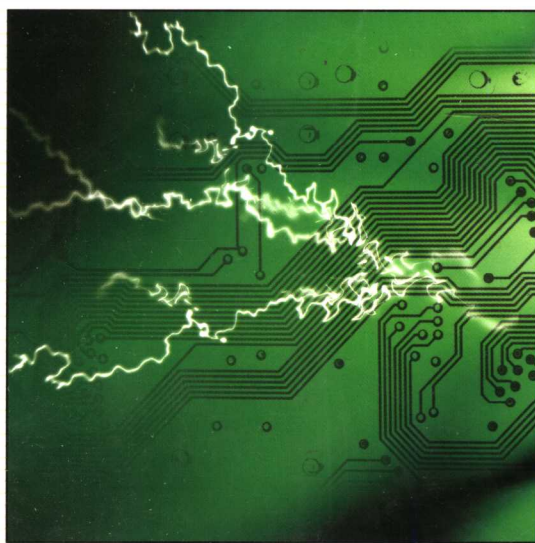


电磁屏蔽

理论与实践

杨士元 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电磁屏蔽理论与实践

杨士元 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电磁屏蔽理论与实践 / 杨士元编著. —北京:国防
工业出版社, 2006. 1

ISBN 7-118-04078-9

I. 电... II. 杨... III. 电磁屏蔽 IV. TN721.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 088491 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 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16½ 379 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 27.00 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

内 容 简 介

本书从电磁学的基本理论入手,介绍电磁屏蔽技术的发展、基本原理和有关参数的估计方法。所举的例子多数具有典型的实际应用价值,也是在电子系统设计和开发过程中经常遇到的难题。

本书力图以通俗易懂的方式,使用尽量少的数学知识,以电磁屏蔽的工艺设计为主线,叙述对一个电子系统作电磁屏蔽设计的基本思路以及有关参数和指标的评估方法。

本书适合于从事电子电路和电子系统设计的工程师及技术人员作专业参考书,以指导其设计实践;也可以作为理工科大专院校的本科生和研究生的学习参考书,是对所学教材和已有知识的一个补充。

前 言

随着无线通信技术的普及与应用、电子产品的日益更新，以及数字系统的工作频率日趋提高，电磁兼容性及电磁屏蔽技术越来越引起有关部门和技术人员的重视。尤其是我国已经进入了 WTO 国际市场，电磁兼容性已经成为我国的电子系统和电子产品进入国际大市场的必备条件之一，因此也引起了有关领导部门的高度重视。

作为电磁兼容性领域的主要内容——电磁屏蔽技术，虽然发展已有数十年，但一直只为极少数人员所掌握。现在电子产品的设计和生已经成一般公司的日常业务，但目前从事这项工作的技术人员对电磁屏蔽技术的知识知之甚少，或是因缺少知识而盲目试验，或是依靠长期的实践来逐渐积累经验，或有一定的理论知识但无从着手而难以解决实际问题。面对这样的现状，本书从介绍电磁学的基本理论开始，结合一些最常见的实例，说明如何应用这些理论来分析和估计有关的电磁兼容性参数和指标。因此本书的着眼点首先放在理论的应用技术和应用方式上，其次才介绍一些实用的屏蔽技术和工艺。

由于有关电磁学的理论比较难学和理解，同时需要的数学知识也比较多，所以进入这个领域的门槛相对比较高。本书力图使用尽量少的数学知识来叙述和估计有关的结论，但这样会不可避免地产生相当的误差或限制适用的范围。即使这样，仍然还有一些读者会感觉“入电磁屏蔽的门太难”，其实只要多下一点工夫，就能体会到其中的“奥妙”。

本书的主要内容是作者在香港理工大学进行科研合作期间完成的，其中参考了香港理工大学电子工程系郭培生先生为该系学生讲授有关课程时编写的讲稿。衷心感谢郭培生先生的帮助和香港理工大学为作者所作的周密的安排。

