

二维飞行机构控制策略研究

汤子龙^{1,2}, 张鑫¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃工大舞台技术工程有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 研究设计二维飞行机构运动系统控制器, 探讨在改善跟踪误差和轮廓误差的同时, 具有良好的抗干扰性能。先根据单轴的跟踪误差和抗干扰能力对单轴控制器进行设计, 加入前馈和反馈控制以提高响应速度和位置跟踪精度; 再利用交叉耦合补偿控制器以减小二维轮廓误差。仿真结果证明此单轴控制器相比传统的PID控制器具有良好的跟踪性能和抗干扰性能, 并证明交叉耦合补偿能有效减小系统轮廓误差。

关键词: 二维运动; PID控制; 交叉耦合控制; 跟踪误差; 轮廓误差

中图分类号: TP202 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2016)12-0020-04

Study on Control Strategy of Two-Dimensional Flight Mechanism

TANG Zi-long^{1,2}, ZHANG Xin¹

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730050 China;

2. Gansu Gongda Stage Technology & Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730050 China)

Abstract: A two-dimensional flight mechanism controller is designed, which can decrease the tracking error and contour error, and improve the capacity of anti-interference at the same time. First, according to the tracking error and anti-interference, single axis controller is designed, which adds feedforward and feedback control to improve the response speed and location tracking accuracy; then cross coupling compensation controller is used to decrease the contour error. Simulation results show that this axis controller has better tracking performance and anti-interference performance, and also prove that cross coupling compensation can effectively decrease the contour error.

Key words: two-dimensionn; PID al motiocontrol; cross-coupled control; tracking error; contour error

1 引言

目前, 飞行机构在舞台表演, 影视制作等方面已得到普遍的应用。飞行机构能使表演获得良好的视觉效果的前提是飞行机构运行的精确度, 只有当飞行机构的实际运行轨迹与期望轨迹误差很小时, 才能说明此飞行机构具有良好的控制精度^[1]。

飞行机构由两个运动方向互相垂直的三相异步电机控制, 通过控制两电机收、排钢丝绳的速度, 就可形成所需要的运动轨迹, 因此飞行机构可以看作是一个二维

运动平台。由于二维运动平台单轴跟踪轨迹的连续时变性以及两轴之间的耦合, 造成系统轨迹跟踪控制难度比较大^[2], 是二维运动平台研究的难点之一。

2 二维运动平台系统的控制策略

在二维运动平台控制系统中最常用的就是PID控制。由于PID控制的原理简单、鲁棒性较强、算法简单等优点, 使PID控制成为二维运动平台最基本的控制形式。然而仅靠PID控制难以满足系统高精度的运动控制要求, 这就要求对传统的PID控制器进行改进, 以到达高精度的控制要求。

收稿日期: 2015-09-23

2.1 单轴运动控制器的设计

对二维运动平台控制器的设计，首先设计其单轴控制器，就是异步电机位置和速度控制器的设计。通过单轴电机位置跟踪精度的提高，可以减小其跟踪误差，进而可以间接的减小两轴的轮廓误差。

实现二维运动控制系统的高速定位，其实质就是使系统快速跟踪指定指令。在控制理论中，前馈控制和反馈控制相结合的复合控制可以提高伺服系统的响应以及轨迹跟踪精度^[3]。前馈系统模型如图1所示。

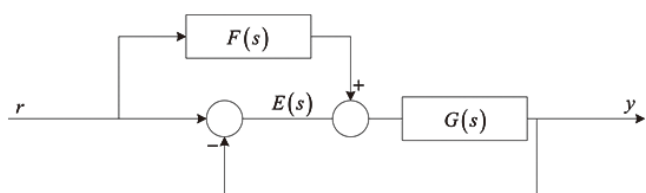


图1 前馈控制原理框图

前馈控制器可以把指定指令r直接传递给控制对象，使系统的快速响应能力和跟踪指令性能大大提高。

由上图可知，系统的输出量为：

$$y=[E(s)+F(s)r]G(s) \quad (1)$$

系统误差表达式为： $E(s)=r-y$

可得：

$$y = \frac{[1+F(s)]G(s)}{1+G(s)}r \quad (2)$$

当前馈控制器传递函数为如下形式：

$$F(s)=1/G(s) \quad (3)$$

带入(2)式可得：

$$y=r \quad (4)$$

由(4)式可以说明任何时刻系统输出量y都可以完全跟踪输入量r，即到达理想的跟踪性能。

上述设计是单轴位置控制器的设计，然而造成位置误差的直接原因就是速度误差的出现，造成速度误差出现的主要原因是干扰的发生。由于此二维运动平台是载人的舞台二维飞行机构，人在飞行机构上要做各种动作以获得良好的表演效果，人的动作就使得电机所带负载不为恒定值，即相当于有一个干扰力。为了避免干扰力对系统造成的影响，首先我们先研究传统的IP控制器(如图2)。

