

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.020

多路纤维铺放控制系统的设计研究

何 琴

(文华学院 机械与电气工程学部,湖北 武汉 430074)

摘要:针对目前传统的复合材料成型技术难以保证小曲率半径、凹凸不平复杂表面构件加工的质量问题,对最新的纤维铺放技术进行了研究,设计了一种基于主流的 IPC 机 + PMAC II 可编程运动控制器的开放式控制系统,利用 VC++6.0 搭建了人机交互界面,通过 PMAC II 进行硬件/软件的设计以实现每一路电动机的速度、位移的控制,进而达到对每一路纤维丝束的独立运动控制及整体的联合运动控制的目的,从而实现了铺放压力的控制作用。同时还设计了压力反馈系统,实现对铺放压力的精确控制。研究表明,该控制系统能够实时监测铺放过程中的各项参数,并能进行自动/手动操作;不仅能够顺利完成表面形状复杂构件的加工,而且达到铺放压力在 30 N 范围内误差为 $\pm 3\%$ 的精度,保证了铺放质量。

关键词:铺放头;纤维丝;PMAC II;控制系统

中图分类号:TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0393-04

Control system of multiple fiber tows placement

HE Qin

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wen Hua College, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional composites forming technologies were difficult to guarantee the processing quality of complex components such as components with small curvature radius or with concave-convex surface, the latest fiber placement technology was analysed. A control system was designed based on the mainstream open control mode of a PC machine combining with a programmable multi-axis motion controller. VC++6.0 was used to build the man-machine interface. Hardware and software were designed to complete speed and displacement control of each motor through PMAC II, thus achieving independent movement control of each fiber bundle and overall joint movement control, so as to realize the control of laying pressure. At the same time, a pressure feedback system was designed to realize the accurate pressure control of multiple fiber tows. Research results show that the control system could make real-time monitor of the parameters in the laying process, and perform automatic or manual operation. It not only can smoothly complete surface uneven components laying operations, but also realize that the pressure errors were $\pm 3\%$ N within the range 30 N, ensuring the quality of laying.

Key words: placement head; fiber tow; PMAC II; control system

0 引 言

目前,复合材料在航空航天及汽车领域的用量正成爆炸式增长^[1-3],预计 2015 年的全球碳纤维消费量将达到 70 000 t^[4]。纤维铺放技术作为一种新型复合材料成型技术,是由纤维缠绕技术和自动铺带技术发展起来的^[5-6],不仅拥有传统的手工铺层技术对复杂铺放表面适应性强和自动铺带技术稳定性高、加工精度高、灵活性强的优点,还避免了它们各自的缺点^[7-8]。

该项技术的发展对机翼车身等曲率半径小、凹凸不平的复杂零件的制造意义十分重大。对于该项技术的研究,美国的 Cincinnati Milacron 公司是走在了世界前列,拥有小型、中型、大型一系列纤维铺放设备,可以满足不同带铺放构件尺寸,Boeing 公司的超大型 787 “Dreaming”客机中有 5 个重要机身段构件就是通过该公司的 Viper6000 纤维铺放机生产加工出来的^[9-10]。国内的研究则比较滞后,主要是一些高校在研究,虽然也取得了不错的研究成果,但仅仅只是能生产加工一

些表面曲线形状简单、规则的制品如液化气罐,目前仍处于研究初级阶段。

本研究设计一种基于主流的 IPC 机 PMC II 可编程运动控制器的开放式控制系统。

1 纤维铺放控制系统的设计

1.1 铺放系统功能要求

铺放头作为纤维铺放机的重要组成部分是保证铺放任务顺利进行的关键。铺放头需要完成纤维丝束的剪切、夹紧、重送、加热、施压等功能^[11-12]。该设计中铺带头安装在移动小车上,具有伸臂运动、垂直运动和绕垂直于芯模轴线转动的三坐标运动自由度,铺放头周向位置控制和铺放倾角姿态控制由伸臂运动、竖直运动和绕轴转动三坐标实现。其中,伸臂运动和竖直运动采用滚珠丝杆和直线导轨组件实现机械传动,绕轴转动采用精密轴承和齿轮实现机械传动,各坐标伺服控制可以实现任意角度的自动铺放和铺带间隙调整。其中,伸臂运动行程为 500 mm,定位精度为 0.1 mm;垂直运动行程为 ± 100 mm,定位精度为 0.05 mm;绕轴运动行程为 $\pm 360^\circ$,定位精度为 0.1° 。纤维丝铺放靴作为铺放头的施压装置是铺放头的核心部件,其任务是将经过导向、夹紧、剪切、重送等操作后的纤维丝束压实到芯模表面。该设计以 8 路纤维丝束铺放作业为例,则铺放靴中包含 8 个铺放手指,每一个铺放手指对应一路纤维丝束,各路纤维丝铺放手指独立可控,互不干涉。在铺放过程中,各路纤维丝铺放手指根据每一路纤维丝束的路径规划和芯模表面实际情况来调整各自的运动,达到不同的进给位移,防止芯模表面与纤维丝之间出现架空、气泡等现象,从而保证铺放质量。

