

# 交流采样在飞机发电机控制器中的应用

## Application of AC Sampling in Aircraft Generator Control Unit

西北工业大学自动化学院 白 勇 李玉忍 李瑞琴

**[摘要]** 为了更有效地提高飞机供电系统的质量,本课题对交流采样技术在航空电源上的应用进行了研究。提出了一种通过交流采样实时采集调节点处电压等电力参数,通过数字信号处理算法对采集到的数据进行数值分析,有效地监控供电系统工作状态。系统采用TMS320F2812控制核心。试验结果表明:该系统具有较高的精度和可靠性,对国内航空电源系统向数字化方向发展具有较高的使用价值。

**关键词:** 交流采样 数字信号处理 快速傅里叶变换

**[ABSTRACT]** In order to improve the quality of aircraft power system, the AC sampling technology is studied. AC sampling technology is used to collect real-time adjustment point voltage and other parameters. Then through digital signal processing algorithm the collected data is analyzed and also the working state of the power supply system is monitored. TMS320F2812 is used as core of controller. The test results show that the system has higher precision and reliability and it is meaningful in the development of digital aircraft power system.

**Keywords:** AC Sampling DSP FFT

随着向多电和全电方向的发展,机载用电设备越来越多,其任务也越来越繁重,对供电系统的容量、品质、安全性的要求也随之提高。飞机交流发电机控制器(Generator Control Unit, GCU)是飞机电源控制系统的核心,目前我国的飞机配电系统普遍采用的是常规配电系统。模拟式GCU在国内航空电源系统中占主导地位,它采用直流采样技术,虽然能满足调压等一些基本功能,但直流采样方法仍存在着以下不足:(1)具有较大的时间延迟,难以及时反应被测量的突变,为了提高响应速度,变送器的时间常数必须特殊设计,因而不宜普遍使用;(2)变送器测量谐波有误差;(3)监控系统的测量精度直接受变送器的精确度和稳定性的影响。与直流采样相比,交流采样法具有实时性好、相位失真小、便于维护的优点。其原有的一些缺点,比如算法复杂、精度难以提高、对A/D转换速度要求较高等等,随着微机技

术的发展,也逐步得到了弥补。从航空电源监控系统的发展趋势来看,交流采样法正在逐步代替直流采样。

### 1 应用系统介绍

该系统设计应用于国产某型飞机恒频交流电源系统。恒频交流电源系统又分为恒速恒频(CSCF)和变速(VSCF)恒频两种类型。飞机交流电源调节点额定电压为115/200V,恒频交流额定频率为400Hz<sup>[1]</sup>。现代飞机普遍采用三级式无刷交流发电机系统,它主要由永磁发电机、交流励磁机和主发电机构成。发电机控制器实时地采集调节点的电压、电流、频率、相序等参数,并通过分析计算对相应的开关发出指令。由于发电机控制器所承担的任务众多,故通过调节发电机励磁电流的通断使得调节点处电压稳定在115/200V。另外,具有微处理器的GCU还必须具有完善的电源自检测和故障排除功能。CSCF电源故障保护项目有过压、欠压、过频、欠频、电压畸变、短路等项目。

### 2 系统硬件电路设计

GCU需要采集的模拟量有:交流发电机的输出电压、输出电流、频率、主馈线电流以及由永磁发电机提供给电源模块的输出电压。

#### 2.1 交流电压采集电路设计

系统需要实时地采集电压、电流等信号来完成对CSCF电源系统的监测和控制。电压和电流的检测与调理就是把传感器输出的弱电流信号转化成适合DSP采样的信号<sup>[2]</sup>。电压采样信号调理电路,如图1所示。该电路使用了TI公司的高速运放LM339。DSP2812的A/D转换器输入电压范围为0~3V,所以采样进来的模拟信号必须经过调理将其转化为0~3V的ADC模数转换器可以采集的范围。当电路工作时,电压传感器将输出电压变换为-1.225~1.225V的交流,经过跟随器再加上一个+1.225V的直流偏置,输出0~2.45V的正弦信号,该正弦信号在0~3V的范围内,并且留有一定裕度,该信号送到DSP的A/D转换器的输入管脚。同理,电流信号调理电路与电压调理电路类似。

