

第17届

全国电磁兼容学术会议

论·文·集

▶ EMC'2007
中国·广州

◎ 高攸纲 沈远茂 石 丹 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

TN03-53/1
:2007
2007

中国通信学会电磁兼容委员会
中国电子学会电磁兼容分会

第 17 届全国电磁兼容学术会议论文集

(EMC'2007/广州)

高攸纲 沈远茂 石丹 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

电磁兼容作为一门综合性学科,理论基础涉及到数学、电磁场理论、电路基础、信号处理、计算电磁学、电磁生物效应等多门学科,而其应用范围又涉及到所有用电领域。第17届全国电磁兼容学术会议论文集汇集了全国20余所高校及科研/企事业单位的科研新成果,包括电磁兼容设计、测试、标准、建模、仿真及防护产品设计与性能特点等,有理论分析及测试数据、仿真建模等。

本书可供电磁兼容教学、科研设计人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

第17届全国电磁兼容学术会议论文集/高攸纲,沈远茂,石丹主编. —北京:电子工业出版社,2007.8
ISBN 978-7-121-04856-2

I.第… II.①高… ②沈… ③石… III.电磁兼容性—学术会议—文集 IV.TN03-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第124635号

责任编辑:竺南直

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:490千字

印 次:2007年8月第1次印刷

定 价:68.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着科技的迅速发展，各种电气及电子设备日益增多，而家用电器的运用，更使这些设备遍及千家万户，当前用电设备密集程度越来越大，空间电磁环境日益恶化，电磁污染已不仅限于设备与设备之间的问题，而且进一步涉及到人类的生存环境。

电磁兼容作为一门综合性学科，理论基础涉及到数学、电磁场理论、电路基础、信号处理、计算电磁学、电磁生物效应等多门学科，而其应用范围又涉及到所有用电领域，时至今日，电磁兼容已经形成一种产业，并在国民经济中发挥着重要作用，创造着巨大的经济效益。为加强电子产品在国内外市场上的竞争能力，也为使人类在高度享受物质文明和精神文明的同时，仍能确保社会生活及生产得到安全、健康、持续有效的发展，电磁兼容新技术的研究开发，迫在眉睫。

有鉴于此，为促进电磁兼容技术在我国进一步深入发展，中国通信学会电磁兼容委员会及中国电子学会电磁兼容分会，频繁组织各类学术会议，加强学术交流，推广新技术。但出席会议人数毕竟有限。为进一步扩大影响，让国内更多单位及个人受益，使电磁兼容技术得到进一步提高，为此经学会与电子工业出版社商定，今后学会学术会议论文集将由该社正式出版。深信此举将有利于电磁兼容事业的进一步发展，正如国内外专家预言那样，电磁兼容必将有一个美好的明天。

