

# 自动铺放设备双电机交叉耦合同步控制算法研究

## Study on Cross-Coupled Synchronizing Control Algorithm of Double Motor of Composite Automated Placement Machine

南京航空航天大学材料科学与技术学院 李文聪 文立伟 肖军 严飙

**[摘要]** 先进复合材料以其高比强度、比刚度以及良好的可设计性获得了广泛应用和迅速发展。复合材料自动铺放技术作为复合材料数字成型的一种典型应用,越来越受到重视。为了解决复合材料自动铺放设备大惯量轴的精密驱动问题,提出交叉耦合结合“PID+前馈+陷波滤波器”的控制方法进行双电机同步协调控制,并给出了在此控制方式下的回原点方法。最后,通过与其他双电机控制策略的比较,验证了该控制方式可以实现无振动、无噪声、稳定精密驱动,满足了大型自动铺放设备的铺放精度。

**关键词:** 复合材料 自动铺放 交叉耦合 同步控制 双电机

**[ABSTRACT]** Advanced composite materials (ACM) have been used widely and developed rapidly for their excellent characteristics, such as high specific strength, specific modulus and outstanding designability. As a typical application of composite automatic manufacturing, automated placement has gained more and more attention. In order to resolve the precision driving problem of large-inertia axis of automated placement machine, a method of cross-coupled combining with “PID+feedforward+notch filter” is proposed. With this control mode, a homing method is given. At last, we verify that the double motor driving is precise and stable with no oscillation and noise by comparing with other two control modes.

**Keywords:** Composite material Automated placement Cross-coupled Synchronizing control Double motor

具有高比强度和比刚度、并具有可设计性的复合材料在航空航天领域的应用已经越来越广泛,在飞机结构上的用量已经成为飞机先进性的一个重要指标。随着复合材料用量的增多,复合材料自动成型技术越来越受到重视并得到迅速发展,自动铺放技术即是一个典型应用<sup>[1-2]</sup>。为了充分利用复合材料整体化结构的优势,复合材料构件的尺寸越来越大,自动铺放设备的结构也越

来越复杂,体积越来越大,给伺服系统提出了大惯量和大功率的要求<sup>[3]</sup>。为了实现大惯量进给轴以及主轴的精密驱动,采用交叉耦合的控制方式实现双电机同步驱动,以提高大惯量轴的控制性能和加工精度。

本文选用UMAC运动控制器作为控制核心,对其内部控制机制进行分析,结合交叉解耦的原理,提出交叉解耦结合“PID+前馈+陷波滤波器”的控制方法以实现自动铺放设备大惯量轴双电机驱动的同步控制,并给出了在此种模式下该轴回原点的具体方法。最后,将此控制方法应用于大型卧式自动铺丝机,并与传统的同步双驱方式进行了比较,结果表明,各解耦轴运行稳定可靠,精度达到预计要求。

### 1 同步控制原理

双电机同步联动要解决的关键问题是确保运行过程中联动电机的动态特性的一致性,以使得双电机系统的运行如同单一电机系统一样。为此,双电机同步联动伺服系统需要使用同步联动的各种控制方法来达到各电机动态特性的一致性;其次,双电机同步联动伺服系统是一种强耦合性的非线性系统,需要通过控制理论来有效地消除其中存在的非线性因素的影响,如饱和和非线性、齿隙非线性和摩擦非线性等。

双电机同步协调控制主要是对其速度环和力矩环的双重协调控制,目前主要有以下几种同步控制方式:主从控制、并行控制、虚拟总轴控制、交叉耦合控制等。主从控制方式是将2个电机分别设定为主电机和从电机,将主电机的位置输出作为从电机的指令输入,这样一个电机就会跟随另一个电机运动。但任何从电机上受到的扰动不能反馈到主电机,也不会影响其他电机,当负载发生变化时,电机之间的同步精度不能够得到保证。并行控制方式是将位置输入指令同时发送给2个电机,从而达到2个电机同步运动的效果。但是,整个系统相当于开环控制,当运行过程中某一台电机受到扰动时,电机之间将产生同步偏差并持续保持,同步性能很差。虚拟总轴控制系统在启动时,负载发生扰动,停机过程中轴之间会产生不同步的现象,并且在主参考值和每个轴之间会保持一个恒定的偏差<sup>[4]</sup>。

