

飞机发电机控制器的保护电路数字化设计

Digital Design of Protection Circuit of Aircraft Generator Control Unit

西北工业大学自动化学院 李玉忍 李晓东

[摘要] 针对模拟式发电机控制器(GCU)中元器件易受环境等因素的影响,以模拟调压数字控制保护为原则,设计实现了基于数字信号处理器(DSP)的数字式飞机发电机控制器,并阐述了其设计要点。试验证明,数字式控制器在故障处理等方面比传统模拟式控制器可靠稳定。

关键词: 数字控制 DSP 电压调节 有效值

[ABSTRACT] According to the fact that components in traditional controllers are very sensitive to environment, a digital aircraft generator control unit(GCU) is designed and implemented with a digital signal processor(DSP)based on the principle of analog voltage regulation and digital control and protection.And the key design points are introduced. Experimental results show more reliability and more stability in fault treatment of the digital controllers comparing with the traditional ones.

Keywords: Digital control DSP Voltage regulation RMS

随着飞机向多电和全电方向的发展以及技术指标的提高,机载用电设备对飞机电源系统的依赖性和要求也在不断提高^[1-2]。电源系统除了能够提供稳定可靠的电能外,还要求多余度和不间断供电,以及能够进行电源系统的检测、监控以及故障保护等。但传统的模拟式发电机控制电路复杂,器件受环境影响较大,精度不高,可靠性低,且对故障的检测、诊断、隔离难度大,特别是对具有延时特性的保护,其延时时间往往达不到理想的效果。随着数字信号处理技术和微处理器的发展,采用数字信号处理集成芯片来设计数字式发电机控制器已成为一种较好的选择^[1-4]。

1 系统概述

某型飞机 60kVA 交流发电系统是三相 115V、400Hz 的恒速恒频交流电源系统,由 4 个交流电源通道组成,分为左右两侧,通道间可以相互转换但不能并联。任一通道与同侧另一通道或辅助动力装置(APU)或交流地面电源装置(EXT POWER)之间可实现供电转换。发电机控制器(GCU)控

制本通道发电机主接触器(GC1)和相邻通道发电机连接接触器(BTC2),完成系统的调压、控制保护、状态检测和通信等功能。交流主电源系统系统结构如图 1 所示。

2 系统硬件总体设计

虽然利用 DSP 等处理器进行数字调压的技术日趋成熟,但这种数字调压器存在着处理器死机或“跑飞”的弊端,给飞机的安全飞行带来了来很大隐患。本系统所设计的 GCU 是在某型飞机模拟式 GCU 的基础上进行改进的,采用模拟调压^[5-7]、数字控制保护的方式。调压器可以单独工作,而不需要 DSP 的干涉。数字控制保护部分采用 DSP 芯片完成对发电机电压、频率和电流等的检测,并在系统故障时实现保护、通信功能。

控制器采用 TI 公司 TMS320F240 作为控制核心。TMS320F240 是工作频率可达 20MHz 的 16 位定点 DSP,片上有丰富的外设资源,主要包括 16K 的 Flash、10 位模数转换器(ADC)、事件管理器模块(EV)、串行外设接口模块(SPI)、串行通信接口模块(SCI)和 CAN 控制模块等^[8-9],很好地满足了发电机控制器对电量测量、延时设定、控制保护输出和通信等方面的需求。其系统硬件原理如图 2 所示。

2.1 调压器

调压电路采用平均相和高相结合控制的方式,调压器结构原理如图 3 所示。调压点电压 U_A 、 U_B 、 U_C 经平均电压检测和高相电压检测后,转换成锯齿波信号,与电压基准进行比较后,形成脉宽调制波(PWM),通过 PWM 占空比的变化控制开关管的导通关断时间,进而控制发电机励磁,保证

