

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.04.051

机载用电设备谐波试验系统的研究与实现

司剑飞^{1,*}, 邱智¹, 贾会睿²

1. 海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041

2. 91395 部队, 北京 102443

摘要: 现代飞机因机载任务系统多、用电设备负载特性复杂, 易造成电网谐波偏高甚至超标的情况, 因此, 必须考核用电设备在供电谐波时的工作可靠性。飞机供电特性国军标未对此做出规定, 参考 HB 6167 第 18 部分: 电源输入试验航空标准设计了谐波试验系统。分析了谐波产生原理, 设计了适应中频 500VA 供电系统的谐波产生电路, 采用基于 USB 的数据采集系统对波形进行采样分析。测试结果表明, 系统硬件选型正确, 谐波畸变达到了设计要求, 但 HB 6167 推荐方案存在操作不便、谐波可控性不佳的缺陷, 针对以上不足, 给出了改进意见。

关键词: HB 6167; 谐波试验; 非线性负载; 供电畸变; 桥式整流

中图分类号: V242, TP29

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2017) 04-0051-06

飞机电气系统是飞机的重要平台系统, 通常包括供电系统和用电设备。为了保证供电系统与用电设备之间的相互适应性, 世界各国都制定有相应的飞机供电特性标准, 如美军标 MIL-STD-704 系列、国军标 GJB 181 系列标准等。这些标准一方面规范供电系统供电特性, 另一方面限制用电设备对电网的冲击^[1,2]。在飞机电源系统设计时, 会进行严格的供电特性测试, 保证飞机电源系统供电特性符合要求。但是, 由于飞机用电设备众多, 尤其是新型飞机, 机载电子设备不仅数量多, 机载电子设备的负载特性更为复杂, 如非线性负载、脉冲型负载、整流型负载等, 这些用电设备的使用, 极大地增大了电网负担, 造成了飞机供电系统的谐波污染情况较为严重, 飞机供电特性中电压畸变偏高甚至超标的情况突出。

飞机电网谐波超标会导致用电设备工作异常、发热严重, 甚至会导致用电设备损毁, 无法工作。由于飞机电网谐波治理是一个系统性工程, 电网谐波偏高的情况暂时不会发

生根本性改善。因此, 机载用电设备能否适应飞机供电特性的要求, 在供电系统供电特性处于临界状态, 如谐波含量偏高时, 能否可靠工作是机载用电设备重要的性能特性, 也是供电兼容性要考核的内容。

为此, 研究设计了机载用电设备交流谐波试验系统, 通过系统的研制, 为机载用电设备谐波供电状态下的工作性能测试提供研究分析平台。

1 谐波试验的标准要求及原理

1.1 谐波试验要求

飞机供电特性的相关标准仅规定了供电特性, 并未对如何考核飞机机载用电设备的供电中存在谐波时的工作性能提出要求。目前, 考核国内飞机用电考核在各种供电情况下的工作可靠性主要参考航空标准。

HB 6167《民用飞机机载设备环境条件和试验方法》第 18 部分: 电源输入试验明确规定了民用飞机机载供电电源

收稿日期: 2017-02-08; 退修日期: 2017-02-22; 录用日期: 2017-03-01

* 通讯作者. Tel.: 13792875579 E-mail: 32435906@163.com

引用格式: SI Jianfei, QIU Zhi, JIA Huirui. Research and realization of harmonic testing system in airborne electric equipment [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (04): 51-56. 司剑飞, 邱智, 贾会睿. 机载用电设备谐波试验系统的研究与实现 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (04): 51-56.

