

# 机载电源在线监测系统的研制

肖涛<sup>1</sup>, 钱政<sup>1</sup>, 于浩<sup>1</sup>, 孙丹丹<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:** 机载电源的供电质量对飞机的安全飞行和机载用电设备的正常工作至关重要。在电子试验机试飞环境中, 各机载用电设备处于不同的工作状态, 可能会影响机载电源的供电质量, 因此, 需要对试飞中的机载电源进行持续的在线监测, 评估其供电质量; 针对此, 研制了一种机载电源在线监测系统, 对 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流电源的多工作特性参数进行持续的在线监测; 该系统基于高性能专用计算机和高速同步数据采集卡, 对机载电源电压和电流进行实时采集, 采用相关数据处理算法, 对多工作特性参数进行快速实时运算, 并显示和存储, 并对异常工作点的电压、电流进行录波, 以便后期分析; 该系统在某型电子试验机上进行了实验, 监测结果实时、准确, 对机载电源提高可靠性和故障分析定位具有重要的意义。

**关键词:** 机载电源; 工作特性参数; 在线监测

## Development of On-line Monitoring System for Airborne Power System

Xiao Tao<sup>1</sup>, Qian Zheng<sup>1</sup>, Yu Hao<sup>1</sup>, Sun Dandan<sup>2</sup>

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Chinese Flight Test Establishment, AVIC, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The quality of the airborne power system is crucial to the safe flight of the aircraft and the normal work of the avionics. In the test flight of electronic testing machines, avionics are in different working conditions, which may affect the quality of the airborne power system. Therefore, it is needed to continuously monitor the airborne power system in flight test, and evaluate the quality of power supply. Aiming at this problem, an on-line monitoring system for airborne power system is developed to realize the on-line monitoring of the multi-working characteristic parameters of 115 V/400 Hz three-phase AC and 28 V DC power continuously. The system is based on high-performance dedicated computer and high-speed synchronous data acquisition cards. It can collect voltage and current of airborne power system in real-time, and use related data processing algorithm to perform real-time operation for multi-working characteristic parameters, and display and store these parameters, and the voltage and current of the abnormal working point are recorded for the later analysis. The system has been tested on a certain electronic test machine and the monitoring results are real-time and accurate. It is of great significance for improving reliability and fault location of airborne power system.

**Keywords:** airborne power system; working characteristic parameters; on-line monitoring

## 0 引言

机载电源的供电质量直接关系到飞机的飞行安全和机载用电设备的正常工作<sup>[1]</sup>。随着航空技术的发展, 机载用电设备日益多样化和复杂化。在电子试验机试飞环境中, 部分机载用电设备(感性、容性), 特别是开关设备在加载或卸载时, 可能会对机载电源造成瞬时冲击、电压跌落、谐波分量增大等现象, 产生的瞬时电磁干扰可能会造成部分机载用电设备异常运行, 严重影响着各项试验的开展和整机的安全运行。即使单个设备已经通过了符合机载用电

设备的各项电磁指标, 电子试验机挂载的设备复杂度高, 难免有相互影响的情况出现, 无法长时间监测机载用电设备之间对机载电源的影响。同时, 当机载用电设备出现突发状况或持续不正常运行且并未触发机载电源继保系统时, 无法实时对此类情况进行故障的定位分析。综上, 亟需一种机载电源监测系统, 能够对机载电源工作特性和供电质量进行持续的在线监测。而目前的监测系统主要在地面环境下对机载电源或地面电源的稳态或瞬态工作特性参数进行监测<sup>[1-6]</sup>, 测试时间短暂, 无法预防飞机试飞过程中的偶然情况。本文研制的机载电源在线监测系统, 对机载电源 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流电压和电流进行持续在线同步采集, 对采集数据进行实时的快速运算得到其多工作特性参数, 并显示和存储, 并实时判断异常工作状态, 对异常工作点的电压、电流进行录波, 以便后期分析。

