

基于 PMAC 的柔性导轨制孔设备控制系统研制^{*}

Research on PMAC-Based Control System for Flexible Track Drilling Machine

上海交通大学机械与动力工程学院 冰峰 胡永祥 姚振强

[摘要] 针对上海交通大学研制的应用于飞机机身、机翼蒙皮进行制孔的柔性导轨自动制孔设备,提出了一套以 PMAC 运动控制卡为核心的开放式数控系统的设计方法。根据飞机自动制孔的特点与要求,设计并分析了柔性导轨自动制孔设备的整体框架、硬件构成、软件模块、设备坐标系下加工代码生成方法。初步制孔试验表明,该系统实现了设备设计功能,能够实现群孔加工。

关键词: 柔性导轨 飞机制孔 PMAC 控制系统 代码生成

[ABSTRACT] For the flexible track automatic drilling machine, which is used to drill on the skin of fuselage or wings of a plain, a kind of design of the control system is proposed. It is an open NC system based on PMAC motion control card. According to the feature and requirement of the flexible-track drilling, the framework, hardware, software and a code generation method in the machine coordinate system are researched and analyzed. Practical experiments show that the control system realizes the designed functions of the machine, which can now drill a group of holes with high quality.

Keywords: Flexible track Aircraft assembly drilling PMAC Control system NC code generation

为了满足现代飞机高寿命的要求,可通过各种技术途径改善各连接点的技术状态,其中一个很重要的途径是通过自动化设备进行自动精密制孔,提高制孔质量^[1]。相比传统的手工制孔而言,自动化制孔不仅能够提高制孔质量,而且还能减少操作时间,节约生产成本。当前国外航空行业广泛采用自动化制孔技术,其主要的形式分为:柔性导轨制孔设备、工业机器人制孔设备、龙门式自动制孔设备、自动钻铆机等^[2]。柔性导轨自动制孔设备是一种用于飞机机身、机翼等大型部件装配制孔的自动化设备。该种类型的设备可以利用其导轨上的真空吸盘,直接吸附于如飞机机身、机翼等平缓大曲面

上进行自动制孔,具有重量轻、效率高、质量好、灵活方便,以及自动化程度高等特点^[3]。

波音公司在 2005 年提出基于柔性导轨的飞机装配制孔方案^[4]。目前从事柔性导轨制孔技术开发的厂商主要有美国的 Electroimpact 公司(EI)、美国的 Advanced Integration Technology 公司(AIT)^[5]。美国的 West Coast Industries 公司(WCI)开发了一款单导轨两轴制孔设备。出于技术保密等原因,关于该设备相关技术研究开发报道较少,对其控制系统进行研究的文章更是鲜见。国内的北京航空制造工程研究所等单位也进行了一定的研究,取得了一定的成果^[6]。柔性导轨自动制孔设备的研制和制孔工艺研究,需要一套功能齐全、快速高效的控制系统的支持,但传统通用数控系统无法满足 5 轴以上的伺服控制要求,且无法满足多传感器的信号采集和数控系统二次开发的需要。因此,采用具备 8 轴伺服运算能力、开放性高的 PMAC 运动控制卡来开发柔性导轨自动制孔设备的数控系统。

针对飞机部件装配柔性自动制孔设备的控制与加工工艺要求,基于 PMAC 运动控制卡,研制开发了一套专用数控系统,介绍了其硬件组成和功能特点;分析了柔性导轨控制系统的建立方法、人机界面的开发过程,以及在柔性导轨自动制孔设备坐标系下加工代码生成方法。

1 柔性导轨自动制孔设备组成

柔性导轨自动制孔设备主要由制孔执行单元、伺服运动单元、柔性导轨单元,以及一些辅助设备组成。制孔执行单元具备法向检测、压紧工件、高效钻孔等功能;伺服运动单元实现快速精确的定位和进给;柔性导轨单元吸附在工件表面,以支撑整个设备的平稳运行;辅助设备可以实现主轴冷却、气动动作等功能。本课题组研制的柔性导轨自动制孔设备实物如图 1 所示。

