

## 研究·开发

## 双电机驱动卷绕式系统转速同步控制研究

□ 刘笃喜 □ 程益恒 □ 赵小军 □ 李浩 □ 朱琳

西北工业大学 机电学院 西安 710072

**摘要:**为解决拖锥自动收放系统双电机转速同步的问题,提出了基于 PID 交叉耦合补偿的转速同步控制方法,建立了系统数学模型,并进行了电机参数变化及负载干扰情况下的双电机转速同步仿真。结果表明,采用交叉耦合转速补偿方法,可以极大地降低双电机转速差,实现双电机的转速同步控制。

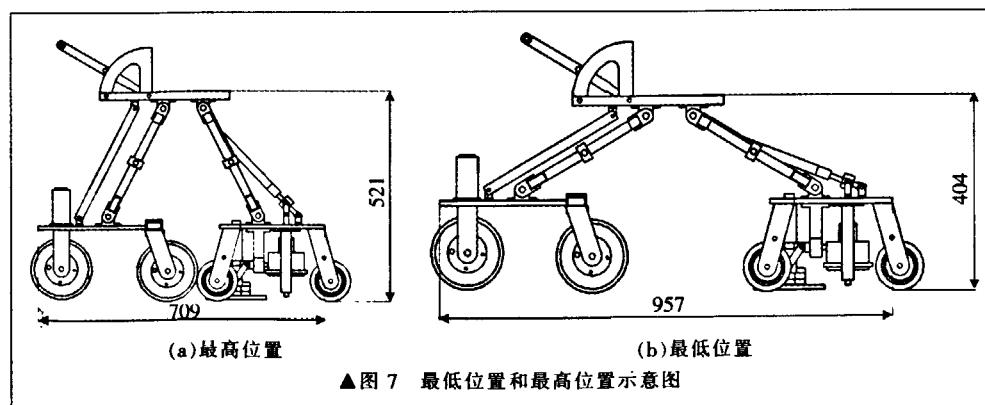
**关键词:**卷绕式系统 双电机 转速同步控制 交叉耦合补偿

中图分类号:TH132.4;TM921.54 文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2012)08-0032-04

拖锥自动收放系统是卷绕式系统在航空测试中的典型应用,是在飞机试飞时进行静压参数检测的主要设备<sup>[1]</sup>。对于拖锥自动收放系统,除具有一般卷绕式系统恒线速度、精确位移控制的要求外,因其航空测试的特殊应用场合,设备的抗负载干扰性以及安全可靠性是其不同于一般卷绕式系统的非常重要的性能要求。为满足其特殊使用要求,使用双电机驱动方法,各电机在实时跟随同一目标转速的同时,还需要保持两电机间的转速同步,否则便会对后面的机械传动系统造成损坏,导致系统无法正常使用,因此,需要对拖锥自动收放系统的双电机转速同步控制进行深入研究。

收稿日期:2012年2月



▲图7 最低位置和最高位置示意图

身总长 709 mm,座位距离地面 521 mm,最低位置杆件与水平位置呈 30°左右,车身总长 957 mm,座位距离地面 404 mm。车体由最高点下降至最低点,再由最低点上升至最高点这一运动周期中前进 248 mm,座位上下起伏 117 mm(如图 7 所示)。

## 5 创新点分析

1) 机构组合创新:空间凸轮机构、导杆机构、正弦机构、双滑块机构等相互配合,完成其上下起伏运动。

本文针对拖锥自动收放系统双电机驱动时的转速同步要求,分析了产生同步误差的原因,设计了基于 PID 交叉耦合补偿的转速同步控制方法,最后采用该方法进行了电机参数变化及负载干扰情况下的双电机转速同步仿真与分析。