交叉耦合控制方式将双电机系统当作整体进行分析,分别收集 2 个电机的信息,然后一起进行计算处理,再根据需求对各个电机的信号进行补偿,这样通过各电机之间的相互影响,克服上述其他几种方法彼此没有信息反馈交流的缺点,实现彼此间协调同步<sup>[5-6]</sup>。

## 2 控制系统结构与 UMAC

本文以某项目支持的大型卧式自动铺丝机为研究平台,为其搭建控制系统,并实现 4 个大惯量进给轴以及主轴的双电机同步控制。采用 PC+NC 的方式,组成“IPC+运动控制器+PLC”的主从数控系统。控制核心选取性能高效且具有高开放性的 UMAC 多轴运动控制

器。硬件上,UMAC 可以连接各种伺服系统、获取多种检测元件的反馈信号;软件上,可以通过内置的 I 变量和编码器转换表等功能实现特种控制方式的定制性。

数控系统工控机的 CPU 与 UMAC 的 CPU 构成并行双微处理器结构,各自实现相应的功能。UMAC 上位机为软硬件平台,进行位置控制、插补等实时控制;西门子 S7-300PLC 负责接收指令以及反馈信号,对铺丝过程中的动作进行逻辑运算并输出;上位机完成诸如初始化、参数管理、代码编辑等非实时任务。数控系统的硬件结构如图 1 所示,其中轴卡 ACC-24E2A 与安川伺服电机相连,发出模拟量信号并接收编码器反馈信号。

## 3 交叉解耦同步控制策略

UMAC 运动控制器本身提供了一种“PID+速度/加速度前馈+陷波滤波器”的控制算法,可以使伺服系统有高的响应速度和控制精度,获得良好的稳态性能和动态品质,从而得到良好的鲁棒性。图 2 为该算法的原理图(不包含死区补偿、跟随误差限制和摩擦前馈)<sup>[7]</sup>。其中, $K_p$  为比例增益; $K_d$  为微分增益; $K_i$  为积分增益; $K_{vff}$  为速度前馈增益; $K_{aff}$  为加速度前馈增益。

该通道的实际输出为:

$$DACOUT = 2^{-16} \times K_p + (FE + (K_{vff} \times DV + K_{aff} \times DA - K_d \times AV)) / 128 + IPOS, \quad (1)$$

