

飞机交流电源特性参数测量研究

任明翔¹, 杨娟²

(1. 中国南方航空公司 工程部, 广州 510405; 2. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300)

摘要: 飞机机载电源系统供电品质直接关系到飞机用电设备可靠工作和飞行安全, 为此, 2006 年国际标准组织推出了新的机载电源标准 ISO1540—2006; 本文根据该标准要求, 提出了一种机载电源的稳态和瞬态特性的测试的实用方法; 建立了测量的数学模型; 采用虚拟仪器技术, 设计硬件测试平台, 包括功率因数可调的大功率数字化程控负载和计算机数据采集系统; 基于 LabVIEW 开发了测试软件; 为满足暂态特性的测量要求和精度要求, 采用了 NI 高速高精度数据采集卡, 实现了较高的测量精度, 综合测量误差小于 0.5%, 并在暂态测量中, 考虑了负载接触器吸合时间; 该测试系统可以用来检验恒频机载交流电源的特性是否符合国际标准要求, 以保证飞行安全。

关键词: 机载电源; 稳态特性; 瞬态特性; LabVIEW; 数据采集

Research on Measurement of AC Electrical Power System Characteristics

Ren Mingxiang¹, Yan Juan²

(1. Maintenance Engineering Division, China Southern Airlines, Guangzhou 510405, China;

2. Engineering Training Department, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: The characteristics of aircraft power system are direct related to utilization equipment operation and fly safety. In 2006, The International Standard Organization (ISO) issued new standard ISO1540—2006 “Characteristics of aircraft electrical system”. According to the requirements of the standard, this paper puts forward a useful method to measure Steady—state Characteristics and Transient Characteristics of aircraft electrical power system. This paper founds the mathematic measuring modals; the virtual instrument technology has been adopted to design hardware measuring platform, include adjustable power factor and digital programming large loads and computer data acquisition system. Measuring software is designed based on LabVIEW. In order to satisfy measuring transient characteristics and the accuracy of measurement NI high speed and high accurate data acquisition card is used; the relative high measuring accuracy has been reached, the total error of measurement is lower than 0.5%, in measuring transient characteristics, the response time of load contractor is took into account. This system can be used to check onboard constant frequency electrical power system whether or not meet the requirements of international standards, to ensure flight safety.

Keywords: airborne electrical power; steady—state characteristics; transient characteristics; LabVIEW; data collection

0 引言

飞机电源的可靠性和稳定性, 直接关系到机载电气电子设备能否可靠工作, 甚至影响到飞行安全。尤其是以 B787 为代表的多电民航飞机的投入运行, 取消了气动和部分液压系统, 使机载用电设备和用电量大大增加, 飞机机载电源系统特性是否符合要求是保障安全飞行的关键。因此, 在飞机电源系统设计时, 必须符合国内国际标准^[1-2]。

飞机电源系统的特性包括稳态特性 (Steady—state Characteristics) 和瞬态特性 (Transient Characteristics)。本文依据 ISO1540—2006 Aerospace—Characteristics of aircraft electrical system 国际机载电源标准, 建立测量理论模型和测量方法, 开发了测试系统。实际测试表明, 该系统测量精度高, 操作方便, 为我国民航飞机电源系统特性测试提供方法和手段。

1 飞机机载交流电源系统的特性参数

飞机电源系统的特性包括稳态特性和瞬态特性, 根据 ISO1540—2006, 表 1 为飞机交流电源系统在正常供电条件下

的主要特性参数。

表 1 飞机交流电源系统的主要特性参数

特性	交流电源参数	指标
稳态特性	三相平均电压/V	104 ~120.5
	单相电压/V	100 ~122
	最大不平衡电压/V	6
	相位差/°	116 ~124
	最大波峰值/V	4
	波峰系数	1.26~1.56
	总谐波失真度/%	<8
	最大单次谐波/%	<6
	直流分量/V	-0.1 ~+0.1
瞬态特性	频率/Hz	390 ~410
	电压瞬态特性	见图 1
	频率瞬态特性	见图 2

1.1 稳态特性参数测量模型

1.1.1 电压、电压调制量、电压不平衡值和直流分量

1) 交流电压有效 U_{RMS} 其为:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i^2 dt} \tag{1}$$