鉴于作者水平有限，最后成书的时间也很仓促，书中难免有欠妥乃至错误之处，恳请读者指正与赐教。

杨士元

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 电磁屏蔽技术的发展 | 1 |
| 1.1.1 电磁学的基本实验定律的建立..... | 1 |
| 1.1.2 电磁屏蔽技术的发展..... | 4 |
| 1.2 电磁兼容性的重要意义 | 7 |
| 1.3 电磁兼容和电磁屏蔽技术的主要研究内容..... | 10 |
| 1.3.1 电磁污染源 | 10 |
| 1.3.2 电磁干扰的传播途径 | 12 |
| 1.3.3 电磁污染的敏感器 | 14 |
| 1.3.4 电磁兼容性研究的其他内容 | 15 |
| 第 2 章 基本概念与数学基础 | 17 |
| 2.1 场的数学基础知识..... | 17 |
| 2.1.1 标量场与梯度 | 17 |
| 2.1.2 向量场与散度和旋度 | 19 |
| 2.1.3 有关场的一些基本计算公式 | 20 |
| 2.1.4 场的分类与分解 | 22 |
| 2.2 麦克斯韦方程组..... | 22 |
| 2.2.1 基本物理量 | 23 |
| 2.2.2 积分型麦克斯韦方程组 | 26 |
| 2.2.3 微分型麦克斯韦方程组 | 29 |
| 2.3 静电场与电容..... | 31 |
| 2.3.1 静电场的简单回顾 | 31 |
| 2.3.2 电场中的导体 | 34 |
| 2.3.3 电容与电容器 | 36 |
| 2.4 稳恒磁场与电感..... | 40 |
| 2.4.1 稳恒磁场 | 40 |
| 2.4.2 稳恒磁场中的导体 | 44 |
| 2.4.3 电感与互感 | 50 |
| 2.5 电磁波与平面波..... | 57 |
| 2.5.1 电磁波的传播及其性质 | 57 |