编 者

第 17 届全国电磁兼容学术会议

EMC'2007/广州

主办：

中国通信学会电磁兼容委员会

中国电子学会电磁兼容分会

承办：

郑州铁路中安工程公司

学术委员会：

主 任：高攸纲

副主任：高本庆

委 员：宋笑亭 吴 雷 吕英华 沙 斐

秘 书：沈远茂

组织委员会：

主 任：卫中安

副主任：张苏慧

目 录

电力系统非线性负载谐波电流测量及功率因数的研究	张启林 冯天宝 韩冰 (1)
航空电源产品辐射发射测试研究	赵金奎 (6)
传感器信号调理电路的电磁兼容问题	李小春 王园 赵家升 胡皓全 杨显清 (15)
某船环境射频电磁场分布调查及分析	李振杰 柯文棋 褚新奇 周宏元 蔡懿灵 李政年 乐秀鸿 (22)
长波脉冲电磁场对实验家兔的影响	李振杰 郭丰涛 杨 军 王学佑 冀仲义 柯文棋 乐秀鸿 (28)
卫星定位系统信号变换过程分析	逯贵祯, 王京玲 (36)
人体—金属模型静电放电电路参数对电流上升时间影响研究	周峰 徐丹 黄久生 高攸纲 刘素玲 王喜芹 汪朗峰 (39)
LPS 与 LPMS 共用自然构件的探讨	孙巍巍 谢亚静 (45)
发射机电磁兼容预测模型研究	龙奕 胡皓全 赵家升 杨显清 (49)
雷害源的分析	马民 薛文安 (56)
电磁屏蔽效能分析与实例计算	龙奕 胡皓全 赵家升 杨显清 (61)
系统间电磁兼容性问题的建模与研究	王海波 杨显清 赵家升 胡皓全 (67)
核电磁脉冲对传输线耦合的研究	朱伟玲 胡皓全 赵家升 杨显清 (74)
方型金属被测物对 ATEM 室电场分布和特性阻抗的影响	戚金龙 王胜轩 (80)
微波网络与 CAD 分析在裂缝阵天线设计中的应用	高明亮 薛正辉 刘忠凯 (84)
细缝半解析仿真算法的精度和适应性研究	刘项羽 刘萍 (89)
基于矢量匹配法的传输线宏模型研究	洪红 刘萍 (94)
PCB 平面螺旋电感辐射的 HFSS 分析	王俊涛 段磊 高攸纲 (99)
火车载卫星直播电视接收天线方案仿真设计	张颖 李莉 王华芝 (103)
高速数字电路的电磁兼容研究与仿真	李安平 陈捷 高攸纲 (109)
对近区低频磁场的屏蔽设计研究	高成 朱翼超 石立华 周壁华 (115)
钢筋环与钢筋笼的低频磁场屏蔽效能实验研究	朱翼超 高成 周壁华 万浩江 刘晓 (122)
900/1800MHz TDMA 蜂窝移动台杂 散辐射的电磁兼容测试	张骏驰 刘胤廷 沈远茂 高攸纲 (128)
蛇形偶极子标签天线谐振特性的研究	刘胤廷 张骏驰 周峰 沈远茂 高攸纲 (134)
运用电磁兼容测试进行 RFID 设备频谱管理的技术分析	周宇 王文俭 李书芳 (142)
等效传输线法分析有孔矩形金属腔对静电放电辐射场的屏蔽效能	汪柳平 高攸纲 沈远茂 (147)

阵列天线平台遮挡效应研究	段磊 王俊涛 高斌 高攸纲 (153)
带电人体-金属放电参数出现极值的研究	阮方鸣 高攸纲 沈远茂 石丹 周峰 刘万松 (157)
基于 FDTD 的不平行多导体传输线瞬态分析	梁薇 王娜 李莉 (162)
基于 FDTD 的区域电磁场分析	魏立柱 王卓 (168)
自动测试系统 (ATS) 的不确定度分析	周庆 刘红杰 李书芳 (174)
射频同轴连接器电接触故障研究	朱剑 高锦春 (180)
负介电系数集成材料电磁特性分析 —— 周期性单元结构对电磁特性的影响	包永芳 吕英华 杨显清 (186)
互耦对四元微带天线阵性能影响的仿真与分析	王娜 梁薇 李莉 (192)
电磁灶加热的理想物理模型及其解析解	付小芮 和伟 李树晨 付昆鹏 (200)
大地电阻率与云地放电之间的关系	李树晨 和伟 付小芮 付昆鹏 (205)
某电子设备的电磁屏蔽接地设计	杨金志 林守霖 薛正辉 (210)
有源共模 EMI 滤波技术在开关电源中的应用	陈立剑 熊蕊 吴琼 (215)
国内外汽车电磁兼容标准	刘青松 丁良旭 许响林 李彬 (221)
高压开关电源的滤波电路设计	吕媛超 张金玲 吕英华 王登伟 (226)
半电波暗室与全电波暗室测试比对方法的研究	周宇 陶洪波 李书芳 (233)
通信局 (站) 防雷接地的关键问题	刘宗奇 张振恒 (239)
ROF 链路中的电磁干扰分析	张博 吕英华 张金玲 张宏欣 (244)
电涌保护器对核电磁脉冲的响应性能测试与分析	俞阳 石立华 万浩江 周颖慧 (249)
电场仪标定装置的设计与仿真	万浩江 石立华 朱翼超 公聪聪 (254)
磁性材料磁导率的测量及其分析	王俊玲 王添文 李永卿 郭红霞 王群 (259)
有限元法在地铁站台电场分布计算中的应用	李良进 李永卿 刘小黑 郭红霞 王群 (264)
移动基站的接地与等电位连接结构	林湧双 刘吉克 李猛 陈强 (269)
高速电气化铁道对机场导航台站的影响评价	卫中安 张育明 (276)
时变媒质下 FDTD 的一种 PML 吸收边界条件 (ABC)	陈丙康 高本庆 (281)
应用并行 GTD 算法计算阵列天线近场受扰	耿江东 薛正辉 高本庆 (287)
基于 GMRES 的边界元-有限元混合法在 EMC 中的应用	胡玉生 (293)

电力系统非线性负载谐波电流测量及功率因数的研究

张启林, 冯天宝, 韩冰

(河北北方学院, 理学院, 河北 张家口 075028)

摘要: 电力系统中的非线性负载引发的电源污染受到人们越来越多的关注。本文对一种典型非线性负载电流的谐波用波形法和直接测量法进行了分析。对谐波畸变率对广义功率因数的影响进行了讨论。

关键词: 谐波; 畸变率; 功率因数; 非线性负载

Measurement of Power Systems Nonlinear Load Harmonic Current and Study of Power Factors

ZHANG Qi-lin, FENG Tian-bao, HAN Bing

(The School of Science, Hebei North University, Zhangjiakou 075028)

Abstract: In power system, pollution of electric sources caused by nonlinear load is paid more and more attention. This paper makes analysis of a typical harmonic wave of nonlinear load current in ways of waveform and direct measurement, especially discusses the influence that distortion rate of harmonic wave has on power factors in a broad sense.