单个纤维丝铺放手指机构图如图 1 所示,该手指机构主要由施压系统、传动系统、反馈系统等组成。施压系统主要由施压靴头组成,为纤维丝束提供一定的铺放压力,使其能够很好地压实到待铺放芯模表面。传动系统主要由软轴、丝杠、滚珠螺母和导杆组成,是系统动力和运动传递的中间环节,将运动和动力从电动机传递给施压系统,为整个铺放靴机构提供运动动力,同时达到改变运动大小及形式的目的。反馈系统主要由压力传感器组成,在纤维铺放过程中起到实时压力监控的作用,它将检测到的铺放手指的实时压力值反馈给铺放控制系统,使其与预先设定的压力值进行比较并及时进行压力值的调整,从而使铺放手指的压力大小与预定的值相匹配,满足铺放过程中对压力

值的要求。

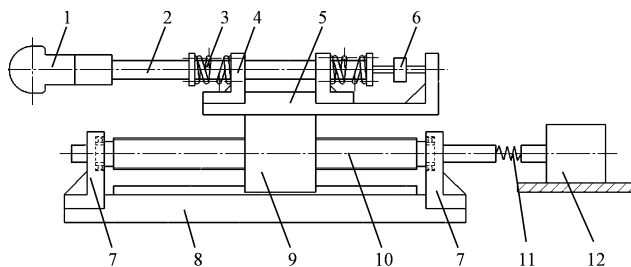


图 1 单个纤维铺放手指机构图

1—施压靴头;2—导杆;3—弹簧;4—燕尾槽支撑座;5、8—支撑板;6—压力传感器;7—轴承座;9—滚珠螺母;10—丝杠;11—软轴;12—电动机

1.2 控制系统方案

控制系统采用 PC + Turbo PMAC II 运动控制器主—从式双数控系统结构。PC 机采用工控机作为上位机面向用户层,负责铺放过程中的人机交互、状态监控和上、下位机通信等功能。运动控制器采用 Turbo PMAC II 作为下位机面向控制层,负责铺放过程中的实时运动控制、逻辑控制。该控制系统的特点为:对 PC 机的依赖性较低,实时控制由运动控制器来完成,系统运行速度快、精度高、能够提高铺放工作的效率。控制结构总图如图 2 所示。该结构主要由上位机 IPC、总线 PCI 通信系统、下位机 PMAC II 可编程运动控制器、伺服系统、反馈系统组成。

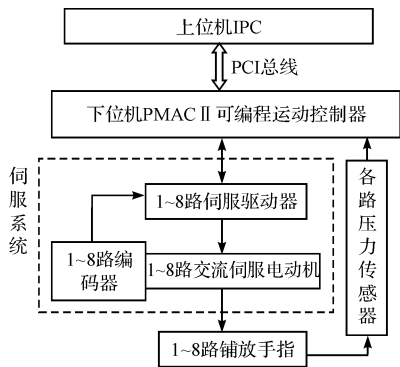


图 2 控制结构总图

1.3 铺放压力控制

该系统能够进行铺放压力值的预设、自动控制和显示记录功能。其最大控制压力为 300 N,当控制压力超过 30 N 时,精度误差为 $\pm 4\%$;当控制压力在 30 N 以内时,精度误差为 $\pm 3\%$ 。在纤维铺丝束放过程中要保证铺放靴施压靴头压力值的稳定,该压力值是通过铺放手指运动时的进给位移量产生的,也就是由伺服电动机主轴的运动产生的。换言之,要保证伺服电动机运行稳定、动态响应速度快。该系统中伺服电动机

采用的是位置控制模式,在该控制模式下,系统主要处理的动态跟随误差和静态误差,以保证良好的动态响应特性和稳定性,满足纤维丝束铺放过程中对压力的要求。位置控制模式框图如图 3 所示,该控制模式为三环控制系统,包含电流环、速度环和位置环,分别控制伺服电动机的转矩、速度和位移,共同形成 PID 的反馈调节系统,保证系统的压力控制的精度。