| | | |
|------------|-------------------------|------------|
| 2.5.2 | 近场与远场 | 61 |
| 2.5.3 | 高阻场与低阻场 | 64 |
| 2.5.4 | 电磁场中的能量原理 | 66 |
| 第3章 | 电磁波的传播与传输线 | 71 |
| 3.1 | 电磁波的发射及天线理论 | 71 |
| 3.1.1 | 天线的一般特性和主要技术指标 | 71 |
| 3.1.2 | 天线辐射的电磁场估计 | 74 |
| 3.1.3 | 源自电缆的共模型辐射场 | 78 |
| 3.2 | 电磁波在介质中的传播 | 79 |
| 3.2.1 | 电磁波在导体中的传播 | 80 |
| 3.2.2 | 电磁波在不同介质中的阻抗 | 86 |
| 3.2.3 | 电磁波在不同介质中的传播 | 94 |
| 3.3 | 传输线理论 | 105 |
| 3.3.1 | 传输线的物理模型 | 106 |
| 3.3.2 | 传输线的阻抗 | 108 |
| 3.3.3 | 传输线上信号的传送速度 | 116 |
| 3.3.4 | 传输线与平面波传输的比较 | 117 |
| 3.3.5 | 传输线上信号的耦合 | 119 |
| 第4章 | 屏蔽理论与实践 | 125 |
| 4.1 | 屏蔽的基本概念 | 125 |
| 4.1.1 | 屏蔽效果的度量 | 125 |
| 4.1.2 | 屏蔽的基本思想 | 126 |
| 4.2 | 稳恒场的屏蔽 | 127 |
| 4.2.1 | 稳恒电场的屏蔽 | 127 |
| 4.2.2 | 稳恒磁场的屏蔽 | 134 |
| 4.3 | 平面波电磁场的屏蔽 | 139 |
| 4.3.1 | 屏蔽分析的基本模型 | 139 |
| 4.3.2 | 近场的屏蔽 | 143 |
| 4.4 | 实际结构对屏蔽的影响 | 152 |
| 4.4.1 | 屏蔽层上的孔的影响 | 153 |
| 4.4.2 | 狭缝的影响及改进措施 | 158 |
| 4.4.3 | 电缆连接的注意事项 | 161 |
| 4.5 | 传输线的屏蔽 | 162 |
| 4.5.1 | 同轴电缆的屏蔽原理及效率分析 | 162 |
| 4.5.2 | 排线电缆的屏蔽 | 167 |
| 4.6 | 屏蔽实践的小结 | 173 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第 5 章 传导性干扰与 EMC 设计 | 175 |
| 5.1 无源场元件的 EMC 模型 | 175 |
| 5.1.1 导线(导体) | 175 |
| 5.1.2 电阻 | 177 |
| 5.1.3 电容 | 178 |
| 5.1.4 电感 | 180 |
| 5.1.5 变压器 | 182 |
| 5.2 辐射型的交叉干扰及抑制方法 | 185 |
| 5.2.1 电感耦合方式 | 186 |
| 5.2.2 电容耦合方式 | 190 |
| 5.2.3 噪声辐射源 | 191 |
| 5.3 公共阻抗上的交叉干扰 | 194 |
| 5.3.1 公共阻抗的种类 | 194 |
| 5.3.2 电源公共阻抗上的交叉干扰及抑制方法 | 197 |
| 5.3.3 长线上高频信号的影响 | 202 |
| 5.4 数字系统中的辐射干扰及抑制 | 206 |
| 5.4.1 数字系统中的 EMC 问题 | 206 |
| 5.4.2 时钟电路的设计 | 207 |
| 5.4.3 分布参数的影响 | 209 |
| 5.5 公共主电源上的传导干扰及抑制 | 213 |
| 5.5.1 传导发射源及路径 | 213 |
| 5.5.2 EMC 滤波器的原理和作用 | 214 |
| 5.5.3 开关电源的传导发射及抑制 | 217 |
| 5.6 静电放电干扰及抑制 | 221 |
| 5.6.1 带静电人体的基本模型 | 222 |
| 5.6.2 ESD 的直接的耦合方式 | 222 |
| 5.6.3 ESD 的二次路径和效应 | 223 |
| 5.6.4 ESD 的电场耦合及抑制 | 225 |
| 5.6.5 ESD 的磁场耦合 | 227 |
| 5.6.6 ESD 在电缆耦合中的影响 | 228 |
| 5.7 电子设备中的接地 | 230 |
| 5.7.1 地线的种类 | 231 |
| 5.7.2 大地的接地 | 232 |
| 5.7.3 屏蔽地线 | 236 |
| 5.7.4 信号地的连接 | 240 |
| 附录 信号的傅里叶频谱分析 | 243 |
| 参考文献 | 255 |

第 1 章 概 述

1.1 电磁屏蔽技术的发展

任何一项科学技术的发展几乎都经历了两个不同的过程。首先是正向的研究发展,即分析现象、总结规律、形成理论、开拓应用领域、造福于人类。但是任何事物都有其对立面,一项技术的发展和运用必然会产生其副作用,尤其是在市场经济的社会中,在利益的驱动下无限地扩大其应用范围和场合,从而又导致了对人类的伤害。此时必然会进入该项技术发展的另一个过程,即研究抑制因应用该项技术而产生的副作用的理论和运用,规范该项技术的应用范围和运用场合。随着该项技术的不断发展,这两个过程将同时进行,相辅相成,互相刺激和促进。其中电磁现象及其发展和运用的过程是最典型的一个例子,因此回顾一下这个发展过程,不仅对该项技术的进一步发展有益,而且对开拓和研究抗电磁干扰的理论和运用也是必要的。

1.1.1 电磁学的基本实验定律的建立

电磁学的一些基础定律,即对电磁现象及其规律的发现和确定,都是以实验方式来发现和确定的。因此在对电磁现象有了一些“猜想”之后,如何设计一个巧妙的实验系统/装置去验证就是至关重要的了。

