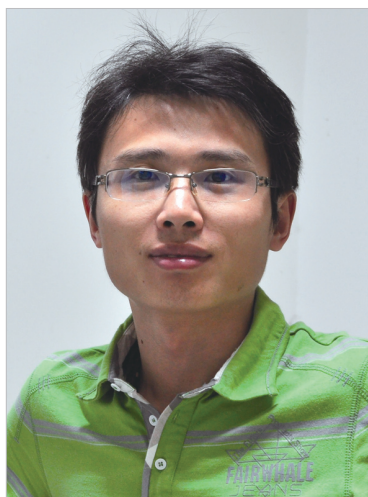


复合材料自动铺放机主轴双驱同步控制研究*

Study on Synchronizing Control of Double Drive for Spindle of Composites Automated Placement Machine

南京航空航天大学机电学院 严 飙
南京航空航天大学材料科学与技术学院 文立伟 肖 军 宋清华 孙 成



严 飙

博士研究生,主要从事复合材料数字化成型装备技术研究。

为了满足某改造项目的卧式铺放机大惯量主轴精密驱动、主轴与铺放各轴的精密联动插补需求,采用双驱结构来提高伺服系统的控制性能和跟踪精度。选用 UMAC 运动控制器连接西门子 611U 模块组成“IPC+运动控制器”的开放式数控系统。

* 民机专项资助项目资助。

复合材料用量增加推动了自动化制造技术及装备的迅速发展,为制造整体结构从而最大限度地利用复合材料整体化结构优势,自动铺放设备构型越来越复杂、装备尺寸越来越大,对驱动功率和传动精度要求越来越高。多电机同步高精度驱动,尤其对于大型卧式复合材料自动化成型设备,已经成为关键技术之一。

通过结合“PID+速度/加速度前馈+陷波滤波器”控制算法和 611U 伺服驱动模拟 I/O 主从式连接方式,有效实现主轴电机同步工作。经长时间实际铺放应用,验证该控制策略满足自动铺放控制要求。

复合材料用量的增加推动了自动化制造技术及装备的迅速发展,为制造整体结构从而最大限度地利用复合材料整体化结构优势,自动铺放设备构型越来越复杂、装备尺寸越来越大,对驱动功率和传动精度要求越来越高。多电机同步高精度驱动,尤其对于大型卧式复合材料自动化成型设备,已经成为关键技术之一。

国内外许多学者已经对同步运动控制方法进行了探索和研究,李连升提出了加入差电流负反馈的方法保证两个电机的电流保持一致^[1];陈庆伟等针对电机速度的一致性要求,提出了差速负反馈控制方法,它断开从电机的速度环,由主电机速度补偿计算后将电流信号直接加给两驱动电流环^[2];李经源和徐文云提出了一种学习控制算法来进行同步控制:通过将其中一个电机的输出值经学习因子的计算后再与该电机的输入进行运算后记忆,将计算结果当成另一个电机的输入,从而保证同步运动的精度^[3];Koren 和 Kim 等采用交叉

耦合控制方法对两轴的插补提供了一个有效的方法,现在广泛应用于减小同步运动误差^[4-5]; Siemens 840D 数控系统提供 Gantry 功能,将两个电机定义在同一坐标轴上得到完全相同的运动指令实现同步运动,或者系统采用扭矩补偿控制器实现主从电机之间的扭矩平衡分配,且扭矩补偿控制器根据伺服电机的具体性能分配相应的负载扭矩^[6-7]。

本文针对某型号航天器生产任务需求,以原有卧式数控缠绕机为平台改造升级,增加自动铺放功能,实现缠绕、自动铺放工艺及其自动切换。为满足上述工艺要求,采用工控机和 UMAC (Universal Motion and Automation Controller) 多轴运动控制器构建开放式数控系统,基于双电机消除驱动原理,通过两套 Siemens 611U 驱动器同步控制主轴伺服电机,实现芯模运动与铺放头各轴运动的精确联动插补。

