工工艺分析

材料成分是被加工零件的基本特性,决定了零件加工方法及切削参数的选择。S形件所用材料为铝合金7175-T7451。S形件结构如图1所示,其中缘条厚3 mm,属于薄壁件。此外,缘条与矩形基座不垂直,属于非直壁类零件。

依据S形件材料及结构特性制定数控加工工序卡片。S形件的加工大致可分成4大工序:毛坯粗加工(铣基准面、制压紧孔);S缘条粗加工;S缘条精加工;基准孔加工。S形件加工基本流程如图2所示。

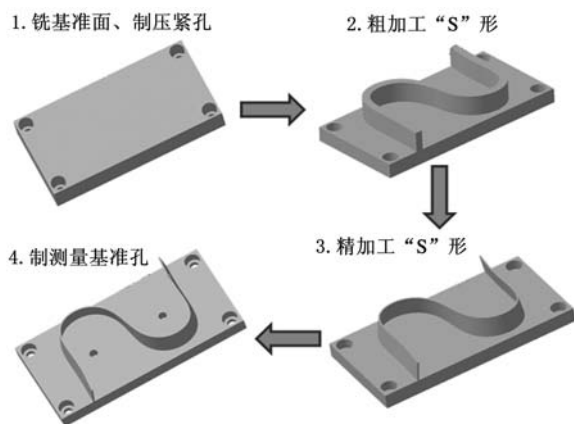


图2 S形件加工基本流程

2.2 刀路轨迹规划

本文针对S形件的加工流程,制定了S形件数控加工工序卡片,如表1所示。

表1 S形件数控加工工序卡

工序	加工内容	加工方式	加工刀具
1	通孔	钻削加工	钻头 $\phi 20$
2	沉头孔	钻削加工	镗刀 $\phi 32$
3	对S型面粗加工	型腔铣	立铣刀 $\phi 32$
4	对S型面精加工	多轴铣	立铣刀 $\phi 20$
5	矩形底座上表面	平面铣	面铣刀
6	中心孔	钻削加工	钻头 $\phi 16$

根据UG CAM编程流程,首先打开S形检测试件三维模型,进入UG加工编程环境。根据S形件加工工序卡,开始毛坯的加载和设置。

工序1和工序2用来加工沉头孔。在“加工环境”对话框中选择drill,进入钻削加工环境。创建3把刀具:刀具T1——中心钻(SPOTDRILLING_TOOL),直径20 mm,长65 mm,主要用于打定位孔;刀具T2——钻头(DRILLING_TOOL),直径20 mm,长65 mm,主要用于钻 $\phi 20$ 的通孔;刀具T3——镗刀(COUNTERBORING_TOOL),直径32 mm,长50 mm,主要用于加工 $\phi 32$ 的沉头孔。然后创建工序,即先钻中心孔,再钻通孔,最后镗沉头孔,完成加工。

工序3是创建型腔铣程序,具体为:新建1把直径32 mm、圆角半径3 mm的立铣刀;创建部件、毛坯、检查等几何体;设置刀轨,选择切削模式为“跟随周边”;设置切削参数,底面余量为0.5 mm,侧壁余量为2 mm;设置进给率和速度;设置加工方法,点击生成刀轨控件。

工序4为S型面精加工工序。缘条质量是加工的重点,本文提出多种编程加工方法对S形缘条进行精加工。

(1)方法1:多轴顺序铣。点击“创建工序”,选择多轴铣子操作顺序铣,进入顺序铣编程环境;创建直径20 mm立铣刀;设置加工安全平面;在“进刀运动”对话框中设置进刀方法、参考点、几何体;在“连续刀轨运动”中设置检查曲面、驱动曲面、部件表面;完成退刀。加工刀具路径轨迹如图3a所示。

(2)方法2:多轴外形轮廓铣。选择多轴铣子操作外形轮廓铣,进入编程环境;几何体、刀具等设置同方法1;选择矩形基座上表面为底面,缘条曲面为壁;驱动方法为“外形轮廓铣”;刀轴设置为自动;加工方法选择精加工。加工刀具路径轨迹如图3b所示。

(3)方法3:多轴分层外形轮廓铣。在方法2的基础上,通过设置8个辅助底面,对缘条进行分层加工,其他设置同方法2。加工刀具路径轨迹如图3c所示。

(4)方法4:多轴分层可变轮廓铣。选择多轴铣子操作可变轮廓铣;选择S形件缘条表面为驱动曲面,切削模式为“单相”,步距数为6;投影矢量选择“朝向驱动体”,刀轴选择“侧刃驱动体”;几何体及刀具等其他设置同方法1。加工刀具路径轨迹如图3d所示。