1. 库仑定律的发现与验证

作为整个电磁场理论基础的库仑(Coulomb)定律

$$f = K \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.1.1)$$

是由法国物理学家库仑在 1777 年首先提出的,这个定律阐述了静止点电荷相互作用的规律,它确定了静电场的基本性质。

值得指出的一点是,库仑定律中的电荷 Q_1 和 Q_2 之间的作用力是否严格与距离 r 的平方成反比的理论是直接和光子的静止质量 m_r 是否为 0 密切相关的,也即是近代物理学的基石。因此近 200 多年来,科学家们设计了各种各样的实验,以期来验证库仑定律,这个过程是相当艰难的(如表 1.1 所示)。到 1971 年为止,静电力的平方反比律的精度提高了十几个数量级,从而使其成为当今物理学中最精确的实验定律之一。迄今为止的科学实验表明,库仑定律在点电荷之间的距离为 $10^{-13} \text{ cm} \sim 10^9 \text{ cm}$ 的范围内是严格成立的。

表 1.1 验证库仑定律的实验

| 年代 | 实验者 | 精度(δ) |
|------|-----------------|---------------------------------|
| 1772 | Cavendish(卡文迪什) | 2×10^{-2} |
| 1872 | Maxwell(麦克斯韦) | 5×10^{-5} |
| 1936 | Plimpton(普林顿) | 2×10^{-9} |
| | Lowton(劳顿) | |
| 1968 | Cochran(科克伦) | 9.2×10^{-12} |
| | Franken(弗兰肯) | |
| 1970 | Bartlett(巴特利特) | 1.3×10^{-13} |
| 1971 | Williams(威廉斯) | $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ |

2. 毕奥—萨伐尔定律和安培定律

1820年7月21日,丹麦物理学家奥斯特(Oersted)的实验开始揭示了电与磁这两种物理现象之间的密切关系。从此,电与磁不再是相互孤立和互不联系的,而是作为一个统一的电磁学学科出现。

奥斯特实验的重要意义在于指出了“电流周围生成磁效应”这个现象,但没有给出这两者之间的定量关系,而只给出了定性的解释。尽管如此,其意义还是十分重大的。

法国物理学家毕奥(Biot)和萨伐尔(Savart)于1820年10月30日报告的“弯折载流导线对磁极作用”的实验,揭示了电流对磁极的作用关系,并形成了毕奥定律

$$dH = K \cdot \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1.1.2)$$

即定性描述了电流 Idl 对在距离 r 处的单位磁极的作用力 dH 。

为进一步揭示电流对电流之间的电磁关系,法国物理学家安培在重复了毕奥实验的基础上,提出了分子电流形成磁效应的新学说,并于1820年9月18日和25日分别报告了电流致磁的右手螺旋定律以及基于两平行直导线电流相互吸引/排斥的作用关系的安培定律

$$dB = \frac{\mu_0 I_1 dl_1 \times r_{12}}{4\pi}$$

$$dF_{12} = I_2 dl_2 \times dB$$

安培定律的发现为电动机的发明奠定了理论基础。

3. 欧姆定律的建立

描述电路最基本的实验定律的欧姆(Ohm)定律揭示了电路的基本规律。它的数学表达式是重要的介质方程之一。欧姆定律现在应用很普遍,其数学表达式也极为简单,但在发现欧姆定律的年代,由于实验设备和测量仪器都非常原始,所以当时发现这个定律还是相当艰难的。

从1825年5月起,法国物理学家欧姆陆续做了大量实验,并做了仔细的分析,于1926年4月推导出了欧姆定律的初始形式

$$x = k \cdot s \cdot \frac{a}{l} = \frac{a}{R}$$

即在施加端电压为 a 时,通过长度为 l 、截面积为 s 、电导率为 k 的导线时的电流 x 的定量表达形式,即电阻

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

4. 法拉第电磁感应定律

电流对磁及电流与电流之间的关系相对容易发现,因为在“静态”时这些现象就比较明显,而磁与电的关系由于是存在于动态之中,因此该定律的发现颇费周折。从1920年发现电流的磁效应之后又经历了10多年,直至1931年8月29日,英国化学家和物理学家法拉第(Faraday)才在实验之中发现了电磁感应现象,其基本的概念是在磁通发生变化时,将产生感应电动势 e_{in} ,即

$$e_{in} = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \mathbf{B} \cdot \hat{n} ds \right)$$

