

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.002

基于 FPGA 的双余度旋变无刷电机控制系统

王 强, 应 浩

(南京模拟技术研究所, 南京 210016)

摘要: 为提高无人直升机整机系统恶劣环境工作的可靠性和安全性, 提出一种基于 FPGA 的双余度旋变无刷电机控制系统的设计方法, 分别对旋转变压器的工作原理, 激磁解调接口电路, FPGA 信号采集, 旋变故障检测、判断和切换进行说明, 对旋变故障检测方法进行分析, 给出双余度旋变切换过程稳定结论。仿真结果证明: 该系统工作稳定、可靠, 提高了舵系统在恶劣环境中正常工作的能力。

关键词: FPGA; 旋转变压器; AD2S1210; BLDC; 舵系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Control System of Dual Redundant Rotary Brushless Motor Based on FPGA

Wang Qiang, Ying Hao

(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China)

Abstract: For improving reliability and security of unmanned helicopter system under harsh environment, this paper proposes a dual redundant rotary brushless motor based on FPGA, and separately introduce the operating principle of rotary transformer, demodulation interface circuit of excitation, signal acquisition of FPGA, and fault detection, diagnosis and switching of rotary transformer. Analyze the rotary fault detection method, and put forward the calculation that the dual redundant rotary transformation process is stable. Simulation results show that the system work is stable and reliable and it improves normal working performance when the rudder control system was under harsh environments.

Keywords: FPGA; rotary transformer; AD2S1210; BLDC; rudder system

0 引言

随着无人机功能的不断增加和应用领域的快速发展, 无人机的工作环境也变得复杂多样, 对无人机舵系统执行机构的环境适应性、可靠性和安全性提出了更高的要求; 因此, 迫切需要一种具有双余度旋转变压器的无刷电机以适应恶劣环境。传统的无刷直流电机电子换向采用霍尔传感器的方式, 文献[1]提出采用双余度旋转变压器作为无刷电机角度传感器换向方式, 提高了无刷电机工作的可靠性和环境适应性。无人直升机余度舵系统需要同时控制多路舵机完成飞行任务, 基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的并行性、高速性和冗余技术的可靠性, FPGA 和多余度技术已被越来越多地应用到无人机航电系统设计开发中[2]。笔者提出一种基于 FPGA 实现双余度旋转变压器无刷直流电机控制系统, 已在某无人直升机上得到验证和使用。

1 整体系统方案设计

系统硬件处理器平台采用 EP4C25 系列 FPGA

系统架构, 软件编程语言采用 Verilog HDL, 所有内部功能模块均采用 Verilog HDL 逻辑实现。双余度舵机^[3]由双绕组无刷直流电机、LVDT(linear variable differential transformer)、多级减速齿轮机构和滚珠丝杠等组成。双余度旋转变压器直流无刷电机采用旋变绕组与电机绕组一体化隔离设计, 具有体积小、质量轻和更高性能指标等优势, 但工艺要求高、价格贵。其系统工作流程如图 1 所示。

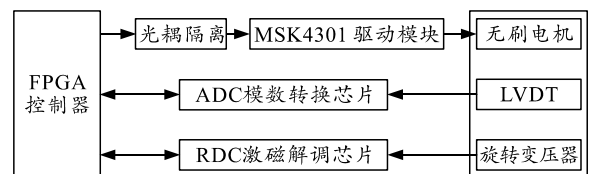


图 1 系统工作流程

图中只包括 1 路无刷舵机驱动电路部分, 其余 5 路没有画出。

如图 2 所示, 舵机控制器电气部分采用双余度设计。其中电气部分采用软硬件完全相同的余度技术策略, 图中向上箭头虚线为舵系统各种状态监控功能, 向下箭头虚线为舵系统出现故障后做出故障隔离和切换功能, 保证无人机一次性故障后还能够