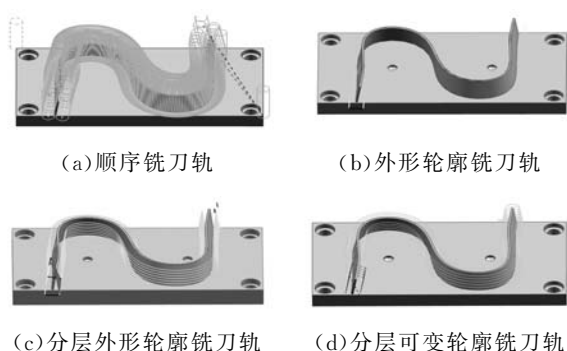


图3 精加工多轴铣刀路轨迹

工序5和工序6用来精加工测量基准平面和基准孔,为S形件轮廓误差的测量做准备。点击“创建工序”,选择钻孔加工子操作标准钻孔,进入孔加工环境;创建直径16 mm钻头;选择待加工

基准孔;设置最小安全距离80 mm;循环类型为“标准钻”,即可实现该道工序。

2.3 五轴后处理

刀位轨迹文件又称通用前置指令,数控系统无法识别,不能直接传输到数控机床进行加工。机床的物理结构和机床内部的数控系统,都会因机床不同而不同。因此,必须将通用前置处理计算所得到的刀位轨迹文件数据转换成某一特定机床能识别的程序代码,这一过程称为后置处理。

为构造专用后置处理器,将UG/Post Builder作为开发工具。通过选择机床类型,设置机床各运动轴行程等参数,构建后处理器。将刀路文件导入后处理器,得到S形试件后置指令。

3 虚拟加工仿真

虚拟制造技术是指在计算机虚拟环境下,模拟产品和制造设备的现实运动环境,在实时和经验数据的支撑下,进行产品生产完整生命周期的一体化模拟仿真过程^[9]。

VERICUT是一款专用数控加工仿真软件,其采用先进的三维显示和虚拟制造技术,既能模拟虚拟机床的运动过程及工厂环境,又能检查NC后置处理程序的准确性。将2.3节生成的后置指令导入VERICUT环境中进行加工仿真,验证后置G代码的准确性并对比分析数控加工理论误差。

3.1 仿真平台搭建

根据实际机床各轴间的相互运动关系及相关参数,在VERICUT环境中建立机床模型拓扑结构。在UG中构建机床CAD三维模型,以X/Y/Z/A/B轴、床身、主轴等组件为单位逐个导出模型组块,根据拓扑结构关系再导入VERICUT环境中,调整各组件位置参数,装配成AB双摆头五轴联动数控机床模型,如图4所示。机床建成后,还需初始化设置,如机床干涉检查、机床初始化位置、机床行程等。最后加载机床控制系统,本文选用西门子840D数控系统。

3.2 NC后置程序验证

要实现动态加工仿真,首先在“项目树”对话框中,选择节点“坐标系统”,添加新的坐标系;然后是添加毛坯模型,单击“Stock (0,0,0)”,新建毛坯400 mm×200 mm×70 mm矩形块;单击“Design (0,0,0)”,添加S形试件三维模型;选择“加工刀具”,右键进入“刀具管理器”对话框,选择“添加”→“刀具”→“新”→“铣削”命令,新建表1所示的6把刀具;选择单击“数控程序”,加载2.3

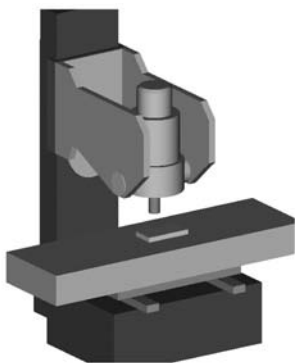


图 4 虚拟机床模型

节 S 形件 NC 后置程序;在“项目上树”对话框中选择“工位:1”,单击“G-代码”选项卡按钮,进入“径向刀具补偿”列表框设置刀具半径补偿;最后单击“G-代码偏置”,定义加工坐标系。

在完成以上所有设置后,保存该项目。单击 VERICUT 系统主窗口右下角“启动加工仿真”按钮,开始数控加工动态仿真,虚拟机床将依次实时显示表 1 中 6 道工序的虚拟加工过程,S 形件缘条精加工过程中某一时刻的截屏如图 5 所示。

