

doi: 10.7690/bgzdh.2014.12.005

无人机伺服作动系统容错控制研究

陈望舒, 沈佩珺

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为了增强伺服作动系统的可靠性, 使其当某些特定故障发生时, 能够继续工作, 提出了一种双余度电动伺服舵机系统。通过建立双余度电动舵机的数学模型, 设计舵机控制器, 分析双余度舵机的典型故障, 选择合适的故障诊断策略, 以达到舵回路的故障容错能力。结果表明: 采用余度技术后, 系统的静态性能和动态性能没有大的改变, 但是大大提高了系统的可靠性。

关键词: 伺服作动系统; 可靠性; 余度; 故障诊断; 故障容错

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Research on Fault-Tolerance in Servo System of UAV

Chen Wangshu, Shen Peijun

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the reliability of servo system, and make it work normally when some faults occurred, introduce a dual-redundancy steering gear. Based on establishing mathematical model of the dual-redundancy electric actuator, design the actuator controller, analyze the typical faults of it, choose proper fault diagnosis strategy, then the servo system can attain the ability of fault tolerance. The results prove that the static and dynamic property has not been changed greatly by using redundancy technology, but the system reliability has been greatly improved.

Keywords: servo-system; reliability; redundancy; fault detection; fault tolerance

0 引言

随着高新技术在航空领域的广泛应用, 无人机的应用范围和性能得到不断发展。伺服作动系统的可靠性直接影响飞行控制系统的可靠性, 进而影响了无人机的可靠性^[1]。同时, 伺服作动系统又是故障的高发环节。因此, 必须拥有一套高可靠性的伺服作动系统。

伺服作动系统是用来精确跟随某个过程的反馈控制系统, 其主要功能是根据计算机的给定指令, 实现对无人机左右副翼, 方向舵, 升降舵和油门的定位控制, 从而维持飞行姿态的稳定与精度。提高伺服作动系统可靠性可以采用余度技术, 采用相同或相似的单元构成余度系统^[2]。通过分析电动舵机结构和组成, 搭建数学模型, 笔者开发了一种双余度电动舵机, 完成了控制器的设计和参数的选择, 提高了伺服作动系统对于某些故障容错能力, 也增强了系统的可靠性。

1 总体结构

伺服作动系统主要组成部分为伺服控制器和伺服作动器 2 个^[3]。伺服控制器控制被控对象的某种状态, 使其能自动、连续、精确地跟踪输入信号的

变化规律, 一般为闭环控制系统。

笔者以双余度伺服作动系统作为研究对象, 控制器采用 DSP28335, 完成电机位置信号的采样, 采用 PID 算法设计控制方案, 实现故障监测和故障的处置, 并验证了方案的可行性。

2 舵机控制器的设计

控制对象模型的建立是控制律设计的基础^[4], 在建立数学模型的基础上讨论对其模型进行经典控制律的设计与仿真。双余度舵机主要由 2 个通道构成, 每个通道都有自己的功率放大器, 电机和位移传感器组成。对单通道伺服作动系统, 其数学模型推导如下:

1) 功率放大器的传递函数。

功率放大器主要功能是将 DSP 给定的微小信号转换成可以驱动舵机的大信号。理论上说, 舵机功率放大器是线性放大环节, 但电平变化会有一个过程, 所以, 应视为一阶惯性环节, 其传递环节形式如下:

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

2) 电机的数学模型。

收稿日期: 2014-07-15; 修回日期: 2014-08-24

作者简介: 陈望舒(1990—), 女, 安徽人, 在读硕士, 从事先进飞行控制研究。

根据直流伺服电动机的原理，可画出等价的传递函数方块图，如图 1 所示。

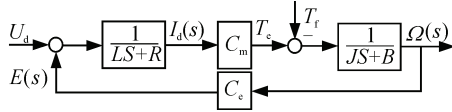


图 1 电机等价传递函数方块图

3) 减速传动机构模型。

电机转动经减速传动机构转换为舵机的输出，不计弹性形变，齿轮间隙，减速传动机构的传递函数如下：

$$W(s) = \frac{D(s)}{\omega(s)} = \frac{ZP}{2\pi is} \quad (2)$$

其中：i 为各级传动比之积；Z 为减速器最后一级齿数；D 为输出轴位移^[5]。

4) 控制律的设计。

为了使舵机系统更加快速，稳定和准确，最优先采用电流速度位置三闭环系统，这需要采用测速机，增加了成本，所以采用电流位置双闭环系统。上位机将指令分别传给 2 个通道，2 个通道分别通过控制律的解算，得到输出的信号量，最终输出舵机位移量。其结构如图 2 所示。

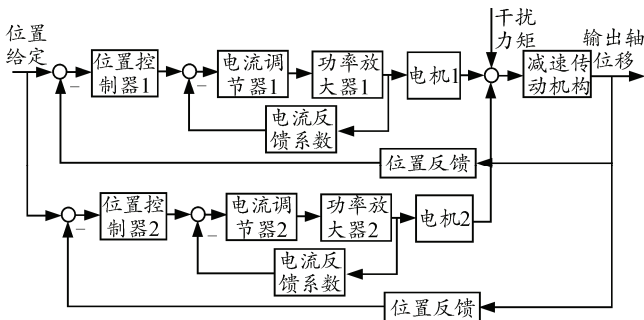


图 2 双余度舵机控制原理框图

控制器的设计应遵循先设计内环再设计外环的方式。先设计电流环，电流环应该具备快速的跟随特性，但是超调量过大又会影响系统的平稳性。综合考虑，电流环应具有快速的响应速度，较小的超调，可设计成典型 I 型系统。由于电流环的控制对象是由 2 个惯性环节叠加组成的，必须使其产生零极点对消，这样传递函数才能使典型 I 型系统，其传递函数可以写成

$$G_{ACR} = \frac{K_{ic}}{s} + K_{pc} = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (3)$$

式中，K_i、τ_i 分别为电流调节器的比例系数和电流调节器的超前时间常数。在快速性和稳定性之间取折中，取得合适的增益值，为了使系统快速达到

稳定状态，位置控制器改用 PD 控制。采用 PD 控制的位置调节器传递函数为

$$G_{APR} = K_{pc} + \frac{K_{dc}s}{T_{dc}s + 1} = 1.5 + \frac{0.08s}{0.005s + 1} \quad (4)$$

舵机双余度仿真曲线如图 3 所示。

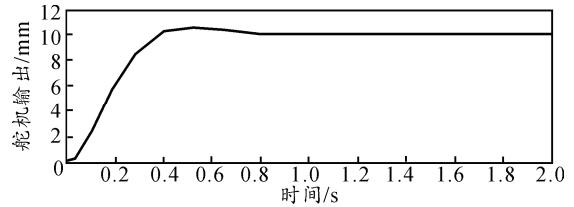


图 3 舵机双余度仿真曲线

由上图的仿真曲线可以看出：双余度舵机的系统调节时间较小，过渡过程平滑，得到了良好的效果。

3 舵机系统的故障诊断和余度管理

为了减少飞控计算机的运算以及不必要的器件损耗，伺服系统采用单通道工作。由于本文所研究的双余度舵机 2 个通道采用相同的控制器，功率放大器和位移传感器，所有单元参数基本相同；所以，当其中一个通道出现故障时，可以立即切换到另一个通道。

对于单通道的舵机系统，采用基于 Kalman 滤波器的故障诊断技术。通过 Kalman 滤波器对伺服动作系统的状态进行估计，由估计的状态值得到对应的系统输出估计值，将其与系统的真实值进行比较，得到残差，利用残差进行故障诊断^[6]。当通道处于正常工作状态下，残差应该为一个白噪声序列，均值为零。当这一通道发生故障时，残差会迅速增大。