1.1 制孔执行单元

钻削制孔功能主要由一部最高转速可达 24000r/min 的电主轴完成,该转速可以满足飞机制孔中大多数场合的需要。用一个变频器能够实现该主轴的调速,而变频器输出的频率,可以通过一个 0~10V 模拟量来调节。动态工件压紧功能用来压紧加工区域,减少和抑制层间钻

^{*} 上海市民机创新工程(ZXDF077)、机械系统与振动国家重点实验室开放课题(MSV-2010-12)资助。

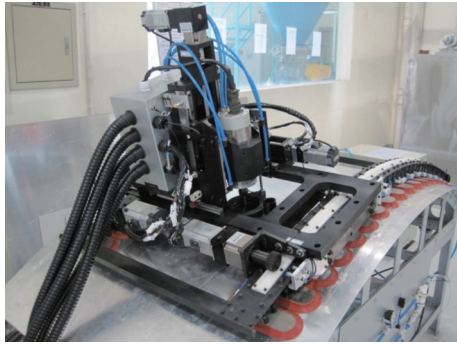


图1 柔性导轨自动制孔设备
Fig.1 Flexible track automatic drilling machine

削毛刺及钻屑的积累,达到提高加工质量和加工效率的目的。压脚的上下动作,由一个2位五通电磁阀控制的2个气缸实现。利用2个等距安装在钻头两侧的激光位移传感器来实现钻削工位法向检测功能。

1.2 伺服运动单元

该设备具有X、Y、Z、B 4个方向的自由度,共使用了5台伺服电机进行控制。其中为了提高沿导轨方向的运动特性,X轴上安装了2台龙门结构布置的伺服电机。高精度的伺服运动单元,为定位精度以及重复定位精度的提高,提供了一个重要的必要条件。伺服电机由伺服驱动器直接控制,而数控系统可以通过发送 $\pm 10V$ 的模拟量信号来控制伺服驱动器。利用伺服电机内部的编码器反馈,每个伺服运动都可以实现半闭环控制。

1.3 柔性导轨单元

柔性导轨由两根平行放置的弹簧钢带构成。钢带下部安装着等间隔布置的真空吸盘,工作时真空系统启动,使得整个导轨能够柔性的吸附于工件表面。导轨最终状态近似平行于工件表面。导轨上部具有齿条,与X轴2部电机相连的齿轮相啮合,从而实现制孔单元在X方向快速、准确的移动。数控系统通过控制4个电磁阀实现导轨真空状态的启动和停止,同时利用真空压力开关对真空度进行检测。

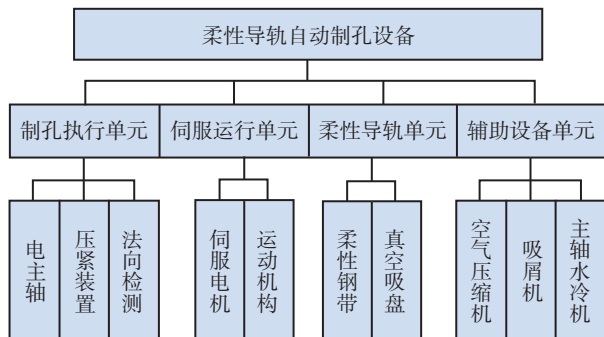


图2 柔性导轨制孔设备硬件组成
Fig.2 Hardware components of flexible track drilling machine

辅助设备主要负责支持整套设备功能的实现,例如空气压缩机提供气缸、主轴等需要的压缩空气,水冷机提供对电主轴的内部冷却等。各部分关系如图2所示。

2 柔性导轨设备专用数控系统实现

柔性导轨自动制孔设备中,各元件对控制系统都有不同的需求。经过分析与统计,数控系统直接控制的元件达到20个,检测元件22个。其中输出模拟量信号共7路,分别输出至电磁比例阀、主轴变频器、5台伺服驱动器;输入模拟量信号共5路,分别采自电磁比例阀反馈、2个真空开关、2个激光位移传感器;输出数字量22路,分别控制气动元件、指示灯、报警器、驱动器状态等;输入数字量28路,分别采自电子手轮、三坐标测头、刀具状态传感器、限位开关、伺服驱动器状态传感器等;输入编码器反馈信号共6个,分别采自5台伺服电机、电子手轮。因此,需要搭建一套功能完备、响应迅速的专用数控系统,以实现运动控制、通断切换、状态检测、人机交互等功能。