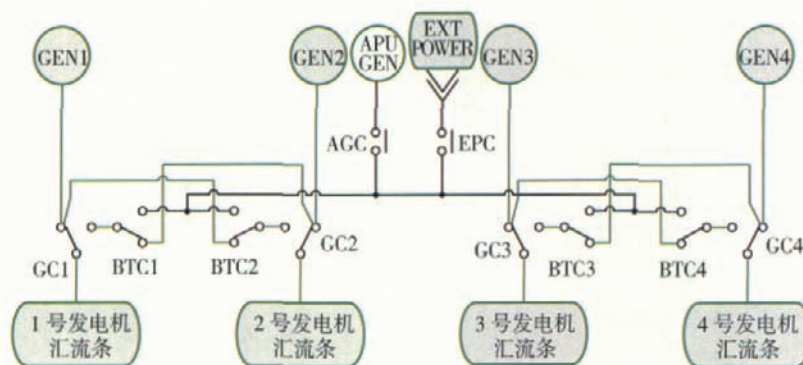


图 1 交流主电源系统

Fig.1 AC main power system

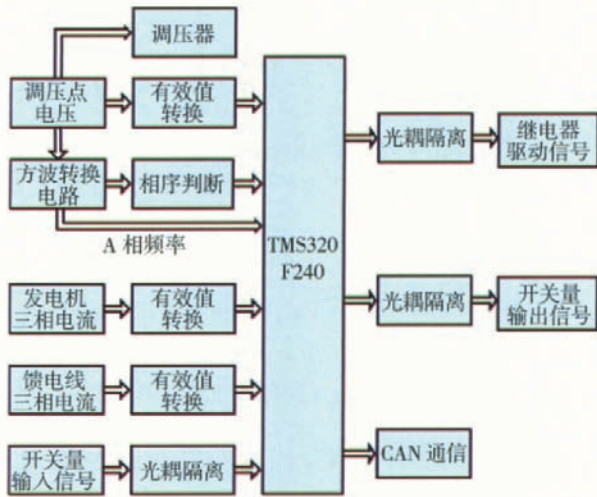


图2 系统硬件原理
Fig.2 Principle of system hardware

调压点电压稳定在115V左右。在励磁电流反馈环节中，通过判断励磁电流的增大或减小对电压基准进行调节，加快了系统的动态响应速度，并保证了稳定性。

2.2 有效值变换电路

为了降低DSP的运算量，发电机电压及电流信号经有效值变换芯片后，将有效值送入DSP的内部AD进行采样。有效值转换芯片选用AD公司的AD637。AD637具有高精度、宽频带和外围电路简单等特点，其应用电路如图4所示。CIN是交流耦合电容，起隔直作用，典型值为 $1\mu\text{F}$ 。CAV为平均电容，其值的选取与输入信号频率和转换误差有关，CAV越大，输出纹波越小，转换精度越高，但稳定时间随之增长。

2.3 方波转换电路

发电机三相电压经方波转换电路后转换为同频率的0~5V方波信号，供DSP采集频率和判断相序。图5所示电路可将任意电压波形转换成同频率方波，方波的沿与输入电压的过零点相一致。为了减小过零点干扰，加入稳压管V43，将过零点抬升至参考电平，N25D连接成跟随器，防止输入信号串入参考电平引起波动，输入信号经过比较器N29A后转换成同频率的方波。

2.4 相序检测电路

将发电机三相电压分别经过方波转换电路，得到三路方波信号，三路方波信号经两路D触发器后，再将

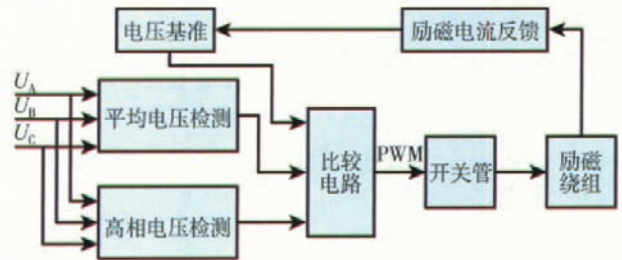


图3 调压器结构原理
Fig.3 Principle of voltage regulator structure

两路D触发器的输出相与，送入DSP以采集相序。其电路如图6(a)所示，相序正常时的波形如图6(b)所示，Q为高电平；当相序出错时，Q为低电平，DSP通过检测Q的高低来判断相序的正确与否。

3 系统软件设计

本系统软件采用C语言与汇编语言混合编程，利用模块化结构增强了程序的可读性和可移植性^[10]。根据功能要求，系统主要由自检、频率捕获、电量采集、实时监控、故障处理、通信和中断等子程序组成，主程序每10ms执行一次。主程序流程图如图7所示。其中冷复位指上电运行，热复位指DSP的软件看门狗或硬件看门狗复位。