Key words: harmonic wave; distortion rate; power factors; nonlinear load

0 引言

随着科学技术进步和生活水平提高, 用电设备中的非线性负载的数量和比重在迅速增大。这一领域的主要设备有: 计算机, 电视机, 电磁炉, 微波炉, 各种节能灯, 电车和地铁的整流装置, 各种调速驱动装置等。它们的共同特点是: 负载向电源索取的电流都是非正弦波, 我们把使供电电压波形或供电电流波形为非正弦的用电设备统称为非线性负载。由于流过非线性负载的电流非正弦。它们中含有非常高的谐波电流成分。这些谐波成分将对供电电源造成严重污染。它是继水质污染, 大气污染, 噪声污染之后被世界公认的第四大污染, 通常称电磁环境污染。当谐波电流严重时, 可以使并联在同一电源线路上的其它用电设备不能正常工作: 如测量仪器误差加大; 计算机出现干扰; 控制设备出现误动作; 正常运转的电机热损增大等。

另一方面, 本身负载的功率因数大大减小, 谐波无功分量增大, 使供电设备可供电容量减小, 带负荷能力下降。下面我们对如图 1 所示的一种典型非线性负载的电流波形进行测量分析, 讨论谐波成分对电路各项指标的影响。

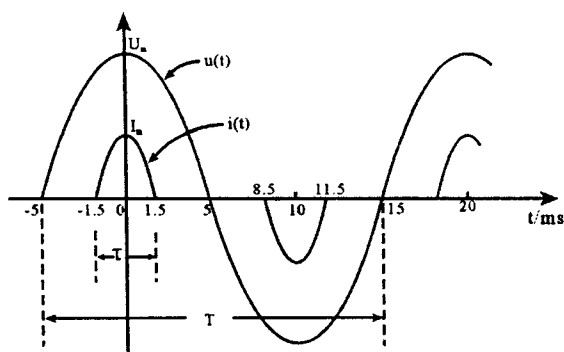


图 1 非线性负载的电压、电流波形图

1 波形法求有功功率 P

由图 1 看出，电源电压是正弦波：

$$u(t) = U_m \sin \omega t = 220\sqrt{2} \sin \frac{2\pi}{T} t \text{ V}.$$

而供电电流 $i(t)$ 是非正弦脉冲波，其宽度 $\tau = 3\text{ms}$ ，幅度 $I_m = 1\text{A}$ 。我们用一个余弦脉冲函数式来表示 $i(t)$ [1]：

$$i(t) = \begin{cases} I_m \cos \frac{\pi}{\tau} & -1.5\text{ms} \leq t \leq 1.5\text{ms} \\ -I_m \cos \frac{\pi(t-10)}{\tau} & 8.5\text{ms} \leq t \leq 11.5\text{ms} \\ 0 & t = \text{其余时间} \end{cases}$$

由此计算负载的有功功率 P：

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot u(t) \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{-1.5}^{1.5} i(t) \cdot u(t) \cdot dt \\ &= \frac{2}{T} \int_{-1.5}^{1.5} I_m \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} \cdot U_m \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot dt \\ &= \frac{4}{T} \int_0^{\frac{\tau}{2}} I_m \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} \cdot U_m \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot dt \end{aligned}$$

利用积分公式：

$$\int \cos ax \cdot \cos bx \cdot dx = \frac{\sin(a-b)x}{2(a-b)} + \frac{\sin(a+b)x}{2(a+b)}$$

其中 $a = \frac{\pi}{\tau}$, $b = \frac{2\pi}{T}$ ，得，

$$P = \frac{4}{T} U_m I_m \left[\frac{\sin(\frac{\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{T}) \cdot t}{2(\frac{\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{T})} + \frac{\sin(\frac{\pi}{\tau} + \frac{2\pi}{T}) \cdot t}{2(\frac{\pi}{\tau} + \frac{2\pi}{T})} \right]_0^{\frac{\tau}{2}}$$

$$= \frac{4}{T} U_m I_m \left(\frac{\sin 63^\circ}{\frac{7}{15}\pi} + \frac{\sin 117^\circ}{\frac{13}{15}\pi} \right) = \frac{4}{T} U_m I_m \times (0.6077 + 0.3272) = \frac{4}{T} U_m I_m \times 0.9349$$