对机载用电设备的试验要求及方法,用于验证机载用电设备与飞机供电电源特性之间的协调性^[3]。标准规定了交流设备和直流设备两大类设备。其中,交流设备可进行的试验项目包括交流谐波试验、交流电流调制试验、交流功率因数试验、交流冲击电流试验四大类^[4,5]。根据交流设备的技术要求,从中选取部分或全部项目进行试验。

有关交流谐波试验,HB 6167 中规定:交流谐波试验适用于单台功耗大于 35VA 的交流设备,或由多台同类型设备组成的总功耗大于 150VA 的交流装置。电压谐波含量应符合表 1 的规定。

表 1 谐波含量规定
Table 1 Specified value of harmonic content

设备类别	最大电压总谐波畸变	最大电压单次谐波含量
恒频交流、窄变频交流设备	8%	6%
宽变频交流设备	10%	8%

表 1 中对交流供电波形的电压总谐波畸变与电压单次谐波含量都做了规定。其中,电压总谐波畸变是所有谐波电压的有效值与基波电压有效值之比;电压单次谐波分量是给定谐波频率的电压与基波电压的百分比。

因此,要想对交流用电设备进行谐波试验,试验供电系统中必须具备产生谐波电压的装置,常规中频交流电源的谐波含量一般不超过 3%。因此,无法采用试验供电电源产生谐波畸变。HB 6167 标准中推荐的方法是:电压畸变可由全波整流桥产生,改变整流桥的负载和在线中插入源阻抗可控制电压畸变电平。此外,对受试设备的供电电压进行限幅也可产生畸变电压。

图 1 是 HB 6167 中推荐的典型谐波试验电压畸变形成电路,标准中有单相和三相两种,三相实际上就是三个单相电路的叠加,下面重点讨论单相电路。

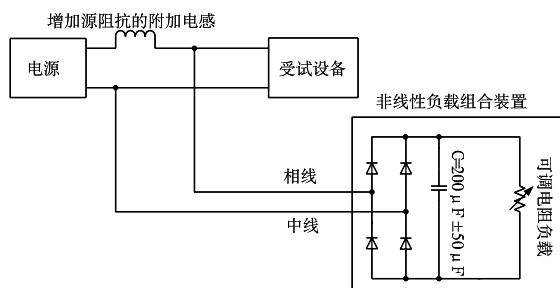


图 1 单相设备电压畸变产生装置

Fig.1 Voltage distortion production for single phase equipment

1.2 谐波产生原理

畸变产生装置的本质就是一个单相全波不控整流电

路。当整流电路输出侧带大电感负载时,整流电路的网侧电流呈矩形方波^[6-9]。对单相桥式整流电路来说,其输入电路波形宽度为 180°,且以原点为镜面对称,如图 2 所示。其傅里叶展开式为:

$$i_2 = \frac{4}{\pi} I_d \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right] \\ = \frac{4}{\pi} I_d \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin n\omega t = \sum_{n=1,3,5,\dots} \sqrt{2} I_n \sin n\omega t \quad (1)$$

式中:基波和各次谐波有效值 I_n 为:

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_d}{n\pi}, \quad n=1,3,5,\dots \quad (2)$$

电流的畸变因数为:

$$K_d = \frac{I_1}{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \frac{1}{I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.9 \quad (3)$$

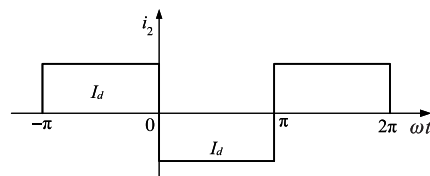


图 2 单相桥式整流电路电流波形

Fig.2 Current waveform of single phase bridge type rectifier circuit

从理论计算看,网侧电流的畸变因数高达 0.9,在电流畸变的情况下,网侧供电电压波形会出现相应的严重畸变^[10]。影响最终电压畸变程度的因素较多,无法准确的定量计算,最终以实测数据为准。

2 谐波试验系统设计

根据上述原理电路,设计了交流恒频用电设备谐波试验系统。

试验系统中交流供电电源采用的是一台稳压变频交流电源,电源容量 500VA。将其输出设定为 115V/400Hz。为了能够对电源造成足够大的冲击,非线性负载组合装置的消耗功率应尽量接近电源容量,同时,还必须留有一定余量,保证用电设备的用电需求。

首先,计算非线性负载组合装置的工作电压。根据单相桥式全波整流电路的直流电压平均值公式:

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \\ = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (4)$$

式中: $\alpha=0^\circ$ (不控整流),可得 $U_d=103.5V$ 。

实际上,由于整流输出端并有大电容,当电容量足够大

时,整流后的直流电压可以认为无脉动。此时,整流电压基本接近输入交流电压的峰值,即整流电压大约为输入交流电压有效值的 1.4 倍左右,即 $115 \times 1.4=161\text{V}$ 。设定整个负载组合装置的最大负载电流为 2A,此时,非线性负载组合装置的总功耗为 320W,达到总供电容量的 60%。

为满足负载需求,整流二极管的通态电流应不低于 2A,耐压值应不低于 200V。为保证器件安全,一般还会提高 2~3 倍。用于中频 400Hz 电路中的整流二极管,应优先选择快恢复型整流二极管。对应的负载电阻应不低于 $80\Omega/2\text{A}$ 。由于电阻功率较大,采用了滑线变阻器作为负载电阻,为避免使用中的意外操作造成负载过流,在滑线变阻器的滑道上进行了标识及限位。据此,得到器件选型如表 2 所示。

表 2 非线性负载组合装置器件选型表
Table 2 Electronic device selection of nonlinear load combination device

序号	型号及名称	简要参数
1	FR608 快恢复整流二极管	6A, 800V
2	CD293 铝电解电容器	220 μF , 400V
3	滑线变阻器	220 Ω , 2A
4	定制电感	3.5mH

为了测试非线性负载组合装置谐波畸变的程度,根据标准要求,需要在电源输出侧连接谐波分析仪或示波器对电源电压、电流进行测量。本系统中,采用了基于 USB 接口的数据采集设备对电压电流进行了波形采集,并利用计算机软件对波形进行了数据分析。

USB 数据采集系统的组成原理框图如图 3 所示。

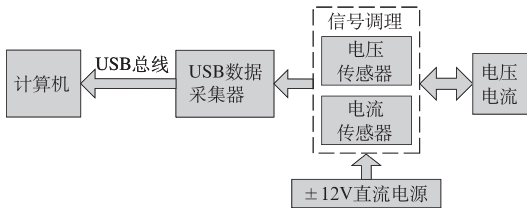


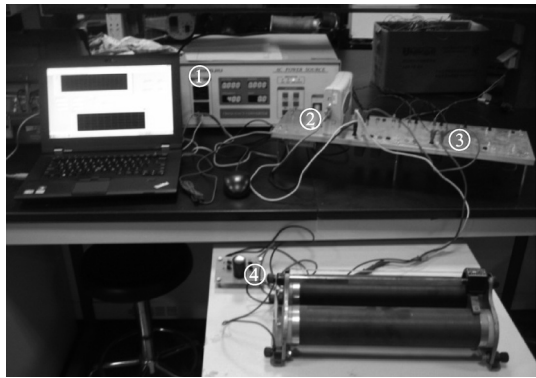
图 3 USB 数据采集系统组成原理框图
Fig.3 Block diagram of USB data acquisition system

图 3 中,USB 数据采集器选用的是台湾凌华科技的 USB-1210 数据采集器,简要的指标如下:4 通道同步采样,采样率 2MS/s, A/D 转换精度 16bit。由于采集器需要实时采集系统中的电压、电流波形,传感器全部采用的是四川维博公司的霍尔式跟踪型传感器。受实验室的现有条件限制,电压传感器是 WBV121S07 交直流电压传感器,输入 0~300V,输出 0~5V;电流传感器是 WBI021F27 交直流

电流传感器,输入 0~100A,输出 0~5A。两型传感器均采用 $\pm 12\text{V}$ 电源供电。

实际使用中,由于被测电流信号有效值最大仅为 2A,而电流传感器量程较大,为保证测量精度,将测试导线在电流传感器的测量孔中缠绕十匝,以提高电流的磁场强度,适当降低测量误差。