2.1 控制系统组成

柔性导轨自动制孔设备控制系统由上位工控机、下位Turbo PMAC 2多轴运动控制卡、Acc-34AA数字量I/O卡、Acc-8A轴接口卡(共4块,提供8个通道)、执行元件、检测元件等组成。其简化的系统结构如图3所示。

上位工控机提供了一个便捷、高效的人机界面,用

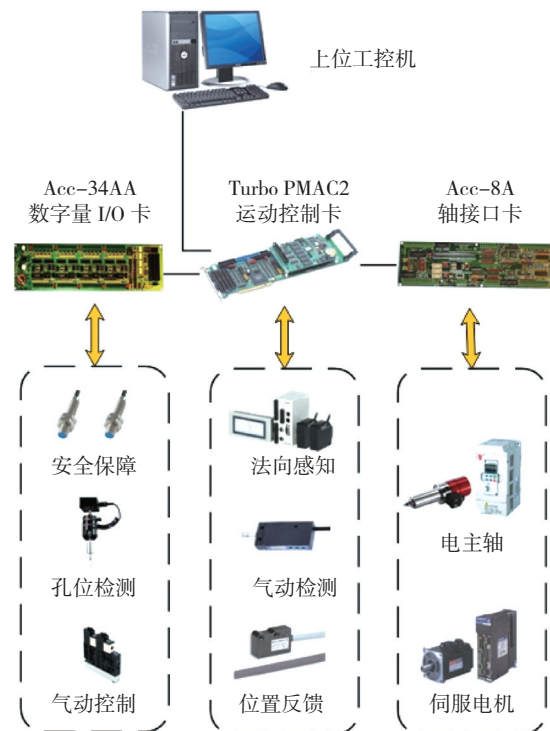


图3 控制系统组成
Fig.3 Composition of control system

以控制和监视系统各个状态,并且可以对整套控制系统的参数进行设定。同时,它也允许操作员对程序的编辑和传送,实现运动程序和 PLC 程序的自动运行。PMAC 运动控制卡是整个运动控制系统的中枢,可以同时控制 8 个运动轴,并具备数字量、模拟量的输入和输出能力。主要负责各种实时性要求很高的插补和伺服更新;加工过程中的各种检测数据的误差计算和相应的补偿计算;控制各个伺服电动机轴的运动过程和对来自 I/O 端口信号的处理等。数控系统的执行元件提供设备 4 个轴的联动、气动系统的动作等。数控系统的检测元件用以检测系统状态、保障系统安全、调整设备的姿态、提高设备精度等。

2.2 运动控制器及参数设置

PMAC 运动控制利用 DSP 控制器的运算功能实现 1~8 轴的实时伺服控制。依靠集成在卡上 ROM 中的程序,它能够对存储在它内部的程序进行单独运算,执行运动程序和 PLC 程序,进行伺服环更新,并以串口、总线两种方式与主计算机进行通讯。它还可以自动对任务优先级进行判别,从而进行多实时的多任务处理,这使得它在处理时间和任务切换这两方面大大减轻了主机和编程器的负担,提高了整个控制系统的运行速度和控制精度^[7]。

PMAC 运动控制卡具备 5 轴以上的伺服运算能力和良好开放性,其功能可以很好地满足柔性制孔设备对控制系统的需求。Turbo PMAC2 PCI 板卡,可以通过 PCI 总线与上位机通讯,也可以使用双端口 RAM 扩展总线与上位机通讯。板卡本身具备 8 路模拟量输入功能,实现信号的实时采集。采用 4 块 ACC-8A 附件作为轴接口卡,可以输出 8 路 $\pm 10V$ 模拟量信号,用来控制伺服驱动器和主轴变频器,每个轴通道接口电路还具备 4 个标志信号输入(限位、回零、报警等);剩余的两路信号,可以作为普通的模拟量输出使用,如控制电磁比例阀。采用 1 块 ACC-34AA 附件作为数字量 I/O 卡,提供 32 路数字量输入和 32 路数字量输出接口。