把 $U_m = \sqrt{2} \times 220V, I_m = 1A$ 代入, 得: $P = 58.17 W$

2 谐波分析法

在单相电源线中串入 10Ω 电阻, 用美国产谐波分析仪 (SR760) 测量 $i(t)$ 在 10Ω 电阻上的十个谐波电压电平分贝值 P_x 如表 1 所示。根据电子测量理论^[4], 分贝值与电压有效值的关系为:

$$P_x(dBV) = 20 \lg \frac{U_x}{0.775}$$

由此换算得各次谐波电压有效值 v_x 也列入表 1 中。

表 1 谐波电平测定值

谐波次数 (频率/HZ)	1 (50)	3 (150)	5 (250)	7 (350)	9 (450)	11 (550)	13 (650)	15 (750)	17 (850)	19 (950)
电压分贝值 P_x (dB)	11.28	10.6	7.8	3.2	-2	-7.8	-6.1	-6.5	-9.2	-11.3
电压有效值 v_x (V)	2.839	2.626	1.902	1.228	0.615	0.315	0.384	0.366	0.268	0.211

从表 1 看到, 电流 $i(t)$ 除 50Hz 基波外, 只含有奇次谐波成分, 没有偶次谐波, 证明完全符合付里叶级数中关于奇半波对称周期函数只包含奇次谐波的理论。另外看到, 三次谐波的幅值很高, 已接近基波幅度。

2.1 电流总有效值

电压有效值 v_{rms} 为:

$$v_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} v_{xn}^2} \approx \sqrt{\sum_{n=1}^{10} v_x^2} = \sqrt{(2.839^2 + \dots + 0.211^2)} = 4.58 V$$

则电流有效值为: $I_{rms} = \frac{v_{rms}}{10} = 0.458 A$ 。

2.2 电流总谐波畸变率

电流总谐波畸变率 THD_I 定义为:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1rms}} \right)^2 - 1}$$

其中 I_{1rms} 为基波电流有效值。由表 1 知, $I_{1rms} \approx 0.284A$

则: $THD_I = \sqrt{\left(\frac{0.458}{0.284} \right)^2 - 1} \approx 126\%$

可见, 由于电流 $i(t)$ 的非正弦, 它的畸变率很大, 根据 GB/T14549—93 标准规定, 380/220V 低压电网电压的波形畸变率的限值为 5%。由上式可知电流有效值与电流畸变率的关系为:

$$I_{rms} = I_{1rms} \sqrt{1 + THD_i^2}$$

同理, 若电源电压波形发生畸变, 则电压有效值与电压畸变率的关系为:

$$v_{rms} = v_{1rms} \sqrt{1 + THD_v^2}$$

2.3 视在功率

视在功率定义为电压总有效值与电流总有效值的乘积, 即:

$$S = v_{rms} \cdot I_{rms} = v_{1rms} \cdot I_{1rms} \sqrt{1 + THD_v^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2} = S_1 \sqrt{1 + THD_v^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}$$

式中 S_1 为基波视在功率。当只考虑电流畸变, 而认为电压为正弦波无畸变时, $THD_v=0$ 。

则: $S = S_1 \sqrt{1 + THD_i^2}$

可见, 非线性负载的视在功率大小不仅与基波视在功率 S_1 有关, 而且与畸变率有关, 畸变率越大, 视在功率越大。本例中,

$$S_1 = v_{1rms} \cdot I_{1rms} = 220V \times 0.284A = 62.48(VA)$$

则视在功率的大小: $S = 62.48 \sqrt{1 + (126\%)^2} = 100.5(VA)$

3 功率因数的讨论

功率因数 PF 为有功功率对视在功率的比值[2], 即:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1 \sqrt{1 + THD_v^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}} = PF_{disp} \cdot PF_{dist}$$

式中 $PF_{disp} = \frac{P}{S_1}$ 称位移功率因数, 是由基波电压与基波电流的相位差所决定的;

$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}}$ 称为畸变功率因数,

本例中, $THD_v=0$, $THD_i=126\%$, 代入上式得:

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (126\%)^2}} = 0.62$$

而位移功率因数 $PF_{disp} = \frac{P}{S_1} = \frac{58.17}{62.48} = 0.93$, 因此在有谐波电流存在下非线性负载的实际功