且磁通 Ψ 的正方向与感应电动势 e_{in} 的正方向成右手螺旋关系。

正是法拉第电磁感应定律的发现,为发电机的发明提供了理论依据和基础。

5. 麦克斯韦电磁场理论

库仑定律、毕奥定律、安培定律、欧姆定律和法拉第定律的相继建立,表明电磁学的各种局部的规律均已发现,但它们彼此的联系似乎并不十分密切。英国物理学家麦克斯韦试图将这些定律(现象)用一组统一的公式来描述,他应用了电磁场与力学场的类比方式,继承了法拉第的电磁力线的概念,于1855年至1856年总结出了电磁学的6条定律

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \int \alpha \cdot dl \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \oint \mathbf{H} dl = \Sigma I \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ W = \oint \mathbf{J} \cdot \alpha dl \\ \mathbf{E}_{\text{涡旋}} = -\frac{\partial x}{\partial t} \end{array} \right.$$

然后,麦克斯韦于1861年至1862年又提出了位移电流的概念,最终形成了完整的麦克斯韦方程组

$$\text{其中} \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \end{array} \right.$$

这就将以往各个电磁学的定律统一归为简洁的5个基本方程之中,并大胆预言了电

磁波的存在:电磁波以横波方式传播,其传播速度等于光速。于是,实现了光波与电磁波之间的同一性,从而为电磁波的应用奠定了理论基础。

1865年,麦克斯韦又发表了《电磁场的动力学理论》一文,明确地以电磁场为研究对象,对以前的理论和定律作了修补,最终建立了描述电磁场的运动变化规律的完备方程组——麦克斯韦方程组,这也就是至今一直在使用的关于电磁学的基本描述和求解的依据。

6. 电磁学的继续发展

麦克斯韦的电磁理论主要是以“力线假说”为基础的数学表达式,它并不承认电荷和带电粒子以及电磁场是独立存在的客观实体,即从根本上忽略了电磁现象中的“源”的作用。为此,洛伦兹(Lorentz)在总结了赫兹(Hertz)和亥姆霍兹(Helmholtz)二位“源派”学者的基础上,在1892年发表的论文中提出了“电子论”,对麦克斯韦的电磁理论在概念上作了进一步的深化,其中最突出的是,由于将物质与“以太”的作用相分离,为确定电磁场的边界条件提供了必要的概念前提。

此外,麦克斯韦是从理论上预言了电磁波的存在,但并没有解释电磁波是怎样产生的,也从未打算用实验来证实电磁波的存在。他关心的只是电磁场的运动所应遵守的普遍法则,因此与电磁波的产生源是无关系的。直到1883年英国科学家斐茨杰拉德(Fitzgerald)从理论上计算出了电磁波辐射能量与线圈磁距和电流周期的关系。1886年赫兹用实验验证了该预言,从而为电磁波的实际应用奠定了基础并指明了方向。

最后,麦克斯韦考虑的电磁理论是在一个无穷大的空间里的有关电磁场运动规律的理论,但这个大空间是在一个绝对时空之中的,即空间和时间与物体的运动无关。但对电磁波的一种重要形式——光的一些重要现象,应用绝对时空观无法予以解释。爱因斯坦(Einstein)在洛伦兹电子论和洛伦兹时空变换的基础上,于1907年发表的论文《关于相对性原理和由此得出的结论》中提出了狭义相对论的两条基本原理:

(1) 相对性原理:在参考系没有作加速运动时,自然规律同参考系的运动状态无关。

(2) 光速不变原理:光在真空空间里总是以一确定的速度 c 传播,这个速度与光的发射体的运动状态无关。

应用相对论原理,否定了以往认为电磁传播依赖于电磁以太的观点,得出了电磁场量在不同惯性系统之间的洛伦兹变换公式,实现了电场力和磁场之间的完美统一,为研究电磁波在运动介质中的传播现象奠定了基础。至此,电磁理论的发展达到了完美成熟的阶段。