以AD转换为例，TMS320F240内部有2组独立的10

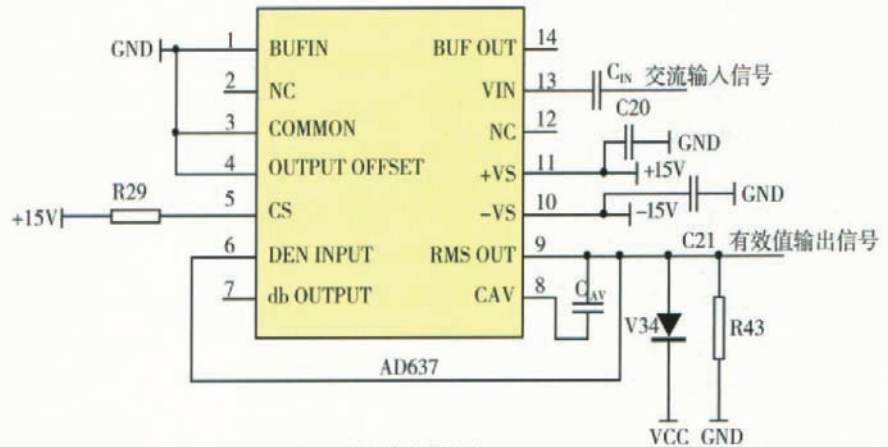


图4 有效值变换电路
Fig.4 Circuit of RMS conversion

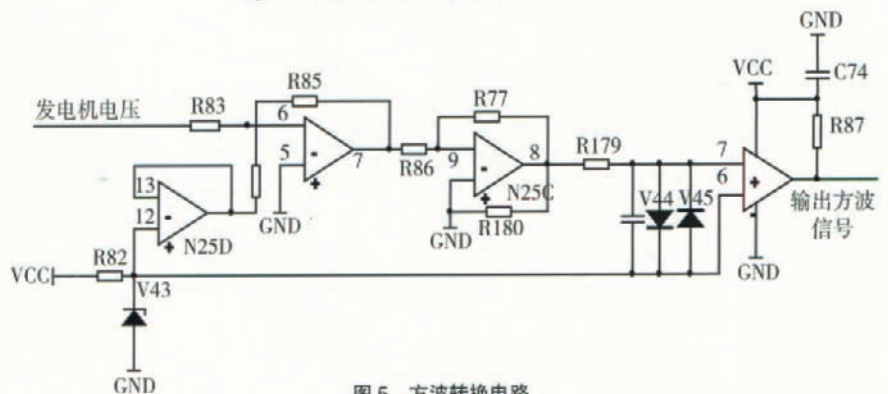
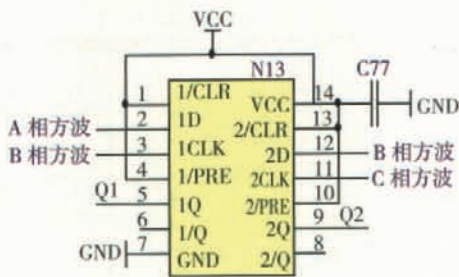
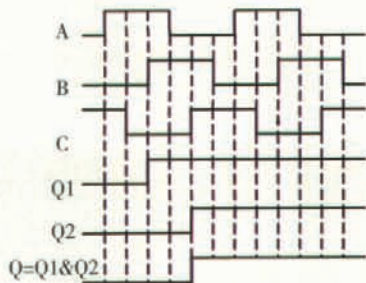