## 1 系统总体设计

机载电源在线监测系统主要由高性能专用计算机、高

收稿日期:2018-01-01; 修回日期:2018-01-21。

作者简介:肖涛(1988-),男,重庆涪陵人,硕士研究生,主要从事现代电气检测技术方向的研究。

钱政(1973-),男,教授,江苏常州人,博士研究生导师,主要从事现代电气检测技术、先进传感技术以及大型机电设备的在线检测与故障诊断方向的研究。

速同步数据采集卡、电源转换电路、信号调理电路、触摸显示屏及传感器组成。系统结构框图如图 1 所示。

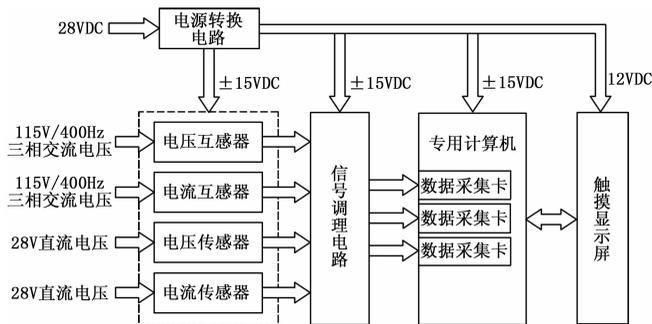


图 1 系统结构框图

系统通过电压传感器和电流传感器将机载电源 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流的电压信号和电流信号转换为小信号, 并通过信号调理电路, 转换为适合数据采集卡输入范围 (-10~+10 V) 的差分电压信号, 通过上位机软件控制数据采集卡对电压信号和电流信号进行采集, 通过专用计算机对采集的数据进行分析和运算, 得到机载电源的各项工作特性参数数据, 进行实时显示和存储, 并对异常工作点的电压、电流进行录波, 以便后期分析。

系统采用 DAQ-2010 高速同步数据采集卡, 该数据采集卡是基于 PCI 总线, 支持 4 通道模拟信号的同步采集, 具有 14 位 A/D 分辨率, 单通道最高采样率 2 MS/s, 可以为每通道提供采样率 500 kS/s, 并支持差分输入方式。监测系统配置了三块 DAQ-2010 数据采集卡, 分别用于三相交流电压的同步采集, 三相交流电流的同步采集和 28 V 直流电压电流的同步采集。

## 2 系统硬件电路设计

### 2.1 电源转换电路的设计

系统是外部 28 V 直流电源供电, 通过电源转换电路将 28 V 直流电压转换成系统内部各部分所需的工作电压。在设计中, 考虑到体积、性能与抗干扰等问题, 选用 DC/DC 电源转换模块, 它具有体积小、抗干扰能力强、输出稳定、纹波小的特点。电路原理如图 2 所示。

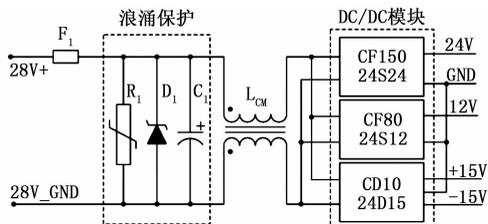


图 2 电源转换电路

在电源转换电路的前端串联了保险丝  $F_1$ , 对系统起到过流保护; 由压敏电阻  $R_1$ 、TVS 管  $D_1$  和电容  $C_1$  组成浪涌保护电路, 实现对系统的过压保护。 $L_{CM}$  为共模电感, 能够有效地滤除共模干扰。该电路中, CF15024S24 将 +28 V 直

流电压转换成专用计算机的 +24 V 直流供电电压, CF8024S12 将 +28 V 直流电压转换成显示屏的 +12 V 直流供电电压, CD1024D15 将 +28 V 直流电压转换成传感器和信号调理电路的 ±15 V 直流供电电压。

### 2.2 交流信号调理电路

#### 2.2.1 交流电压信号调理电路

三相交流电压信号调理电路如图 3 所示。(此处只给出 A 相的电压信号调理电路, B 相和 C 相的电路与 A 相相同)。系统选用精密电流型电压互感器 TV19E, 其额定电流为 5 mA; 5 mA。限流电阻采用 24 kΩ 的精密电阻, 将输入电流限制在 5 mA 内。经过精密采样电阻采样, 差分运算放大器 THS4130 实现电压信号的放大, 使输出的差分信号满足数据采集卡差分输入范围 (-10~+10 V) 的电压信号。