PMAC 运动控制卡有 4 种变量,即 I 变量、P 变量、Q 变量和 M 变量,根据制孔设备的控制要求进行设定。PMAC 卡的 I 变量为 PMAC 卡、电机和编码器等参数变量,用于设置与控制卡有关的所有工作特性。本控制系统中,部分 I 变量的设置如下:全局变量, I5=1 (启用前台 PLC 功能,禁用后台 PLC);电机变量, Ixx00=1 (激活 xx 号电机)、Ixx06=1 (电机 xx 主导,即手轮跟随使能) A/D 转换表变量, I5060=8 (A/D 转换通道数)、I5080=1 (允许 A/D 转换);坐标系变量, I5179=0 (坐标系快速运动模式)、I5190=1000 (坐标系进给率单位为 1000ms)。

2.3 下位机程序设计

PMAC 可以执行上位机编译好的运动程序,这些运动程序可以由符合 PMAC 编程方法的高级语言编写,也可以通过调用预先编译好的 G 代码、M 代码子程序,由符合一般习惯的 G 代码、M 代码编写。G 代码、M 代码分别在子程序 prog1000 和 prog1001 中定义,PMAC 在编译运动程序时,会自动调用上述两个子程序对应的程序行。这样便可以很方便地实现 NC 数控代码的功能,甚至可以自己定义某些 G 代码、M 代码指令,实现设备的特殊需要。

PMAC 内置有 PLC 控制和编程功能,它是以循环逻辑顺序来执行命令,但它的编程方式不是梯形图编程,而是采用类似于 BASIC 等高级语言的编程方式,不需要专用编程器,执行速度更快。PMAC 的内置 PLC 与 NC 共用 CPU,利用 CPU 的空闲运算能力来发挥 PLC 的功能,所以 I/O 点数较少。通过 PLC 程序可以完全地对 PMAC 变量和 I/O 进行操作,并且它具有非同步的特性,因此它能有力地协助运动控制程序完成任务^[8]。研制开发的数控系统,利用 PLC 程序为设备实现了电子手轮的选通、倍率、以及跟随功能;实现了数字量 32 个输入和 32 个输出的即时读取和控制等功能。

2.4 自动制孔流程设计

由于在飞机机身、机翼蒙皮等小曲率曲面上装配制

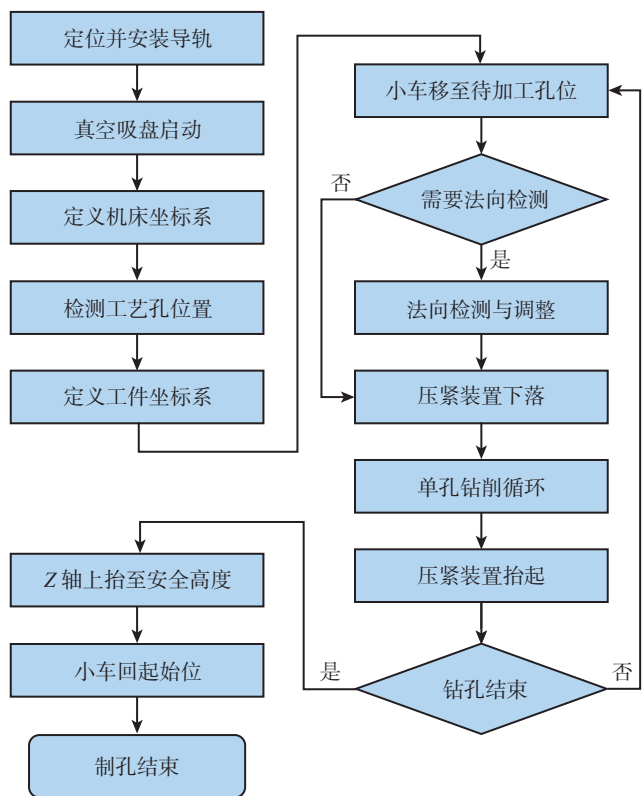


图4 柔性导轨自动制孔流程图

Fig.4 Flow chart of automatic drilling by machine

孔具有一定的特殊性,根据本设备的特点,制定了一套自动制孔工艺流程,如图4所示。首先,需要做加工前的准备工作,即连接设备,并将导轨吸附固定在工件表面。其次,建立机床坐标系和工件坐标系,其中依靠一个三坐标测头检测定位孔位置。再次,开始正式钻孔流程,其中主要涉及了曲面法线方向检测、主轴启停与调速、辅助设备启停、各轴进给等。