图5 方波转换电路



(a) 电路图



(b) 相序正常的波形

图6 相序检测电路
Fig.6 Circuit of phase checking

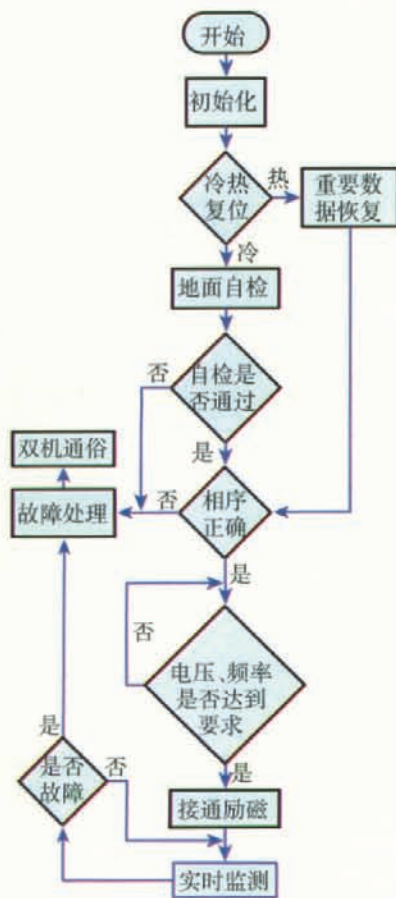


图7 主程序流程

Fig.7 Flow of main program

位ADC,其中ADC1由ADCIN0-7输入引脚组成,ADC2由ADCIN8-15输入引脚组成。在AD转换过程中,它以参考电压Vref为基准电源^[5]。本系统采用软件触发方式启动AD转换,由于AD由取样到转换时间至少需要6μs以上,为满足要求,设定转换操作时间为9.6μs。ADC转换的结果可由下式计算得出:

$$\text{转换后数据} = 1023 \times \frac{\text{输入电压} - V_{ref,0}}{V_{ref,H} - V_{ref,0}} \quad (1)$$

本系统中, V_{ref,H} 为 5V, V_{ref,0} 为 0V。

AD采集程序如下:

```
uint AD_Convert(uint Channel)
```

```
{ //uint 为 unsigned int 缩写, Channel 为 0-15 的 AD 通道数值
```

```
ADCTRL2=0x0005; //AD 转换时间 9.6 μs
```

```
uint temp=0; // 用于存放 AD 转换数字量
```

```
uint ChannelTemp=Channel&0x00ff;
```

```
uint ADout; //AD 输出结果
```

```
if (Channel>=15) Channel = 15;
```

```
if (Channel<=0) Channel = 0;
```

```
if (Channel<=7)
```

```
{
```

```
ADCFIFO1=0;
```

```
ADCTRL1=0xac00|(ChannelTemp<<1);
```

```
// 选通 ADC1 中的相应通道
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
ADCFIFO2=0;
```

```
ChannelTemp=ChannelTemp&0x0007;
```

```
ADCTRL1=0xb400|(ChannelTemp<<4);
```

```
// 选通 ADC2 中的相应通道
```

```
}
```

```
while((ADCTRL1&0x80)!=0); // 转换结束
```

```
if (Channel <=7)
```

```
temp=ADCFIFO1>>6; //ADC1 转换数据
```

```
else
```

```
temp=ADCFIFO2>>6; //ADC2 转换数据
```

```
adout=(long)(Vref)*temp/1023; //AD 结果
```

```
return(ADout);
```

```
}
```

4 试验结果

通过开环和闭环试验,我们对系统功能进行了验证,并将模拟式控制器和数字式控制器进行了比较。开环试验通过外部三相可调电源实现各保护功能,闭环试验则是与

发电机相连,进行联机试验。

开环试验数据如表 1 和表 2 所示,其中表 1 为数字式控制器的试验数据,表 2 为模拟式控制器的试验数据,虽然两者在某些规定值方面有所差异,但通过 2 组试验数据的对照发现数字式控制器在各保护点以及保护时间上的精度均高于模拟式控制器。闭环突加突卸负载时调压点波形分别如图 8(a)、(b) 所示,其中突加负载过渡时间为 74ms,最低点电压为 109V,突卸负载过渡时间为 80ms,最高点电压为 131V。闭环试验中调压精度数据如表 3 所示。以上试验结果均是在负载功率因数为 0.8 的情况下测得的。试验结果表明数字式控制器在各方面均满足设计要求。