率因数为: $PF = 0.62 \times 0.93 \approx 0.58$ 。

由上分析知, 谐波畸变率 THD 对电路实际功率因数影响很大。谐波成分越大, 畸变功率因数 PF_{dist} 越小, 电路的实际功率因数 PF 越小。平常电器设备铭牌上所标的功率因数是位移功率因数, 是在纯正弦电流电压波形下测得的。当电压或电流中有谐波存在时, 实际的功率因数要小于铭牌上的功率因数。因此, 传统理论上的功率因数 $\cos\varphi$ 与 PF 有重要的区别, 前者反映了总电压与电流的相位差, 而后者只表示有功功率占视在功率分量的大小, 没有任何相位角的内含, 通常把 PF 称为广义功率因数。由此推知, 要提高非线性负载的功率因数 PF,

采用并联电容器的方法奏效不大,只能采用消除谐波的方法以增大 PF_{dist} 。目前较成熟的有两种消除谐波的方法:在电源电路中接入无源滤波器(PPF)或接入有源滤波器(APF)^[3]。

4 结束语

电力系统中的非线性负载是一种重要的谐波源,称为谐波电流源。谐波电流流经输电线路及变压器时在其阻抗上产生谐波压降,叠加在正弦电压波形上使电源电压的波形发生畸变,形成了电压谐波源,进而使线性负载的电流也发生畸变。这样用电设备就会出现一系列如引言中所述的现象。目前,对非线性负载的谐波分析一般有二种方法:一种是用数学表达式表示出谐波电压或电流。然后用付里叶级数等数学方法进行分析;另一种是用谐波分析仪直接测出各次谐波值进行分析。当谐波无法用数学式表示时,只能用后一种方法进行。本文用二种方法对谐波电流 $i(t)$ 进行了分析,特别对谐波畸变率 THD 与广义功率因数 PF 的关系进行了讨论,对在谐波情形下的功率因数的意义进行了阐述。

参 考 文 献

- [1] 张启林,冯天宝,王增波等.三相非线性负载中线电流波形及测试与分析[J].电测与仪表,2005,(10):11~13
- [2] George J. Wakil.电力系统谐波基本原理,分析方法和滤波器设计[M].北京:机械工业出版社,2003
- [3] 王洪新,贺景亮.电力系统电磁兼容[M].武汉:武汉大学出版社.2004:51~58
- [4] 刘国林,殷贯西.电子测量[M],北京:机械工业出版社,2003:132
- [5] Jin Sheng Lai.通过抑制谐波方法改善开关电源的功率因数[J],电力电子技术,1994,(1):10—13
- [6] 刘学会,张伟,王永刚等.非正弦电网的功率因数及其测量[J],电测与仪表,2004,(1):23-25

航空电源产品辐射发射测试研究

赵金奎^{1, 2}

- (1. 中国一航 陕西航空电气有限责任公司, 陕西 兴平 713107;
2. 中国航空工业西北电磁兼容性监督检测中心, 陕西 兴平 713107)

摘要: 航空电源产品高度集成化的发展可以提高产品的可靠性和效率, 但随之而来的是电磁干扰问题的复杂性和潜在危害性随之加剧。对航空电源产品进行辐射发射测试是电磁兼容性检测的重要项目, 目的是用来考核产品的辐射发射是否满足标准要求、判断产品辐射干扰的程度。对航空电源产品在电磁兼容性测试中的辐射发射项目进行了全面介绍和分析, 详细介绍了航空电源产品辐射发射的测试方法和测试布置, 并对测试结果进行了分析, 给出一些辐射干扰的抑制措施。

关键词: 电磁兼容 (EMC); 电磁干扰 (EMI); 航空电源; 辐射发射 (RE); 测试方法

Research of RE Testing for the Aircraft Power Supply Product

ZHAO Jin-kui^{1, 2}

- (1. Shaanxi Aero Electric Co., Ltd. of AVIC, Xingping, Shaanxi 713107, China;
2. Northwest EMC Supervising and Detecting Center of China Aviation Industry, Xingping, Shaanxi 713107, China)

Abstract: Monolithic integrated circuit (IC) of the aircraft power supply product can help to design more effective, better-reliability, but electromagnetic interference (EMI) problem of the aircraft power supply product become more complicate than before and the potential damage to other device goes high risk. Radiated emission testing of the aircraft power supply products are very important items in EMC detections, the purpose is to check radiated emission weather accord with requirements of standard and to estimate the level of interference of the products. The radiated emission items in EMC testing for the aircraft power supply products are presented and analyzed, and testing procedures and setup of RE testing of the aircraft power supply products are introduced, analysis of tested result and some suppression measures of radiated interference are given.