设计完成的谐波试验系统如图 4 所示。



注:①稳压调频电源 ② USB 采集器③传感器及其接口 ④非线性负载组合装置
图 4 谐波试验系统
Fig.4 Harmonic test system

3 系统测试及数据分析

初次试验中,考虑到稳压调频电源输出侧是变压器隔离输出,具有一定的感性,并未在电路中使用附加电感(图 1 所示位置)。将电源电压设定为 115V、400Hz,负载电阻调整至 100Ω 。测得交流电压有效值 114.52V、频率 400Hz,输出电流有效值 1.60A。此时,电流波形畸变严重。经过分析,电流总谐波畸变总谐波含量 (THD) 达到 139.39%,基本是尖峰脉冲波形,与理论分析的矩形对称波形相差较大,这与电路的负载感性不足有关。电压波形略有谐波畸变,THD 为 6.82%。利用快速傅里叶变换 (FFT) 工具对供电波形进行分析,得到各次谐波的具体含量如表 3 所示。

表 3 电压总谐波畸变和单次谐波含量
Table 3 Total & Individual harmonic content of voltage distortion

谐波次数	THD	2	3	4	5
谐波含量 /%	6.82	0.116	6.382	0.026	2.152
谐波次数	6	7	8	9	10
谐波含量 /%	0.019	0.868	0.012	0.439	0.008
谐波次数	11	12	13	14	15
谐波含量 /%	0.322	0.005	0.247	0.005	0.179
谐波次数	16	17	18	19	
谐波含量 /%	0.004	0.118	0.003	0.069	

从测试结果看,供电电源中的 THD 达到了 6.82%,根据 HB 6167 的测试要求,要求非线性负载组合装置产生的畸变达到 8%。此时,可适当调大整流电路的负载电流,使电流畸变进一步加剧,进而产生满足要求的电压畸变。

但是,可以看到,当 THD 达到 6.82% 时,3 次谐波含量已高达 6.38%,这已经超过了 HB 6167 中最大电压单次谐波含量 6% 的限制,在总谐波含量达到 8% 时,3 次谐波含量已接近 8%,这主要是受单相全波整流电路的电压、电流畸变特点所决定的。因此,在实际操作中,要想保证电压总谐波含量达标、单次谐波不超标,除适当调整源阻抗的负载外,还需要适当调整源阻抗的附加电感或对供电进行限幅。此外,还可以更换非线性负载组合装置的负载类型,使电流畸变发生变化进而影响电压谐波的畸变特征。

为此,根据图 1 所示,在供电电源输出侧增加一个 3.5mH 的附加电感,保持其他条件不变,再次通电试验,发现测试系统中电压严重畸变。同时,附加电感的存在也使得用电设备供电端的电压略微下降,可见附加电感能够严重影响电压畸变的程度。由于为定值电感,只能通过改变负载的方式对总电压畸变进行调整。最终,采用 3 个滑线变阻器串联作为负载电阻,并适当调高供电电源电压,边调整边观察总电压畸变,当达到要求时停止调节,此时负载电阻约为 500Ω。

此时,测得交流电压有效值 115.39V、电压频率 400Hz、交流电流 0.5A、交流电压波峰系数 1.41、电压总谐波畸变 8.03%,电流总谐波畸变为 78.88%,此时供电侧的电压电流波形如图 5 所示。

