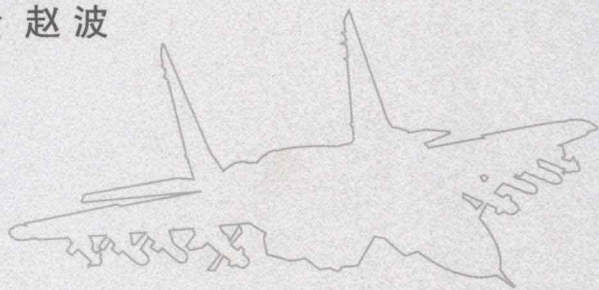


机载设备

电磁兼容设计与实施

主编 田建学 副主编 魏俊淦 赵波
主审 顾德均



国防工业出版社
National Defense Industry Press

机载设备电磁兼容 设计与实施

主 编 田建学
副主编 魏俊淦 赵 波
主 审 顾德均

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

随着航空电子技术的迅猛发展,机载设备的电磁兼容性已成为可靠性工程的重要组成部分,在进行机载设备设计的同时应开展电磁兼容性设计,并在设备的研制生产和使用维护阶段付诸实施。本书从电磁兼容基本概念切入,介绍了飞机电磁干扰源、电磁兼容管理和电磁兼容标准等知识;在介绍机载设备电磁兼容控制策略的基础上,介绍了滤波、屏蔽、接地和搭接等四项电磁兼容重要技术;并就机载设备设计和改装过程中的电磁兼容性预测技术、电磁兼容设计技术、电磁兼容测量与故障诊断等问题进行了讨论;最后结合作者的科研成果介绍了电磁兼容实施实例。

本书可供从事机载设备设计与实施工作的部队、科研院所技术人员阅读,也可作为相关院校电气、电子工程专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机载设备电磁兼容设计与实施/田建学主编. —北京:
国防工业出版社, 2010. 6
ISBN 978-7-118-07103-0

I. ①机... II. ①田... III. ①机载设备-电磁
兼容性-研究 IV. ①V24

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第191421号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11½ 字数 258 千字

2010年6月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 28.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

当前航空业发展迅猛,加快了机载设备的更新换代。随着电子技术的发展,机载设备的功能不断增强,与此同时,电磁干扰问题也越来越突出,妨碍机载设备的正常工作,甚至影响飞行安全。因此,解决好机载设备的电磁兼容问题是一项非常重要而且十分必要的任务。

电磁兼容既是一门科学技术,也是一种工程方法。由于电磁环境的日益复杂,机载设备面临着越来越多的干扰,造成性能降低、功能丧失的概率显著增加。机载设备电磁兼容设计与实施是实现机载设备或系统规定功能、使系统效能得以充分发挥的重要保证。

全书共分8章。第1章是机载设备电磁兼容概论,涉及电磁兼容的基本概念、飞机电磁干扰源、电磁兼容管理和电磁兼容标准等知识;第2章在介绍机载设备电磁兼容控制策略的基础上,介绍了滤波、屏蔽、接地和搭接等四项电磁兼容重要技术;第3章介绍机载设备电磁兼容设计与实施过程中的电磁兼容性预测技术;第4章介绍与机载设备电磁兼容性密切相关的电路设计、印制板设计、内部布线设计、机壳屏蔽设计和滤波连接器的使用问题;第5章介绍机载设备机上改装的电磁兼容设计问题;第6章介绍机载设备电磁兼容的测量与故障诊断方法;第7章和第8章结合作者的科研成果,分别介绍短波电台与无线电高度表、某机载系统与超短波电台的电磁兼容实施实例。

本书是作者结合多年来关于机载设备设计、改装、电磁兼容和维护的实践经验、研究成果以及参考文献编写而成的。目的在于保证机载设备的电磁兼容性,充分发挥机载设备的战术技术性能,提高机载设备全寿命期的可靠性,以满足机载设备快速更新换代的现实,适应现代化建设的需要。

田建学、魏俊淦、赵波、张然、顾德均等同志参加了本书编写工作。在编写过程中,顾德均给予了大力支持和鼓励,并对全书进行了仔细审阅,提供了具体指导。海军装备研究院航空所高军、规范所刘正伟以及海军航空仪器计量站陈松等对书稿进行了审阅,提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

希望本书能够对部队、科研院所从事机载设备设计与实施工作的人员有所指导和帮助。由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝赐教。