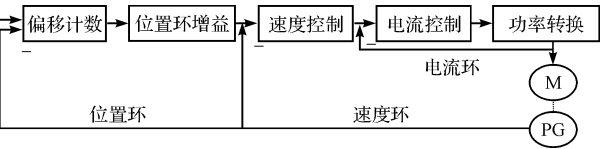


图 3 位置控制模式框图

该设计中,PMAC II 对电机的运行控制采用的是电子齿轮控制模式。电子齿轮是一种位置跟随控制模式,能够实现对伺服电动机位置的精确跟踪。电子齿轮运动控制原理为:PMAC II 控制器接受 IPC 机的控制指令,然后给伺服驱动器发送脉冲指令,伺服驱动器驱动伺服电动机进行相应的运动,同时编码器采集伺服电动机运动信号进行位置反馈,伺服驱动器根据反馈回来的位置指令按照电子齿轮传动比进行调整,使其与脉冲指令相匹配,即通过电子齿轮可以完成一个 PMAC II 控制卡脉冲指令与伺服电动机轴位移量之间的换算,从而实现 PMAC II 控制卡对伺服电动机的位置跟踪,保证纤维丝束铺放的精度。电子齿轮的计算公式为:

$$\frac{B}{A} = \frac{4 \times P_c \times m \times \Delta t}{n \times P} = \frac{4 \times P_c}{P} \times \frac{m}{n \Delta t} \quad (1)$$

式中: Δt —指令单位, P_c —编码器脉冲, P —滚珠丝杠节距, m/n —减速比。

2 控制软件的实现

控制系统中的软件模块可分为两大部分:上位机 IPC 软件模块和下位机 PMAC II 运动控制卡软件模块。IPC 机软件模块主要完成人机交互界面的设计和系统状态监控功能。PMAC II 运动控制卡软件模块主要完成运动程序的设计、PLC 程序的设计、实时的运动操作,以及系统状态数据采集功能。上、下位机之间的通讯功能则通过 PMAC II 本身带有的 PCOMM32. DLL 通信驱动程序实现。

运动程序的编写直接在 PMAC II 运动控制卡执行软件的终端窗口进行。首先,本研究使用指令 OPEN PROG { constant } ({ constant } 为程序编号) 打开运动程序缓冲区,然后进行具体的程序编写,程序编写完后使

用 CLOSE 命令关闭运动程序缓冲区。当需要执行某个具体程序时,可以在终端窗口输入“&mBnR”(m 为坐标系号,n 为程序号,B 指令为选择某个程序,R 指令为执行运动程序)完成该操作。

PLC 程序的设计直接采用 PMAC II 运动控制卡的内置功能,编写程序时不用考虑运动程序的状态,PLC 程序可以进行重复、快速的周期计算,用于监视 I/O 口、改变增益、执行命令等。控制系统中的 PLC 程序设计主要是进行纤维丝束铺放过程中各路丝束的重送、夹紧、剪切等操作以及输入输出 I/O 口数据采集以实现对电机的逻辑控制,纤维铺放流程图如图 4 所示,纤维丝束在导向、剪切操作后传递到铺放靴头,再经过加热处理,使丝束具有一定的粘性,然后通过施压装置将丝束压实到芯模表面,完成一次铺放作业,当需要改变路径铺放时,夹紧和重送操作才执行。

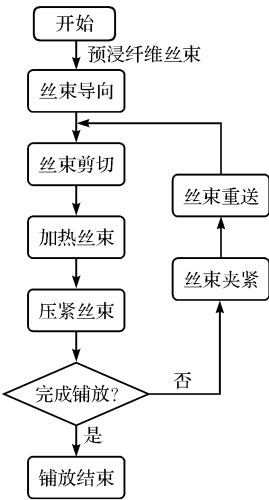


图 4 纤维铺放流程图

3 实 验

本研究利用 VC + 6.0 + 设计的人机界面如图 5 所示,该界面主要包括铺放状态数据和传感器态显示、手动/自动操作,以及程序操作窗口。通过 PMAC 自带的 Pcomm32 通讯驱动程序实现与 IPC 机通讯功能。然后对电动机进行 PID 整定,保证其位置和速度动态响应性能,整定界面参数设置及整定曲线如图 6 所示,当整定曲线无限接近理想的波形曲线时,则电机的动态跟随性能优越,整定工作完成,控制系统能够满足铺放时对压力的要求。

