

## 旋翼模型操纵系统设计与实现

郭琳<sup>1</sup>, 曹云峰<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 高新技术研究院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 倾转旋翼模型实验台用于倾转旋翼飞行器模型的地面悬停试验及风洞试验研究, 通过对倾转旋翼模型实验台旋翼模型操纵系统的研究, 建立和分析了旋翼模型操纵系统的数学模型, 采用永磁同步直线电机作为执行元件, 运用常规 PID 控制方法, 实现了对旋翼模型作总距操纵和横向、纵向周期变距操纵, 设计了操纵系统的测控软件; 试验结果显示所设计的系统能很好地跟踪输入信号, 系统具有较好的静态和动态性能, 满足倾转旋翼模型实验台的要求。

**关键词:** 倾转旋翼; 直线电机; 伺服系统

## Design and Realization of Rotor Model Operation System

Guo Lin<sup>1</sup>, Cao Yunfeng<sup>2</sup>(1. Academy of Automatic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The tiltrotor model bench is applied in the tiltrotor aircraft model hovering ground experiment and wind tunnel experiment. By establishing and analyzing its model, the rotor model operation which is used to drive rotor for the collective pitch control and the cyclic pitch control on the tiltrotor model bench is achieved and its test control software is designed. The experiment results show that this designed system can track the input signal successfully and has nice static and dynamic performance, and can satisfy the requirement of the tiltrotor model bench.

**Key words:** tilt rotor; liner motor; servo system

## 0 前言

倾转旋翼飞行器是一种兼具固定翼飞机和直升机双重飞行模式的新概念飞行器。它既能垂直起降, 同时又具有速度快、航程远、机动性强的特点。由于倾转旋翼飞行器独特的性能, 使得它在军用、民用两方面均有很好的发展前景<sup>[1-2]</sup>。

倾转旋翼模型实验台用于倾转旋翼飞行器模型的地面悬停试验及风洞试验研究。整个实验台由旋翼模型、自动倾斜器、旋翼模型操纵系统、测量系统、数据采集处理系统、监视报警系统、台架和中央控制台等设备组成。其中旋翼模型操纵系统用来驱动自动倾斜器使旋翼做总距操纵和横向、纵向周期变距操纵。

在传统的旋翼模型实验台上, 旋翼模型操纵系统是由电液伺服系统组成。由于电液伺服阀对油液污染敏感, 要有泵站系统提供恒压油源, 由于高温下性能不稳定等缺点, 本文根据倾转旋翼模型实验台的要求, 采用直线电机作为执行元件, 设计了一套旋翼模型操纵系统。试验结果表明, 该伺服系统能很好地满足倾转旋翼模型实验台的要求。

## 1 操纵系统建模

旋翼模型操纵系统属于位置伺服系统, 整个系统采用三台直线电机驱动的三个通道与自动倾斜器的不旋转盘连接组成, 三台直线电机在实验台上以 120° 圆等分垂直安装, 它具有受力均匀、安装方便、与真实飞行器模型一致等优点。

总距、横向周期变距、纵向周期变距的角度值和直线电机的位移关系可以采用下式说明:

$$\begin{Bmatrix} \theta_0 \\ \theta_s \\ \theta_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

由桨叶变距原理<sup>[3]</sup>, 桨距的变化可用自动倾斜器操纵平面的变化规律表示为:

$$\Delta\theta = \theta_0 + \theta_c \cos(\psi) + \theta_s \sin(\psi) \quad (2)$$

式中,  $\theta_0$  为总距角,  $\theta_s$  为纵向周期变距角,  $\theta_c$  为横向周期变距角,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为三台直线电机的位移, 均向上为正。

桨叶在方位角  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  的桨距角分别可表示为:

$$\begin{aligned} \theta^0 &= \theta_0 + \theta_c \\ \theta^{90} &= \theta_0 + \theta_s \\ \theta^{180} &= \theta_0 - \theta_c \\ \theta^{270} &= \theta_0 - \theta_s \end{aligned} \quad (3)$$

总距和周期变距角可分别由 4 个方位的桨距角表示为:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \frac{1}{4}(\theta^0 + \theta^{90} + \theta^{180} + \theta^{270}) \\ \theta_c &= \frac{1}{2}(\theta^0 - \theta^{180}) \\ \theta_s &= \frac{1}{2}(\theta^{90} - \theta^{270}) \end{aligned} \quad (4)$$