编 著 者

2010年4月于青岛

目 录

第 1 章 机载设备电磁兼容概论	1
1.1 电磁兼容基本概念	1
1.1.1 电磁兼容的名词术语	1
1.1.2 电磁干扰源分类	3
1.1.3 电磁干扰及其危害	4
1.1.4 电磁兼容常用单位及换算	7
1.2 飞机系统的电磁干扰源	10
1.2.1 系统内干扰源	10
1.2.2 系统外干扰源	11
1.3 机载设备可靠性与电磁兼容性	12
1.3.1 质量与可靠性	12
1.3.2 电磁兼容性与可靠性	13
1.4 机载设备电磁兼容设计研究内容	14
1.5 机载设备电磁兼容基本方法	15
1.5.1 实施电磁兼容的方法	15
1.5.2 电磁兼容设计基本方法	16
1.6 机载设备电磁兼容管理	16
1.7 电磁兼容标准	19
1.7.1 主要电磁兼容组织	19
1.7.2 电磁兼容标准分类	20
1.7.3 我国军用电磁兼容标准	20
第 2 章 电磁兼容控制策略与技术	22
2.1 电磁兼容控制策略	22
2.1.1 空间分离	23
2.1.2 时间分隔	23
2.1.3 频率划分与管制	24
2.1.4 电气隔离	25
2.2 电磁兼容控制技术	26
2.2.1 滤波技术	26
2.2.2 屏蔽技术	33
2.2.3 接地技术	37
2.2.4 接地技术应用	40

2.2.5	搭接技术	44
第3章	电磁兼容性预测技术	47
3.1	电磁兼容性预测主要作用	47
3.2	电磁兼容性预测原理	48
3.2.1	电磁兼容性预测的总体要求	48
3.2.2	电磁兼容性预测的基本方程	48
3.2.3	电磁兼容性预测的基本方法	49
3.3	电磁兼容性预测数学模型	50
3.3.1	干扰源模型	50
3.3.2	传输耦合模型	53
3.3.3	敏感器模型	53
3.4	电磁兼容性预测分析步骤	54
3.5	电磁兼容性预测流程	56
3.6	电磁兼容性预测软件介绍	58
第4章	机载设备电磁兼容性设计	60
4.1	电路设计	60
4.1.1	常用元器件选择	60
4.1.2	常用电路设计	66
4.2	印制电路板设计	70
4.2.1	印制电路板电磁兼容设计要求	70
4.2.2	布局设计	70
4.2.3	布线设计	71
4.3	设备内部布线设计	75
4.3.1	设备内部布线原则	75
4.3.2	设备内部布线要求与措施	76
4.4	设备机壳屏蔽设计	77
4.5	滤波电连接器使用	80
4.6	软件设计	83
第5章	机载设备改装电磁兼容设计	85
5.1	飞机系统电磁兼容性要求	85
5.2	飞机天线电磁兼容分析与设计	88
5.2.1	飞机天线电磁兼容主要耦合形式与消除干扰办法	88
5.2.2	飞机天线布局分析	90
5.2.3	飞机天线电磁兼容分析与设计	93
5.3	机载设备改装电磁兼容要求	94
5.3.1	机载设备改装布线电磁兼容要求	94
5.3.2	机载设备改装电搭接电磁兼容要求	96
5.3.3	机载设备改装屏蔽电磁兼容要求	102
5.3.4	机载设备改装设备布局电磁兼容要求	103

第6章 电磁兼容测量与故障诊断	105
6.1 电磁兼容测量	105
6.1.1 电磁兼容测量的一般过程	105
6.1.2 电磁兼容测量环境	106
6.1.3 电磁兼容测量主要仪器和设备	109
6.1.4 电磁兼容测量基本方法	113
6.2 电磁兼容故障诊断基础	116
6.2.1 电磁兼容故障诊断思路	117
6.2.2 电磁兼容故障诊断前期准备工作	117
6.3 电磁兼容故障诊断方法	118
6.3.1 电磁兼容故障诊断测试	118
6.3.2 电磁发射诊断与处理	120
6.3.3 电磁抗扰度诊断	121
6.4 电磁兼容故障诊断流程	122
6.5 常见电磁干扰的解决方法	124
6.5.1 辐射发射超标	124
6.5.2 传导发射超标	125
第7章 短波电台干扰无线电高度表电磁兼容实施	127
7.1 短波电台干扰无线电高度表现象与严重性	127
7.2 短波电台干扰无线电高度表试验	128
7.2.1 短波电台干扰无线电高度表修理厂试验	128
7.2.2 短波电台干扰无线电高度表机上试验	129
7.2.3 短波电台干扰无线电高度表电磁兼容研究检测中心试验	130
7.3 短波电台干扰无线电高度表消除措施试验	132
7.3.1 屏蔽和接地措施试验	132
7.3.2 滤波措施试验	134
7.4 短波电台干扰无线电高度表分析	140
7.4.1 无线电高度表工作原理介绍	140
7.4.2 短波电台干扰无线电高度表分析	140
7.5 短波电台干扰无线电高度表消除实施	141
7.5.1 准备工作	142
7.5.2 机上改进	144
第8章 某机载系统与超短波电台电磁兼容实施	147
8.1 某机载系统干扰超短波电台现象及严重性	147
8.2 某机载系统干扰超短波电台试验	148
8.2.1 机上试验	148
8.2.2 某机载系统吊箱电磁干扰测试	149
8.3 某机载系统干扰超短波电台分析	153
8.4 某机载系统干扰超短波电台改进措施试验	155