3 上位机软件设计

3.1 软件总体结构

本软件是以 Visual Basic6.0 为开发工具,采用面向对象的编程方法,充分利用 PMAC 的动态链接库 Pcomm32.dll 中的函数,实现了人机界面的各项功能。该软件提供了控制系统人机界面、伺服状态显示和调整模块、自动运行和手动运行模块、主轴控制模块、气动系统控制模块等功能,并且具有运动程序和 PLC 程序的编制界面。控制系统软件结构关系如图5所示。

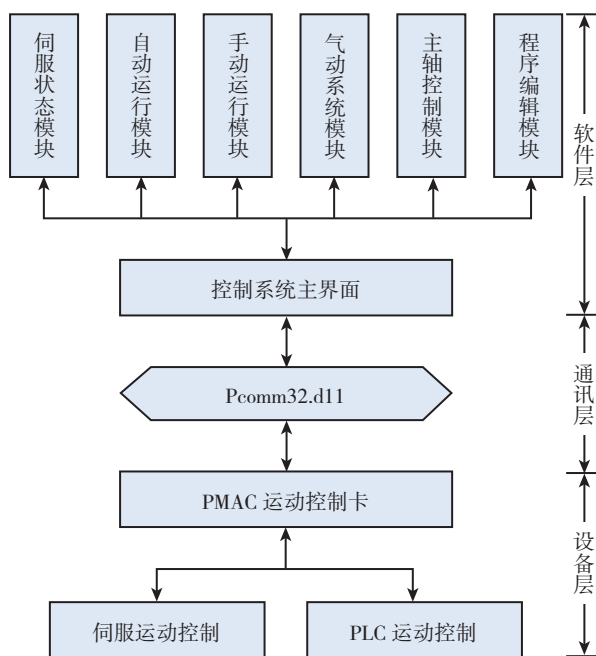


图5 控制系统上位机软件结构

Fig.5 Architecture of upper-computer software for control system

3.2 上位机与 PMAC 间通讯功能的实现

Pcomm32 动态链接库包括了同 PMAC 通讯的各种方式,而且将其主要函数进行分类、封装。通过这些函数可以完成 PMAC 与 PC 机之间的通讯功能,完成对 PMAC 硬件的操作。如 OpenPmacDevice() 函数用于与某一个 PMAC 设备建立通讯关系; PmacGetResponseA() 函数用于给 PMAC 发送指令并返回执行结果等^[6]。

例如,若要获取和返回 Y 轴电机选通状态,并将结果显示在控制系统人机界面上,可以在 Visual Basic 中添加 Timer 控件,其作用是每隔一定时间执行一次程序体。之后在 Timer 程序体中利用 PmacGetResponseA() 函数获取和返回 Y 轴电机选通状态字,并根据该状态字的结果,用不同的颜色指示 Y 轴电机的状态。其部分程序如下:

```

Private Sub Timer1_Timer()
    return_value = PmacGetResponseA(DeviceNumber,
    response, 255, "M314")
    If Val(response) = 1 Then
        Shape1(1).FillColor = vbGreen
    Else
        Shape1(1).FillColor = vbButtonFace
    End If
End Sub
  