$$IPOS = K_i \times FE \times 2^{-23} + IPOS, \quad (2)$$

式中,  $DACOUT$  为 16 位的伺服周期输出命令(-32767~+32767),它被转换成 -10~+10V

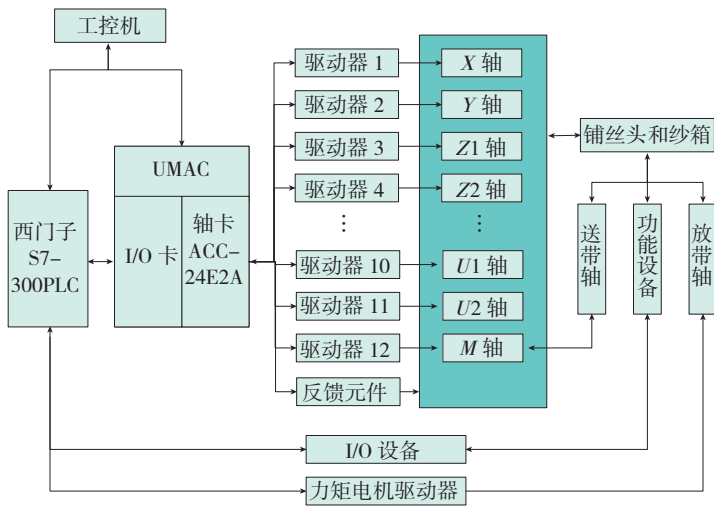


图1 数控系统硬件结构  
Fig.1 Structure of CNC system hardware

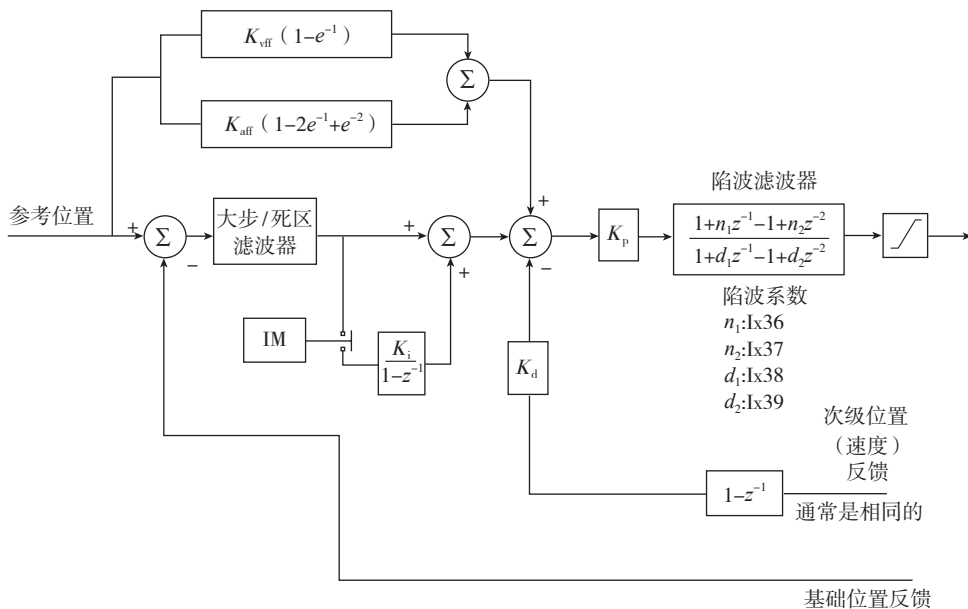


图2 “PID+前馈+陷波滤波器”控制算法  
Fig.2 Control algorithm of “PID+feedforward+notch filter”

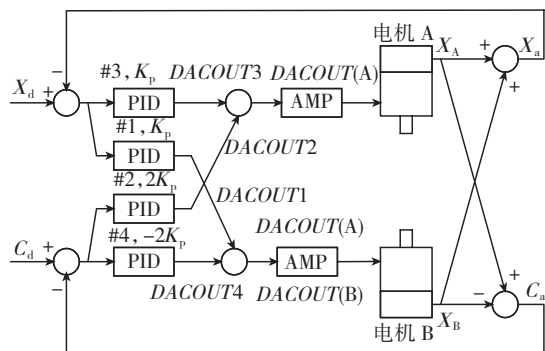


图3 交叉耦合原理图  
Fig.3 Cross-Coupled principle diagram

的输出； $FE$  是电机伺服周期内的跟随误差； $AV$  是电机伺服周期内的实际速度； $DV$  是电机伺服周期内的理想速度； $DA$  是电机伺服周期内的理想加速度； $IPOS$  是电机前  $N$  个伺服周期内的跟随误差的积分。

根据交叉耦合控制原理，UMAC 的 2 个编码器通道分别采集 2 个电机的编码器反馈，利用其自带的编码器转换表功能，对两电机位置值进行和差计算。将位置和保存在电机基本输出的位置环和速度环的地址，进行电机模拟量输出的基本运算；将位置差保存在电机补偿输出的位置环和速度环的地址进行运算，加减补偿到基本输出中。通过对两电机的输出进行实时调整，改变它们的速度和位置，实现双电机精确同步运行。原理图如图 3 所示。