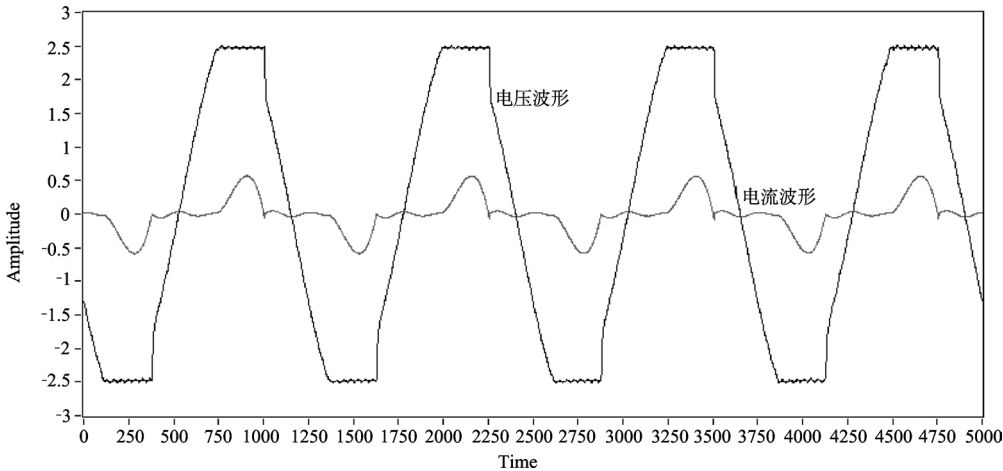


图 5 交流电源供电侧的电压、电流波形
Fig.5 Voltage & Current waveforms in AC power supply side

对该电压波形进行 FFT 分析,得到谐波频谱图如图 6 所示,各次谐波的具体含量如表 4 所示。

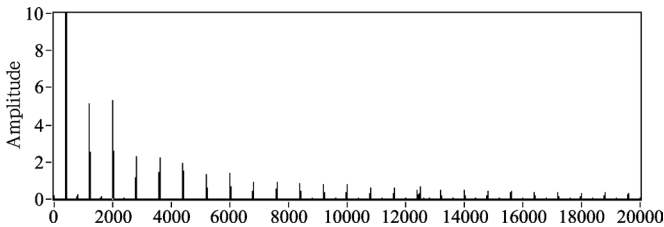


图 6 电压畸变频谱
Fig.6 Voltage distortion spectrum

4 结论

通过谐波试验系统的研究测试,可以看出,基于 HB 6167 的推荐方案进行用电设备的谐波测试,其基本原理是

可行的。但对系统设计及人员操作的要求较高,需要根据用电设备试验中的具体情况进行调整。在试验操作中,需要对以下问题进行认真研究:

表 4 电压总谐波畸变和单次谐波含量
Table 4 Total & Individual harmonic content of voltage distortion

谐波次数	THD	2	3	4	5
谐波含量 / %	8.03	0.243	4.610	0.090	5.170
谐波次数	6	7	8	9	10
谐波含量 / %	0.048	2.230	0.020	2.002	0.015
谐波次数	11	12	13	14	15
谐波含量 / %	1.706	0.012	1.147	0.002	1.251
谐波次数	16	17	18	19	
谐波含量 / %	0.025	0.868	0.013	0.913	

(1) 非线性负载组合装置、附加电感等都需要与电源容量以及被测设备相匹配,一旦供电电源容量加大,若要产生符合要求的畸变电压,则必须加大非线性负载组合装置及附加电感的功率,组合装置的体积、重量将大大增加。同时,在具体试验过程中,必须现场调整负载电流,使其达到要求,基本无法提前预估。

(2) 由于全波整流电路产生畸变电流的特征固定,因此,畸变电压必然是奇次谐波含量高、偶次谐波含量较低。同时,各次谐波含量的占比随着谐波次数的上升而下降,并且,必须采用附加电感限制3次谐波含量。而如果想对机载用电设备进行全面考核,应在保证总谐波含量8%的基础上,适当调整各次谐波含量的占比,提高对用电设备的考核效果,还可以考虑采用程控测试电源的方案进行测试。