8.4.1 某机载系统吊箱采取屏蔽措施试验	155
8.4.2 某机载系统更换吊箱电缆试验	159
8.4.3 某机载系统晶振信号处理部件改进试验	159
8.5 某机载系统干扰超短波电台机上改进	169
8.5.1 晶振信号处理部件试验	169
8.5.2 机上改进	170
参考文献	174

第 1 章 机载设备电磁兼容概论

1.1 电磁兼容基本概念

1.1.1 电磁兼容的名词术语

1. 电磁兼容的定义

电磁兼容一词,源于英语 Electromagnetic Compatibility(EMC),直译应为电磁兼容性。国家标准 GB/T 4365—1995 制定工作组经过认真讨论达成如下共识:Electromagnetic Compatibility 一词,对一门学科、一个领域、一个技术范围来讲,应译为“电磁兼容”,以便反映整个领域,而不仅仅是一项技术指标;对于设备或系统的性能参数来说,则应译为“电磁兼容性”。

电磁兼容是指电气、电子设备或系统的一种工作状态,在这种状态下,它们不会因为内部或彼此间存在的电磁干扰而影响其正常工作。

电磁兼容性则是指电气、电子设备或系统在预期的电磁环境中,按设计要求正常工作的能力,它是电气、电子设备或系统的一种重要的技术性能。一个系统的电磁兼容性,实际上体现在两个方面:一方面,设备或系统必须以整体电磁环境为依据,要求每个用电设备不产生超过一定限度的电磁发射,即它不会产生使处于同一电磁环境中的其它设备或系统出现超过规定限度的工作性能降低的电磁干扰;另一方面,又要求它具有一定的抵抗给定电磁干扰的能力,并且有一定的安全裕量,即它不会因受到处于同一电磁环境中的其它设备或系统发射的电磁干扰而产生不允许的工作性能降低。只有对每一设备或系统作这两方面的约束,才能保证系统达到完全电磁兼容。

国际上对电磁兼容虽有各种定义,但都体现了这两方面的要求。

国际电工技术委员会(IEC)对 EMC 的定义:电磁兼容是设备的一种能力,是指设备在其电磁环境中能完成它的功能,而不至于在其环境中产生不允许的干扰。

国际电气和电子工程师学会(IEEE)对 EMC 的定义:一个装置能在其所处的电磁环境中满意地工作,同时又不向该环境及同一环境中的其它装置排放超过允许范围的电磁扰动。

国家标准 GB/T 4365—1995《电磁兼容术语》中对 EMC 的定义:设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力。这个定义基本上等同于 IEC 的定义。

我国军用标准 GJB 71—85《电磁干扰和电磁兼容名词术语》对 EMC 的定义:设备(分系统、系统)在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态,即该设备不会由于受

到处于同一电磁环境中的其它设备的电磁发射导致或遭受不允许的降低,它也不会使同一电磁环境中其它设备(分系统、系统)因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降低。

在以上的定义中,都涉及电磁环境这一概念。实际上,电磁环境是由空间、时间、频谱三个要素组成的。所有需要解决的电磁兼容问题都脱离不开这三个要素。

对于上述的几个定义,无论文字如何表达,都反映了这样一个基本事实:在共同的电磁环境中,任何设备、分系统、系统都应该不受干扰并且不干扰其它设备。

2. 电磁兼容常见术语

(1) 电磁环境 (electromagnetic environment): 存在于给定场所的所有电磁现象的总和。

(2) 电磁噪声 (electromagnetic noise): 一种明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合。电磁噪声通常是脉动的或随机的,也可能是周期性的。

(3) 无用信号 (unwanted signal, undesired signal): 可能损害有用信号接收的信号。

(4) 电磁辐射 (Electromagnetic Radiation, EMR): 能量以电磁波形式由源发射到空间的现象;能量以电磁波形式在空间传播。

(5) 电磁骚扰 (Electromagnetic Disturbance, EMD): 任何可能引起设备或系统性能降低或者对生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可以是电磁噪声、无用信号或有用信号,也可能是传播媒介自身的变化。

(6) 电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI): 由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。电磁骚扰和电磁干扰这两个术语经常容易混淆,其实它们是同一事物的两个不同侧面,前者是指电磁能量的发射过程,后者则强调电磁骚扰造成的结果。

(7) 系统内干扰 (intra - system interference): 系统中出现的由本系统内部电磁骚扰引起的电磁干扰。

(8) 系统间干扰 (inter - system interference): 由其它系统产生的电磁骚扰对一个系统造成的电磁干扰。

(9) 自然噪声 (natural noise): 来源于自然现象而非人工装置产生的电磁噪声。

(10) 人为噪声 (man - made noise): 来源于人工装置的电磁噪声。

(11) 性能降低 (degradation of performance): 装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。