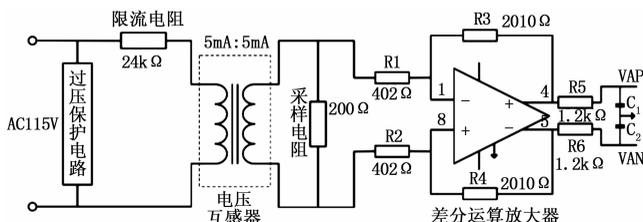


图 3 交流电压信号调理电路

#### 2.2.2 交流电流信号调理电路

三相交流电流信号调理电路如图 4 所示。(此处只给出 A 相的电流信号调理电路, B 相和 C 相的电路与 A 相相同)。系统选用穿芯式电流互感器 SCT045B-A, 电流变比为 400:1, 三相交流电流信号经过电流互感器转换为小电流信号, 再经过精密采样电阻采样, 差分运算放大器 THS4130 实现电压信号的放大, 使输出的差分信号满足数据采集卡差分输入范围 (-10~+10 V) 的电压信号。

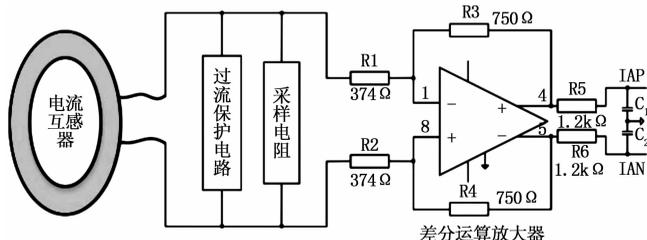


图 4 交流电流信号调理电路

### 2.3 直流信号调理

系统对 28 V 直流电压和电流的监测采用了电压电流传感器, 通过电压传感器 HV62 将 28 V 直流电压转换为 0~5 V 电压信号, 通过电流传感器 HST30 将 28 V 直流电流转换为 0~5 V 电压信号, 原理如图 5 所示。

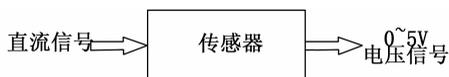


图 5 直流信号调理原理图

### 3 系统软件设计

#### 3.1 系统软件的组成

系统软件的主要功能包括存储路径与存储时间设置、数据采集、数据运算处理、波形及参数数据显示和数据存储 5 个部分。软件功能结构如图 6 所示。

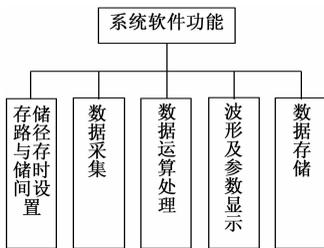


图 6 软件功能结构图

- 1) 存储路径与存储时间功能：设置参数数据的存储路径和数据存储时间（即采集时间）；
- 2) 数据采集功能：软件控制数据采集卡对电压和电流进行实时地数据采集；
- 3) 数据运算处理功能：对采集的数据通过相应的算法进行运算处理，得到各项工作特性参数数据；
- 4) 波形及参数显示功能：上位机界面实时显示电压波形、电流波形和各项工作特性参数数值；
- 5) 数据存储功能：对各项工作特性参数数据在设置的存储路径下进行实时存储，对监测到的不满足 GJB181B—2012 中正常工作特性范围的电压数据进行存储，通过软件设定电流阈值对超过阈值的电流数据进行存储。

机载电源在线监测系统的上位机界面如图 7 所示。界面以选项卡的形式对 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流的波形和工作特性参数数据进行实时显示，清晰直观。

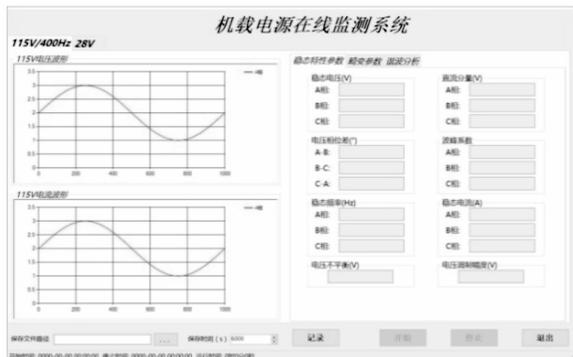


图 7 上位机界面

#### 3.2 参数运算

系统对机载电源 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流电压和电流的采集，每通道采样率为 200 kHz，采样周期为 1 s，并结合 GJB5189—2003<sup>[7]</sup>和 HB6448—90<sup>[8]</sup>中提出的参数计算公式对采集的电压和电流数据进行运算。