5 结束语

本文从硬件和软件 2 方面介绍了发电机控制器的设计方案。模拟调压部分调压精度和动态响应时间均满足要

表 1 数字式控制器开环试验数据

试验项目	规定值	实测值	规定时间 /s	实测时间 /s
欠压	(99 ± 2)V	98.4V	(5 ± 0.2)	(5 ± 0.01)
欠压恢复	(112 ± 2)V	112.3V	无	无
过压	(125 ± 2)V	125.5V	(8 ± 0.2)	(8 ± 0.01)
过压恢复	(122 ± 2)V	122.9V	无	无
欠频	(375 ± 1)Hz	374.5 Hz	(2 ± 0.2)	(2 ± 0.01)
欠频恢复	(390 ± 1)Hz	390 Hz	无	无
过频	(425 ± 1)Hz	425.5 Hz	(1.5 ± 0.2)	(1.5 ± 0.01)
过频恢复	(410 ± 1)Hz	410.4 Hz	无	无

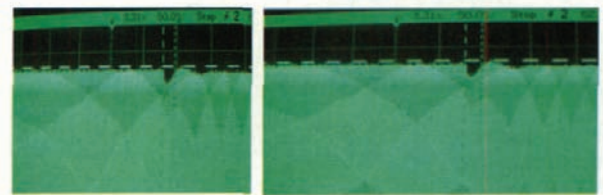
表 2 模拟式控制器开环试验数据

试验项目	规定值	实测值	规定时间 /s	实测时间 /s
欠压	(100 ± 2)V	99.1V	(5 ± 0.5)	4.62
欠压恢复	(110 ± 2)V	111.8V	无	无
过压	(125 ± 2)V	124.4V	(8 ± 0.5)	7.54
过压恢复	手动恢复	手动恢复	手动恢复	手动恢复
欠频	(375 ± 1)Hz	374.3 Hz	(2 ± 0.5)	2.38
欠频恢复	(385 ± 1)Hz	384.5 Hz	无	无
过频	(425 ± 1)Hz	425.8 Hz	(1.5 ± 0.5)	1.56
过频恢复	手动恢复	手动恢复	手动恢复	手动恢复

表 3 闭环试验数据

测试项目	空载	额定负载	1.5 倍过载
规定电压值	(115 ± 1.5)V	(115 ± 1.5)V	(115 ± 2)V
实测电压值	A:115.16V B:115.25V C:115.26V	A:115.0V B:114.75V C:114.93V	A:114.37V B:113.75V C:114.1V
规定励磁电流值	≤ 1A	≤ 2.8A	≤ 4A
实测励磁电流值	0.75A	1.9A	2.65A

注:空载指负载电流为 0A,额定负载指负载电流为 166A,1.5 倍过载指负载电流为 250A。



(a) 突加负载调压点波形 (b) 突卸负载调压点波形

图 8 调压点波形

Fig.8 Waveform of POR

求。其数字控制保护部分有效解决了模拟式控制器中保护点精确度不够高、延时电路参数难确定,延时时间不精确等问题。通过试验验证,其精度和可靠性相比模拟式控制器有了很大提高,且得到了电路结构简化。

参考文献

[1] 王艳芳. 全数字发电机控制器通用开发平台的硬件设计与实现 [D]. 西安: 西北工业大学自动化学院, 2007.

[2] 邓中卫. 国外民航航空电子技术发展特点. 航空制造技术, 2008, (9): 65-66.

[3] 梁海瑛. 全数字控制器通用开发平台的软件设计与实现 [D]. 西安: 西北工业大学自动化学院, 2007.

[4] Sebastian Rosado, Ma Xiangfei, Gerald Francis, et al. Model-based digital generator control unit for a variable frequency synchronous generator with brushless exciter. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 1(23): 42-52.

[5] 刘建英, 杨建忠. 飞机电源系统. 北京: 兵器工业出版社, 2004, 78-97.

[6] 沈颂华. 航空航天器供电系统. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005, 114-120.

[7] 蒋志扬, 李颂伦. 飞机供电系统. 北京: 国防工业出版社, 1990, 76-108.

[8] 王茂飞, 程昱. TMS320C2000 DSP 技术与应用开发. 北京: 清华大学出版社, 2007, 12-13.

[9] 黄英哲, 董胜源. TMS320C240 原理与 C 语言控制应用实习. 北京: 中国水利水电出版社, 2003, 25-26, 65-77.

[10] 李曼. 基于 $\mu C/OS-II$ 的飞机防滑刹车控制设计. 测控技术, 2007, 26(9): 33-35.

(责编 淡蓝)