1.1.2 电磁屏蔽技术的发展

正是由于电磁学理论的不完善,电磁技术得到了广泛的应用,其中一些应用一直沿用至今,发明这些技术应用的不少科学家和继而成立的公司至今还为世人所称道。

1745年,荷兰莱顿的穆切布罗克(Musscherbroek)发明了莱顿瓶,它可以用来存储电荷,成为电容器的原始形式。

1752年,富兰克林(Franklin)做了著名的高空云层的风筝实验,导致1754年狄维施(Divish)实现了第1个用于防止雷击损坏的避雷针。

1792年,伏特(Valta)在研究蛙腿在电击下的抽动现象后,发明了第1个化学电池。

19世纪70年代,爱迪生(Edison)发明了白炽灯,一直沿用至今。

1839年,卡尔·雅可比(Karl jacobi)和西门子(Siemens)发明了电镀技术。

1825年,斯特金(Sturgeon)发明了电磁铁,为电的应用创造了条件。

1837年,莫尔斯(Morse)和惠斯通(Wheatstone)发明了电报机,从此电可以用来作信息传播的工具。

1876年,美国的贝尔(Bell)发明了电话,其收话机一直沿用至今,由爱迪生和休斯(Hughes)分别发明的炭式发话机和传声器也一直沿用至今。

1821年,纽曼(Neumann)制成了世界上第1台电动机。

1845年,纽曼在给出了感应电动势的基础上发明了世界上第1台发电机。

1866年,西门子发明了可供实用的反激发电机。

1888年,赫兹在用实验证实了麦克斯韦的理论之后,发明了振子天线。

1895年,俄国的波波夫(Попов)和意大利的马克尼(Marconi)分别建立了无线电信号的传播和竖直天线,马克尼在1901年第1次建立了横跨大西洋的无线电联系。

1904年,弗莱明(Fleming)发明了电子管。1906年福雷斯特(Forest)实现了电子管的应用技术,使电磁波的发送和接收变得轻而易举,从此无线电技术进入了完全实用的阶段。

1928年,美国通用电气公司生产出了世界上第1台电视机,从此大众开始享受到影视的无穷乐趣。

1954年,世界上第1台演播型的磁带录像机诞生,人们开始了个性化的影视生活。

1989年,瑞典爱立信公司推出了世界上第1款移动电话,至今已经风靡全球。

在计算机的发展进程中,有几个里程碑值得一提:

1931年,美国布什(V. Bush)研制成功世界上第1台为求解微分方程而设计的电子式模拟计算机。

1946年,美国宾夕法尼亚大学的莫克利(Mauchley)和埃克特(Eckert)研制成功世界上第1台由程序控制的电子计算机ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Calculator)。

1971年,美国Intel公司的霍夫博士研制成功世界上第1片单片微处理器Intel 4004,标志着微型计算机时代的到来。

这些电磁技术的实际应用,给人们的生活带来了极大的方便和乐趣,甚至改变了一些观念,同时促进了科学技术的进一步发展。与此同时,电磁技术也带来了各种各样的“污染”,有的干扰直接影响了电子设备的正常工作,有的“污染”直接影响了人体的健康和生命安全。因此对抗这种“污染”的技术和理论也伴随着电磁技术应用的开拓而不断发展。在1888年赫兹首创了无线电天线,第1次成功地将电磁波辐射到自由空间,同时又成功地将其接收下来,即用实验证实了电磁波的客观存在,对空间电磁干扰问题的研究也同时开始了。

抗电磁干扰不能只是单纯地排除或抑制,因为有些“干扰”本身就是要使用的信号,有

些干扰是不可完全抑制的,因此在 20 世纪 40 年代提出了电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility)的概念,即在从理论、技术和工艺上研究保证电气设备在其工作环境中正常工作能力的系统工程。其主要内容是:分析电磁干扰产生的原因和干扰的特性,了解干扰的传播途径及作用机理,给出抑制干扰的技术和工艺措施,制定相关的电磁兼容性的测试标准或规范,同时建立电磁兼容的试验和测试的体系等。

