

doi: 10.7690/bgzdh.2014.08.006

# 一种多通道电气双余度的无人直升机舵系统

应浩, 黄健, 孙宾

(总参六十所, 南京 210016)

**摘要:** 为满足无人机飞行的安全性与可靠性, 提出一种多通道双余度舵系统的设计方法。该系统采用无接触式设计, 由 DSP 完成 6 路舵机的位置环控制, FPGA 完成速度环控制, 通过对主要模块的余度设计特点进行说明, 采用模型比较和通道参数比较的方法, 构成了系统的故障自检测模块。当出现一次同类故障或多次不同类故障时, 系统仍能正常工作。分析结果表明: 该方法达到了技术指标要求, 余度切换时无明显扰动, 并已在某型无人直升机上得到实际验证。

**关键词:** 双余度; 故障监测; 可靠性

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Multi-Channel Electrical Double Redundancy for Unmanned Helicopter Rudder System

Ying Hao, Huang Jian, Sun Bin

(No. 60 Institute of the Headquarters of the General, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** For meet the safety and reliability of unmanned helicopter fly, put forward a design method of multi-channel double redundancy rudder system. The system uses non-contact design, adopts DSP to realize 6-channel rudder position loop control, and adopts FPGA to realize speed loop control. By introducing redundancy design features of main module, adopt model comparing and channel parameter comparing to establish system fault self-diagnosis module. The rudder system achieved the ability that when the system appears a similar failure or many different kinds of system to work normally. Experiments show that the design has reached the technical index requirement, and the redundant switch has no obvious shaking. It was verified by certain type unmanned helicopter.

**Keywords:** double redundancy; fault monitoring; reliability

### 0 引言

随着无人机应用领域的不断扩展, 对无人机飞行的安全性与可靠性要求也不断提高。近年来, 随着无人机技术的发展和设备功能的提升, 余度技术被越来越多地用到了无人机设计中来<sup>[1]</sup>。由于对无人机系统体积、重量、功耗等方面的要求, 航电系统多采用双余度技术。文中提出的舵系统采用了完全电气双余度设计, 舵机采用双绕组稀土无刷直流电机, 角度和位移传感器分别采用了无接触式的霍尔传感器和磁阻式线性位移传感器, 舵机控制器采用完全电气双余度设计, 并对某型无人直升机上负责

姿态控制的 6 路舵机采取集中式控制, 通过双余度舵系统设计, 提高无人直升机整机工作的可靠性。

### 1 方案设计

目前, 舵系统的双余度设计多为驱动电路双余度或电机绕组双余度设计, 均为局部余度设计<sup>[2-3]</sup>。当前者发生绕组故障或后者发生驱动电路故障时, 或者两者发生位置传感器、电流传感器等其他器件故障时, 舵机系统仍不能正常工作。本系统为某型无人直升机多通道完全电气双余度舵系统, 满足一次同类故障和多次不同类故障的工作能力。

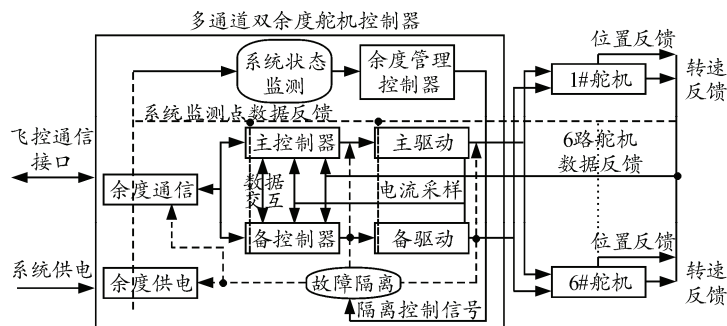


图 1 多通道电气双余度舵系统原理

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-04-21

作者简介: 应浩(1981—), 男, 安徽人, 硕士, 从事无人机作动系统、电机控制研究。

系统采用无接触式设计，舵系统包括一个完全双余度舵机控制器、6 路双余度舵机。系统整体框图如图 1 所示。

舵机控制器主要包括系统供电余度部分、通信余度部分、控制器余度部分、余度管理部分、驱动余度部分、系统状态自监控部分、光电隔离、故障隔离部分等，舵机包括稀土双绕组无刷直流电机、磁阻式线性传感器、减速箱、滚轴丝杠等。

## 2 工作原理

由于本系统属于多通道控制方式，主/备控制器平台采用 DSP+FPGA 方式，同时对 6 路舵机进行控制。为减小系统响应时间，提高系统响应的快速性，采用位置环和速度环分别处理的方式，由 DSP 完成 6 路舵机的位置环控制，FPGA 完成速度环控制。