#### 2.2 频率采集通道设计

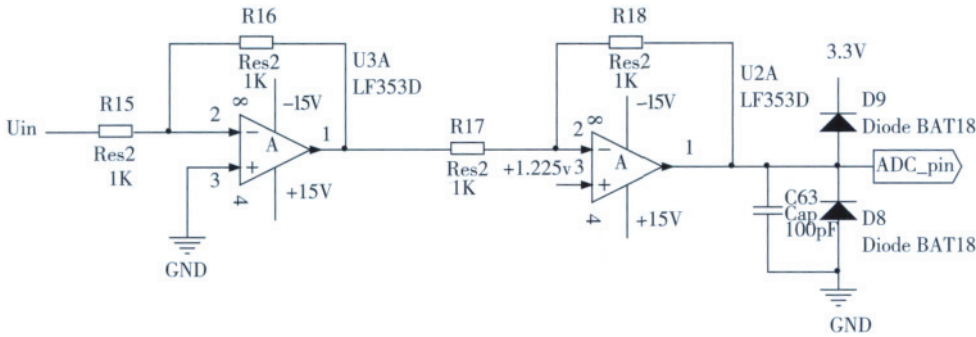


图1 交流电压调理电路  
Fig.1 AC voltage regulating circuit

则需采用非正弦模型算法。任何一个畸变的、非正弦的周期波(如电压,电流)都可以分解为一系列正弦波之和,也叫做傅里叶级数。各种基于傅里叶级数的算法广泛地应用到电力系统领域,尤其在谐波分析领域是必不可少的工具<sup>[3]</sup>。离散傅里叶变化(DFT)是数字信号处理中最基本也是最常用的运算之一,但基于在使用中运算量过大,对处理器要求较高,实时性难以保障,本课题采用快速傅里叶变换算法(FFT)对谐波进行计算分析,有效地提高了数字信号处理的实时性。

由电路理论得出电压,电流有效值表示为:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} ;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} 。$$

将连续时间  $u(t)$ 、 $i(t)$  信号在每一个周期内进行离散化。如果每周采样点为  $N$  点,则电压,电流有效值的为:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{n-1} u^2(k)} ;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{n-1} i^2(k)} ;$$

式中,  $u(k)$  为电压  $u$  在第  $k$  个采样点时的采样电压值。用 FFT 算法求出第  $k$  次谐波的实部和虚部分别为  $u_r$

( $k$ ) 和  $u_i(k)$ 。则第  $k$  次谐波电压的幅值  $U_k$  为:

$$U_k = \sqrt{u_r^2(k) + u_i^2(k)} ,$$

同理,第  $k$  次电流谐波幅值为:

$$I_k = \sqrt{i_r^2(k) + i_i^2(k)} 。$$

从以上对电压、电流的 FFT 计算中可以得到各次谐波的幅值和相角,利用这些谐波参数可以进一步计算与

在 CSCF 电源系统中电气系统中的频率应该稳定在 400Hz,但实际中频率是上下浮动的。GJB 181A-2003 对航空交流电力工作特性的稳定频率范围规定在 4007Hz。过频和欠频都会造成飞机仪器设备工作不稳定,所以必须实时采集频率信号来判断电源系统工作状态和提供 ADC 每轮转换的周期。通过硬件测频电路将电压周期信号转化为等周期的方波信号送入 DSP 的捕获外设。频率采集电路如图 2 所示,永磁机的输出电压信号经分压滤波以及跟随电路作为频率采集的信号;频率输入信号经过由比较器 LM339 构成的电压过零迟滞比较电路后,形成 0 或者 3V 的同频率的方波信号。采用迟滞比较电路可以有效地消除输入信号对过零点可能出现的抖动。