其中: T 为电压波形的周期, u_i 为 t 时刻电压波形的瞬时值。

收稿日期:2015-12-16; 修回日期:2016-04-29。
基金项目:中国民航局科技基金项目(MHR201003)。
作者简介:任明翔(1986-),男,硕士,工程师,主要从事机载信息和计算机测量与控制方向的研究。

2) 电压调制量:

即在任意单位时间 (1 s) 内, 电压调制包络线上最高电压与最低电压的差值^[3]:

$$U = \text{MAX} \left[\begin{array}{l} |U_{A,\max} - U_{A,\min}|, |U_{B,\max} - U_{B,\min}|, \\ |U_{C,\max} - U_{C,\min}| \end{array} \right] \quad (2)$$

式中: $U_{A,\max}, U_{B,\max}, U_{C,\max}$ 分别为 A, B, C 三相电压调制包络线上的最大值; $U_{A,\min}, U_{B,\min}, U_{C,\min}$ 分别为 A, B, C 三相电压调制包络线上的最小值。

3) 电压不平衡值:

用电设备输入端, 三相稳态电压有效值之间差值的最大值。

$$U_{UNB} = \max\{U_A, U_B, U_C\} - \min\{U_A, U_B, U_C\} \quad (3)$$

式中, $\max\{U_A, U_B, U_C\}$ 为 U_A, U_B, U_C 中的最大相电压值; $\min\{U_A, U_B, U_C\}$ 为 U_A, U_B, U_C 中的最小相电压值。

4) 直流分量:

交流电压正负半波瞬时电压的平均值。

1.1.2 相位、频率、谐波分量

采集卡对连续电压信号进行采样, 经过 A/D 转换后变成数字信号。频率、相位、谐波分量的测量采用快速傅里叶变换 (FFT) 的方法进行分析和计算^[5-7]。

采用 FFT 对谐波、相位、频率等参数进行分析时, 需要对连续的信号进行有限离散化处理, 如果是非整周期截断时, FFT 算法会产生频谱泄露和混叠误差等问题, 造成分析结果误差较大。对信号前期加窗, 后期引入差值算法可以很好地提高计算的精度, 减少误差^[5-7]。

计算出各次谐波后, 任何单次谐波含量 D_{Vn} 表达式为:

$$D_{Vn} = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中, U_n 为非基波的电压或电流单次谐波分量有效值; U_1 为基波分量的有效值。

1.1.3 波峰系数和畸变系数

1) 波峰系数:

稳态条件下, 在不小于单位时间 (1 s) 内, 所测的交流电压波形的峰值和方均根值之比的绝对值^[3], 通常用 φ 来表示, 表达式为:

$$\varphi = \left| \frac{U_{pk}}{U_{rms}} \right| \quad (5)$$

其中: U_{pk} 为交流电压波形的峰值; U_{rms} 为交流电压波形的方均根值。

2) 畸变系数 D :

在交流电压或电流波形中, 除了基波分量以外的其他畸变分量的方均根值^[1], 用 D 来表示。表达式如下:

$$D = \frac{\sqrt{(U_{rms}^2 - U_1^2)}}{U_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中, U_{rms} 为交流电压的有效值。

1.2 瞬态特性测量模型

在发动机、调压器和其他设备组成的电源系统中, 当用电设备打开或切除时, 会引起电源电压和频率的波动, 用瞬变电压的包络线来确定机载交流电源瞬态响应是否符合要求。图 1, 图 2 为交流电源在正常供电条件下的瞬态电压响应和瞬态频率响应的包络线^[1]。