```

3.3 人机界面设计

为了让数控系统可以识读用户的操作和意图,同时把数控系统的状态信息转换成人可以接受的方式,为数控系统设计了一个人机界面,如图6所示。

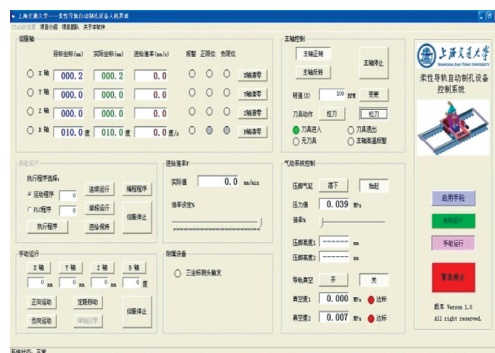


图6 控制系统人机界面

Fig.6 HMI of control system

位于主界面左上部的区域即为伺服轴模块,该模块可以监视各个轴(即 X、Y、Z、B 轴)的状态,以及执行各轴坐标的清零操作。位于主界面左中部的区域即为自动运行模块,该模块可以实现自动运行所需的功能,如程序选择与执行、运行模式选择、程序编辑等。位于主界面左下部的区域即为手动运行模块,该模块可以实现手动运行所需的功能,如选择轴、定距移动、连续运动等。位于主界面中上部的区域即为主轴运行模块,可以实现主轴的启停、调速、刀具动作、状态监控。位于主界面中下部的区域即为气动系统控制模块,该模块可以实现对气动系统的手动操作,以及状态监视。总体控制模块位于界面右侧,提供了启用手轮、自动运行和手动运行切换、紧急停止等功能。

4 柔性导轨制孔设备坐标系下加工代码的生成方法

当需要在飞机舱段蒙皮外表面或机翼等平缓大表面钻孔时,将该设备通过导轨吸附在待加工表面,使制孔设备与工件组成一体化的钻孔系统,然后根据预先编制的加工代码,快速高效地进行群孔钻削。与传统的刚性加工机床不同,柔性自动制孔设备加工过程中,工件不仅仅作为加工对象,它也成了制孔设备基座的一部分。在导轨弯曲吸附之后,导轨的 X 轴已经不是沿直线

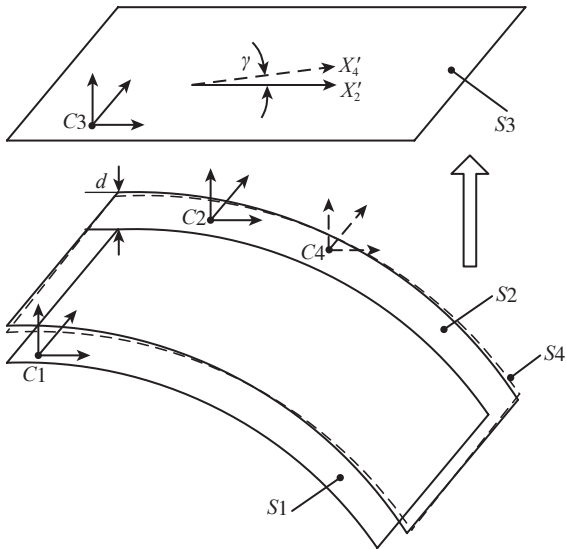


图7 制孔加工坐标变换示意图
Fig.7 Diagram of coordinate transformation in drilling process

方向了,而是沿着导轨弯曲的方向。因此,整个待加工面也不再是一个平面,而是一个贴附于飞机蒙皮表面的曲面。生成设备加工代码,需要建立工件三维数模上钻孔点与设备加工坐标系的映射。控制系统中设计的加工代码生成方法如图7所示。

首先,需要将飞机三维数模(所在坐标系设为 $C1$)中待加工面 $S1$ 连同其上的孔位信息向外偏置一个距离 d ,形成偏置曲面 $S2$,其坐标系为 $C2$, \vec{X}_2 沿着导轨理论安装方向。 d 的值等于柔性导轨齿条中截面到工件表面的距离。偏置曲面 $S2$ 为设备理论运行面,但是在设备实际定位过程中,其实际运行面为 $S4$ (如图中7中虚线曲面所示),其坐标系为 $C4$, \vec{X}_4 沿着导轨实际安装方向。

其次,设置一个虚拟平面 $S3$,其上的坐标系为 $C3$ 。将 $S2$ 曲面以及 $S4$ 曲面分别展开后,映射到 $S3$ 平面上,映射结果中 \vec{X}_2 和 \vec{X}_4 分别为导轨理论安装方向和实际安装方向在 $S3$ 平面上的映射。角 γ 为 \vec{X}_2 与 \vec{X}_4 的夹角,即