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-06-25

作者简介: 王 强(1986—), 男, 辽宁人, 硕士, 中级工程师, 从事无人直升机航电系统、伺服控制系统、BLDC 控制等研究。

E-mail: 174962512wq@163.com。

正常完成任务和安全返航。

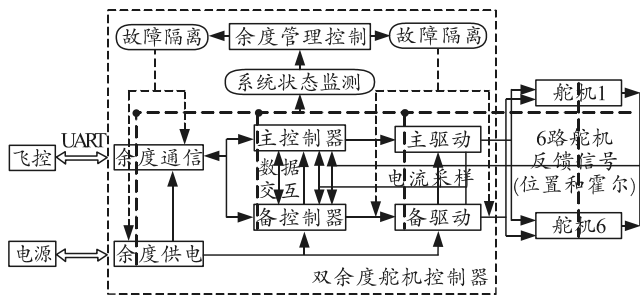


图 2 双冗余舵机控制器

2 旋转变压器原理

旋转变压器简称旋变，由定子绕组和转子绕组构成，并且相互独立，定子由初级绕组和次级绕组组成，转子由与定子磁通耦合的磁阻线圈组成^[3-5]。旋变是一种输出电压随转子角度变化的传感器元件，可靠性高，抗干扰能力强，应用范围广泛。其实物如图 3 所示。

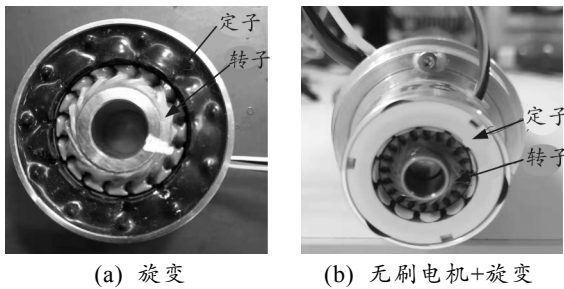


图 3 旋转变压器

旋变可作为无刷电机的转子角度传感器，为无刷电机电子换向提供准确的换向信息，旋变初级绕组(激磁绕组)和次级绕组(输出绕组)均安装在定子上，内部结构如图 4 所示。

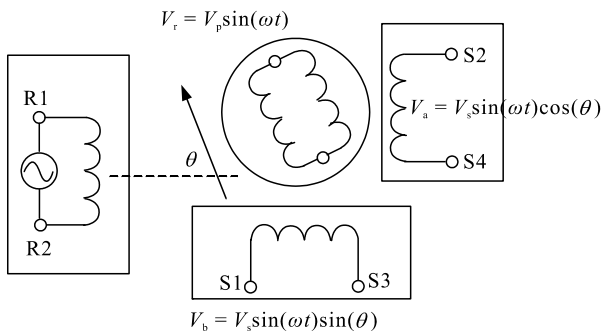


图 4 旋变内部结构

图中 R1、R2 为激磁绕组，S2、S4 和 S1、S3 为两正交次级绕组。当转子转动角度为 θ ，激磁信号频率为 ω ，激磁信号幅度为 V_p ，传输比为 K ，可推出旋变的输入和输出电压之间的具体函数关系式如下：

1) 激磁输入电压为：

$$V_r = V_p \sin(\omega t)。$$

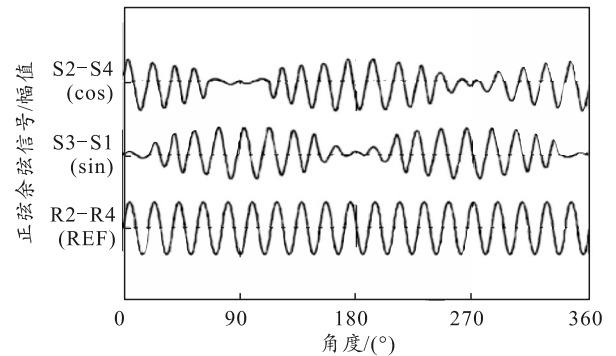
2) 正弦输出电压为：

$$V_s \sin = K V_r \sin(\theta) = K V_p \sin(\omega t) \sin(\theta) = V_s \sin(\omega t) \sin(\theta)。$$

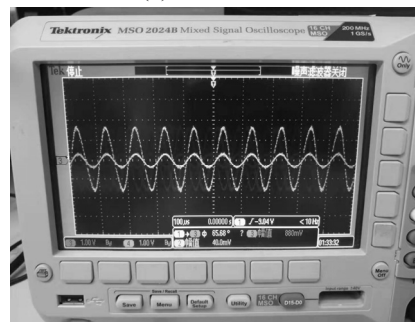
3) 余弦输出电压为：

$$V_s \cos = K V_r \cos(\theta) = K V_p \sin(\omega t) \cos(\theta) = V_s \sin(\omega t) \cos(\theta)。$$