(12) 抗扰性 (immunity): 装置、设备或系统面临电磁干扰不降低运行性能的能力。

(13) 电磁敏感性 (electromagnetic susceptibility): 在存在电磁骚扰的情况下,装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。抗扰性与电磁敏感性是同一性能的正反两方面的不同说法,敏感性高则意味着抗扰性低。

(14) 发射电平 (emission level): 用规定方法测得的由特定装置、设备或系统发射的某给定电磁骚扰电平。

(15) 基波分量 (fundamental component): 一个周期量的傅里叶级数的一次分量。

(16) 谐波分量 (harmonic component): 一个周期量的傅里叶级数中次数高于 1 的分量。

(17) 谐波次数(harmonic number):谐波频率与基波频率的整数比。

(18) 电源干扰(mains - borne disturbance):经由供电电源线传输到装置上的电磁干扰。

(19) 机壳辐射(cabinet radiation):由设备外壳产生的辐射,不包括所接天线或电缆产生的辐射。

(20) 耦合路径(coupling path):部分或全部电磁能量从规定源传输到另一电路或装置所经由的路径。

(21) 骚扰抑制(disturbance suppression):削弱或消除电磁骚扰的措施。

(22) 干扰抑制(interference suppression):削弱或消除电磁干扰的措施。

(23) 电磁屏蔽(electromagnetic screen):用导电材料减少交变电磁场向指定区域穿透的屏蔽。

1.1.2 电磁干扰源分类

一般来说电磁干扰源分为两大类:自然干扰源和人为干扰源,如图 1.1 所示。

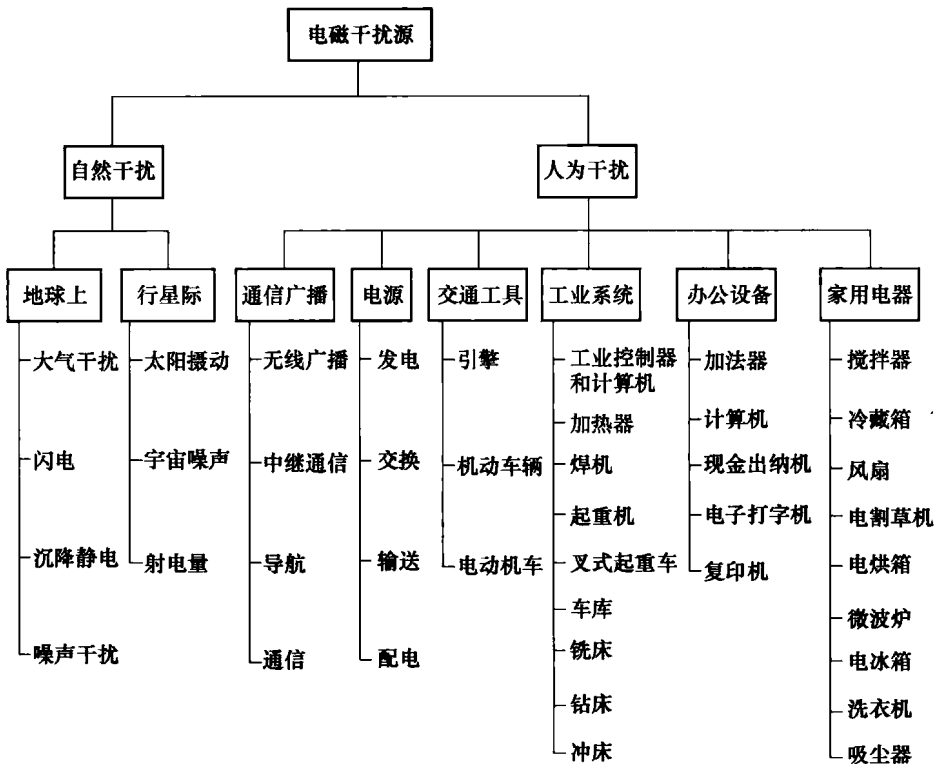


图 1.1 电磁干扰源分类

自然干扰源主要来源于大气层的天电噪声、地球外层空间的宇宙噪声。它们既是地球电磁环境基本要素的组成部分,同时又是对无线电通信和空间技术造成干扰的干扰源。例如,自然噪声会对人造卫星和宇宙飞船的运行产生干扰,也会对弹道导弹运载火箭的发

射产生干扰。

人为干扰源是由机电或其它人工装置产生的电磁能量干扰,其中一部分是专门用来发射电磁能量的装置,如广播、电视、通信、雷达和导航等无线电设备,称为有意发射干扰源。另一部分是在完成自身功能的同时附带产生电磁能量的发射,如交通车辆、架空输电线、照明器具、电动机械、家用电器以及工业、医用射频设备等,因此这部分又称为无意发射的干扰源。