飞行控制指令通过余度通信模块将指令数据同时发送至主控制器和备控制器，主/备控制器同时对 6 路舵机的位置反馈和电流反馈进行采样与处理。通过 PID 计算，将 6 路控制量送与 FPGA，由 FPGA 将控制量与速度反馈进行计算，最终得到舵电机伺服控制量，通过驱动电路完成 6 路舵机的伺服控制。正常工作时，由主控制器完成对 6 路舵机主绕组的控制，备控制器的输出与舵机备绕组之间通过隔离电路进行隔离。余度管理控制器通过系统状态监测对整个舵系统的工作状态进行数据采样、处理、判断，当发现某部分电路出现故障时，及时将该部分进行隔离，切换到备控制通道上，并上报该状态。

## 3 余度组成

系统的电气余度主要有供电余度、通信余度、控制器余度、驱动电路余度、电机绕组余度、霍尔余度、位移传感器余度等。

供电余度在保证对舵系统供电独立的同时，又能在电源系统出现故障时，将故障电源隔离在系统之外。系统设计时对重要供电电源输出端做单向输出、限压处理，同时对输出电压、输出电流进行采样，确保在电源部分出现问题时能及时发现问题、隔离。

为减少因控制器切换带来的舵机抖动，将通信余度设计如图 2 所示。正常工作时主/备控制器能同时收到主/备电平转换后的飞控指令，数据回传则只通过主控制器完成。当主电平转换出现故障时，主控制器通过备电平转换完成数据的接收与回传，避免因通信中断带来的控制器切换问题。

主/备控制器采用 DSP+FPGA 方式，完成对 6 路舵电机绕组 1 和绕组 2 的伺服控制。主/备通道同时完成对 6 路舵机的工作状态采集与数据反馈，如图 3 所示。

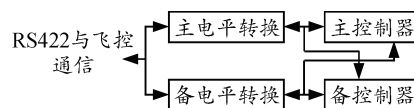


图 2 通信余度设计

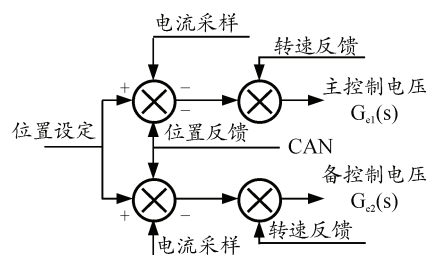


图 3 双余度舵机控制器控制结构

在同一个控制周期内，由于主/备控制器的位置设定、位置反馈、电流采样与转速反馈采用相同的数据，满足  $G_{e1}(s)=G_{e2}(s)$ ，理论上保证了在余度切换时系统的无扰动性。

驱动余度及电机绕组余度对应主/备余度控制器的控制器输出，驱动电路采用体积小、可靠性高的 MSK4301 模块，电机绕组采用主/备工作方式，单个绕组提供系统所要求的力矩输出，此方式避免了双绕组同时工作时电流平衡、力的分争和单绕组出现故障时系统输出性能减半的问题。

位移传感器采用非接触式的磁阻式线性位移传感器，本系统采用基于 HMC1512 的磁阻式列阵的无接触式位移测量方法，取代了通常所用的电位计方式，避免了电位计由于长时间磨损带来接触损耗所造成的测量误差或“不接触”<sup>[4]</sup>，测量精度、性能可靠性更高。通过余度传感器阵列方式（10 个，间距 10 mm），使线性范围达到 90 mm，数据输出使用 CAN 总线方式。正常工作时，位置精度可达 0.01 mm。在某个传感器出现故障时，在出现故障传感器 10 mm 范围内测量精度可控制在 0.1 mm，其余范围测量精度不变。

## 4 余度管理及故障诊断

故障诊断是余度管理的出发点与难点，诊断结果直接影响系统的可靠工作与虚警率。本方案根据不同模块的特点，采用模型比较和通道参数比较的方法构成系统的故障自检模块（BIT），并将诊断的结果作为余度管理的依据。

舵系统为无人机上重要执行机构，也为主要用电设备，出现故障后要及时排除，以免影响无人机飞行，同时也需对故障进行隔离，以保护机上其他用电设备。舵系统可处理的故障类型如表 1 所示。

通过表 1 可发现，系统不仅可以处理一次故障，也可以处理不同类的多次故障，大大提高了系统的工作的可靠性。

表 1 系统可处理的故障类型

故障类型	通信故障	控制器故障	电机霍尔故障	电机绕组故障	位移传感器故障	余度切换故障
一类故障	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作
二类故障	—	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作
三类故障	—	—	正常工作	正常工作	正常工作	正常工作
四类故障	—	—	—	正常工作	正常工作	正常工作
五类故障	—	—	—	—	正常工作	正常工作
六类故障	—	—	—	—	—	正常工作