当激磁绕组以一定频率的交流电压激磁时，输出绕组的电压幅值与转子转角成正弦、余弦函数关系，如图 5 所示，当转子旋转产生角度位置变化时，将会耦合到定子次级绕组跟着发生正余弦信号变化。



(a) 理论波形



(b) 实际波形

图 5 旋变初级和次级绕组电信号波形

图 5(a)中 REF 为激磁正弦信号，S3-S1 为 sin 差分信号，S2-S4 为 cos 差分信号，解调器即是通过检测这 2 组输出信号获取旋变角度位置信息。图 5(b)为示波器测试电机旋转某一角度时刻的旋变正弦和余弦波形，不同角度实时变化。

3 旋变激磁解调电路设计

AD2S1210 旋变激磁解调芯片是一种 10~16 bit 分辨率的 RDC，最大跟踪速率为 187 500 r/min，集成片上可编程正弦波振荡器，为旋转变压器提供 2~20 kHz 正弦波激磁信号，自动实现旋变故障检测功能，其内部包括时钟处理模块、参考电压模块、激磁输出模块、正弦/余弦差分输入采样处理模块、Type II 环路跟踪模块、增量式编码器输出模块、故障自检测模块、配置寄存器模块和数据总线控制模块等，其功能十分强大，是完整的单芯片旋变数字转换器。旋变角度解调输出原理如图 6 所示。

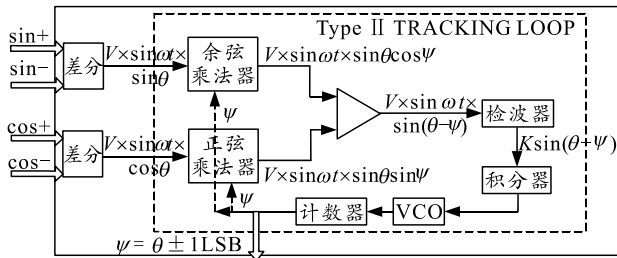


图 6 AD2S1210 内部解调原理

如图 7 所示，旋变激励解调电路采用一体化集成芯片 AD2S1210，通过外部接口电路满足不同旋变输入输出接口要求。系统中旋变解调电路采用 14 bit 分辨率(晶振为 8.192 MHz)时，对应的最大激励输出为 10 kHz，最大动态性能为 600~1 200 Hz，最大跟踪速率为 30 000 r/min，完全满足项目中无刷电机最高转速 12 000 r/min 和控制带宽要求。