20 世纪 70 年代,电磁兼容技术已经引起实业界的格外重视,成为了一个非常活跃的学科领域,在国际上已有定期的较大规模的关于电磁兼容性讨论的学术会议,各种集电磁兼容性的技术和工艺于一体的设计也陆续问世。

到 20 世纪 80 年代,以美国、德国、日本、法国及俄罗斯等为首的经济发达国家在研究开发新型的屏蔽材料和新工艺,以及高精度的电磁干扰及电磁灵敏度自动测试系统等方面的研究及应用达到了很高的水平,电磁兼容性的设计和管理已经从军工产品推广到民用产品。

20 世纪 90 年代的主要研究内容转为电磁兼容性的预先分析评估、预先检验和预先测试,即研究和开发电磁兼容性的预测软件及系统,不仅节省了大量的时间和财力开销,同时也提高了电磁兼容性的品质。

尤其需要指出的一点是,在电磁兼容性技术的发展过程中,制定系统和产品的电磁兼容性的标准和规范一直是一个十分重要的内容。国际上先后成立了国家级和国际间的组织/协会专门从事该项工作,如德国的电气工程师协会,国际电工委员会(IEC),国际无线电干扰特别委员会(CISPR)等。1944 年德国电气工程师协会制定了世界上第 1 个电磁兼容性的标准 VDE0878,美国在 1945 年制定了美国军方最早的电磁兼容性标准 JAN-I-225。到目前为止,国际上有权威影响的制标组织有欧洲联盟(EU-European Union)的欧共体指令,国际电工委员会,国际无线电干扰特别委员会(CISPR)和第 77 技术委员会,国际标准化组织(ISO)和国际电信联盟(ITU)等。

电磁兼容的标准化的主要内容有:

- (1) 所有产品的辐射极限。
- (2) 基本 EMC(Electromagnetic Compatibility)标准。包括针对发射和抗干扰的测试和测量方法。
- (3) 普通 EMC 标准。其中规定了针对发射和抗干扰的基本实验装置、测试方法以及适用于不同环境的测试等级。
- (4) 产品的 EMC 标准。它是针对某一类产品制定的专项标准(包括发射和抗干扰两个方面)。

我国在电磁兼容性方面的研究起步较晚,一直到 20 世纪 80 年代才开始启动,到 2001 年加入 WTO 后形成了热点。从 1981 年我国颁布了第 1 个转为完整的航空工业标准 HB—5662—81《飞机设备电磁兼容性要求和测试方法》开始到目前为止,我国已经制定了数十个国家标准和军用标准。

在制定标准后的一个重要工作就是对产品和系统的达标论证。现在国际上对这种论证工作已经由一个行业、一个国家发展到一个地区或一个贸易联盟采取统一行动。1996 年 1 月,欧共体 12 个国家和欧洲自由贸易联盟的北欧 6 个国家共同宣布实行电磁兼容性许可证制度,即产品若没有这种许可证明就不允许进入欧洲市场。

1.2 电磁兼容性的重要意义

研究电磁兼容性的理论和方法,主要是抑制或消除由于广泛应用电磁现象而造成的不利影响。由于现在世界上已广泛应用电器设备以及大量无线通信设备,它在给人类带来了快乐和便利的同时,也给人类社会的发展带来很大的损害,人为的电磁污染问题已经成为一大公害,这不仅引起了国际上科技界的广泛关注,而且也引起了政府有关部门的高度重视。从1996年1月1日起,欧洲联盟十五国就制定并强制执行89/336/EEC(EMC)指令,即将电子产品的电磁兼容性标准/要求纳入到国家的技术法规之中,要求所有的电子产品和设备的电磁兼容性指标必须经过有关测试中心的检测并符合要求,然后加贴CE标志,这样才能在欧洲市场上销售,凡是没有CE标志的电子产品和设备均不得在欧洲市场上销售。目前在美国、加拿大、日本和澳大利亚等国也都采取了相应的对策,陆续出台了有关的技术法规和市场准入要求。