图 3 中， $X_A$  和  $X_B$  分别为 A、B 两电机的实际位置反馈； $X_a$  和  $C_a$  分别为 A、B 两电机位置反馈的和、差； $X_d$  为 UMAC 对两电机的理想位置信号，其值为电机期望进给距离的 2 倍； $C_d$  为 UMAC 对两电机理想偏差信号，默认希望其值为 0 有：

$$X_a = X_A + X_B, \quad (3)$$

$$C_a = X_A - X_B. \quad (4)$$

$DACOUT1$  和  $DACOUT3$  为两电机的基本输出， $DACOUT2$  和  $DACOUT4$  为两电机的补偿输出：

$$DACOUT(A) = DACOUT3 - DACOUT2, \quad (5)$$

$$DACOUT(B) = DACOUT1 - DACOUT4, \quad (6)$$

$$DACOUT1 = 2^{-16} \times K_{p1} + (FE_1 + (K_{vf1} \times DV_1 + K_{aff1} \times DA_1 - K_{d1} \times AV_1) / 128 + IPOS_1), \quad (7)$$

$$DACOUT2 = 2^{-16} \times K_{p2} + (FE_2 + (K_{vf2} \times DV_2 + K_{aff2} \times DA_1 - K_{d1} \times AV_1) / 128 + IPOS_1), \quad (8)$$

$$DACOUT3 = 2^{-16} \times K_{p3} + (FE_3 + (K_{vf3} \times DV_3 + K_{aff3} \times DA_1 - K_{d1} \times AV_1) / 128 + IPOS_1), \quad (9)$$

$$DACOUT4 = 2^{-16} \times K_{p4} + (FE_4 + (K_{vf4} \times DV_4 + K_{aff4} \times DA_1 - K_{d1} \times AV_1) / 128 + IPOS_1), \quad (10)$$

$$FE_1 = FE_3 = X_d - X_a, \quad (11)$$

$$FE_2 = FE_4 = C_d - C_a = -C_{da}. \quad (12)$$

为了实现补偿输出符号的不同，可将  $K_{p2}$  或  $K_{p4}$  设定为负值，从而实现负补偿的目的。并且，由于补偿信号是以两电机的反馈信号之和为基础，所以补偿值也应该为反馈信号之差的 2 倍，通过将  $K_{p2}$  和  $K_{p4}$  的绝对值设定为  $K_{p1}$  和  $K_{p3}$  的 2 倍来实现。即：

$$K_{p3} = K_{p1}, \quad (13)$$

$$K_{p2} = 2K_{p1}, \quad (14)$$

$$K_{p4} = -2K_{p1}, \quad (15)$$

其他的  $K_d$ 、 $K_i$ 、 $K_{vf}$  和  $K_{af}$  可以设定为相同值，具体值可以根据具体的负载、环境等因素，运用分析脉冲响应曲线和正弦曲线进行调整。

#### 4 回原点方法

对于双电机交叉解耦同步运动进行回原点操作，一般有 2 种方式：(1) 两电机同时接收同一个原点信号；(2) 两电机分别对应一个原点开关，回原点操作时，将两电机解除交叉耦合，以主从跟随方式分别找到各自原点，然后再重新建立耦合关系。第一种方法进行回原点操作，其操作简单方便，但两电机运动时难免会出现不完全同步的现象，接收同一原点信号，在建立机械零点时可能出现位置偏差，多次回原点可能造成偏差积累，降低驱动精度。通过第二种方式进行回原点操作，需要编写一个回原点 PLC 程序，自动控制耦合轴的解除耦合、两电机分别回原点、消除偏差、重新建立耦合的逻辑过程，过程相对复杂，但可以有效消除第一种方法中出现的位置偏差，保证精度。此过程的 PLC 程序部分代码如下：

```

COMMAND*K
WHILE(M138=1 OR M238=1 OR M338=1 OR
M438=1)
END WHILE
I306=0 I406=0
I102=$78202 I202=$7820A
I303=$3501 I304=$3501
I403=$3502 I404=$3502
M398=M397 M399=M397 (解除交叉解耦)
I430=20000
I330=10000
M498=M497 M499=M497
P1000=0
WHILE(P1000<2000)
P1000=P1000+1
END WHILE
COMMAND "#4j"
    
```

```

WHILE(M438=0)
END WHILE
I406=1      (建立主从跟随模式, #3 电机为主电机, #4 电机为从电机)
M345=0
COMMAND"#3hm" ( #4 电机跟随 #3 电机回原点)
WHILE(M345=0 OR M340=0)
END WHILE
I406=0
I306=1
M445=0
COMMAND"#4hm" ( #3 电机跟随 #4 电机回原点)
WHILE(M445=0 OR M440=0)
END WHILE
I306=0
COMMAND "#3j=0" (消除两电机的位置偏差)
P1000=0
WHILE(P1000<1000 OR 340=0)
P1000=P1000+1
END WHILE
    
```