干扰源的分类方法很多,除了上述分类方法外,从电磁干扰属性来分,可以分为功能性干扰源和非功能性干扰源。功能性干扰源是指设备实现功能过程中造成对其它设备的直接干扰;非功能性干扰源是指用电装置在实现自身功能的同时伴随产生或附加产生的副作用,如开关闭合或切断产生的电弧放电干扰。

从电磁干扰信号的频谱宽度来分,可以分为宽带干扰源和窄带干扰源。它们是相对于指定感受器的带宽大或小来加以区分的。干扰信号的带宽大于指定感受器带宽的称为宽带干扰源,反之称为窄带干扰源。

从干扰信号的频率范围来分,可以把干扰源分为工频与音频干扰源(50Hz 及其谐波)、甚低频干扰源(10kHz 以下)、载频干扰源(10kHz ~ 300kHz)、射频及视频干扰源(300kHz ~ 300MHz)、微波干扰源(300MHz ~ 100GHz)。

1.1.3 电磁干扰及其危害

1. 电磁干扰三要素

理论和实验研究表明,不管复杂系统还是简单装置,任何一个电磁干扰的发生都必须具备以下三个基本条件。

(1) 电磁干扰源,是指产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统或自然现象。

(2) 耦合途径(或称耦合通道),是指把能量从干扰源耦合(或传输)到敏感设备上,并使该设备产生响应的媒介。

(3) 敏感设备(或称被干扰设备),是指对电磁干扰产生响应的设备。

所有的电磁干扰都是上述三个因素组合而产生的,这三个因素称为电磁干扰三要素,如图 1.2 所示。

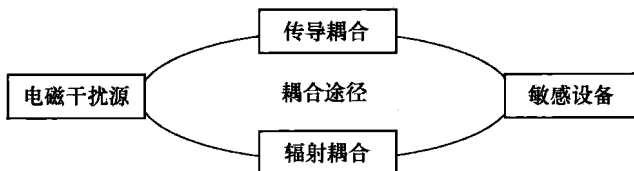


图 1.2 电磁干扰三要素示意图

由电磁干扰源发出的电磁能量,经过某种耦合途径传输至敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应,并产生干扰效果,这一作用过程及其效果,称为电磁干扰效应。

关于电磁干扰的耦合途径,一般分为两种方式:传导耦合方式和辐射耦合方式。电磁干扰源可通过其中的一种方式或同时通过两种方式,对敏感设备进行干扰。

敏感设备是被干扰对象的总称,它可以是一个很小的元件或者一个电路板组件,也可以是一个单独的用电设备,甚至可以是一个大系统。由于敏感设备是由不同电路原理、不同结构和不同元器件构成的具体用电设备,它们在同一电磁干扰作用下的响应程度差别很大。通常用敏感度来描述敏感设备对电磁干扰的响应程度。敏感度越高,表示对干扰作用响应的可能性越大,也可以说表明该设备抗电磁干扰的能力越差。在实际应用中,人们最关心的是敏感设备受到干扰作用后是否影响了它的工作性能,引起设备性能降低的最小干扰值称为敏感度门限值。不同敏感设备的敏感度门限值需要根据具体情况加以分析和实际测定。

在分析和设计机载设备的电磁兼容性,或解决出现的电磁干扰问题时,首先必须弄清干扰源、耦合途径和敏感设备三个基本要素,其中前两个要素尤其难于寻找和分析。在简单系统中,干扰源和耦合途径较易确定,干扰也就容易排除。但是,现代机载设备往往是一个复杂的系统,有时一个元器件既是干扰源,同时又被其它信号干扰;有时一个电路同时受几个干扰源的共同作用,难分主次;有时干扰途径来自几个渠道,既有传导耦合,又有辐射耦合。

为了达到机载设备的电磁兼容,必须从电磁干扰三个基本要素出发,运用技术和组织两方面措施。所谓技术措施,就是从分析电磁干扰源、耦合途径和敏感设备着手,采取有效的技术手段,抑制干扰源、消除或减弱干扰的耦合、降低敏感设备对干扰的响应或增加电磁敏感度门限;为了对人为干扰进行限制,并验证所采用技术措施的有效性,还必须采取组织措施,制订和遵循一套完整的标准和规范,进行合理的频谱分配,进行电磁兼容性管理。

2. 电磁干扰的危害

电磁辐射能量对人类活动有三大危害:①电磁干扰会破坏或降低机载设备的工作性能;②电磁干扰能量可能引起易燃易爆物的起火和爆炸,造成武器装备的失灵、储油罐起火爆炸,带来巨大经济损失和人身伤亡;③电磁干扰能量可对人体组织器官造成伤害,危及人类的身体健康。这里仅简单介绍电磁干扰对机载设备的危害。