2 测试系统的硬软件设计

由于要求采样速度快, 特别是瞬态特性参数测量, 系统采

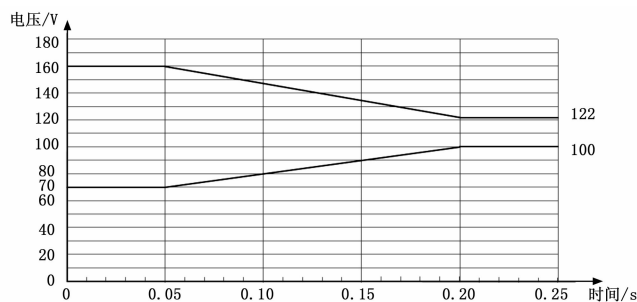


图1 电压瞬变包络线

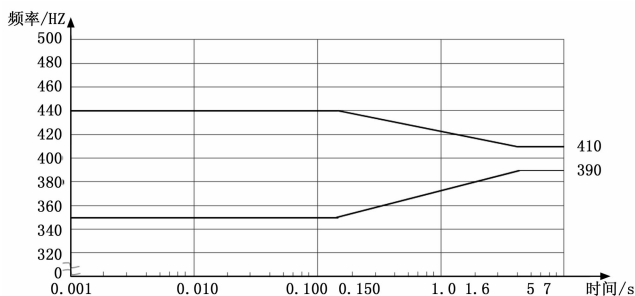


图2 频率瞬变包络线

用 NI 高速采样卡, 基于 LabVIEW 开发测试软件。

2.1 测试系统硬件设计

测试系统平台框图如图 3。主要包含程控负载、信号处理电路、数据采集卡、计算机等。

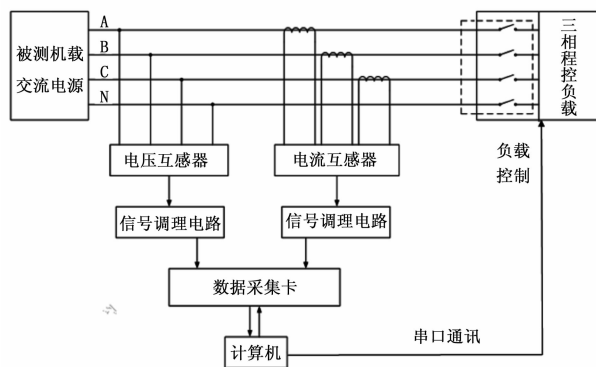


图3 机载交流电源测试系统硬件框图

数据采集卡采用美国 NI 公司的基于 USB 总线的 USB-6210, 通道数为单端 32 路/差分 16 路, 单通道最高采样率为 250 kS/s, ADC 的精度为 16 位, 可以实现多通道信号的实时采集。采集到数据传送给计算机进行处理、存储和显示。同时, 计算机通过 RS485 串口控制程控负载箱, 实现测量时电源的加载和卸载。

将飞机电源系统输出的三相交流电源与程控负载相连, 设计的程控负载为功率 0~60 kVA、功率因素 0.6~1 可调^[8], 满足 ISO1540-2006 测试要求。电源输出的电压、电流信号通过信号处理电路的处理, 把发电机的输出电压为 115/200 V 和 0~200 A 的电流, 转换到符合采集卡可以采集的范围 (±10 V)。电压信号转换调理电路如图 4 所示。电压传感器采用 GBT206B 电流型电压传感器, 电阻 R14 和电容 C30 的作用是补偿由于电压传感器引起的相移。电流传感器采用 MG8 型电

流传感器。

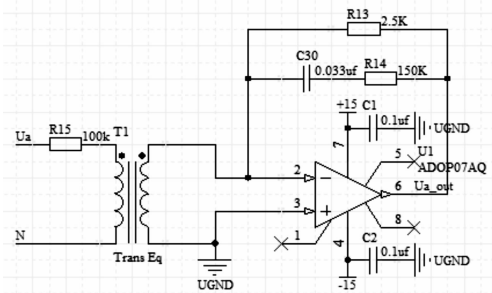


图 4 电压信号转换调理电路

2.2 软件设计

软件分为稳态参数测量和瞬态参数测量模块。由于该测试系统必须具有数据采集与控制，数据分析和报表生成等功能，LabVIEW 软件在这些方面具有特出的优点。LabVIEW 内置 1000 多个信号处理、分析与数学运算函数，内置用户界面控件，报表生成和数据存储非常方便。

稳态和瞬态参数测量程序框图见图 5 和图 6，编程采用模块化结构。负载运算和控制模块完成负载功率因数和负载大小（包括平衡负载和不平衡负载）进行运算，将运算结果指令传