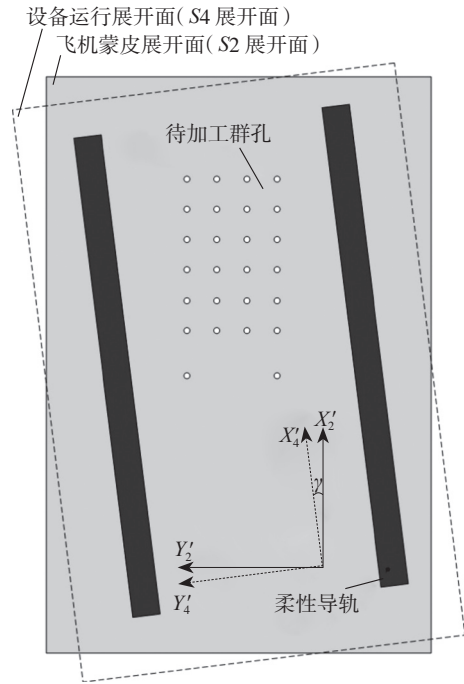


图8 制孔设备加工面展开图
Fig.8 Expansion plan of machined surface

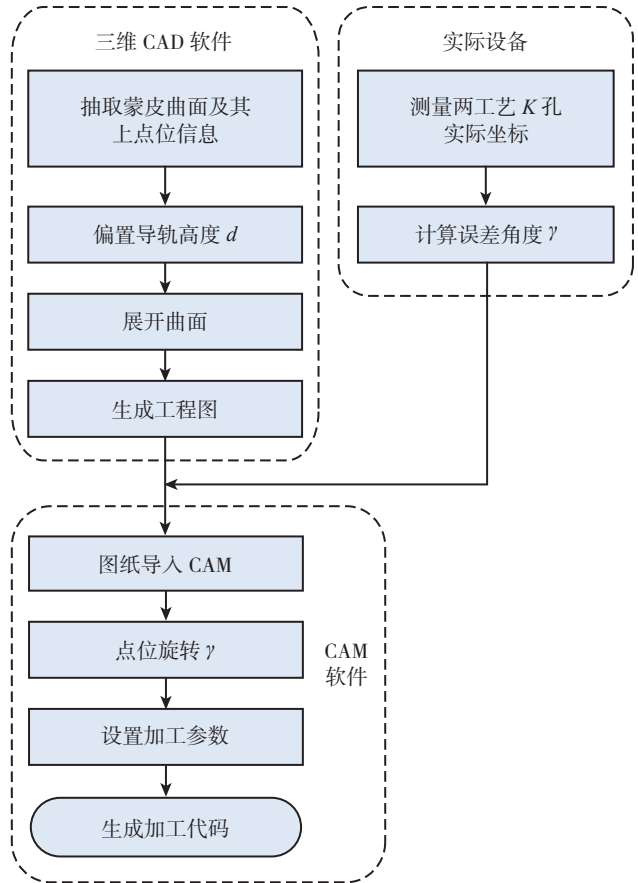


图9 设备加工代码生成流程图
Fig.9 Flow chart of NC code generation

导轨实际安装方向与理论方向的夹角,如图8所示(为了明示各部分几何关系,图中夹角 γ 取值较大)。

最后,对偏置曲面S2在虚拟平面S3上生成的S2'绕虚拟平面坐标系C3的原点旋转 $-\gamma$ 角后,便可直接在计算机辅助制造软件(如MasterCAM)中生成群孔钻削路径。此路径上的点位信息,即是待加工面S1在设备运行面为S4上的投影,按其进行加工,即可补偿因导轨高度引起的X轴方向弧长误差,同时也可补偿导轨在工件表面粗略定位的偏角误差。

实际工程应用中,可以遵循以下流程实现三维数模中点位信息生成设备加工代码,如图9所示。首先在一种三维CAD软件(如CATIA)中将飞机蒙皮表面上的点位信息映射到两维工程图上;之后利用设备本身的检测功能测量实际蒙皮上两个工艺K孔的设备坐标,计算得到安装误差角 γ ;最后在一种CAM软件(如MasterCAM)中导入之前生成的两维工程图,并补偿 γ 角,设置好参数后便可生成加工代码。