##### 3.2.1 交流电压参数运算

115 V/400 Hz 三相交流电压参数包括稳态交流电压、

电压不平衡、电压调制幅度、电压相位差、峰值电压、波峰系数、稳态频率、直流分量、畸变系数和谐波含量。运算流程如图 8 所示。

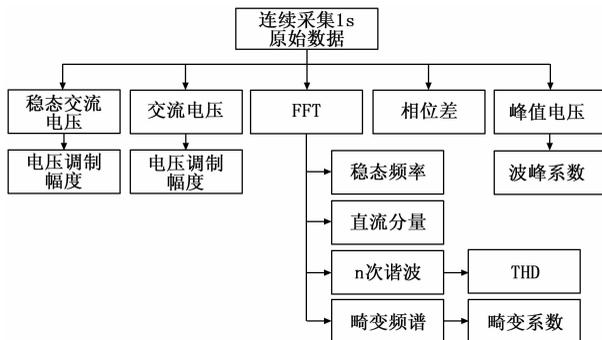


图 8 交流电压参数运算流程

对每 1 s 周期内的采样数据做如下运算：

- 1) 对采集的瞬时电压数据求方均根值，得到各相的稳态交流电压；两相之间稳态交流电压之差的最大值为电压不平衡；
- 2) 对采集的瞬时电压数据求每一半波的方均根值，求出各相中最大方均根值与最小方均根值之差的最大值为电压调制幅度；
- 3) 通过快速傅里叶变换 (FFT)，得到稳态频率、直流分量和  $n$  次谐波、畸变频谱，谐波的总失真 THD 和畸变系数；
- 4) 对采集的瞬时电压数据进行数字低通滤波，然后按以下公式求取相位差：

$$\varphi = \left| \arccos \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) \cdot y(n))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x^2(n)} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N y^2(n)}} \right| \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

- 5) 对采集的瞬时电压数据作频谱分析得到峰值电压，与稳态交流电压之比为波峰系数。

##### 3.2.2 直流电压参数运算

直流电压参数包括稳态直流电压、畸变系数、脉动幅值。运算流程如图 9 所示。

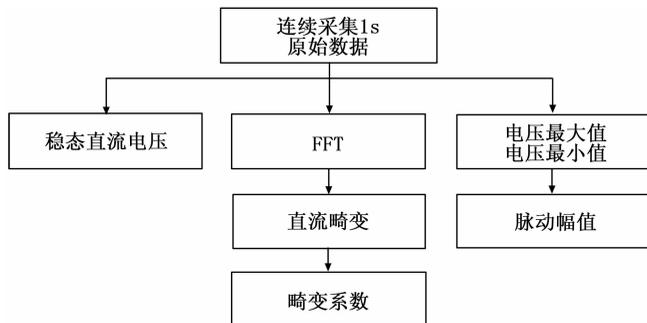


图 9 直流电压参数运算流程图

对每 1 s 周期的采样数据做如下运算：

- 1) 对采集的瞬时电压数据求平均值，得到稳态电压；

2) 对瞬时电压数据求最大值和最小值, 结合稳态直流电压得到直流电压脉动幅值;

3) 对采集的瞬时电压数据进行 FFT 变换, 得到直流畸变和畸变系数。

### 3.3.3 电流参数运算流程

系统监测交流电流为求 1 s 的瞬时电流的方均根值; 监测直流电流为求 1 s 的瞬时电流的平均值。

## 4 实验结果与分析

采用本文研制的机载电源在线监测系统, 在中国飞行试验研究院某型电子试验机上做了实验。由于系统持续采集时间长, 数据量大, 本文取其中的 1 s 数据作为实验结果予以分析。

### 4.1 三相交流电压实验结果与分析

系统对 115 V/400 Hz 三相交流电压工作特性参数的实验结果如表 1、表 2 所示。表 1 中,  $U$  为稳态交流电压;  $\theta$  为电压相位差;  $U_{z}$  为交流电压直流分量;  $f$  为稳态频率;  $F_i$  为波峰系数;  $U_{JP}$  为峰值电压; 表 2 中,  $U_{\epsilon}$  为电压不平衡;  $U_{TZ}$  为电压调制幅度;  $k_{JJ}$  为畸变系数。

表 1 115 V/400 Hz 三相交流电压实验结果 1

	A 相	B 相	C 相	正常工作范围	是否正常
$U/V$	114.97	115.07	114.98	108~118	正常
$\theta/(^{\circ})$	120.10	120.15	119.75	116~124	正常
$U_{z}/V$	0.026	0.082	0.003	-0.1~+0.1	正常
$f/Hz$	399.9	399.9	399.9	393~407	正常
$F_i$	1.41	1.41	1.41	1.31~1.51	正常
$U_{JP}/V$	162.59	162.73	162.55	<271.8	正常