## 1 同步误差分析与方法设计

双电机驱动拖锥自动收放系统的基本结构如图 1 所示,主要由控制计算机、变频器、电机、减速部分和绞盘等组成。

### 1.1 双电机转速同步误差分析

双电机驱动拖锥自动收放系统的减速传动部分由

2) 功能创新:实现儿童车的仿生式蠕行前进运动,运动形式新颖独特。

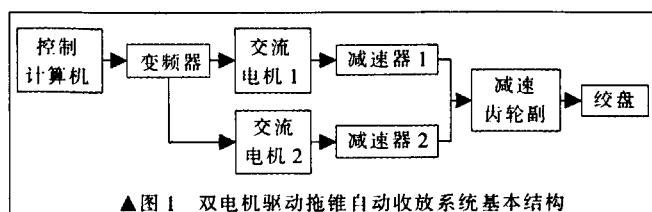
3) 外形创新:设计的外形可爱俏皮,运动栩栩如生。

## 参考文献

- [1] 彭文生,李志明,黄华梁.机械设计[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 杨家军.机械创新设计技术[M].北京:科学出版社,2008.
- [3] 王为,汪建晓.机械设计[M].武汉:华中科技大学出版社,2007.
- [4] 张英会.弹簧[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [5] 闻邦椿.机械设计手册(第 5 版)第一卷[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 张英会,刘辉航,王德成.弹簧手册[M].北京:机械工业出版社,2008.

(编辑 日 月)





▲图1 双电机驱动拖锥自动收放系统基本结构

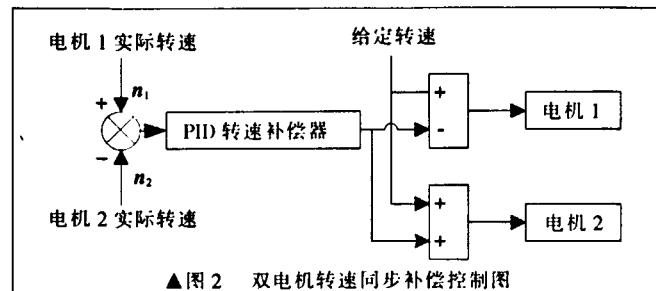
减速器及减速齿轮副组成，构成减速齿轮副的两个减速小齿轮与一个减速大齿轮啮合，从而带动绞盘转动。这样的齿轮传动机构对两个电机的转速同步性能提出了很高的要求，当双电机转速不一致、产生较大的同步转速误差时，将会对传动系统造成损坏，使系统无法正常使用，严重时甚至会使拖锥无法完全收回，给试飞飞机带来重大安全隐患，因此，从某种意义上来说，拖锥自动收放系统两电机间的转速同步性能要比其分别对同一目标转速的跟随性能更加重要。

对于拖锥自动收放系统，导致双电机转速不同步的原因有多种：(1)用于双电机驱动的电机虽采用同种型号，但也会由于制造工艺等原因不能保证其结构参数完全一致，存在一定的额定转速误差；(2)随着电机工作时间的增加，电机的结构参数也会发生变化，从而引起双电机转速的不同步；(3)飞机试飞时，由于飞行高度及速度的变化，作用在两电机轴上的负载力矩值会产生变化及差异，导致其产生转速同步误差。

## 1.2 双电机转速同步方法设计

用于实现拖锥自动收放系统双电机转速同步的控制方法需满足两个要求，一是当两电机结构参数不同、产生转速误差时，能迅速对两电机的控制电压进行微调，使其首先达到转速同步，在这一前提下去共同跟随同一目标转速指令；二是当任一电机上的负载力矩变化导致其转速波动时，另一电机都会及时跟踪，这虽然使两电机的共同转速无法保持稳定，但却可以保证其转速的同步，避免因同步转速误差给系统带来的损害。

基于以上分析，双电机驱动拖锥自动收放系统采用交叉耦合补偿的方法来对双电机转速误差进行补偿，保证双电机的转速同步。这种控制方法最初由Koren<sup>[2]</sup>教授提出，使双电机同步控制精度和抗负载扰动能力都得到了很大提高。应用到拖锥自动收放系统中的双电机转速同步控制方法如图2所示。



▲图2 双电机转速同步补偿控制图

系统运行时，两个电机按照共同的给定目标转速指令运动，同时，将传感器反馈的两电机实际转速值 $n_1, n_2$ 之差，将其作为交叉耦合补偿器的输入，经补偿器运算后，将运算值分别补偿给两个电机的控制输入端进行电压微调，从而控制两个电机的转速变化，减小其转速误差。在此需要注意的是，输入到两个电机控制端的补偿值的正负号是不一样的。为保证实时、快速地消除转速差，保证双电机能够同步运转，采用工程上常用的PID控制方法进行交叉耦合控制器的转速补偿控制。

## 2 系统建模

### 2.1 变频器环节数学模型

变频器的输入电压，即控制器的输出控制电压为 $u_c$ ，经变频器所得的电压频率为 $f_1$ ，交流电机的相电压为 $U_1$ 。变频器为恒压频比工作方式，所以 $U_1$ 与 $f_1$ 的比值基本不变， $U_1$ 与控制电压 $u_c$ 的关系由变频器的加速时间确定。