双电机同步消除驱动原理

虽然提高齿轮的制造精度、减小空回误差可以改善机床转动精度,但是要制造出没有误差的齿轮是不可能的。采用如图 1 所示的双电机驱动结构已经成为提高传动精度的主流方法之一,两个伺服电机经各自减速机构减速后,其传动链上的小齿轮分别和输出轴大齿轮啮合面啮合^[8]; 电机的输出扭矩与电枢电流成正比,通过每个电机的输入电流指令控制电机的输出扭矩,当电流为零时,可以通过预置偏置电流,使两伺服电机

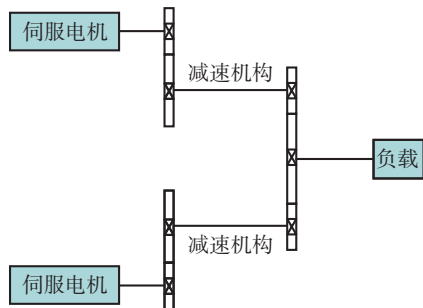


图1 双驱结构原理图

输出扭矩大小相等、方向相反,两小齿轮齿面分别与大齿轮的两个相反齿面贴合,保证输出轴不会在齿隙内来回游动。而当两个电机的电流指令同时增加至一定值时,其中被反向偏置的伺服电机扭矩方向会改变,与另一个伺服电机同向共同驱动负载,当电流减小回到零点过程中,其中被反向偏置的电机会提前反向拖动负载,保证两小齿轮不是同时离开大齿轮的啮合面,消除了齿隙并提高了主轴的大惯量输出能力。

控制系统结构

本文所研究的自动铺放机改造是在保持原缠绕机功能的基础上增加一套多自由度铺放头及相应控制系统,与缠绕单元共用原主轴构成完整的铺放单元,总体结构如图 2 所示。鉴于原机床采用西门子 840D 四轴联动数控系统的扭矩补偿控制算法实现主轴电机同步驱动,为共用双主轴电机、且满足铺放单元的多轴联动等特殊控制要求,选用 UMAC 多轴运动控制器作为下位机、工控机作

为上位机,组成“IPC+ 运动控制器”的开放式数控系统。

铺放单元数控系统具有模块化、可重构、可扩充的软硬件系统,其中基于 PC 的运动控制器是整个控制系统的核心,它接受来自上位 PC 机的应用程序命令,按照设定的运动模式,完成相应的实时多轴同步协调运动规划,向伺服驱动器发出相应的运动指令,并直接决定控制速度和精度。系统硬件结构如图 3 所示,其中轴接口板 ACC-24E2A 输出 $\pm 10V$