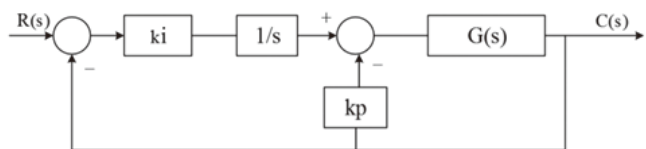


图2 IP控制器

图中 $G(s)=K_M/(T_M S+1)$ 为三相异步电动机的近似传递函数，其中 $T_M=GD^2/375(-\Delta n/\Delta M)$ 为电动机的机电时间常数； K_M 为电动机的传递函数^[4]。

由图2可以看出，IP控制器的优点是可以提高积分增益，所以具有更好的抗干扰能力。但它使误差信号经过积分环节，所以响应速度大大变慢^[5]。

为了克服IP控制器响应速度慢的缺点，需要对IP控制器进行改进。在IP控制器上加一个前馈环节，该前馈环节为比例控制，使得输入命令不经积分环节直接进入系统，这可以使响应速度得以提高，同时仍具有IP控制器抗干扰能力强的优点。改进后的IP控制器如图3所示。

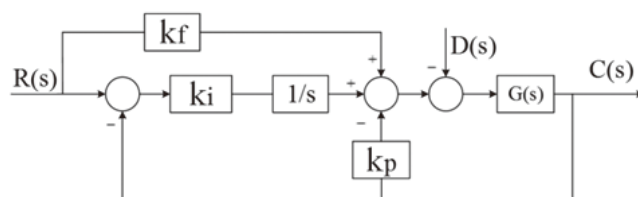


图3 改进后的IP控制器

由图3可得出输入输出传递函数和误差传递函数：

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)\left(k_f + \frac{k_i}{s}\right)}{1+G(s)\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)} \quad (5)$$

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{-G(s)}{1+G(s)\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)} \quad (6)$$

由误差传递函数(6)式可以看出系统对误差D(s)的响应与前馈增益 k_f 无关。所以在调节系统参数时后考虑 k_f 。在传统的IP控制器中，积分增益 k_i 的增大可以使系统快速定位，但 k_i 过大就会导致系统超调量过大，从而导致系统振荡。但在改进后的IP控制器中积分环节 k_i 的增大，不会导致超调量过大，而且积分环节可以滤去许多低频干扰信号。所以说改进后的IP控制器既可以消除干扰对系统造成的影响，又可以提高系统的响应能力。

把图1的位置控制器和图3的速度控制器结合起来就形成速度—位置反馈控制器(如图4)。

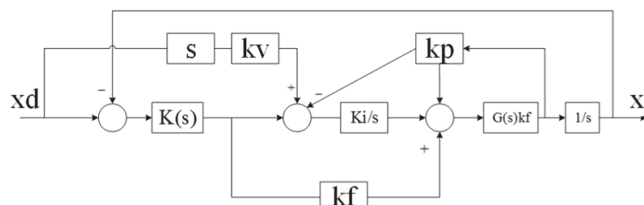


图4 速度—位置反馈控制器

图中 $K(s)$ 是位置控制器, k_v 是前馈控制器增益。此控制器的优点就是输出可完全复现输入、响应速度快且抗干扰能力强。上述控制器是单个轴的运动控制器, 二维运动平台的另外一个轴也采用同样的控制器。

2.2 双轴交叉耦合控制器的设计

我们知道单纯地减小单轴的跟踪误差并不能消除系统的轮廓误差。实际上单轴的跟踪误差非常小时也可能造成较大的轮廓误差, 这种现象称为两轴之间的耦合^[6]。

CCC(交叉耦合控制)是目前解决两轴耦合问题最常用的方法。CCC的基本思想是根据单轴的跟踪误差来直接估算出系统的轮廓误差, 再通过轮廓误差补偿器得到单个轴的位置补偿值, 然后加到单轴的位置中去, 这样两个轴都可以对另一个轴的动态特性做出调整, 可以提高两轴协调控制性能^[7]。交叉耦合补偿控制器如图5所示。