当  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  运动到某一位置时, 可以测得此时方位角  $0^\circ$ ,

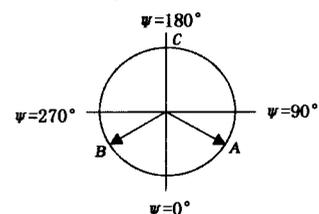


图1 直线电机布局示意图

收稿日期: 2006-09-12; 修回日期: 2006-10-27。

作者简介: 郭琳(1980-), 男, 黑龙江省牡丹江人, 硕士研究生, 主要从事导航、制导与控制方向的研究。

曹云峰(1966-), 男, 浙江省湖州人, 教授, 主要从事无人飞行器控制与导航、计算机视觉应用技术、微机电系统与 MEMS 技术与应用、系统建模与仿真方向的研究。

90°, 180°, 270° 的桨距角  $\theta^0, \theta^{90}, \theta^{180}, \theta^{270}$ 。然后根据 (4) 式可以求出  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ 。这样就会构成  $l_1, l_2, l_3$  与  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  之间的方程组。

根据上面的方法测得三组数据, 构成九个方程, 求得转换矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0.397887 & 0.397887 & 0.397887 \\ -0.590147 & 0.2429 & 0.347247 \\ -0.0602451 & 0.541205 & -0.48096 \end{bmatrix}$$

## 2 操纵系统设计与实现

倾转旋翼模型实验台要求三通道操纵系统输出直线位移, 最大行程  $\pm 50$  mm, 有良好的线性度, 不大于  $\pm 0.4\%$ 。每个电机的额定输出载荷为 54 N, 超载保护力为 122 N, 电机的速度不小于 20 mm/s。

从系统要求、研制周期和性能价格比考虑, 上位机采用研华工控机, 其与单片机、可编程控制器相比, 具有计算速度快 (G 级主频)、容量大 (G 级内存和外存)、扩充接口标准化 (ISA、PCI) 以及丰富的开发工具 (VB、VC 等) 等优点, 可很好的满足操纵系统的要求。

伺服控制器采用 E4000-AT, 其由两部分组成: 驱动电机的功率段和集成有位置控制器的控制段。E4000-AT 是一个完整的数字控制系统, 允许运动位置点的直接设定或者通过上位机发出简单的模拟/数字信号出发存储的运动曲线。它通过串口或现场总线连接到上位机, 其控制段完成所有对电机必要的控制和监控行为。E4000-AT 与所选电机属同一厂家, 兼容性好; 并且该控制器具有两个电源接口、4 个直线电机接口, 在本系统中, 只需要一个此种伺服控制器就可以满足要求, 大大降低了成本。

执行机构的选择是本系统设计的重点。永磁直线同步电动机具有高推力、低损耗、小电气时间常数、响应速度快等特点, 在推力、速度、定位精度、效率等方面比直线感应电动机和直线脉冲电动机等具有更多的优点, 因此, 永磁直线同步电动机是倾转旋翼模型实验台操纵机构的理想的伺服执行元件。

本系统采用的位置传感器是霍尔位置传感器, 它采用的是非接触方法测量运动物体位置。最终设计形成的操纵系统如图 1 所示。

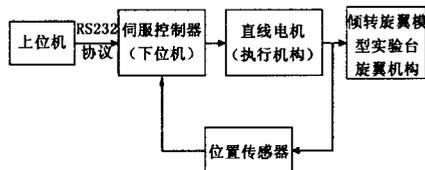


图 1 操纵系统结构图

## 3 操纵系统测控软件设计与关键技术

测控软件要完成以下主要功能: 实现系统的自检; 进行初始化, 调整零位; 将旋翼模型的目标总距和目标纵向、纵向周期变距的角位移转换成三台直线电机的位移并传送给下位机; 将下位机上传的直线电机位移转换成桨距的角位移并在界面上实时显示; 实现试验数据的存储、打印; 实现转换矩阵数据的显示、存储, 并接受数据的修改; 显示系统中不正常的运动情况, 方便用户及时调整。