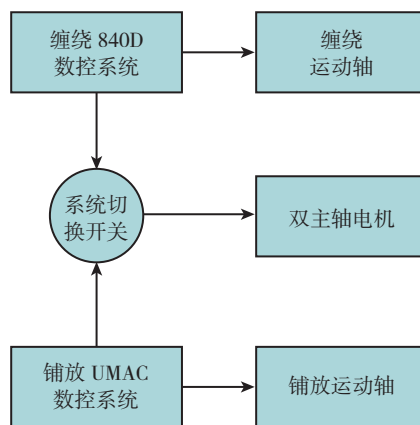


图2 铺放缠绕结构图

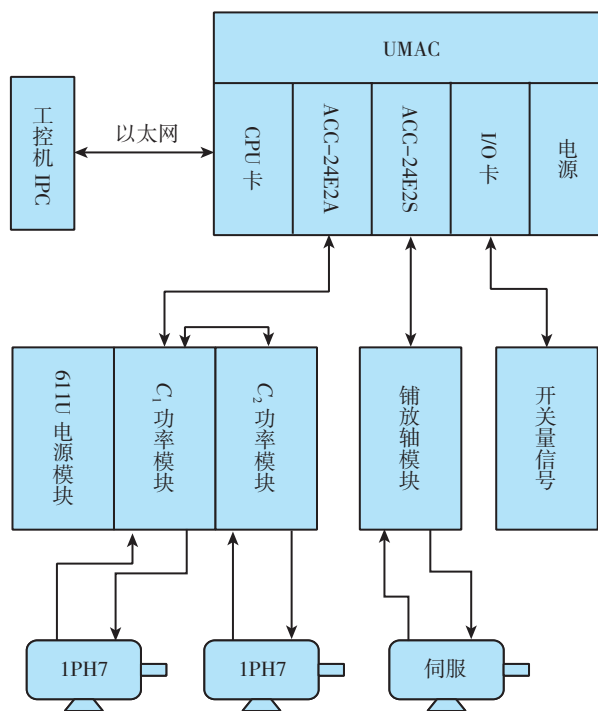


图3 控制系统结构图

模拟量指令信号驱动主轴电机的同步运转,轴接口板 ACC-24E2S 输出脉冲加方向指令信号驱动辅放头各轴动作。

控制策略

1 UMAC 及控制算法

UMAC^[9]是由一套 3U 结构的欧洲标准卡组成的模块化 Turbo PMAC2 系统级控制器,它借助 Motorola 的数字信号处理器 DSP5630x,可同时控制多达 32 个轴、16 个坐标系,实现多轴联动控制;鉴于 UMAC 卡具有的优异控制功能和良好的开放性特点,系统采用 USB 或 Ethernet 通讯方式使 UMAC 与上位机及控制操作台连接,通过上位机来处理后台任务,实现如程序和参数的输入输出、显示等非实时性功能和系统的人机对话和管理功能。

以 UMAC 为核心的控制系统采用本身提供的“PID+速度/加速度前馈+陷波滤波器”控制算法,在理论上可以完全消除系统的静态位置误差、速度误差、加速度误差以及外界扰动引起的误差,使系统获得很好的鲁棒性。图 4 为该算法原理图,其中, K_p 为比例增益(I_{xx30}); K_d 为微分增益(I_{xx31}); K_{vff} 为速度前馈增益(I_{xx32}); K_i 为积分增益(I_{xx33}); K_{aff} 加速度前馈增益(I_{xx34}); n_1 、 n_2 、 d_1 、 d_2 为陷波滤波器调整系数。

传统的 PID 控制是一种反馈控制,它的控制机理中需要反馈信号,从反馈原件得到信号再同指令信号进行比较运算会产生延时,可能使控制失效或者造成系统滞后,因此很多系统都引进了作用于系统前向通道上的前馈控制,如图 4 所示。对于采用 PID+前馈算法控制的电机 xx ,其实际输出为:

$$CMDout(n) = 2^{-19} \times I_{xx30} \{ [I_{xx08} \times [FE(n) + (I_{xx32} \times CV(n) + I_{xx35} \times CA(n)) / 128 + I_{xx33} \times IE(n) / 2^{23}] - I_{xx31} \times I_{xx09} \times AV(n) / 128 \}, \quad (1)$$

式中: $CMDout(n)$ 为 16 位的伺服周期输出命令 ($-32768 \sim +32768$), 它被转换成 $-10 \sim +10V$ 的输出,幅值由 I_{xx69} 定义; I_{xx08} 为电机 xx 的内部位置放大系数; I_{xx09} 为电机 xx 速度环的内部放大系数; $FE(n)$ 是伺服周期 n 内的跟随误差; $AV(n)$ 是伺服周期 n 内的实际速度; $CV(n)$ 是伺服周期 n 内的指令速度; $CA(n)$ 是伺服周期 n 内的指令加速度; $IE(n)$ 是伺服周期 n 内的跟随误差的积分,大小 $\sum_{j=0}^{n-1} FE(j)$ 。

在实际应用中,根据电机的负载、工作环境及本身性能进行以上各参数的调整。UMAC 的 PEWIN 软件为用户提供了调整参数的工具,通过分析脉冲响应曲线来评估 PID 参数