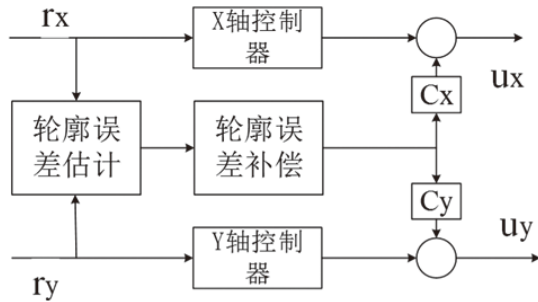


图5 交叉耦合补偿控制器结构图

图中 r_x 和 r_y 分别表示两轴电机的跟踪误差, u_x 和 r_y 分别表示两轴电机的控制输入信号。由图5可知两轴电机的跟踪误差都先输入到轮廓误差估计器中, 估算出的轮廓误差输出到轮廓误差补偿器, 最后再经过各轴的补偿增益反应到各轴的电机的控制输入信号中去。

轮廓误差补偿器采用PID控制器进行设计:

$$G_{ccc} = (K_{DC}S^2 + K_{PC}S + K_{IC})/S \quad (7)$$

而两电机的补偿增益 C_x 和 C_y 通常通过调试获得^[8]。

把单轴控制器与CCC结合起来就可得到完整的二维运动平台控制系统框图(图6)。

3 仿真分析

为了验证所设计单轴控制器的跟踪性能和抗干扰性能。首先用所设计的控制器与传统PID控制器做比较。输入幅值为2周期为 π 的正弦位置信号。在MATLAB中多次调节参数, 最终得到一组较好的控制器参数: $K(s) = 2.2, k_v = 32, k_p = 32, k_i = 45, k_f = 4500$ 。本系统所使用的

电动机的传递函数近似值为 $G(s) = 15/(2s + 244)$ 。

对PID控制器进行参数选取, 设其 $K_p = 200, K_i = 0.3, K_d = 0.5$ 。

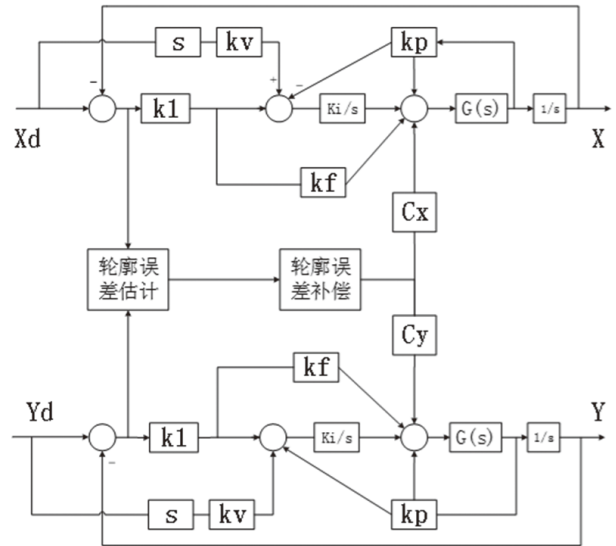


图6 二维运动平台控制系统框图

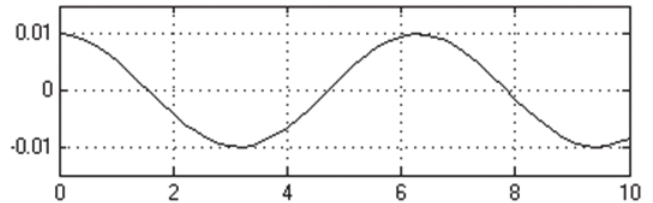


图7 单轴控制器跟踪误差曲线

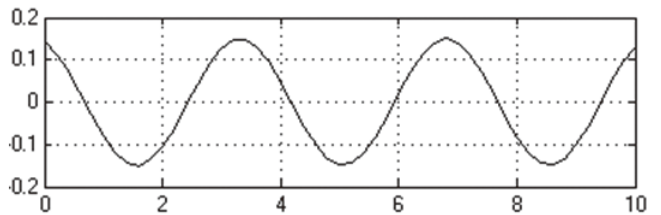


图8 PID控制器跟踪误差曲线

从图7和图8可以看出, 所设计的单轴控制器的跟踪误差远小于传统PID控制器的跟踪误差。

再把输入改为斜率为1的斜坡信号使电机匀速运行, 并在5秒时加入一个幅值为5的阶跃信号, 观察其扰动时的位置特性。

从图9和图10可以看出, 所设计的单轴控制器几乎不受干扰的影响, 而PID控制器受干扰的影响较大。

接下来测试加入交叉耦合补偿前后轮廓误差的变化。设两轴的输入分别为: $X = 2\sin \pi t$ 和 $Y = 2\cos \pi t$, 则理想的输出曲线为半径为2的圆。