表 2 115 V/400 Hz 三相交流电压实验结果 2

	115 V/400 Hz AC	正常工作范围	是否正常
$U_{\epsilon}/V$	0.131	<3.0	正常
$U_{TZ}/V$	0.259	<2.5	正常
$k_{JJ}$	0.003	<0.05	正常

系统对三相交流电压进行 20 次谐波数据运算, 上位机界面得到如图 10 所示的各相的谐波及谐波失真数据。在各次谐波频率时的畸变幅值最大, 由图 10 中数据可以计算出, 在各次谐波处畸变幅值均小于 -20 dB, 满足正常工作特性的范围。

从表 1、表 2 和图 10 中数据可以得出, 在这 1 s 时间内的机载电源 115 V/400 Hz 三相交流电压的工作特性参数满足 GJB181B-2012<sup>[9]</sup> 标准中正常工作特性的要求。

### 4.2 直流电压实验结果与分析

28 V 直流电压参数的实验结果如表 3 所示。 $U_z$  为稳态直流电压;  $U_{zM}$  为直流电压脉动幅值;  $k_{zJ}$  为直流畸变系数。

从表 3 中数据可以看出, 在这 1 s 时间内的机载电源 28 V 直流电压工作特性参数满足 GJB181B-2012 标准中正常



图 10 谐波与谐波失真

工作特性的要求。

表 3 28 V 直流的实验结果

	28 VDC	正常工作范围	是否正常
$U_z/V$	27.98	22.0~29.0	正常
$U_{zM}/V$	0.37	<1.5	正常
$k_{zJ}$	0.003	<0.035	正常

### 4.3 电流实验结果与分析

国军标 GJB181B-2012 中对电流的正常工作范围没有相关规定, 系统对电流的监测主要是得到稳态交流电流和稳态直流电流。系统通过设定电流阈值对泵负载和接触器负载做了相关的电流实验。

机载电源接入一个泵负载时, 系统监测得到一个泵负载时的稳态交流电流为 13.86 A。通过设定电流阈值 10 A, 得到一个泵负载的稳态电流波形图, 如图 11 所示。

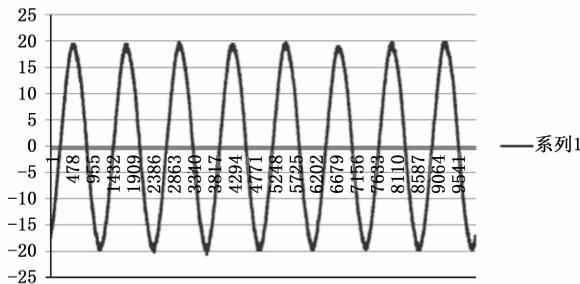


图 11 一个泵负载稳态电流波形图

系统监测八个泵负载时的稳态交流电流为 111.10 A, 监测九个泵负载时的稳态交流电流为 125.00 A。通过设定电流阈值 190 A, 得到在八个泵负载基础上再启动一个泵负载的电流波形图, 如图 12 所示。从图 12 中可以看出在泵负载启动的瞬间交流电流增大, 然后逐渐趋于平稳, 达到一个稳态值。

机载电源 28 V 直流入入一个接触器负载时, 系统监测的稳态直流电流从 3.46 A 变为 4.35 A。如图 13 所示是启动



图 12 泵负载启动电流波形图

接触器瞬间 28 V 直流的电流波形图。从图 13 中可以看出在接触器接入的瞬间有一个瞬态电流冲击，然后达到稳态值。

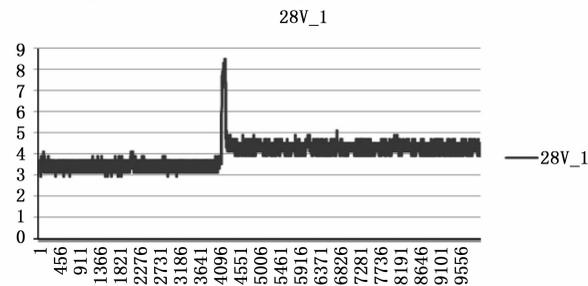


图 13 启动接触器电流波形图

### 5 结论

本文研制的机载电源在线监测系统，采用高性能专用

(上接第 59 页)

[4] 方甲永, 肖明清, 王学奇, 等. 测试不可靠条件下的多故障诊断方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (4): 433 - 438.