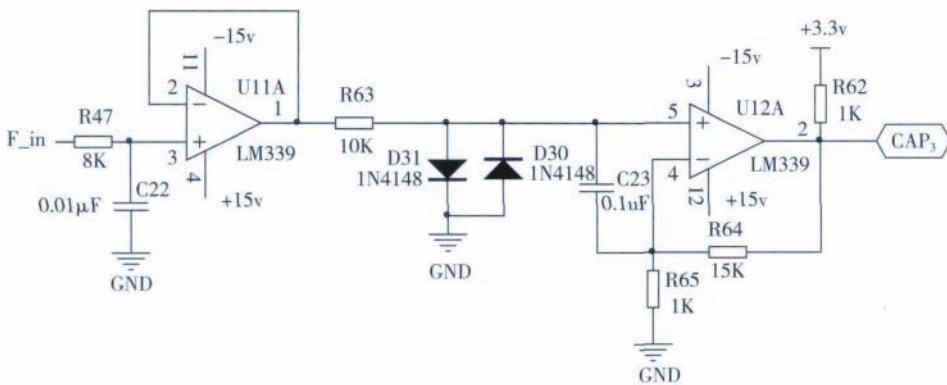


图2 频率采集电路  
Fig.2 Frequency sampling circuit

### 3 算法设计及软件实现

#### 3.1 交流采样算法介绍

交流采样算法有很多种,本课题采用的是非正弦模型算法。飞机电气系统的交流信号,主要是由 115V/400Hz 的正弦交流输入和由各种非线性电气部件引起的干扰等叠加而成,其中包含了各次谐波。要如实地反映输入电信号的特性,对交流信号进行谐波分析,

谐波相关的电力参数。

有效值的计算也可以通过计算电压或电流的基波和各次谐波的有效值来实现,然后计算它们平方和的均方根,即:

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^N U_k^2}$$

式中,  $U_k$  为电压的第  $k$  次谐波有效值,  $k$  为电压中最高次谐波的次数。本系统设计  $N$  取 19, 只计算基波和 2~19 次谐波。因为飞机供电系统中 19 次以上的谐波含量已经很低, 而且谐波次数过多, 势必增加处理器的计算负担, 实时性必然受到影响。本系统基于 FFT 的算法设计, 对电压、电流有效值的计算采用计算基波和各次谐波有效值之和的均方根算法。

电压、电流波形畸变的程度常以总谐波畸变率来表示。作为衡量电能质量的一个指标, 各次谐波含有率的平方和的平方根称为总谐波畸变率 THD, 简称畸变率。对于总谐波畸变率, 根据我国军用标准 GJB181A—2003 飞机供电特性规定畸变系数最大为 5%。电压的总波形畸变率为:

$$THD_u = \sqrt{\sum_{k=2}^N (U_k\%)^2}$$

式中,  $U_k\%$  为第  $k$  次谐波电压含有率, 为第  $k$  次谐波幅值和基波电压的百分比。

同理电流的总谐波畸变率:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{k=2}^N (i_k\%)^2}$$

通过离散傅里叶变换, 可以将有限长序列的频率也离散化成有限长序列, 但这种方法的计算量很大, 很难实时处理问题。快速傅里叶变换是计算离散傅里叶变换的快速算法, 极大地减少了 DFT 的运算量。FFT 具有不同的算法, 基本算法是基 2 按时间抽取和基 2 按频率抽取。本系统设计采用基 2DIT 算法<sup>[4]</sup>。