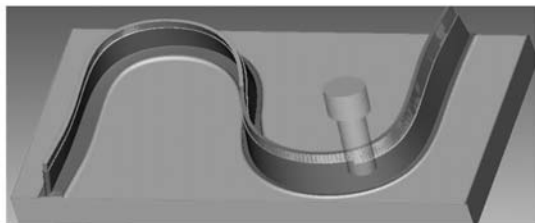


图 5 动态加工仿真截屏

3.3 加工理论误差对比分析

由 3.2 节加工仿真结果可知,S 形件无欠切和过切现象。此外,整个加工仿真过程中,机床刀具与工件、夹具均无碰撞、干涉情况的发生,因此,验证了 S 形件编程方法、五轴后置处理以及所搭建仿真平台的准确性。

本节将基于上述仿真平台,对比分析 2.2 节中 4 种编程方法下 S 形件的加工理论误差。依次将 4 种编程方法下的 S 形件后置指令导入到 3.1 节仿真平台。仿真加工结束后,利用软件自带的曲面加工误差测量模块,对 4 种编程方法下的 S 形件型面加工误差进行测量,测量的公差为 0.05 mm。

4 种编程方法下的 S 形件型面加工误差结果如图 6 所示,图中矩形框内为误差值 +0.05 mm 的欠切区域,圆形框内为误差值 -0.05 mm 过切区域。对比可知,图 6a 中,S 形件型面内的矩形框、圆形框数量最多、面积最大即误差最大,证明了 4 种精加工编程方法中,顺序铣的编程加工理论误差最大,存在多处欠切和过切区域;图 6c 采

用分层外形轮廓铣,加工质量最好,基本无加工理论误差;图 6c、图 6d 的矩形框和圆形框区域远小于图 6a、图 6b,证明了分层加工方法的加工精度明显优于单层加工。

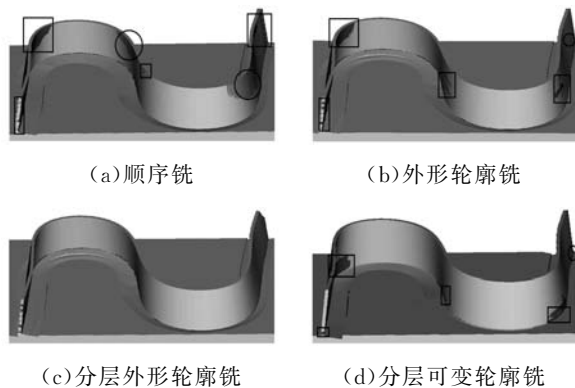


图 6 编程误差显示

4 切削试验

3.3 节对比分析了 4 种编程方法下 S 形件的加工精度,证明了采用分层外形轮廓铣的编程加工方法的 S 形件加工精度较高。因此,本节将采用该编程方法下的 S 形件后置数控程序导入五轴数控机床的数控系统进行实物加工。机床为中捷 AB 双摆头五轴联动数控机床。毛坯材料为航空铝合金 7075-T7451。加工所得 S 形检测试件如图 7 所示,其缘条面光滑,表面质量较好,无明显接刀痕及过切、欠切现象,验证了该编程方法的准确性。

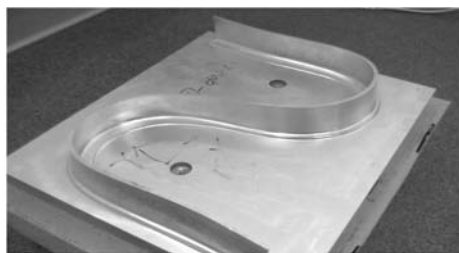


图 7 S 形件

加工完成后,在 S 形件缘条 10 mm、22.5 mm、30 mm 高度方向分别取 3 条截取线,每条线上等距离选取 25 个测量点,利用三坐标测量机测得 3 条线上共 75 个点的空间坐标。对比理论模型空间坐标,计算出 S 形件在 75 个测量点处的加工法向误差,如图 8 所示。

采用型面误差可视化技术,将 75 个测量点处的法向误差直接刻画在 S 形件型面上,如图 9 所示。以不同灰度区分误差的正负、大小,越亮表示正误差越大,反之负误差越大。由图 9 可知,S 形件加工的法向误差基本控制在 $50 \mu\text{m}$ 以内,满足加工精度要求。