Keywords: electromagnetic compatibility (EMC); electromagnetic interference (EMI); the aircraft power supply; radiated emission (RE); testing procedure

1 引言

航空电源是重要的机载供电设备, 航空电源产品和系统用来产生和存储机载用电设备所

需的电能,以保证机上各种用电设备工作时的电能供应^[1]。随着机载航空电子、电器设备不断向高可靠性、大功率方向发展,对航空电源的要求也越来越高,航空电源产品高度集成化的发展可以极大地提高产品的可靠性和效率,但伴随而来的是航空电源产品和系统的电磁干扰(EMI)问题的复杂性和潜在危害性随之加剧。如何判断产品的电磁干扰是否符合标准要求并确定辐射干扰程度,需要通过电磁兼容性测试来决定。

对一些电子、电气设备的电磁兼容性(EMC)测试进行统计发现,大部分产品辐射发射项目的测试结果都有不同程度的超标现象,结果不容乐观。对航空电源来说,它本身就是一个很强的功率源,航空电源在工作过程中不但会在电源线上产生较高的传导干扰,而且还会向周围空间辐射电磁场,对产品进行辐射发射测试,可定量判断产品的辐射电磁干扰。

2 航空电源产品辐射发射测试的重要性

一个现代电子和电气产品(设备、系统)的电磁兼容性对保证产品正常功能的发挥起着至关重要的作用,这已是国内外业界公认的事实。任何电子、电气设备和分系统、系统在其正常运行时,都不可避免地会向电源线反馈电磁能量,同时也从机壳、互连线和信号线等向空间泄漏和发射电磁能量,这种电磁能量有可能构成对所处电磁环境的污染,也可能成为相邻设备的潜在干扰源^[2]。

对于航空电源产品及系统来说,在其正常运行状态下,同样存在着尖锐的电磁兼容问题,其中电磁干扰是其重要特性,只有有效控制和限制它们才能实现产品和系统的电磁兼容性。根据相关电磁兼容标准对产品或系统进行电磁干扰测试,通过测量确定电磁发射是否达到标准要求,是 EMC 测量和设计的基本工作。

一个系统内各个产品相互连线是少不了的,尤其对于航空电源系统,作为重要的机载设备,与其它产品连线延伸范围大,受限于空间,这些连线相互间距不能太大,对于长的电缆,因线缆间的电磁耦合带来系统内的不兼容是常有的。RE 测试用来测量产品或系统通过空间传播的辐射电磁场,检测被试产品自身的电磁辐射发射,判断其在被测环境中对与之相关的周围环境的影响。

为了确保航空电源产品电磁兼容设计的正确性和可靠性,科学地评价产品的电磁兼容性能,就必须在研制的整个过程中,对各种干扰源的干扰量值、传输特性和敏感器件的敏感度进行定量测量,验证产品是否符合电磁兼容性标准和规范;寻找产品设计及生产过程中在电磁兼容性方面的薄弱环节,为产品的正确安装和使用提供有效数据,因此产品的电磁兼容性试验是电磁兼容性设计所必不可少的重要内容。由于电磁兼容分析和设计的复杂性,以及各种杂散发射千差万别,很难控制,对于电磁兼容技术来说,其理论计算结果更加需要实际测量来检验,至今在 EMC 领域对大多数情况仍主要靠测试来分析、判断、解决问题。

对航空电源产品进行辐射发射测试,是判断产品电磁辐射发射是否满足要求的重要手段,是衡量产品电磁兼容性的重要指标,是对产品总体技术性能的考核。依据 GJB 151A/152A-97 的方法要求及配置进行辐射发射的测试项目主要有 RE101 磁场辐射发射和 RE102 电场辐射发射两个项目,试验中若出现超标现象,设计人员可以通过测试数据分析原因,从中探索整改思路,具有针对性地解决问题,所以对航空电源产品进行辐射发射测试是提高和改进产品电磁兼容性的重要环节,其重要性在产品设计中不容忽视。

3 RE101 磁场辐射发射测试

3.1 RE101 测试方法与配置

RE101 磁场辐射发射测试频率范围是 25Hz~100kHz, 适用于与低频磁场辐射发射相关的航空电源产品壳体和所有互连电缆的辐射发射, 目的是用来检验产品及有关电线、电缆的磁场发射是否超过要求, 测试产品安装区域的磁场辐射情况, 以保护工作在本试验频率范围内的敏感设备不受磁场的干扰。