DFT 的定义式为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}R_N(k)$$

FFT 的基本思想是将大点数的 DFT 分解为若干个小点数的 DFT 的组合, 从而减少运算量。为了将大点数的 DFT 分解为小点数的 DFT 运算, 要求序列的长度  $N$  为复合数, 最常用的是  $N=2M$  的情况 ( $M$  为正整数)。该情况下的变换称为基 2FFT。

$$X(k) = DFT[x(n)] = X_1(k) + W_N^k X_2(k)$$

一个  $N$  点的 DFT 被分解为两个  $N/2$  点的 DFT。这

样  $N$  点 DFT 可全部由下式确定出来:

$$X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k)$$

$$X(k + N/2) = X_1(k) - W_N^k X_2(k)$$

因为  $N=2M$ ,  $N/2$  仍然是偶数, 因此可以对两个  $N/2$  点的 DFT 再做进一步的分解, 将两个  $N/2$  的 DFT 分解成两个  $N/4$  点的 DFT。一直分解下去最后是两个点的 DFT。两点的 DFT 可以用蝶形符号来表示。例如, 对于一个  $N=2^3=8$  的 DFT 运算, 其按时间抽取的完整流程图如图 3 所示:

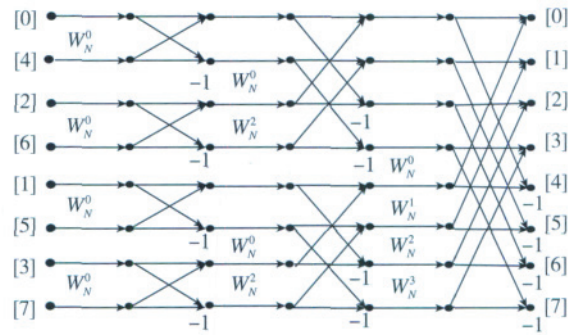


图3 N=8的DIT分解流程图  
Fig.3 N=8 DIT decomposition flow chart

这种方法由于每一步分解都是按照输入序列在时域上的次序是偶数还是奇数来抽取的, 故称为时间抽取法。

### 3.2 系统软件设计

系统主程序主要由初始化和控制两个模块组成, 其中初始化模块只在系统上电时执行一次, 主要针对系统的时钟、看门狗、中断、外设的寄存器进行配置。初始化完成后, 系统进入循环等待状态, 当有中断事件发生时, 系统则进入相应的中断子程序执行中断函数。控制模块主要由中断函数构成。各个中断函数由相应的触发条件触发, 程序转到中断子程序执行中断函数完成对数据的采集、存储、分析、通信, 并根据计算结果判断相应开关量的关断。系统采样程序流程如图 4 所示。

在交流采样程序中, 先捕获单元实时采集励磁电压的频率, 以此频率值动态的调整事件管理器(EVA)计数器的周期值, 在电压频率每周波内由通用定时器 timer1 触发 32 次 ADC 转换, 即采样周期为电压周期的 1/32, 从而实现了一个电压周期的 32 次采样, 达到了对频率的动态跟踪(只是在时间上有一个周期的滞后)。实时采集 32 组数据, 然后对采集的 32 组数据进行 FFT 算法处理获得需要的电参数, 如有效值、谐波畸变率等。当出现故障(如过压、过频等)时, GCU 按反延时特性进行保护, 断开本通道发电机接触器, 发电机去励磁, 断开

恒速传动涡轮。

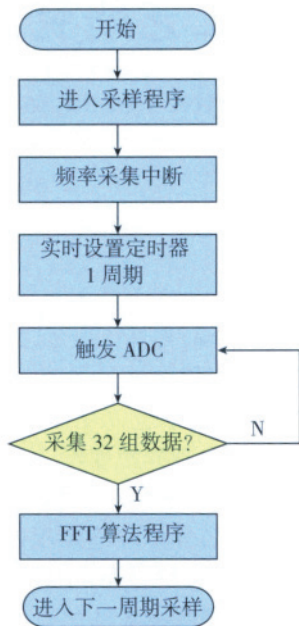


图4 交流采样软件流程  
Fig.4 AC sampling process

#### 4 结果分析

GCU 的实验在 JF60-B 试验台上完成,模拟系统的各种故障状态,验证 GCU 的保护功能,另外还对 GCU 的瞬态特性加以验证,试验结果如表 1 所示。试验结果验证了 GCU 系统部分性能指标和功能逻辑。采用交流采样算法使得系统达到了设计要求。