4.1 通信及控制器故障

根据通道参数，此 2 部分可归为一类故障。通信故障根据舵系统与飞控计算机的通信参数进行比较，当主备通道帧频率不一致且主通道帧频率下降到设定阈值时  $f_{off}$  时，即可判定出现主通信故障。

系统正常工作时，主、备及余度管理控制器之间有相应的数据进行交互，根据舵系统最小控制周期  $T_{off}$ ，设定当某一控制器数据交换间隔大于设定的  $N$  倍控制周期  $NT_{off}$  时(增加 0 或 100% 占空比保护)，即可判为某一控制故障。

4.2 驱动器及电机绕组故障

根据无刷电机三相桥驱动原理，当驱动器某桥壁被击穿、电机绕组短路或缺相、电机永磁体失磁时，将出现电枢电流偏离正常值或突变现象。通过采样电阻对电枢电流采样、滤波、放大，送到 AD 采样电路对舵机电流  $I_{di}$  进行采集。根据舵机负载模型，设  $I_{max}$  为舵电机允许的最大电流， $I_{off}$  为舵电机正常工作时允许发生的最大差值，检测方法如下：

$$I_{di} > I_{max} \text{ 绕组短路或驱动器被击穿}$$

$$|I_{d(i+1)} - I_{di}| > I_{off} \text{ 绕组断线}$$

4.3 电机霍尔及位移传感器故障

方案中所选用的稀土双余度无刷电机，采用双霍尔传感器余度方式，每组霍尔传感器对应 1 组电机绕组，传感器采用三相六状态 120° 导通方式，在 1 个霍尔导通周期内，当出现 000 或 111 时，即可判定该组传感器出现故障。

位移传感器能准确测量舵机丝杠运行到的位置，其精度和准确度是舵系统达到技术指标的关键。系统采用基于 HMC1512 的磁阻式列阵的无接触式位移测量方法，取代了常用的电位计方式，避免了由于长时间摩擦带来的接触损耗，测量精度、性能可靠性更高。通过 10 片 HMC1512 进行列阵(间距 10 mm)，有效距离达 90 mm，精度 0.01 mm，在某一传感器出现故障时，在出现故障处 10 mm 内的测量精度可控制在 0.1 mm，其余范围内精度不变。

4.4 BIT 电路故障

BIT 检测电路不直接参与对舵机的伺服控制，只作为余度管理的依据，从系统复杂度和可靠性上

考虑，对此部分电路没有做监测余度，只要控制好系统的检测精度，从系统模型比较和通道参数的准备度对系统的影响，此部分对于系统虚警率的影响可忽略。

5 可靠性分析及余度测试

本方案主要通过增加系统中双通道传动级数和组件余度来提高系统的可靠性，将单通道串联式舵机工作改变为多通道并联工作方式。当通道中某一组件发生故障时，另一通道仍可正常工作，以确保整个系统的正常运行。只有当系统中同一某件同时发生 2 次故障，该通道才完全失效，因而提高了系统的任务可靠性。串联数学模型：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad \text{MTBF} = 1 / \lambda_s$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \quad R_i(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

其中： $\lambda_s$  为产品的失效率； $\lambda_i$  为零部件的失效率；MTBF 为产品平均故障间隔时间； $R_s(t)$  为产品的可靠度； $R_i(t)$  为零部件的可靠度； $n$  为产品所含的单元数。并联数学模型：

$$R_s(t) = 1 - \sum_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad \text{MTBF} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt$$

舵系统常用模块失效率如表 2 所示。

表 2 舵系统常用模块的等效失效率

模块单元	等效失效率(10 <sup>-6</sup> )
电源模块	12.8
控制器模块	1.34
驱动模块	68.2
无刷电机	156.2
位移传感器	89.3

电气无余度条件下产品失效率  $\lambda_s = 327.84 \times 10^{-6}$ ，MTBF=3 050.3 h，100 h 产品任务可靠度  $R_s(t) = 92.8\%$ 。

电气双余度舵系统产品失效率  $\lambda_s = 214.97 \times 10^{-6}$ ，MTBF=4 651.8 h，100 h 产品任务可靠度  $R_s(t) = 98.6\%$ 。

通过比较可以发现：电气双余度舵系统使系统产品的任务可靠性有了明显的提高，平均无故障时间提高了 0.35 倍。

本方案主要电气参数如表 3。