变频器传递函数为<sup>[3]</sup>：

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} \quad (1)$$

式中： $T_s = 0.6\tau$ ， $\tau$ 为加速时间，即频率由0 Hz上升到400 Hz的时间，取 $\tau$ 为0.1 s。

交流电机电压频率 $f_1$ 与变频器输入控制电压 $u_c$ 关系为：

$$f_1 = K_u u_c \quad (2)$$

式中： $K_u$ 为压频转换系数，变频器的控制电压范围为0~10V，频率范围为0~400 Hz，可得 $K_u = 40 \text{ Hz/V}$ 。

电机定子的相电压 $U_1$ 与电压频率 $f_1$ 的关系为：

$$U_1 = \frac{115 - U_{10}}{400} f_1 + U_{10} \quad (3)$$

式中： $U_{10}$ 为低频补偿电压。当 $U_{10}=0$ 时：

$$U_1 = K_f f_1 \quad (4)$$

式中： $K_f = \frac{115}{400} = 0.2875 \text{ V/Hz}$ 。

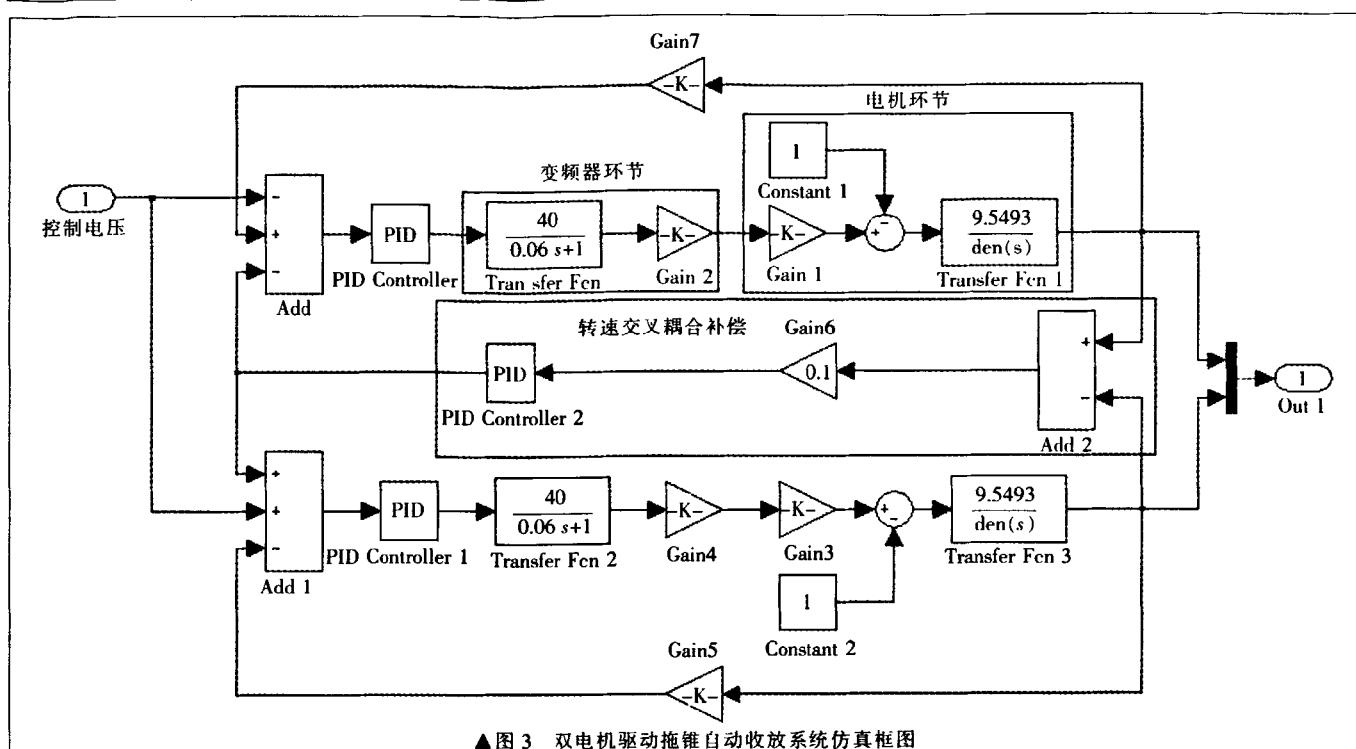
### 2.2 电机环节数学模型

根据电机原理，三相交流异步电机的电磁转矩公式为<sup>[4]</sup>：

$$T_n = \frac{3pU_1^2(R_2/s)}{\omega_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \omega_1^2(L_1 + L_2)^2 \right]} \\ = 3p \left( \frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1 R_2}{(sR_1 + R_2)^2 + s^2\omega_1^2(L_1 + L_2)^2} \quad (5)$$