#### 5 结束语

本课题阐述了交流采样在数字式飞机发电机控制

表1 GCU模拟故障试验结果

实验项目	规定值	实测值
过压 /V	124 ± 2	124.8
欠压 /V	100 ± 2	99.3
过频 /Hz	425 ± 1	425.6
欠频 /Hz	375 ± 1	374.4
波形畸变率 /%	0.05 ± 0.01	0.046

器中的实现方式,充分利用 TMS320F2812 强大的数字信号处理能力和丰富的片内资源<sup>[5]</sup>。采用数字信号处理算法对电力参数进行数值分析,使得整个系统的硬件电路较传统的平均相加高相的直流采集电路更简单、灵活。既提高了电源供电质量,又降低了维护难度和故障率,从而提升了整个系统的自动化水平,对飞机发电机控制器的数字化具有重要的意义。

#### 参考文献

- [1] 江星华,李玉忍.基于 DSP 的飞机发电机控制器设计.测控技术, 2009(3): 49-52.
- [2] 脱秀林,申强,刘成.基于 TMS320F2812 与  $\mu C/OS-II$  交流采样远程终端的设计.计算机测量与控制, 2010(3): 699-702.
- [3] 吴晓华,陈巧妹,张惠蓉,等.基于双 DSP 与 FPGA 的飞机发电机控制器的设计.计算机测量与控制, 2009(6):1123-1125.
- [4] 李全利,王振春.一种基于 DSP 的三相交流采样技术.自动化技术与应用, 2008(12): 85-87.
- [5] 苏奎峰,吕强.TMS320X281X DSP 原理及 C 程序开发.北京:北京航空航天大学出版社, 2008.

(责编 岭雾)

(上接第 87 页)

设计的过程中,要降低舵机的故障率,首先要从重要度大的底事件入手。

#### 3 提高电液作动器的可靠性的措施

(1) 经过故障树的定性和定量分析,得出了系统的关键环节和薄弱环节,这些环节正是影响系统可靠性的重要因素。针对故障树分析得出的系统关键环节和薄弱环节采取有效的弥补措施是故障树分析过程的重要组成部分,这也是对系统进行故障树分析的意义所在。

(2) 液压系统的故障占到飞机故障的 70%,因此一般在飞行控制系统中均作为关键部件来对待。民用飞机要求因电传操纵系统故障而引起的任务实效率要低于  $1 \times 10^{-9}/h$ ,对电液作动器则要求更高。在单纯提高元部件的可靠性不能满足系统要求的情况下,必须采用冗余技术。波音 777 方向舵作动器为 3 台并行工作,如果某个作动器发生故障,就通过功能转换装置将其转换为随动工作状态,其他作动器继续工作,直到全部故障。

则并联 3 个作动器时,系统的不可靠度为  $F_s^-(t)$ , T1 为单方向舵作动器的不可靠度,则并联 3 个这样的作动器后,

$$F_s^-(t) = T1 \otimes T1 \otimes T1 = [6.788e-005 \lambda + 0.00027156 - 6.787e-005 + 0.00040732]^3,$$

当  $\lambda = 0$ ,采用 3 台作动器并行工作时,方向舵出现故障的概率  $F_s^-(t)$  为  $[2.003 \times 10^{-11}, 6.6303 \times 10^{-11}]$  之间;当  $\lambda = 1$ ,方向舵每小时出现故障概率  $F_s^-(t)$  为  $3.911 \times 10^{-11}$ ,和采用单作动器 0.033944% 的故障概率相比,故障率降低了很多,可靠性得到很大提高,该结果较接近方向舵工作的实际状况。

本文共有参考文献 4 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)