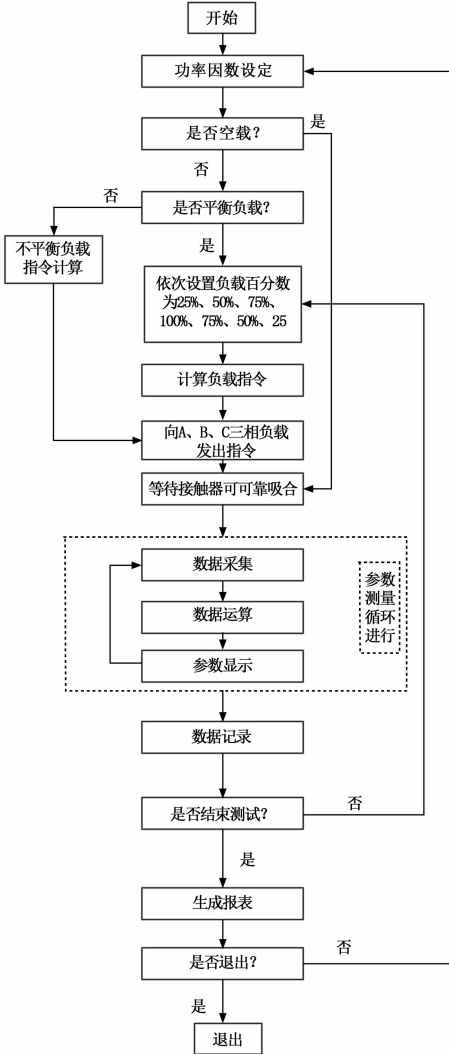


图 5 稳态特性参数测量程序框图

输给程控负载；数据采集和分析模块完成数据采集和分析；数据显示和存储模块完成测试结果数据或图形显示和报表生成。

1) 稳态参数测量：

根据文献[1]要求，设定有功功率和功率因素，分别在平衡负载和不平衡负载条件下对电源系统的所有稳态参数进行测量，程序框图见图 5。

2) 瞬态参数测量：

交流电源瞬态参数测量，包括加卸载后卸载短暂过程中电压或频率的测量，这种瞬态过程持续的时间都很短，特别是电压瞬变过程在 0.25 s 以内，因此，必须考虑程控负载的接触器吸合时间，应先对吸合断开的时间做测试，数据采集时扣除相应的时间，这样就能保证采集到完整的瞬态过程，程序框图见图 6。

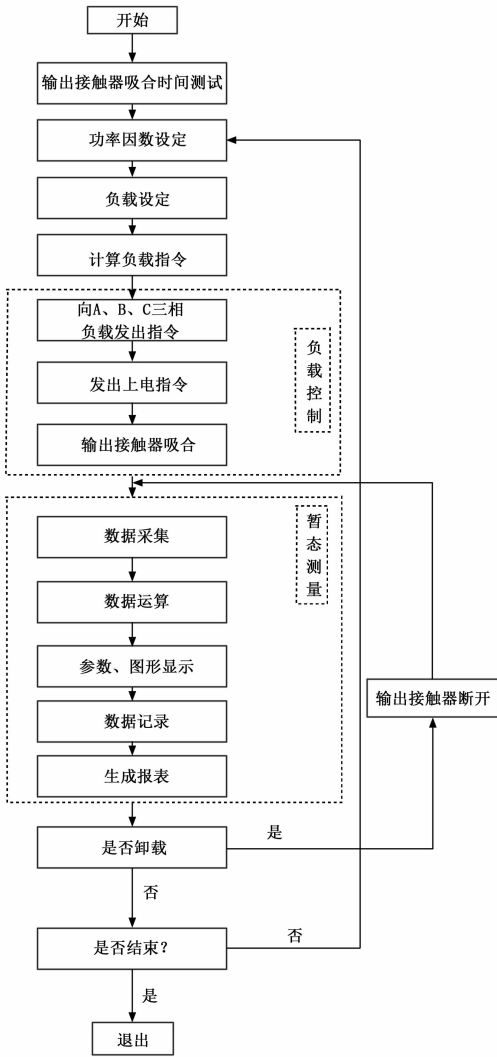


图 6 瞬态特性参数测量程序框图

3 实验结果

系统设计完成后，进行了测量精度校验，由天津市计量监督检测科学研究院进行了测量，测量结果表明，电压、电流、功率因数等测量误差均小于 0.5%（证书编号 DNJZdn1300085）。

在中国民航大学电源实验室进行了实际测量，飞机发电机型号为 976-J118 航空发电机（Westinghouse Electric Corpo-

ration 生产), 额定功率为 30KVA, 额定电压 115/200V, 频率 400 Hz。

3.1 稳态特性参数测试结果

功率因数为 0.8 时, 在不同负载 (0, 25%, 50%, 75%, 100%额定负载) 下, 加载和卸载参数如表 2 和表 3。在不平

衡负载 (各相负载相差 10%) 的稳态特性参数见表 4。测试结果表明, 该电源系统在不同负载稳定状态时, B 相中输出的直流分量都是不在表 1 标准要求的范围内, 而其他的参数, 包括各相的电压、频率、相位、波峰系数、谐波含量及电压调制量都是在表 1 的标准范围内。