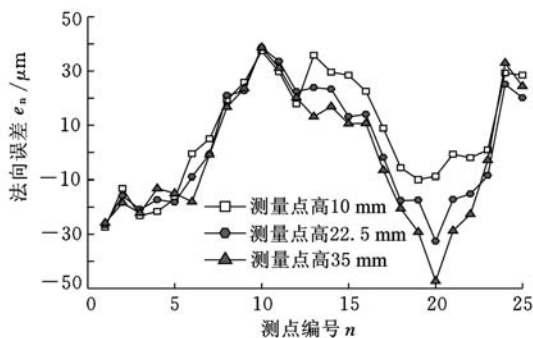


图8 S形件型面加工误差

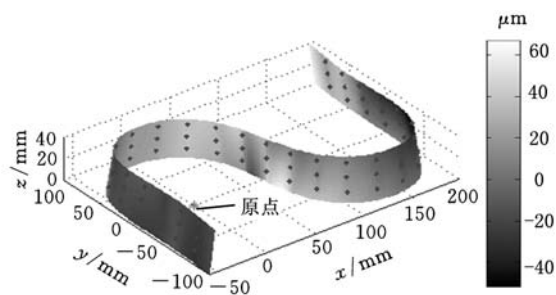


图9 S形件加工误差灰度显示

5 结语

基于机床制造商及用户的需求,本文详细介绍了S形检测试件的提出背景、模型尺寸及建模步骤。针对S形件展开加工工艺规划,制定工艺卡片。在UG NX加工环境下数控编程得到S形件刀路轨迹文件,并构造五轴联动数控机床后置处理器,进而获得了S形件数控程序G代码。基于VERICUT软件,搭建了数控程序虚拟加工仿真通用平台,实现了S形件的虚拟加工。提出并对比分析了多种编程方法下S形件的加工理论误差。最后在某立式五轴加工中心上进行了S形件切削加工试验,验证了该编程方法、数控程序及虚拟加工平台的准确性。

参考文献:

- [1] 陈威,彭芳瑜,闫蓉,等. 多轴加工非线性误差精度建模与姿态补偿[J]. 中国机械工程,2010,21(23):2843-2847.
Chen Wei, Peng Fangyu, Yan Rong, et al. Accurate Modeling and Tool Orientation Compensation for Non-linear Errors in Multi-axis NC Machining[J]. China Mechanical Engineering,2010,21(23):2843-2847.
- [2] Beudaert X, Pechard P Y, Tournier C. 5-axis Tool Path Smoothing Based on Drive Constraints[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing,2011,51(12):958-965.
- [3] 周波,赵吉宾,刘伟军. 复杂曲面五轴数控加工刀轴矢量优化方法研究[J]. 机械工程学报,2013,49

(7):184-192.

- Zhou Bo, Zhao Jibin, Liu Weijun. Method Study on Optimization of Tool Axis Vector for Complex Surface of 5-Axis CNC[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(7):184-192.
- [4] Song Zhiyong, Cui Yawen. S-shape Detection Test Piece and a Detection Method for Detecting the Precision of the Numerical Control Milling Machine: United States, US8061052B2[P]. 2009-07-14.
 - [5] 谢东,丁杰雄,霍彦波,等. 数控机床转动轴进给系统轮廓误差分析[J]. 中国机械工程,2012,23(12):1387-1392.
Xie Dong, Ding Jiexiong, Huo Yanbo, et al. Contour Error Analysis for Rotation Feed Axis in CNC Machines[J]. China Mechanical Engineering,2012,23(12):1387-1392.
 - [6] 丁杰雄,谭阳,崔浪浪,等. 一种五轴机床检验试件轮廓误差的处理与显示技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(10):39-43.
Ding Jiexiong, Tan Yang, Cui Langlang, et al. Study on Processing and Displaying Contour Error at Testing Specimen for Five-axis Machine Tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2012(10):39-43.
 - [7] 崔浪浪. 基于“S”形检验试件的数控机床动态因素误差分析及溯源[D]. 成都:电子科技大学,2012.
 - [8] 杜丽,崔浪浪,赵波,等. 基于S型检验试件的数控机床动态性能辨识新方法[J]. 制造技术与机床,2012(12):152-156.
Du Li, Cui Langlang, Zhao Bo, et al. New Method of Identification on the Dynamic Performance Factors of CNC Machine Tool Based on the “S” Specimen [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2012(12):152-156.
 - [9] 姚英学,李荣彬. 面向加工质量预测的虚拟加工检测单元的研制[J]. 中国机械工程,2000,11(5):520-524.
Yao Yingxue, Li Rongbin. Development of a Virtual Machining and Measuring Cell for Machining Quality Prediction [J]. China Mechanical Engineering,2000,11(5):520-524.

(编辑 张洋)

作者简介:杜丽,女,1970年生。电子科技大学机械电子工程学院教授。主要研究方向为先进制造技术、精密机床精度检测、复杂曲面加工技术。发表论文30余篇。张信(通讯作者),男,1988年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生,中国电子科技集团公司第三十研究所助理工程师。赵爽宇,女,1989年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。李俊杰,男,1989年生。电子科技大学机械电子工程学院硕士研究生。