的调整,通过分析正弦曲线响应来评估前馈参数的调整。只有这样电机才能真正稳定的工作,并且具有高效的工作性能。

2 611U 伺服系统及同步控制

伺服系统是数控机床最重要的组成部分之一,是数控装置与执行部件之间的联系纽带。西门子数控装置 SIMODRIVE 611U 采用模块化安装方式,配用相同系列的电源模块和功率模块,最多带两根没有插补关系的数控轴,可分别进行速度控制、转矩控制和定位控制,既可以用模拟量控制,也可以用数字量控制;并且该数控装置既可以通过显示器和操作者控制单元参数化控制,也可以通过 Simocom U 软件进行适当的参数化配置与优化,应用范围十分广泛^[10]。

为满足两个主轴电机的同步工作要求,可使用模拟输入或者输出,实现主/从驱动的功能。如图 5 所示,根据电机刚性连接与否可选择开环扭矩控制方式(M_{set} 方式)或闭环转速控制方式(N_{set} 方式),将输入端子 I3.x 按标准指定给“开环扭矩控制操作”信号,通过 I3.x 实现两方式转换。由于原缠绕机两个主轴电机在实际应用中采用刚性连接,此时 I3.x=1; C_1 主驱动接受来自 UMAC 控制器的模拟转速信号,再通过一个模拟输出点(端子 75.x/15)给 C_2 从驱动输入扭矩设定点。其中 C_1 主驱动必须设定端子 75.x/15 模拟输出和置 DAV 标准化,对应参数分别为:

P0626=36 (扭矩设定点),

P0627=36 (漂移系数),

P0631=1 (过压控制保护开),

P0625=50 (对应 +5V,近似于两倍的额定扭矩);

C_2 从驱动则需要设定以下参数:

P0607=1 ($N-$ 设定/ $M-$ 设定),

P0619=5 (扭矩设定点的标准化电压),

P1241=从驱动电机的额定扭矩(扭矩设定点的标准化),

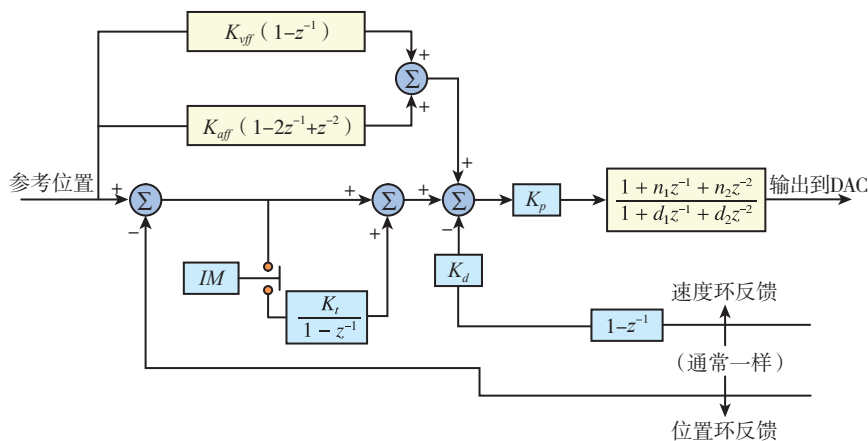


图4 “PMAC PID+速度/加速度前馈+陷波滤波器”控制算法

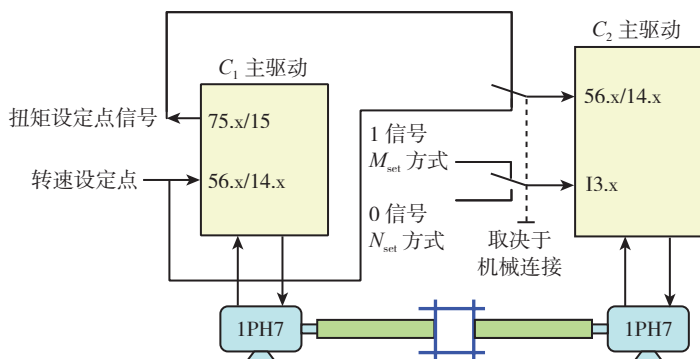


图5 模拟I/O连接主-从双驱

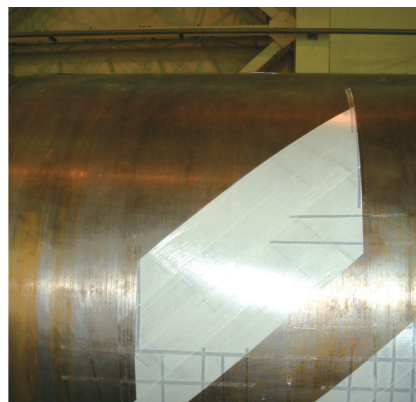


图7 铺放效果图

功能号=4(开环扭矩控制方式)。

应用验证

UMAC多轴控制器采用实时操作系统,数控程序代码解释工作和连续运动时复杂的插补运算都由其内部DSP来完成,可以保证对运算过程和各种紧急情况的及时处理。Delta Tau公司提供了UMAC与上位机间与运动控制相关的动态链接库PCOMM32.DLL,它包含了与UMAC进行通讯的所有方式,使用户方便地在VB、VC、Delphi及C++ Builder下编写自己的软件控制UMAC。因此,在上位机软件系统的开发中使用Windows平台的面向对象可视化设计工具Visual Basic 6.0,设计出如图6所示复合材料自动铺放系统控制

界面,其中两个主轴电机作为一个机床C轴来处理,可在机床正常工作时都处于激活状态,并在JOG、手轮、MDI和自动等方式下实现同步运动。

试验采用75mm宽玻纤预浸带在柱形模具表面进行45°自动铺放,效果如图7所示,相邻预浸带间重叠±0.5mm,芯模旋转C轴与铺放机床其他各轴之间联动插补关系良好,两个主轴电机在UMAC控制下通过主从式连接实现了精密同步运动,提高了机床精度及可靠性,为铺放产品质量提供进一步的保证。

结论

本文为实现自动铺放系统下,与缠绕系统共用主轴双电机的同步控制及精密联动插补,在“IPC+UMAC+伺服电机”开放式结构的运动控制

系统中,通过结合数控系统“PID+速度/加速度前馈+陷波滤波器”算法和611U伺服驱动模拟I/O主从式连接,可以很好地满足主轴电机同步消隙精密驱动要求。经过长时间实际铺放应用,验证了主轴与铺放其他各轴的良好联动插补

参考文献

- [1] 李连升. 现代雷达伺服控制. 北京: 国防工业出版社, 1987:150-153.
- [2] 陈庆伟, 郭毓, 杨非, 等. 双电机同步联动控制系统. 南京理工大学学报, 2005, 29 (Supp):103-107.
- [3] 李经源, 徐文云. 双缸同步运动控制算法研究. 机械制造与自动化, 2005, 35(4):156-158.
- [4] Koren Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing system. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102 (4): 265-272.
- [5] Kim S, Chu B, Hong D, et al. Synchronizing dual-drive gantry of chip moulder with LQR approach. Kob: Proceeding of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003: 21-25.
- [6] 杨涛, 高殿斌, 李开越, 等. 840D复合材料铺放系统及其控制策略. 宇航材料工艺, 2008(3):34-36.
- [7] 宋晓, 王建华, 张会龙. 用西门子数控系统双电机驱动消隙功能提高机床传动精度. 制造技术与机床, 2011(1):68-69.
- [8] 郑亮昌, 徐增豪, 周民. 铺丝头机械手设计探讨. 制造业自动化, 2011, 33(9):120-122.
- [9] Delta Tau Data Systems Inc. Turbo PAMC user manual. 21314 Lassen Street Chatsworth CA91311, 2008.
- [10] SIEMENS. 1P7H 主轴电机和 1F7K 伺服电机安装调试手册. 北京: 西门子(中国)有限公司自动化与驱动部, 2003: 24-78.



图6 自动铺放控制界面

(责编 深蓝)