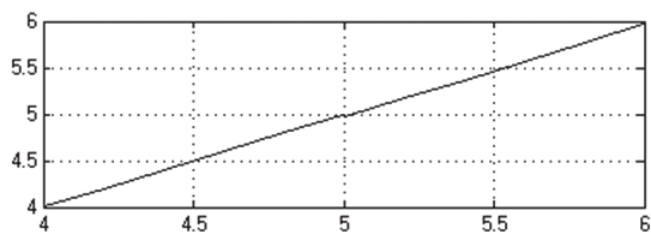


图9 单轴控制器扰动位置特性

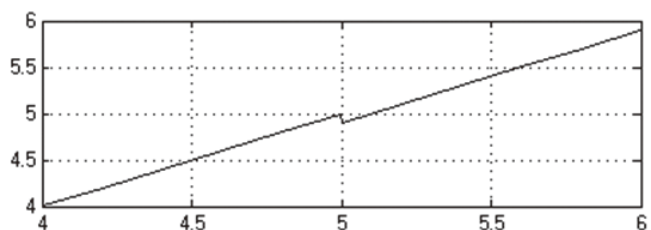


图10 传统PID控制器扰动位置特性

从图 11 和图 12 可以看出, 补偿后的轨迹图已经非常趋近于半径为 2 的圆, 而补偿前的轨迹与半径为 2 的圆相差比较大。

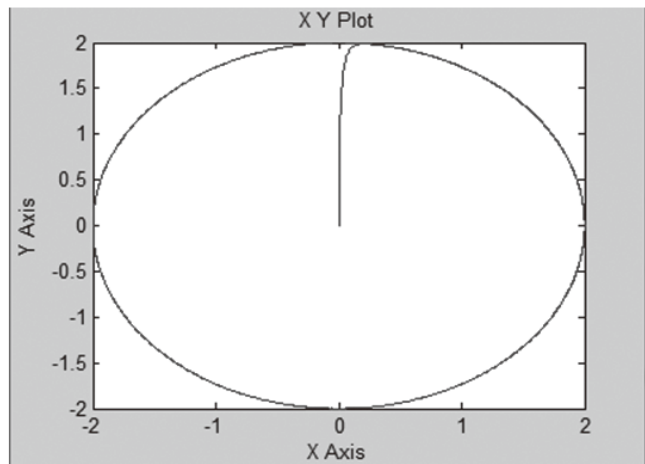


图11 补偿后的轨迹图

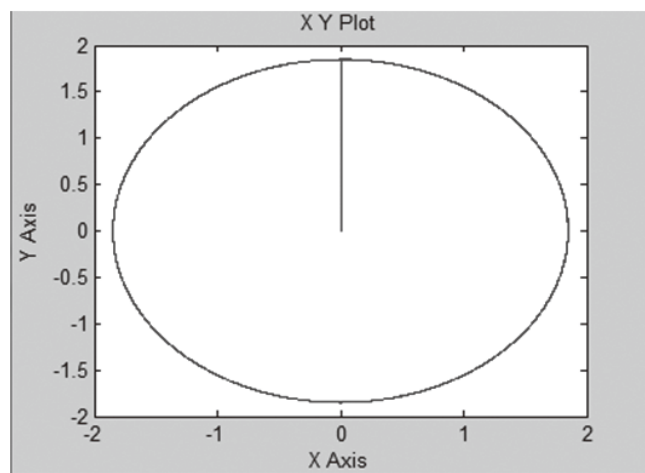


图12 补偿前的轨迹图

4 结束语

由于传统的PID控制难以满足二维飞行机构控制系统高精度的要求。本文先对单轴控制器进行设计, 证明此单轴控制器的跟踪误差远小于传统的PID控制, 且抗干扰能力优于传统的PID控制; 再利用交叉耦合补偿控制设计二维控制器, 并证明补偿后的轮廓误差远小于补偿前的轮廓误差。从而说明此控制策略可以显著提高二维飞行机构运动控制精度。

参考文献:

- [1] 丰其云, 严华峰. 舞台机械设备运动分析[J]. 演艺科技, 2014, (8): 34-38.
- [2] 丛爽, 刘宜. 多轴协调运动中的交叉耦合控制[J]. 机械设计与制造, 2006, (10): 166-168.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 杨绮. 基于实时轮廓误差的直线电机XY平台轮廓控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- [6] 王丽梅, 李兵. 基于实时位置补偿交叉耦合控制与重复控制的直接驱动XY平台系统设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 1030-1034.
- [7] 张秋菊. 多轴CNC机床耦合轮廓误差补偿的方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2001, (12): 19-22.
- [8] 李宏胜. 轮廓运动的交叉耦合模糊自整定控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2005, (5): 18-21.

作者简介: 汤子龙(1962-), 男, 高级工程师, 研究方向: 舞台机械自动化。