电磁干扰有时会对机载设备产生严重的破坏作用,这是因为机载设备大量使用半导体器件。半导体器件的损伤阈值一般为 $10^{-5}\text{J}/\text{cm}^2 \sim 10^{-2}\text{J}/\text{cm}^2$,易损器件则降为 $0.1\mu\text{J}/\text{cm}^2 \sim 1\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。若考虑只引起瞬间失效或干扰而不损坏器件,则阈值还要降低 2 个 ~ 3 个数量级。对半导体器件的损坏效应归纳起来主要有:

高压击穿:当器件接受电磁能量后可转化为大电流,在高阻处也可转化为高电压,结果可引起节点、部件或回路间的电击穿,导致器件损坏或瞬时失效。例如,脉宽为 $0.1\mu\text{s}$ 、电流幅值为 1A 的电流脉冲,可在 1pF 的电容节点上产生 100kV 电压,该节点被击穿后还会产生数百千赫的衰减正弦振荡,辐射出电磁波。

器件烧毁或受瞬变干扰:除高压击穿外,器件因瞬变电压造成短路损坏的原因一般都归结于功率过大而烧毁,或 PN 结的电压过高而击穿,无论是集成电路、存储器,还是晶体管、二极管、晶闸管等,都是一样的。

浪涌冲击:对有金属屏蔽的机载设备,即使壳体外的微波能量不能直接辐射到设备内

部,但是在金属屏蔽壳体上感应的脉冲大电流,像浪涌一样在壳体里流动,壳体上的缝隙、孔洞、外露引线一旦将一部分浪涌电流引入壳体内的设备电路上,就足以使内部的敏感器件损坏。

影响信号正常传递:电磁干扰对低压电子电路也有较大影响。对模拟电路的影响随干扰强度的增大而增大,直接影响电路的工作性能和参数;对数字电路,电磁干扰容易导致信号电平的变化,从而影响数据传输的准确性。

3. 电磁干扰危害举例

美国航空无线电委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)曾在一份文件中提到,由于没有采取对电磁干扰的防护措施,一位旅客在飞机上使用调频收音机,使导航系统的指示偏离 10° 以上。因此,在国际上,对舰载、机载、星载及地面武器、弹药的电磁环境都有严格要求。目前,各航空公司都限制乘客使用移动电话和调频收音机等电子设备,以免导航系统受到干扰。

下面介绍几个由于电磁干扰造成国内外飞行器故障的例子。

1967年7月,美国某航空母舰为执行战斗任务而悬挂于飞机下的一枚57mm火箭正待命发射,不料被雷达扫描波束引爆,造成舰上134人丧生,毁坏飞机27架,经济损失高达7200万美元。

1969年11月14日上午,“土星”V-“阿波罗”12火箭/载人飞船发射后,飞行正常。起飞后36.5s,飞行高度为1920m时,火箭遭到雷击。起飞后52s,飞行高度为4300m时,火箭又遭到第二次雷击。这便是轰动一时的大型运载火箭/载人飞船在飞行中诱发雷击的事件。故障分析及实验研究的结果表明,此次事故是由于火箭及火箭发动机火焰所形成的导体(火箭及飞船共长100m,火焰折合导电长度200m)在飞行中使云层至地面之间及云层与云层之间人为地诱发了雷电所造成的。

1982年,在英阿马岛(福克兰群岛)海战中,某驱逐舰的通信设备与侦查雷达之间没有进行电磁兼容设计,为了实现远程通信只能关闭雷达,结果未能发现来袭的阿根廷飞机,而被其发射的“飞鱼”导弹击沉。

1991年英国劳达航空公司发生了触目惊心的空难,造成223人死亡。据有关部门分析,这次空难极有可能是机上有人使用笔记本电脑、移动电话等便携式电子设备,它释放的频率信号启动了飞机的反向推动器,致使机毁人亡。

1996年10月巴西TAM航空公司的一架“霍克”-100飞机也莫名其妙地坠毁了,机上人员全部遇难,甚至地面上的市民也有数名惨遭不幸,这是巴西历史上第二大空难事件。专家们调查事故原因后认为,机上有乘客使用移动电话极有可能是造成飞机坠毁的元凶。因为这次空难,巴西空军部民航局(DAC)研拟了一项关于严格限制旅客在飞机飞行时使用移动电话的法案。

1998年初,中国台湾华航一班机坠毁,参与调查的法国专家怀疑有人在飞机坠毁前打移动电话,导致飞机通信受到干扰,致使飞机与控制塔失去联络,最后坠毁。

我国也有类似的事情发生,1996年7月11日,由上海飞往广州的CZ3504航班的南航2556号飞机准备降落时,由于有四五名乘客使用移动电话致使飞机一度偏离正常航

道;也是在这一年,一架南航 2564 号飞机执行 CZ3502 航班从杭州飞回广州时,在着陆前 4min,发现飞机偏离正常航道 6°,据查当时也是有人在使用移动电话。这两起事例虽然没有酿成大祸,但让人想起来就后怕。