针对测控软件的要求, 利用基于 Windows 平台的 VC++ 6.0 的开发环境, 开发了如图 2 所示的测控软件。

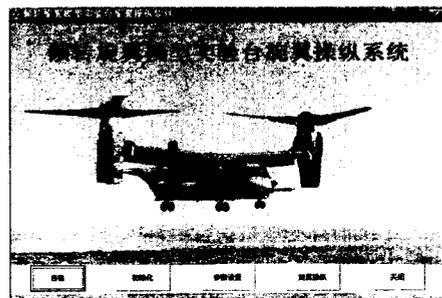


图 2 旋翼模型操纵系统测控软件主界面

旋翼模型操纵系统采用的是 RS232 串行通信协议, 电机的运动指令通过上、下位机的通信传送。上位机应用程序产生指令, 通过串行端口将指令传给下位机, 下位机收到指令后, 对指令进行分析处理, 然后通过串行端口返回一定的命令字和相应的数值给上位机, 上位机根据返回的应答判断通信的状态, 并进行相应的处理。只有在上位机收到下位机对前一指令的应答并作出处理后才能发下一条指令。对串口的操作有几种方法可以使用, 如直接使用 Windows API 对串口进行操作, 使用包装好的控件 (例如 MSComm 控件) 等等。在这里, 我们把系统中要用到的串口操作的 Windows API 都封装到一个类 (CSerialPort) 里面, 封装好的类不仅简洁, 而且在开发过程中不用过分深究串口操作的底层细节, 而可以将更多的精力放在整个软件结构和功能上。

为了实现转换矩阵的显示、存储, 并接受数据的修改, 即要对转换矩阵系数的设置记录在磁盘上从而维持它的持久性, 我们使用注册表来存储配置信息。在 32 位 Windows 中, 虽然支持用 INI 文件存储配置信息以维持向下兼容性, 但是一般很少使用。

当需要把试验数据打印出来时, 这里就涉及到打印程序的编写。由于不是在文档/视图的应用中使用打印功能, 也就无法利用 MFC 提供的功能, 所以要自己创建打印机设备描述表, 打印输出是通过设备描述表的句柄调用相关绘图函数来实现的。

## 4 操纵系统控制律设计

由于系统采用直线电机直接驱动, 旋翼运动过程产生的负载扰动、系统参数扰动、直线电机端部效应等因素的影响将直接反映到直线电机的运动控制中。因此, 必须采取有效的控制策略来抑制这些影响。目前应用于位置伺服系统的控制方案有很多种, 如经过改造的传统控制, 基于现代控制论的自适应控制、基于自适应控制的智能控制等。从理论分析来看, 许多控制策略都能实现良好的电系统动态特性, 但是由于算法本身的复杂性, 而且对系统进行模型辨识比较麻烦, 因此, 在实际系统中实现时会碰到许多困难。对于传统的 PID 调节器而言, 其最大的优点在于算法简单, 参数易于整定, 具有较强的鲁棒性, 可靠性高, 因此该系统就采用传统的 PID 控制。

本系统采用位置式 PID 控制算法。计算机控制是一种采样控制, 需要进行离散化处理, 离散的 PID 表达式为<sup>[1]</sup>:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

(下转 1079 页)

$$Conf = \frac{100}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M F(i,j)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M f(i,j) \wedge F(i,j)$$

其中,  $F(i,j)$  为字符模板(1 表示字符),  $f(i,j)$  为字符图形,  $f(i,j) \wedge F(i,j)$  表示两图对应位置像素值都为 1 的个数。

因噪声的存在, 一般当  $Conf \geq 90\%$  时, 则可以认为样本图像和模板图像是匹配的。

#### 4 实验结果

我们通过 Microvision 公司的 MV-VS130FC 摄像头和 MV-C121 图像采集卡获得图像, 保存为 BMP 位图形式, 图像为 616x256 像素, 用 VC++ 编程, 软件运行界面如图 7 所示。

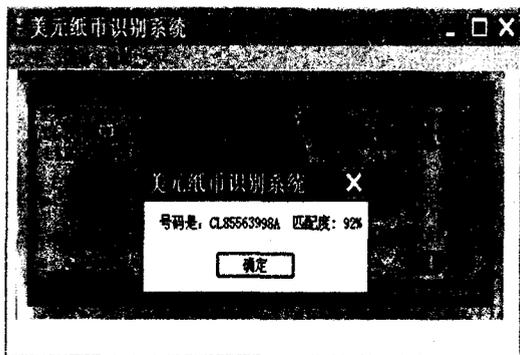


图 7 美元纸币识别系统运行界面图

通过对 200 张 100 元美元样本进行实验, 识别率达 99.5%, 平均识别时间为 0.8 s。本系统算法复杂程度低, 容易实现; 并且具有高识别率, 能满足实用系统的要求。