RE101 测试设备包括测量接收机、磁场环天线(又称接收环)、信号发生器、LISN 等, 测量连接配置如图 1 所示。磁场环天线的使用方式类似于带有一个前置放大器和频谱分析仪的探头, 它们被加以屏蔽或平衡以提供感应到的电磁场的变化, 并且它比电流探头灵敏。采用磁场环天线来测量磁场强度, 在近场区域测量磁场可获得比测量电场更好的重复性, 因为电场更容易受到附近物体或电磁场的影响^[3], 因此磁场环天线可以用于非常靠近一个屏蔽机箱、屏蔽罩或产品连接电缆的磁场测量, 其目的是用于“嗅出”机箱开孔、缝隙和接缝、电缆线周围的电磁泄漏, 指出一些有缺陷的设计方法, 提供一种新的整改思路。

被试产品要良好接地, 并在其进入稳定工作状态后测试有效。产品的电缆敷设状态尽量与真实使用状态接近。被试产品安装调试完毕, 通电预热达到稳定工作状态后, 将接收环(直径为 13.3cm)置于距离产品面或电缆 7cm 或 50cm 处, 并使接收环的平面平行于 EUT 面和平行于电缆的轴线, 采用表 1 规定的带宽和最小测量时间, 使测量接收机在整个适用的频率范围内扫描, 找出最大的辐射频率点^{[4]~[6]}。

3.2 RE101 测试实例

对某航空电源产品依据上述方法要求及配置在半电波暗室内安装调试完毕后, 为了防止环境电磁场对测试结果造成影响, 切断被试产品电源, 将接收环按图 1 设置, 在测量频段内按表 1 要求设置检测参数进行扫描, 扫描曲线如图 2 所示, 测试的环境电平满足低于极限 6dB 的要求。产品接通电源工作稳定后, 将接收环置于距离产品 7cm 和 50cm、平行于产品被测平面和电缆轴线的位置进行检测扫描, 与相对应的极限进行对比, 判断测试结果。图 3、图 4、图 5 分别为距离被试产品 50cm 处, 平行于产品上表面、侧面和电缆轴线位置的扫描曲线, 其中图 3、图 5 状态有超标现象。

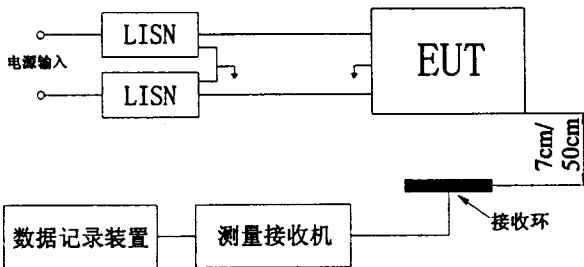


图 1 RE101 磁场辐射发射测试配置图

表 1 发射测试扫描参数

频率范围	6dB 带宽	驻留时间 (s)
30Hz~1kHz	10Hz	0.15
1kHz~10kHz	100Hz	0.015
10kHz~250kHz	1kHz	0.015
250kHz~30MHz	10kHz	0.015
30MHz~1GHz	100kHz	0.015
>1GHz	1MHz	0.015