式中： $p$ 为电机磁极对数； $s$ 为转差率； $\omega_1$ 为电机定子角频率； $R_1$ 和 $R_2$ 分别为电机每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻； $L_1$ 和 $L_2$ 分别为电机定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感。

## 研究·开发



▲图3 双电机驱动拖链自动收放系统仿真框图

由于有  $R_2 \gg sR_1, R_2 \gg s\omega_1(L_1+L_2)$ , 则式(5)可以简化为:

$$T_n = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 R_2} - s = K_r U_1 s \quad (6)$$

由于变频器为恒压频比工作方式, 所以:

$$K_r = \frac{3pU_1}{2\pi f_1 R_2} = \frac{3pU_N}{2\pi f_1 R_2}$$

电机的力矩平衡方程为:

$$T_n - T_L = \frac{2\pi}{60} J_r \frac{dn_p}{dt} + \frac{2\pi}{60} B_r n_p \quad (7)$$

式中:  $T_L$  为电机输出力矩;  $J_r$  为电机轴转动惯量;  $B_r$  为电动机转轴阻尼系数;  $n_p$  为电机实际转速。

将式(6)代入式(7)可得:

$$K_r U_1 s - T_L = \frac{2\pi}{60} J_r \frac{dn_p}{dt} + \frac{2\pi}{60} B_r n_p \quad (8)$$

拖链自动收放系统中, 在额定工况下所使用的交流电机的基本参数如表1所示。

表1 航空三相交流电机基本参数表

参数名称	数值	参数名称	数值
$U\sqrt{V}$	115	$n\sqrt{(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})}$	4 700
$f/\text{Hz}$	400	$T_r/(\text{N}\cdot\text{m})$	1.8
$n_p/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	4 800	$R_r/\Omega$	0.913 6
$s$	0.021	$J_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.027
$B_r/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.005		

表1中, 同步转速为:

$$n_s = \frac{60f_N}{p} = 4 800 \text{ r/min}$$

转差率为:

$$s = 1 - \frac{n_N}{n_s} = 0.021$$

由式(6)可得, 转子每相电阻:

$$R_2 = \frac{3pU_N^2}{2\pi f_1 T_N} \left(1 - \frac{n_N}{n_s}\right) = 0.913 6 \Omega$$

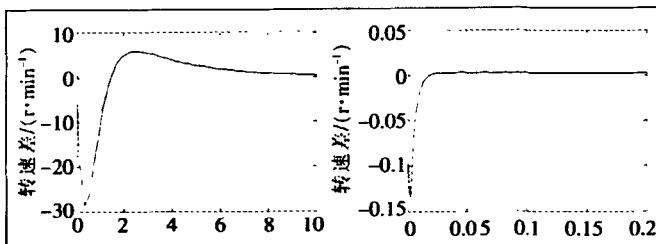
## 2.3 系统仿真框图

双电机驱动拖链自动收放系统的完整仿真框图如图3所示。

## 3 双电机转速同步仿真分析

## 3.1 电机参数变化时的仿真分析

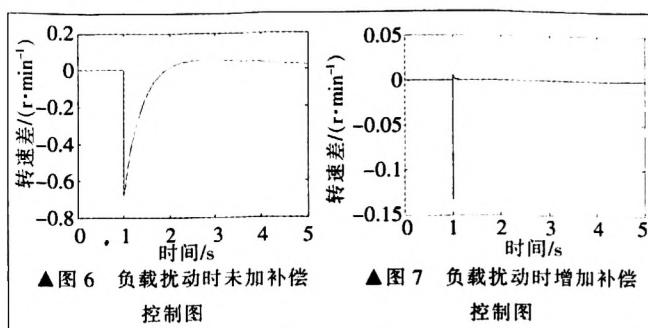
对于同种型号电机, 影响其转速差异的参数有多种, 包括电阻、电感、转动惯量等。在此, 取不同的转动惯量值对双电机进行同步仿真, 取电机1转动惯量  $J_{1N}=0.027 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 电机2转动惯量  $J_{2N}=0.028 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。当变频器控制电压为5V(电机转速2 350 r/min)时, 未加补偿控制时的仿真曲线如图4所示, 增加补偿控制时的仿真曲线如图5所示。