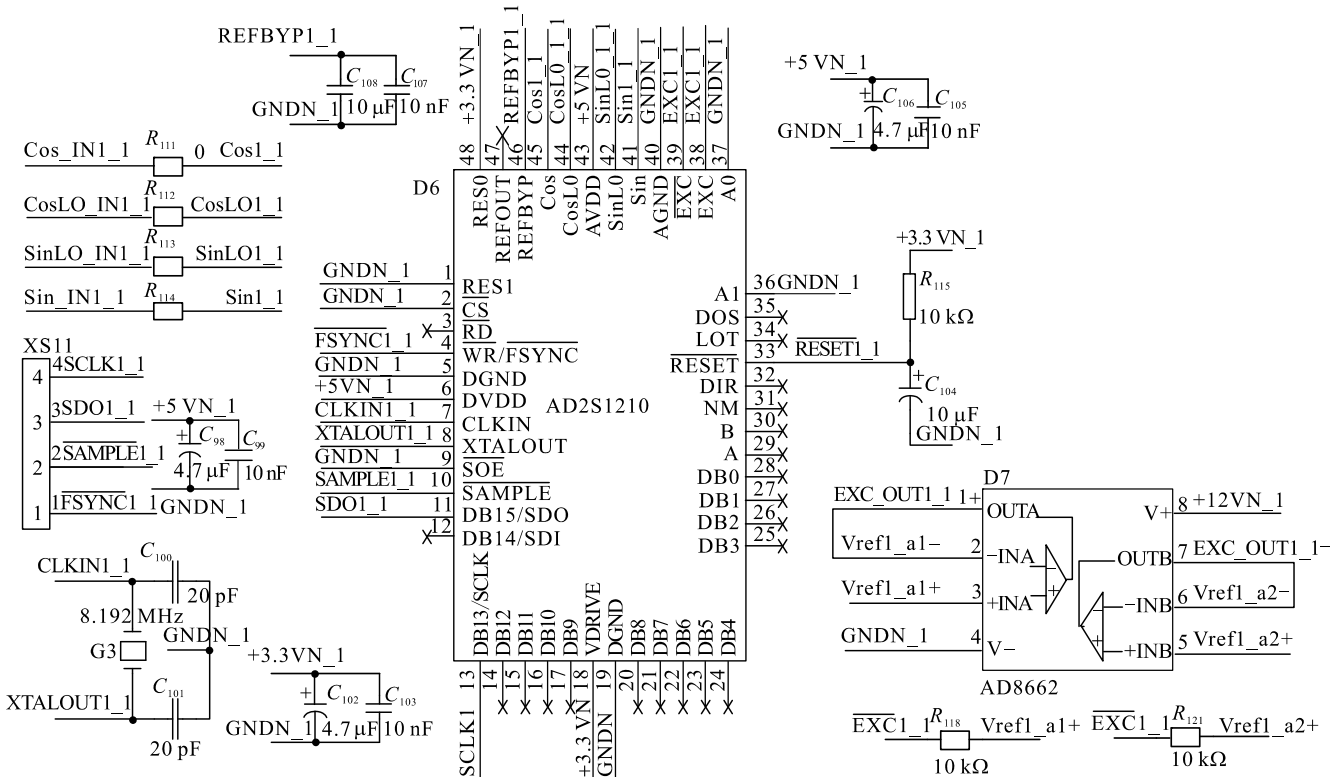


图 7 旋变激励解调接口电路

图中，EXC+和 EXC-为 AD2S1210 芯片激励输出连接旋变初级绕组，SIN、SINLO 为旋变次级输出连接到 AD2S1210 芯片正弦输入，COS、COSLO 为旋变次级输出连接到 AD2S1210 芯片余弦输入。系统 SOE 设置为低电平时选择串行接口，包括 SDO、SDI、FSYNC 和 SCLK 4 个管脚，SDO 用于位置、速度和故障数据输出，SDI 用于数据输入，FSYNC 为帧同步信号，SCLK 为串行时钟输入。

4 FPGA 信号采集

旋变激励后输出正弦波信号，通过旋变解调芯片 RDC 运算输出串行或并行角度信息、速度信息和故障信息，RDC 输出信号连续跟踪旋变的角位置量，FPGA 处理器通过模拟 SPI 总线完成对旋变解调角度值信号采集和后续 BLDC 控制。FPGA 同时对 6 通道旋变解调电路进行同时采样和处理。RDC 串行接口 SPI 总线时序如图 8^[6]所示。

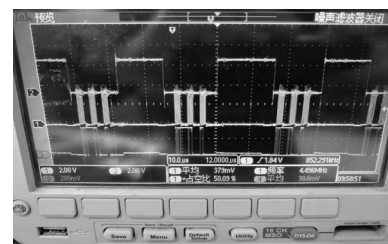


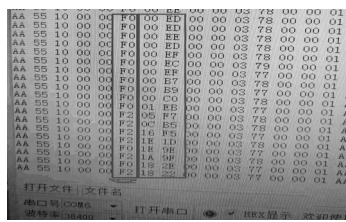
图 8 AD2S1210 串行数据输出采集

图中，2 通道为 FSYNC 同步信号，1 通道为 SCLK 采样时钟信号，3 通道为 FPGA 采集到 AD2S1210 芯片的串行 SDO 输出 24 位数据信号，由 16 位位置或速度信息和 8 位故障信息组成。

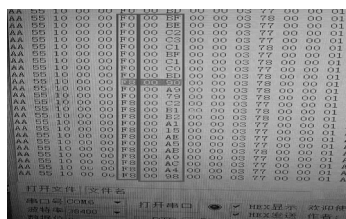
5 旋变故障检测和判断

AD2S1210 旋变激励解调集成芯片可以输出转子的位置和速度信息，并具有系统故障信息检测功能，为舵系统的冗余切换控制提供检测判断依据，其内部故障检测电路可以检测故障类型包括旋变信