(3) 谐波畸变产生的原因是利用整流电路对网侧电流严重的非线性造成的,该畸变电流是否会对被测用电设备造成影响并未进行评估,还需进一步研究分析。

AST

参考文献

- [1] Department of Defense. MIL-STD-704F: Aircraft electric power characteristics [S]. USA: Department of Defense, 2004.
- [2] 中国人民解放军总装备部. GJB 181B-2012: 飞机供电特性 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.
The General Reserve Department of PLA. GJB 181B-2012: Aircraft electric power characteristics [S]. Beijing: Military Standard Distribution of General Reserve Department of PLA, 2012. (in Chinese)
- [3] 陈燕, 李阳. 机载设备电压尖峰试验测试标准分析 [J]. 环境技术, 2012 (4): 56-60.
CHEN Yan, LI Yang. Analysis of airborne equipment voltage spike test standards [J]. Environmental Technology, 2012 (4): 56-60. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. HB 6167.18-2014: 民用飞机机载设备环境条件和试验方法: 第18部分: 电源输入试验 [S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2014.
Industry and Information Technology of the People's Republic of China. HB 6167.18-2014: Environment conditions and test procedures for airborne equipment of civil airplane, Part18: Power input test [S]. Beijing: China Aero-Polytechnology Establishment, 2014. (in Chinese)
- [5] RTCA, Inc. DO-160E environmental conditions and test procedures for airborne equipment [S]. USA: RTCA, Inc., 2004.
- [6] 杨鸣强, 陈乾宏, 张超. 28V 机载用电设备供电特性测试平台的控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 623-625, 637.
YANG Mingqiang, CHEN Qianhong, ZHANG Chao. Design of control system of power supply characteristics test workbench of 28V airborne electrical equipment [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21 (3): 623-625, 637. (in Chinese)
- [7] 梁奇峰, 杨立宏, 宋国翠. 减小航空电源中输入电流谐波的方法 [J]. 通信电源技术, 2010, 27 (5): 49-52.
LIANG Qifeng, YANG Lihong, SONG Guocui. Single-phase APFC technique applied to aviation power supply [J]. Telecom Power Technology, 2010, 27 (5): 49-52. (in Chinese)
- [8] 洪乃刚. 电力电子技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
HONG Naigang. Fundamentals of power electronics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 孔鹏, 赵锦成, 邢娅浪. 典型非线性负载特性分析 [J]. 新技术新工艺, 2011 (9): 52-57.
KONG Peng, ZHAO Jincheng, XING Yalang. Characteristics of typical nonlinear loads [J]. New Technology & New Process, 2011 (9): 52-57. (in Chinese)
- [10] 郑泽煜, 张泾周, 刘征科, 等. 航空供电系统畸变测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 998-1001.
ZHENG Zeyu, ZHANG Jingzhou, LIU Zhengke, et al. Design and implementation of aircraft supply system voltage distortion measurement system [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18 (5): 998-1001. (in Chinese)

作者简介

司剑飞 (1981—) 男, 硕士, 讲师。主要研究方向: 航空电源及电气系统的教学及保障, 计算机测控系统应用。

Tel: 13792875579

E-mail: 32435906@163.com

邱智 (1966—) 男, 硕士, 教授。主要研究方向: 航空电气系统保障研究和计算机测控技术。

贾会睿 (1993—) 男, 学士, 助理工程师。主要研究方向: 航空特设保障维修。

Research and Realization of Harmonic Testing System in Airborne Electric Equipment

SI Jianfei^{1,*}, QIU Zhi¹, JIA Huirui²

1. *Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Branch, Qingdao 266041, China*

2. *Troop 91395, Beijing 102443, China*

Abstract: Due to too many airborne mission systems, having complex load characteristic, equipped in modern aircraft, power harmonic content are easy to be at high level or exceed standard limit. Therefore, the reliability of the electric equipment must be tested when harmonics is in power supply system. GJB aircraft electric power characteristics make no rules in the test. A harmonic test system was studied refer to HB 6167-Part18: Power input test. The principle of harmonic generation was discussed, the harmonic generation circuit applied to 500VA power supply was designed, and the waveforms were sampled and analyzed based on USB bus data acquisition system. The test results show that system hardware selection was correct, harmonic distortion reached the design requirements, but the operation was inconvenience and the controllability of harmonic generation was not good according to the scheme recommended by HB 6167. Some suggestions were suggested for the above defects.

Key Words: HB 6167; harmonic test; nonlinear load; power supply distortion; bridge rectifier

Received: 2017-02-08; **Revised:** 2017-02-22; **Accepted:** 2017-03-01

***Corresponding author. Tel. :**13792875579 **E-mail:** 32435906@163.com