▲图4 电机参数变化时未加补偿控制图

▲图5 电机参数变化时增加补偿控制图





▲图6 负载扰动时未加补偿

控制图

▲图7 负载扰动时增加补偿

控制图

由图4可以看出,未加转速交叉耦合补偿控制时,两电机的最大转速差为28.5 r/min,转速差趋向于0需要的时间为10 s;由图5可以看出,增加转速交叉耦合补偿控制时,两电机的最大转速差仅为0.13 r/min,转速差趋向于0需要的时间仅为0.025 s。仿真结果可以表明,当两电机参数不同时,采用转速交叉耦合补偿控制器的双电机驱动拖链自动收放系统可以明显降低两电机的同步转速误差值,并可以使两电机迅速达到转速同步。

### 3.2 负载扰动时的仿真分析

双电机驱动拖链自动收放系统在实际使用时,由于飞机的飞行速度和高度不同,存在着各种负载扰动,故需对其进行负载扰动仿真,分析双电机在此情况下的同步性能具有重要意义。在两电机参数完全相同的情况下,对电机1在1 s时施加1 N·m的负载扰动,当变频器控制电压为5 V(电机转速2 350 r/min)时,未加补偿控制时的仿真曲线如图6所示,增加补偿控制时的仿真曲线如图7所示。

由图6可以看出,未加转速交叉耦合补偿控制时,两电机的最大转速差为0.7 r/min,转速差趋向于0需要的时间为2 s;由图7可以看出,增加转速交叉耦合补偿控制时,两电机的最大转速差仅为0.14 r/min,转速差趋向于0需要的时间仅为0.01 s。仿真结果可以表明,当两电机受到不同的负载扰动时,采用转速交叉耦合补偿控制器的双电机驱动拖链自动收放系统可以降低两电机的同步转速误差值,并可以在极短的时间内使两电机达到转速同步,消除负载干扰。

## 4 结束语

针对双电机驱动拖链自动收放系统抗负载干扰性以及安全可靠性的特殊性能要求,为达到双电机转速同步目标,分析了产生同步误差的原因,提出设计了PID交叉耦合方法的转速补偿控制器。对系统进行建模,并完成了双电机同步控制仿真框图的搭建,分别对电机参数变化和负载变化两种情况下的双电机转速同步进行了仿真分析。结果表明,采用交叉耦合转速补偿控制器的双电机驱动拖链自动收放系统可以极大降低

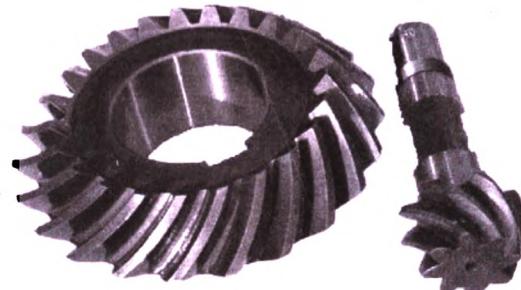
两电机的同步转速误差值,使其保持在允许范围内,并可以在极短的时间内使两电机达到转速同步,消除因电机参数及负载变化带来的同步转速误差,满足系统抗负载干扰性以及安全可靠性的使用要求。

### 参考文献

- [1] 黄兴隆. 卷绕式系统线速度和位移精确控制方法的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [2] Koren Y. Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1980, 102 (12): 1324-1330.
- [3] 迟艳. 双电机驱动旋转机械同步控制的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [4] 董增文. 基于通用变频器的电梯控制系统的应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [5] 陈庆伟, 郭毓, 杨非, 等. 双电机同步联动控制系统 [J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(S1): 103-107.
- [6] 董景龙. 双电机同步驱动转台中框建模与变形控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

(编辑 日 月)

金华迪希  
螺旋锥齿  
轮厂



本厂专业加工螺旋锥齿  
轮, 可为用户提供免费设计、  
测绘服务。

欢迎来图来样洽谈。

厂址: 浙江省金华市花溪路  
(与仙华北街交叉口, 金  
众捷运公司内)

传真: 0579-82386930  
手机: 13002658662