### 5 应用验证

在自行研制的卧式自动铺丝机上,将双电机驱动轴分别设定为主从模式、并行模式和交叉耦合模式,进行对比运行试验。通过 Pwin32Pro2 软件,对各电机的运行位置、速度和跟踪误差进行监控。监控画面如图 4~6 所示。

结果表明,主从控制模式下,从电机位置在主电机之后,始终有几百计数值的滞后。并行控制模式下,两电机位置偏差不如主从模式明显,但仍有 100 ~ 200 的计数差别。以上两种模式的运行过程中都偶尔会有轻微震动以及噪音出现。而采用交叉耦合控制模式,对两电机的位置偏差进行实时补偿,即使在高速运动时偏差也始终保持在几十个计数的范围内,驱动精度高,运行平稳,无噪声和震动。

然后,在自动模式下进行铺丝试验。耦合轴与其他各轴之间联动插补关系良好,耦合轴两电机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。

### 6 结论

本文以自研制卧式自动铺丝机为平台,在以 UMAC 为核心的控制系统中,提出交叉耦合结合“PID+ 速度/加速度前馈+陷波滤波器”的控制算法,对铺丝机大惯量轴进行双电机同步控制,并描述了在此控制方式下的

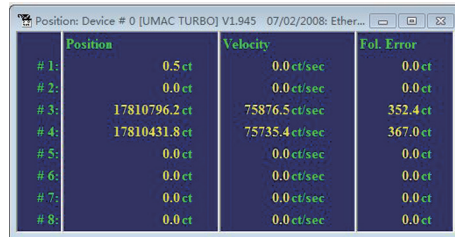


图4 主从控制模式 Fig.4 Master-slave control mode

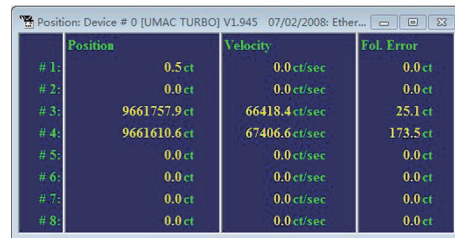


图5 并行控制模式 Fig.5 Parallel control mode

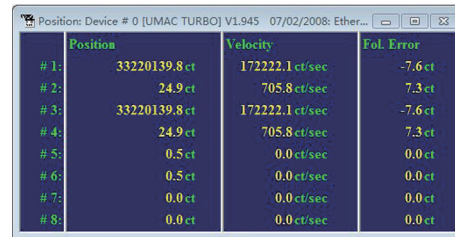


图6 交叉耦合控制模式 Fig.6 Cross-coupled control mode

回原点方法。结果表明,该算法可以很好地满足双电机同步协调、精密驱动的要求。经过在自动模式下进行实际铺放试验,验证了耦合轴与其他轴可以进行良好的联动插补,进一步证明了该控制策略稳定可靠,满足大型自动铺放设备的铺放要求。

### 参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 张建宝, 肖军, 文立伟, 等. 自动铺带技术研究进展. 材料工程, 2010(7): 87-91.
- [3] 严斌, 文立伟, 肖军, 等. 复合材料自动铺放机主轴双驱同步控制研究. 航空制造技术, 2012(18): 53-56.
- [4] 杨晨娜, 张怡. 双电机同步控制的设计与仿真. 工业控制计算机, 2009, 22(1): 36-37.
- [5] 程颖. 基于 PMAC 的双丝杠驱动同步控制研究和应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [6] 宋飞飞, 王志胜. 交叉耦合式的双直流力矩电机同步控制. 机械与电子, 2013(1): 64-67.
- [7] Delta Tau Data Systems, Inc. Turbo PMAC user manual. USA: Delta Tau Data System Inc, 2010.

(责编 杰一)