表 2 功率因数是 0.8 加载后的稳态参数报表

平衡负载,功率因数 0.8,加载																								
负载百分数 / %	U _a	U _b	U _c	频率	A—B 相位	B—C 相位	C—A 相位	U _a 波峰系数	U _b 波峰系数	U _c 波峰系数	U _a 总谐波畸变 / %	U _b 总谐波畸变 / %	U _c 总谐波畸变 / %	U _a 最高单次谐波含量 / %	U _b 最高单次谐波含量 / %	U _c 最高单次谐波含量 / %	电压调制量	三相电压不平衡值	U _a 畸变系数	U _b 畸变系数	U _c 畸变系数	A 相直流分量	B 相直流分量	C 相直流分量
0	116.69	116.29	115.14	400.17	119.3	119.13	121.56	1.41	1.41	1.41	2.62	2.68	2.65	2.1	2.22	2.05	2.74	1.56	3.46	3.39	3.63	0.06	—0.19	0.04
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
25	114.84	114.6	113.33	400.17	119.24	119.22	121.53	1.41	1.41	1.41	1.73	1.63	1.75	1.22	1.23	1.17	2.68	1.49	2.47	2.07	2.08	0.06	—0.17	0.07
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
50	113.52	113.45	112.06	400.16	119.27	119.23	121.49	1.41	1.41	1.41	1.83	1.74	1.91	1.12	1.06	1.07	2.02	1.47	2.85	2.37	2.44	0.06	—0.18	0.04
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
75	112.09	112.08	110.58	400.17	119.4	119.17	121.42	1.41	1.41	1.41	1.94	1.86	1.78	1.13	1.04	1.09	2.63	1.54	2.57	2.43	2.90	0.06	—0.19	0.03
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
100	110.45	110.57	108.76	400.17	119.41	119.24	121.34	1.41	1.41	1.41	1.74	1.69	1.66	0.96	0.96	0.93	1.9	1.81	3.06	2.19	2.18	0.04	—0.17	0.03

表 3 功率因数是 0.8 卸载后的稳态参数报表

平衡负载,功率因数 0.8,卸载																								
负载百分数 /%	U_a	U_b	U_c	频率	A—B 相位	B—C 相位	C—A 相位	U_a 波峰 系数	U_b 波峰 系数	U_c 波峰 系数	U_a 总谐 波畸 变 /%	U_b 总谐 波畸 变 /%	U_c 总谐 波畸 变 /%	U_a 最高 单 次 谐 波 含 量 /%	U_b 最高 单 次 谐 波 含 量 /%	U_c 最高 单 次 谐 波 含 量 /%	电压 调制 量	三相 电压 不平 衡值	U_a 畸 变 系数	U_b 畸 变 系数	U_c 畸 变 系数	A 相 直 流 分 量	B 相 直 流 分 量	C 相 直 流 分 量
100	110.5	110.65	108.8	400.17	119.39	119.2	121.4	1.41	1.41	1.41	1.68	1.71	1.66	1.03	1.06	0.86	2.22	1.85	2.47	2.11	2.36	0.04	—0.2	0.03
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
75	112.26	112.24	110.71	400.17	119.42	119.12	121.45	1.41	1.41	1.41	1.81	1.81	1.8	1.16	1.19	1.12	2.83	1.55	2.58	1.98	2.36	0.05	—0.18	0.04
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
50	113.55	113.47	112.07	400.17	119.25	119.28	121.46	1.41	1.41	1.41	1.83	1.74	1.94	1.13	1.1	1.1	2.95	1.48	2.97	2.46	2.64	0.06	—0.19	0.05
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
25	114.85	114.63	113.34	400.17	119.28	119.19	121.52	1.41	1.41	1.41	1.74	1.63	1.7	1.22	1.22	1.13	3.04	1.52	2.56	2.23	2.57	0.05	—0.18	0.05
	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格
0	116.7	116.28	115.12	400.18	119.27	119.14	121.59	1.41	1.41	1.41	2.56	2.63	2.59	2.03	2.15	1.99	2.82	1.58	3.34	3.31	3.24	0.05	—0.18	0.03