1.1.4 电磁兼容常用单位及换算

电磁兼容常用表征干扰发射和接收的电磁参数表示,如电压、电流、功率、场强等。

1. 电磁干扰场强的基本单位

电磁干扰场强有三种基本单位:电场强度(V/m)、磁场强度(A/m)和功率通量密度(W/m²)。

在一般情况下,电场强度、磁场强度和功率通量密度之间不能相互换算。只有在被测场为平面波情况下,三者之间才能相互换算,否则只能“等效换算”。所谓平面波,是指远离发射天线、在自由空间中传播的电磁波。根据电磁场理论,在平面波情况下,功率通量密度为

$$S = Z_0 H^2 = \frac{E^2}{Z_0} \quad (1.1)$$

在自由空间中,有

$$Z_0 = 120\pi \approx 377\Omega \quad (1.2)$$

代入式(1.1)后,可得

$$E = \sqrt{377S} \quad (1.3)$$

式中: E 单位为 V/cm; S 单位为 mW/cm²。

2. 分贝制单位及换算关系

电磁兼容领域中,电磁参数的取值范围非常大,为便于表达、叙述和运算,常采用对数单位——分贝(dB)。分贝表示两个参量的倍率关系,通常用来表示变化范围很大的数值关系。

1) 功率的分贝单位

两个功率比值的分贝定义为

$$P_{dB} = 10\lg \frac{P_1}{P_2} \quad (1.4)$$

式中: P_1 为某一功率; P_2 为比较的基准功率; P_1 和 P_2 应采用相同的单位。

应当指出,分贝仅为两个量的比值,是无量纲的。但是,随着分贝表示式中基准参考量的单位不同,分贝在形式上也带有某种量纲。如果以 $P_2 = 1W$ 作为基准功率,式(1.4)的分贝值就表示 P_1 功率相对于 1W 的倍率,用符号 dBW 表示,它可以用来作为功率的单位。功率单位 W 和 dBW 的关系表示为

$$P_{dBW} = 10\lg \frac{P_w}{1} = 10\lg P_w \quad (1.5)$$

式中: P_w 为以 W 作为单位的功率电平; P_{dBW} 为以 dBW 作为单位的功率电平。

如果式(1.4)中用 $P_2 = 1\text{mW}$ 作为基准功率,则 P_1 的分贝值就用符号 dBmW 表示。dBmW 和 W 的关系为

$$P_{\text{dBmW}} = 10\lg \frac{P_{\text{w}}}{10^{-3}} = 10\lg P_{\text{mW}} = 10\lg P_{\text{w}} + 30 \quad (1.6)$$

类似地,如果式(1.4)中以 $P_2 = 1\mu\text{W}$ 作为基准功率,就可以用 dB μ W 表示 P_1 的分贝值单位。功率用 W 作单位与用 dBW、dBmW、dB μ W 作单位的换算关系为

$$\begin{aligned} P_{\text{dBW}} &= 10\lg P_{\text{w}} \\ P_{\text{dBmW}} &= 10\lg P_{\text{mW}} = 10\lg \frac{P_{\text{w}}}{10^{-3}} = 10\lg P_{\text{w}} + 30 \\ P_{\text{dB}\mu\text{W}} &= 10\lg P_{\mu\text{W}} = 10\lg \frac{P_{\text{w}}}{10^{-6}} = 10\lg P_{\text{w}} + 60 = 10\lg P_{\text{mW}} + 30 \end{aligned} \quad (1.7)$$

在电磁兼容工程中,除了功率习惯用分贝单位表示,电压、电流和场强也常用分贝表示。

2) 电压的分贝单位

电压的分贝单位定义为

$$U_{\text{dB}} = 20\lg \frac{U_1}{U_2} \quad (1.8)$$

式中: U_2 为基准电压。分贝值表示 U_1 相对于 U_2 的比值的对数函数,反映 U_1 和 U_2 两个电压的倍率关系。

如果令 $U_2 = 1\text{V}$ 为基准,则得到 U_1 相对于 1V 的比值对数,用 dBV 为单位表示。在这样条件下,可以用 dBV 作单位表示电压 U_1 的数值。如果 U_2 用 1mV 作基准电压,则 U_1 电压分贝值的单位表示为 dBmV。如果 U_2 用 1 μ V 作基准电压,则 U_1 电压分贝值的单位表示为 dB μ V。