号丢失、超范围输入信号、输入信号失配或位置跟踪丢失等^[7]。系统中只针对电机中的旋变激磁、正弦、余弦断路故障检测，当 6 根 EXC+、EXC-、SIN、SINLO、COS 和 COSLO 中的任意 1 根或多根断线故障发生时，FPGA 采集 AD2S1210 所输出的低 8 位故障数据由 F0 变为 F2 或 F8，如图 9 和 10 所示。无故障时采集数据为 F0，断激磁线时变为 F2，断正弦线时变为 F8。图 9 中左侧框为旋变实时故障状态监控，右侧框为角度值。图 10 中 3 通道圆圈为故障信号数据采集，通过 FPGA 来判断是否发生旋变断线故障。

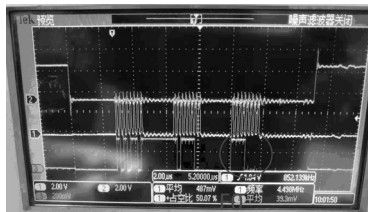


(a) 旋变正常采集数据



(b) 旋变异常采集数据

图 9 故障数据输出串口显示



(a) 旋变正常数据波形



(b) 旋变异常数据波形

图 10 F0(无故障时)变为 F2(断激磁)故障数据

从图 9 和图 10 可知：故障发生时与旋变的实际轴位置偏差跳变很大，具体判断依据为低 2 位或低 4 位采集数据是否检测到 1，如果某一位为 1 且连续采集一定次数均为 1，此时，认为旋变故障已产生。如图 11 所示，系统将主旋变切换到备旋变进行无刷电机控制(备旋变无故障才切换为前提)。

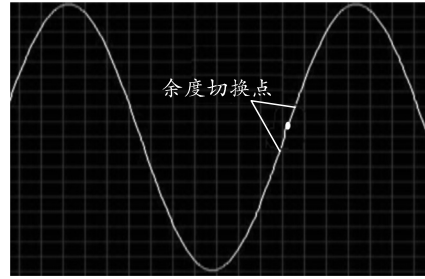


图 11 旋变故障余度切换波形

图中为 FPGA 检测到备旋变信号故障时，系统进行了旋变余度切换控制，白色线为无刷电机运动曲线，圆圈为余度切换点，系统切换时间为毫秒级，切换过程中舵机无明显抖动和毛刺现象出现，满足双余度旋变无刷电机控制指标要求。

6 ModelSim 仿真

如图 12 所示，ModelSim 仿真采用自底向上，下级功能模块单独仿真通过后，针对系统 Top 层模块集成仿真。图中包括旋变角度换向状态信号和 PWM 驱动输出信号，系统将旋变采集的电机转动 360°电角度信号细分为 6 个状态，分别对应 001、011、010、110、100、101，60°进行 1 次电子换向，完成旋变无刷电机换向控制功能。

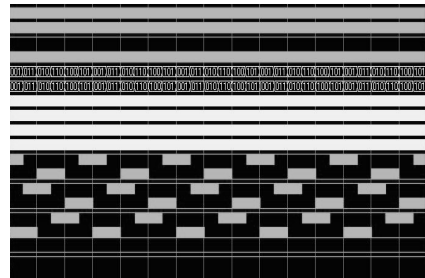


图 12 旋变角度状态信号和驱动输出信号仿真

7 实物测试验证

将图 12 中驱动输出信号连接到无刷直流电机上，验证了旋变控制无刷电子换向的正确性，三相绕组 PWM 驱动信号通过示波器捕捉测试如图 13^[8]。

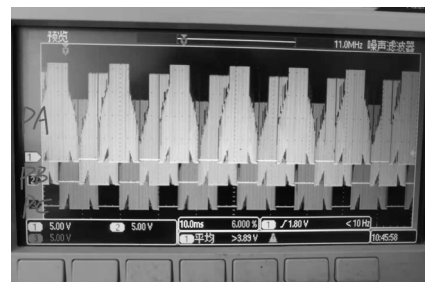


图 13 三相绕组 PWM 驱动信号