5 结束语

研究开发了一套针对于柔性轨道自动制孔设备的专用数控系统。该系统是以PMAC运动控制器为核心,结合上位机、执行元件、检测元件等构建起来的。同时开发的数控系统软件提供了一个人机交互的平台,便于操作。探讨了三维数模上的点位信息不能直接生成设备加工代码的问题,并提出了一种有效、便捷的解决方法。整套数控系统已经很好的应用到了开发的柔性轨道自动制孔设备之上,能够实现设计使用要求,完成自动制孔加工。

参考文献

- [1] 卜泳,许国康,肖庆东.飞机结构件的自动化精密制孔技术.航空制造技术,2009(24):61-64.
- [2] 郭洪杰.大型飞机柔性装配技术.航空制造技术,2010(18):40-41.
- [3] 林美安,陈文亮,王珉,等.柔性轨道自动化制孔系统的仿真研究.机械制造,2010(04):14-17.
- [4] 西奥多·M·博伊尔-戴维斯,小詹姆斯·N·巴特里克,罗杰·A·盖奇,等.柔性轨道多轴工具机及方法.中国:B23Q9/00.CN1993204[P],2007-07-04.
- [5] 林美安.飞机机身装配工艺及仿真技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [6] 侯志霞,刘建东,薛贵军,等.柔性导轨自动制孔设备控制技术.航空制造技术,2009(24):58-60,64.
- [7] 孟璇,邢玉生,王春.基于PMAC的并行双CPU开放式数控系统的研究与开发.组合机床与自动化加工技术,2000(10):28-30,37.
- [8] 白海清,彭玉海,何宁.基于PMAC的数控系统软件开发研究.机床与液压,2007(02):59-61.

(责编 深蓝)

(上接第77页)

0.4mH,转动惯量是 $0.9\text{kg}\cdot\text{m}^2$,极对数为4,额定电压是36V,额定电流6.5A,额定转矩 $0.6\text{N}\cdot\text{m}$,额定功率185W。在仿真时,开始转矩为0,在0.1s时加上额定转矩。将电压初加于电机上,给定转速和实际的转速之间相差较大,即ASR的输入很大,其输出很快达到限幅值,电流也很快上升,接近最大值。ASR达到饱和,转速环相当于开环状态。经过双闭环的调节作用,系统表现为恒值电流给定下的电流调节系统,电流急速下降,转速线性增长。当转速达到给定值后,转速调节器的给定与反馈电压平衡,输入偏差为零,最终系统在0.04s内达到了稳定。

无刷直流电机转速仿真结果如图3(a)所示,转速单位r/min,时间单位是s。在空载时,转速稳定上升,在0.03s时转速达到额定转速。在0.1s时加上额定转矩后,转速下降后达到稳定。

无刷直流电机电磁转矩仿真结果如图3(b)所示,转矩单位 $\text{N}\cdot\text{m}$,时间单位是s。刚开始转矩有过冲,这是由于在刚启动时,反电势很小,电流加在电机内阻上,造成电流很大,因而转矩也很大。电磁转矩在0.05s时回复到0,这是因为空载转矩接近于0。0.1s时加外部转矩,电磁转矩迅速反应在额定转矩附近。

无刷直流电机反电势仿真结果如图4(a)所示,反电势在0.03s时反电势建立。在0.1s时由于加负载,电动势下降。

无刷直流电机电流仿真结果如图4(b)所示,电机启动时电流有过冲,在0.4s时接近0值。在0.1s时由于加负载,电机有电流出现,波形相差 120° 。

5 结论

仿真结果图证明变速积分分离法的数字PI控制算法在电动汽车中方案可行,并且具有相当的快速性。电动控制系统的仿真可以提前了解系统的内部性能,减少生产周期。

参考文献

- [1] 黄智.电动汽车控制器的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2007.
- [2] 袁飞雄.多相永磁无刷直流电机控制系统研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [3] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计.北京:机械工业出版社,1997.
- [4] 陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统(第三版).北京:机械工业出版社,2003.
- [5] Bose B K. Modern Power Electronics and AC Drives.北京:机械工业出版社,2003.

(责编 小城)