#### 5 结论

对于印刷体的字符来说, 二值化和模板匹配是较为常用的方法。针对原始图像中字符大小基本相同, 但因纸币上存在污迹和磨损等特点, 应采用多种策略和方法, 提高字符识别率。在图像处理中, 采用边缘检测来提取图像轮廓, 再通过上下边矩筛选待识字符种类, 减少模板匹配的计算量, 实验结果表明, 该方法具有较高的识别率和坚韧性, 现已投入使用。

#### 参考文献:

- [1] Takeda F, Omatu S. High speed paper currency recognition by neural networks [J]. IEEE Trans. on Neural Network, 1995, 6(1): 73-77.
- [2] 孙即祥. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [3] 朱学芳, 智文广. 计算机图像处理导论 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2003.
- [4] 吴学明, 李灿平. 边缘检测算法在不同分辨率图像中的性能研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 166-169.
- [5] Canny L. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. 8 (6): 679-698.
- [6] Blayvas I, Brnckstein A, Kimmel R. Efficient computation or adaptive threshold surfaces for image binarization [A]. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. 2001, 1: 737-740.

(上接 1076 页)

在 PID 控制系统中, 有 3 个参数需要调整。比例环节的  $K_p$  参数影响系统动作的灵敏度及控制的稳态精度, 增大  $K_p$  的值有利于减少稳态误差, 提高直线电机的控制精度, 但随着  $K_p$  的增大, 系统将不稳定; 积分环节的  $K_i$  参数用于控制系统的稳态误差,  $K_i$  若设置得太大, 振荡次数将增多, 若设置的太小, 不利于消除系统的稳态误差, 难以获得较高的控制精

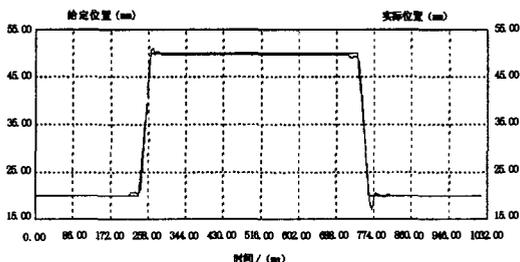


图 3 操纵系统阶跃运动曲线

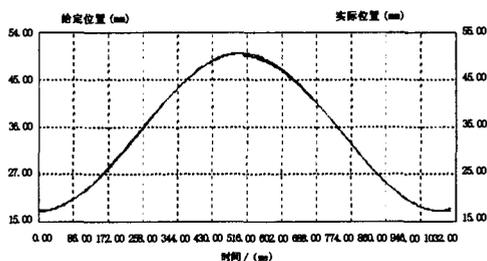


图 4 操纵系统正弦跟踪运动曲线

度; 微分环节的参数  $K_d$  设置的偏大或偏小时, 都使系统的超调增加, 调节时间加长, 不利于系统的稳定。在本系统中, 通过试验, 主要参数设置为:  $P$  为 0.5 A/mm,  $I$  为 0.5 A/(mm \* s),  $D$  为 4 A/(m/s), 最大电流为 5 A, 最大速度为 0.05 m/s, 最大加速度为 10 m/s<sup>2</sup>。从图 3 和图 4 可以看出, 系统能够很好的跟踪输入信号, 实际运动轨迹基本与给定运动轨迹重合, 线性度 0.2%, 电机速度 50 mm/s, 满足要求, 表明系统有良好的静态和动态性能。

#### 5 结论

本文设计了一套用在倾转旋翼模型实验台上的旋翼模型操纵系统。旋翼模型操纵系统的执行元件采用直线电机, 并应用 PID+前馈控制算法使操纵系统获得良好的静态和动态性能。试验结果表明这套旋翼模型操纵系统较好的满足倾转旋翼模型实验台的要求。

#### 参考文献:

- [1] Decker W A. Piloted simulator investigations of a civil tiltrotor aircraft on steep instrument approaches [A]. AHS 48th Annual Forum [C]. Washington DC, 1992.
- [2] Calise A J, Rysdyk R T. Adaptive model inversion flight control for tiltrotor aircraft [A]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference [C]. 1997.
- [3] 王适存. 直升机空气动力学 [M]. 南京: 南京航空航天大学, 1993.
- [4] 陈新年. 直升机旋翼负载模拟计算机控制系统研制 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.