对系统进行故障的仿真实验，在 120 s 左右加入传感器故障，残差曲线如图 4 所示。

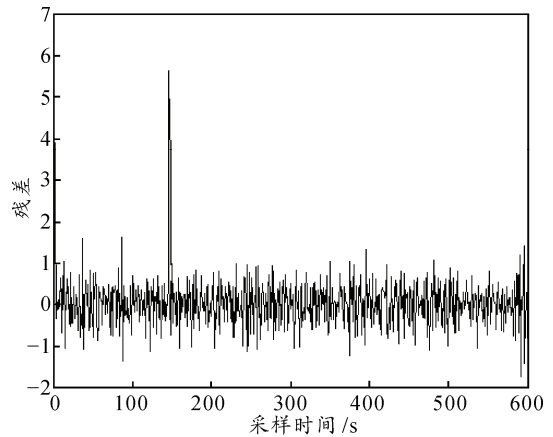


图 4 加入故障的残差曲线

在 120 s 时，残差突然增大，可以证明：基于 Kalman 滤波器的故障诊断技术是有效的，可以在故障发生的时候检测出故障。

在系统发生故障时，通过故障诊断模块，判断出故障发生的原因，将故障类型通过接口报告给上位机。这时，在没有人工干涉的情况下，系统可以依据不同的故障等级，自主地将出现故障的通道切断^[7-8]；根据上位机指示故障的类型，也可以人工通过仲裁通道切换通道，对实现对系统的管理。通过这种双通道的管理策略，能够更有效地对系统进行管理，以提高系统对故障的容错能力以及系统的可靠性。软件的设计流程图如图 5 所示。

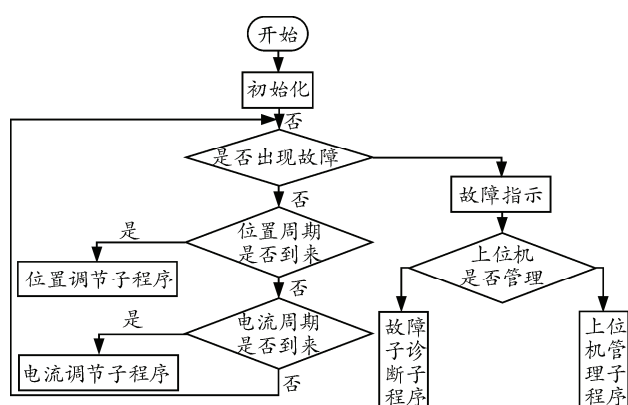


图 5 软件设计流程

伺服系统工作在单通道情况下，当这个通道出现工作异常情况时，对应该通道的失效检测器发出信号，首先切除该驱动电路，然后将故障报告给上位机。由转换器投入一个备用通道，使得系统继续正常工作。由故障控制器切换到另一个通道工作。

当一个通道故障，仅一个通道正常工作，并且故

障诊断模块判断出通道存在故障，根据当前的故障模式重新构造控制策略，从而保证系统的运行性能。文中采用基于采用参数空间的容错控制设计算法，借助固定的固定输出反馈控制，将系统的闭环极点配置在一个预定的区域里，并且保证当所考虑的任何一种故障模式发生时，闭环极点仍处与该区域内，仿真证明是一种有效的方法。

4 结束语

笔者以无刷直流电机作为研究对象，通过对对象建模，设计了电流位置双闭环控制器，采用了双余度控制方法，提高了被控对象的可靠性，克服了由于局部部件故障而导致伺服系统瘫痪的状况。

参考文献：

- [1] 付永领, 裴忠才, 王占林. 伺服作动系统的余度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 1999: 531-534.
- [2] 王慧娟. 双余度电动伺服舵机系统设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 18-22.
- [3] 段镇. 无人机飞行控制系统若干关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院, 2014: 5-8.
- [4] 张志文. 双通道余度飞行控制计算机关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 18-27.
- [5] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- [6] 管宇. 卫星姿态控制系统的故障诊断与容错方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] 吴彬. 基于模型的故障诊断技术及其在电动舵机上的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2008.
- [8] 侯晨光. 民用飞机伺服作动系统可靠性方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.