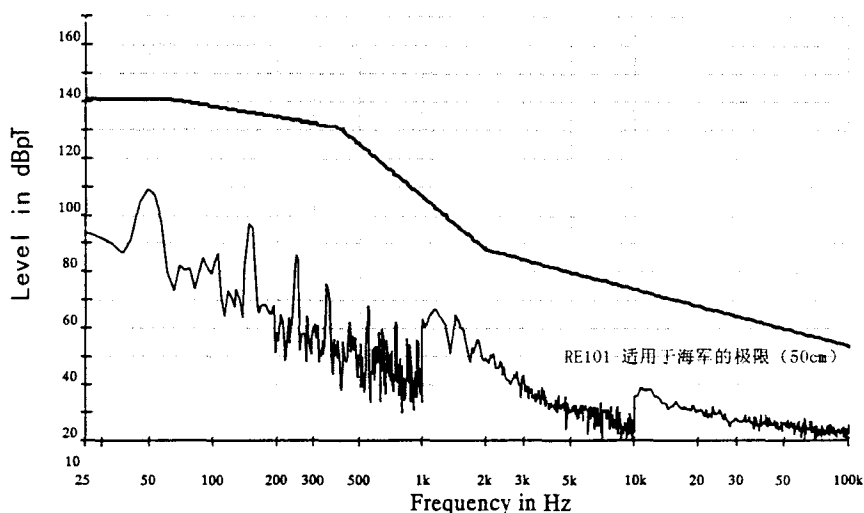


图 2 RE101 磁场辐射发射环境电平扫描曲线

3.3 结果分析与抑制措施

由于该产品工作频率是 400Hz，在产品上表面测试中有三个频率点超出了极限要求，是产品的工作频率点、三次和七次谐波频率点，导致测试结果不合格（见图 3）。对产品进行分析后认为，由于产品内部的 PCB 均垂直安装在产品底座上，内部对产品四周的影响效果一致，造成差别的主要原因是产品金属机箱的设计问题。该产品的金属机箱在产品上表面为了散热的需要开了许多小圆孔，产品上表面的孔缝泄漏导致金属机箱的屏蔽效能大大降低，而侧面是完整的金属板，面板连接处均用螺钉紧固，电气连接良好，有效地防止了电磁泄漏，故侧面位置的测试未出现超标现象（见图 4）。采用金属丝网覆盖大面积通风孔，可以有效地防止电磁泄漏。通过对产品上表面覆盖金属丝网并与壳体良好搭接后进行分析试验，发现测试数据已经满足标准要求。

另一个重要问题是产品连接电缆上的辐射。如图 5 所示，在距离产品连接电缆轴线 50cm 位置处的扫描曲线也有超标现象。经过分析认为，产品的连接电缆包含电源线、信号线、互连线等，电缆组成复杂。产品工作状态时电源线上有 400Hz 的工作电流通过，而载有时变电流的导体都会向外辐射电磁场，从测试数据来看，磁场辐射发射超标主要是由电源线上的谐波引起的。

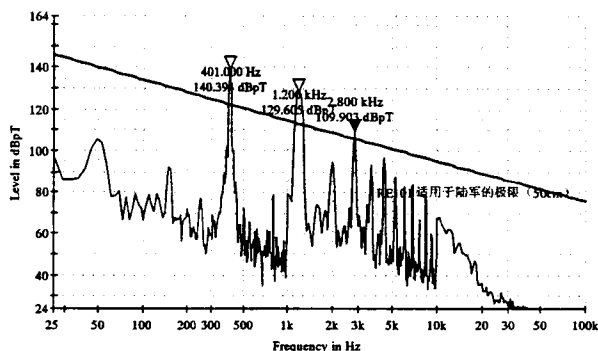


图 3 距离产品上表面 50cm 处扫描曲线

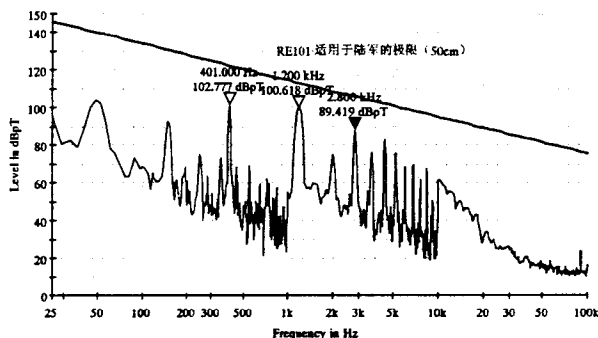


图 4 距离产品侧面 50cm 处扫描曲线

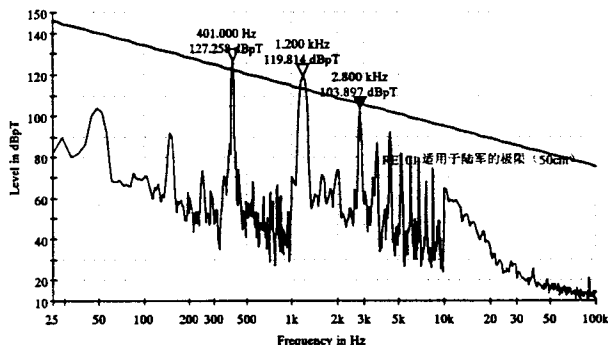


图 5 距离产品电缆 50cm 处扫描曲线

对于辐射干扰最有效的抑制方法是电磁屏蔽，对于 RE101 的辐射干扰，属于低阻抗源的近场，磁场占主要成分，应采取磁屏蔽的方式来抑制。低频（100kHz 以下）磁场的屏蔽常用高磁导率的铁磁材料（例如铁、硅钢片坡莫合金等），原理就是利用铁磁材料的高磁导率对干扰磁场进行分路。将铁磁材料置于磁场中时，磁通将主要通过铁磁材料，而通过空气的磁通将大为减小，从而起到磁场屏蔽作用。屏蔽电缆用铁磁材料制作的屏蔽罩，由于其磁导率很大，其磁阻比空气小得多，电缆所产生的磁通主要沿屏蔽罩通过，即被限制在屏蔽体内，从而使电缆线周围的元件、电路和设备不受电缆辐射磁场的影响^[7]。同样，外界磁通也将通过屏蔽体而很少进入屏蔽罩内，从而使外部磁场不致干扰屏蔽罩内电路。