4 结束语

针对国内纤维丝束铺放技术只能铺放形状简单制品的落后现状,笔者对多路纤维丝束铺放的控制系统



图5 控制界面

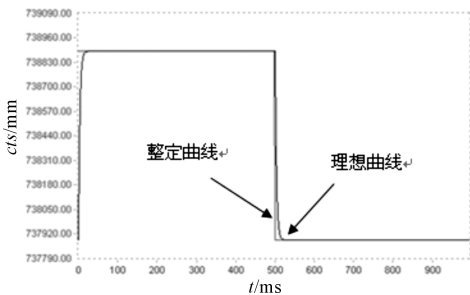
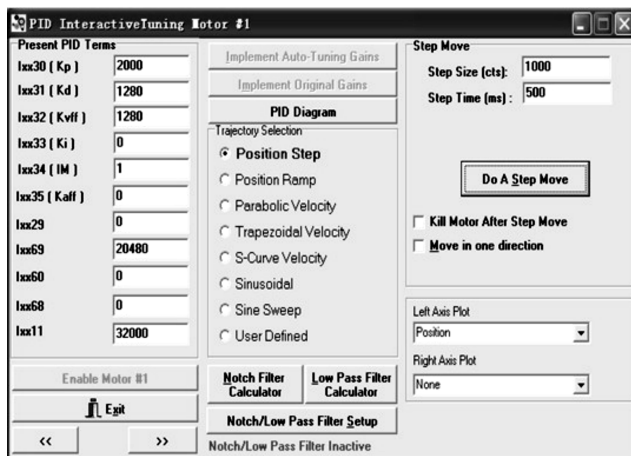


图6 PID 整定

进行研究设计,设计了 IPC + Turbo PMAC II 运动控制器的开放式控制系统。IPC 机负责人机交互,状态监控和上、下位机的通信;PMAC II 则负责实时的运动控制和逻辑控制。该系统不仅实现对各路丝束的整体联合运动的控制,而且成功实现对每一路丝束的独立运动的控制,进而实现对铺放构件表面的压力控制,使得

构件表面各处的压力均等,从而实现对表面形状复杂构件的加工,而且传感检测装置的实时检测反馈,控制了压力值的精度误差,保证了铺放质量。

参考文献 (References):

- [1] 周晓芹,曹正华. 复合材料自动铺放技术的发展及应用[J]. 航空制造技术,2009(1):1-3,7.
- [2] 郝建伟. 复合材料制造自动化技术发展[J]. 航空制造技术,2010(17):26-29.
- [3] 史耀耀,阎 龙,杨开平. 先进复合材料带缠绕、带铺放成型技术[J]. 航空制造技术,2010(17):32-36.
- [4] 李俊斐,王显峰,肖 军,等. 面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形研究[J]. 航空学报,2012(8):1,9.
- [5] TABAKOV P Y, WALKER M. A technique for stiffness improvement by optimization of fiber steering in composite plates[J]. **Applied Composite Materials**, 2010, 17(5): 453-461.
- [6] GE Xin-feng, LI Rui-hua. Study of automatic fiber placement manipulator's robotic kinematics manipulability based on volume element[J]. **Research Journal of Applied Sciences**, 2013(3):2221-2224.
- [7] 徐东亮,李东海. 基于 OpenGL 的虚拟铺放机建模及参数化驱动[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2010(3):403-405.
- [8] BECKWITH S W. Filament winding vs fiber placement manufacturing technologies[J]. **SAMPLE J**, 2008, 44(2):54-55.
- [9] HOLMES G A, WESSON S, MCDONOUGH W G, et al. An automated testing machine for monitoring the evolution of fiber fibreaks [J]. **Journal of Materials Science**, 2009(44):2007-2015.
- [10] KIM J H, HETTENHouser J W, MOON C K, et al. A fiber placement device and methodology for preparing 2-D and 3-D combinatorial microcomposites [J]. **Journal of Materials Science**, 2009(44):3626-3632.
- [11] 史耀耀,阎 龙,杨开平. 先进复合材料带缠绕、带铺放成型技术[J]. 航空制造技术,2010(17):32-36.
- [12] 王明哲. 基于 CAE 早餐杯密封盖模具的研发[J]. 包装与食品的机械,2014(2):47-49.
- [13] DEBOUT P, CHANAL H, DUC E. Tool path smoothing of a redundant machine: application to automated fiber placement[J]. **Computer-Aided Design**, 2011(43):122-132.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

何 琴. 多路纤维铺放控制系统的设计研究[J]. 机电工程,2015,32(3):393-396.

HE Qin. Control system of multiple fiber tows placement[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(3):393-396.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>