电压用 V 作单位和用 dBV、dBmV、dB μ V 作单位的换算关系为

$$\begin{aligned} U_{\text{dBV}} &= 20\lg U_{\text{v}} \\ U_{\text{dBmV}} &= 20\lg U_{\text{mV}} = 20\lg \frac{U_{\text{v}}}{10^{-3}} = 20\lg U_{\text{v}} + 60 \\ U_{\text{dB}\mu\text{V}} &= 20\lg U_{\mu\text{V}} = 20\lg \frac{U_{\text{v}}}{10^{-6}} = 20\lg U_{\text{v}} + 120 = 20\lg U_{\text{mV}} + 60 \end{aligned} \quad (1.9)$$

3) 电流的分贝单位

电流的分贝单位定义为

$$I_{\text{dB}} = 20\lg \frac{I_1}{I_2} \quad (1.10)$$

当电流 I_2 的单位为 1A、1mA、1 μ A, I_1 可分别用 dBA、dBmA 和 dB μ A 作为单位表示。电流用 A 作单位和用 dBA、dBmA、dB μ A 作单位的换算关系为

$$I_{\text{dB}\Lambda} = 20\lg I_{\Lambda}$$

$$I_{\text{dBm}\Lambda} = 20\lg I_{\text{mA}} = 20\lg \frac{I_{\Lambda}}{10^{-3}} = 20\lg I_{\Lambda} + 60$$

$$I_{\text{dB}\mu\Lambda} = 20\lg I_{\mu\Lambda} = 20\lg \frac{I_{\Lambda}}{10^{-6}} = 20\lg I_{\Lambda} + 120 = 20\lg A_{\text{mA}} + 60 \quad (1.11)$$

4) 电场强度、磁场强度的分贝单位

电场强度(E)的单位为 V/m 、 mV/m 、 $\mu\text{V}/\text{m}$,对应的分贝单位分别为 dBV/m 、 dBmV/m 、 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。以 dBV/m 表示时,它是以 $1\text{V}/\text{m}$ 为基准的电场强度分贝数,即

$$E_{\text{dBV}/\text{m}} = 20\lg \frac{E_{\text{V}/\text{m}}}{1} = 20\lg E_{\text{V}/\text{m}} \quad (1.12)$$

因为 $1\text{V}/\text{m} = 10^3 \text{mV}/\text{m} = 10^6 \mu\text{V}/\text{m}$,所以存在 $1\text{V}/\text{m} = 0\text{dBV}/\text{m} = 60 \text{dBmV}/\text{m} = 120 \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。

磁场强度(H)的单位为 A/m 、 mA/m 、 $\mu\text{A}/\text{m}$,对应的分贝单位分别为 dBA/m 、 dBmA/m 、 $\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$ 。以 dBA/m 表示时,它是以 $1\text{A}/\text{m}$ 为基准的磁场强度分贝数,即

$$H_{\text{dBA}/\text{m}} = 20\lg \frac{H_{\text{A}/\text{m}}}{1} = 20\lg H_{\text{A}/\text{m}} \quad (1.13)$$

3. 分贝制单位的应用

从分贝的定义可以看出,分贝反映了两个数之间的比值,当两个数采用相同的单位时(如电压均用 V 或 mV)表示,则其比值的分贝值是不变的。因此,分贝值也常用于表示干扰被抑制的程度,分贝值越高,则干扰抑制效果越好。

1) 分贝制单位的应用场合

分贝制单位的使用有如下几种情况。

(1) 两点间相对大小。表示信号传输系统中任意两点间功率(或电压)的相对大小,或空间某两点电磁干扰场强的相对大小。

(2) 参考电平绝对值。在指定参考电平(电压或电场强度)时,可用分贝表示电压或电场强度的绝对值。此参考电平统称为零电平,如定义 $1\mu\text{V} = 0\text{dB}\mu\text{V}$ 。

需要指出的是, $\text{dB}\mu\text{V}$ 只对小电压使用较为方便,而对大电压则可采用 dBV ($1\text{V} = 0\text{dBV}$) 或 dBmV ($1\text{mV} = 0\text{dBmV}$)。另外,对于电压来说, 1mV 用 dB 表示时为 $60\text{dB}\mu\text{V}$,所以此时若说“ 60dB 电压”是不恰当的,确切的说法应是“ $60\text{dB}\mu\text{V}$ 电压”,因为 dB 是电压比,而不是电压值。

(3) 误差大小。用分贝表示电压或场强的误差大小。

2) 应用分贝制单位的注意事项

在电磁兼容工程中,引入分贝制单位后,可以表示变化范围很大的数值关系,使许多以 10 为底的乘幂的比值有简单明了的表示,其更大的优点是把乘除运算变为加减运算,大大方便了表达、叙述和运算,但是有些分贝制单位是不能直接加减的。例如, $40\text{dB}\mu\text{V} + 40\text{dB}\mu\text{V} \neq 80\text{dB}\mu\text{V}$,这是因为 $40\text{dB}\mu\text{V} = 100\mu\text{V}$, $40\text{dB}\mu\text{V} + 40\text{dB}\mu\text{V} = 200\mu\text{V}$,而 $200\mu\text{V}$ 用