[5] 方甲永, 肖明清, 周越文, 等. 电子产品动态损伤最优估计与寿命预测 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (4): 807 - 812.

[6] 胡雷刚, 肖明清. 基于计算智能和信息熵的故障组合预测研究 [J]. 测试技术学报. 2012, 26 (2): 162 - 170.

[7] 赵建忠, 叶文, 张磊. 基于数据融合和改进新陈代谢不等间距 GM (1, 1) 模型的导弹装备故障预测 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (10): 1689 - 1695.

[8] Chen Z, Yang Y, Hu Z. A Technical framework and roadmap of embedded diagnostics and prognostics for Complex Mechanical Systems in Prognostics and Health Management Systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61 (2): 314 - 322.

[9] Raghuraj R, Bhushan M, Rengaswamy R. Locating Sensors in Complex Chemical Plants Based On Fault Diagnostic Observability Criteria [J]. AIChE Journal. 1999, 45 (2): 310 - 322.

[10] Bhushan M, Rengaswamy R. Design of Sensor Network Based On the Signed Directed Graph of the Process for Efficient Fault Diagnosis [J]. Industrial & engineering chemistry research. 2000, 39 (4): 999 - 1019.

[11] 蒋荣华, 王厚军, 龙兵. 基于离散粒子群算法的测试选择 [J]. 电子测量与仪器学报. 2008, 22 (2): 11~15.

[12] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于混合二进制粒子群-遗传算

计算机和高速同步数据采集卡, 实现对机载电源 115 V/400 Hz 三相交流、28 V 直流的工作特性和供电质量的持续在线监测。系统在某型电子试验机上进行了实验, 监测结果实时、准确, 对机载电源提高可靠性和故障分析定位具有重要的意义。

### 参考文献:

[1] 任明翔, 杨娟. 飞机交流电源特性参数测量研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 19 - 22.

[2] 张晓斌, 程玺菱, 雷涛. 基于 PXI 总线的飞机供电测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1024 - 1026.

[3] 司剑飞, 郝世勇, 战祥新. 飞机地面电源供电品质在线测试系统设计 [J]. 电子测量技术, 2012, 35 (7): 116 - 118.

[4] 范雪扬, 高玉章, 宋伟健. 基于 Labwindows/CVI 某型飞机电源检测系统设计 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (3): 160 - 162.

[5] 程绪刚, 邱智, 郝世勇. 基于 LabVIEW 的飞机地面电源监控系统的设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (9): 100 - 112.

[6] 戴卫兵. 飞机电源瞬态特性测试系统的设计与实现 [J]. 测控技术, 2015, 34 (1): 119 - 121.

[7] 中华人民共和国国家军用标准 GJB5189-2003, 飞机供电特性参数测试方法 [S].

[8] 中华人民共和国航空航天工业部航空工业标准 HB6448-90, 飞机供电系统性能参数的数字式测试 [S].

[9] 中华人民共和国国家军用标准 GJB181B-2012, 飞机供电特性 [S].

[10] 法的测试优化选择研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (8): 1674 - 1680.

[13] Pan J, Ye X, Xue Q. An Heuristic genetic algorithm solve test point selecting with unreliable test [A]. 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering [C]. Qingdao, China: IEEE, 2009: 227 - 232.

[14] Maul W A, Kopasakis G, Santi L M, et al. Sensor selection and optimization for health assessment of aerospace systems [A]. Aerospace 2007 Conference and Exhibit [C]. Rohnert Park, CA, USA: Citeseer, 2007: 1 - 23.

[15] Deng S, Jing B, Yang Z. Test point selection strategy under unreliable test based on heuristic particle swarm optimization algorithm [A]. 2012 IEEE Conference on Prognostics and System Health Management (PHM) [C]. Beijing, China: IEEE, 2012: 1 - 6.

[16] 叶晓慧, 潘佳梁, 王红霞等. 基于动态贪婪算法的不可靠测试点选择 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30 (11): 1350 - 1354.

[17] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 测试不确定条件下基于贝叶斯网络的装备测试优化选择技术 [J]. 中国机械工程学报, 2010, 22 (4): 379 - 384.

[18] Liu B, Uncertainty Theory, 5th Edition [M]. Springer-Verlag, Berlin, 2015.

[19] Liu B, Uncertainty Theory: A branch of mathematics for modeling human uncertainty [M]. Springer-Verlag, Berlin, 2010.