研究屏蔽和电磁兼容性的理论和工程实践主要有下述几个方面的重要意义。

1. 提高电子产品和设备的可靠性

表1.2列出了国内外在航空设备中需要开展的重点应用项目的重要度,这些应用项目的主要目的是提高装备的可靠性。由该表可以看出,其中权值最大(10分)的是可靠性模型,可靠性和可维修性的设计准则、元部件控制、环境应力筛选和电磁兼容性,由此可见电磁兼容性在一个设备的可靠性中占有非常重要的位置。此外,由于要完善一个电子设备的电磁兼容性能,相对其他工作项目而言难度最大,工作量也最大,因此它的作用显得尤为重要。

表 1.2 可靠性工程中项目的重要度

| 序号 | 工作项目 | 重要度权重 | |
|----|----------|-------|-----|
| | | 新机型 | 改进型 |
| 1 | 大纲计划 | 8 | 6 |
| 2 | 可靠性模型 | 10 | 10 |
| 3 | 可靠度分配 | 6 | 6 |
| 4 | 可靠性设计 | 6 | 4 |
| 5 | 热设计分析 | 8 | 4 |
| 6 | 元件降额使用设计 | 8 | 6 |
| 7 | 维修方案概念 | 4 | 2 |
| 8 | 维修性分析 | 8 | 4 |
| 9 | 维修性预计 | 6 | 2 |
| 10 | 保障性分析 | 8 | 2 |

(续)

| 序号 | 工作项目 | 重要度权重 | |
|----|----------|-------|-----|
| | | 新机型 | 改进型 |
| 11 | 元部件控制 | 10 | 10 |
| 12 | 可靠性设计准则 | 10 | 10 |
| 13 | FMECA 分析 | 10 | 10 |
| 14 | 关键产品控制 | 8 | 8 |
| 15 | 可测性分析与设计 | 8 | 4 |
| 16 | 软件可靠性 | 6 | 4 |
| 17 | 电磁兼容性 | 10 | 10 |
| 18 | 环境应力筛选 | 10 | 10 |
| 19 | 结构可靠性 | 8 | 8 |
| 20 | 储存寿命影响 | 6 | 6 |
| 21 | 设计评审 | 8 | 8 |
| 22 | 可靠度模型增长 | 8 | 10 |
| 23 | 可靠性验证 | 4 | 4 |

无论是系统和产品的电磁兼容性还是可靠性问题,都必须在该系统和产品的设计阶段就予以重视,并作为该系统和产品设计的一项重要指标来考虑,而且应始终贯彻在该系统和产品的研制、生产、试验、使用和维护的全过程中。只有这样,才能保证整个系统和产品的真正可靠,并且所付出的时间和财力的成本才能控制在预定的范围之内。

改善电磁兼容性对提高系统和产品的可靠性的影响有两个方面:

(1) 对系统和产品自身工作的影响,即由于电磁污染的存在,对该系统和产品正常工作的能力的影响。其中包括对来自空间的电磁污染、由电源窜入的干扰、雷击的破坏、自身不当的接地方式引入的干扰,以及由于系统和产品设计不合理导致自身内部各部件之间的相互干扰等。

(2) 对其他周围的系统和产品的影响,即由于该系统和产品在运行时产生的电磁干扰对周围其他系统和产品的工作的影响。这种电磁干扰可以通过电源、地线以及空间电磁场等途径产生不良的影响,造成其他设备无法正常工作或性能降低,例如:调频电源或者用可控硅控制的系统将会在邻近的电源线上产生较强的高次谐波,从而经电源线窜入旁边的用电设备之中;不良和不妥的接地方式将会在地线上形成共模的扰动信号,从而影响设备之间的正常工作;系统和设备中的高频信号(如计算机、变频电源等)源产生的高频电磁辐射扰动信号将通过空间传播,直接为旁边的设备所接收,从而造成周围设备的非正常工作。

在认识到电磁兼容问题对系统和设备的可靠性影响的重要性之后,必须在系统和设备的设计阶段就要予以重视,即要作为一个重要的设计指标来考虑。其中要考虑的主要因素有:系统和设备的可靠性模型;系统和设备各部件的可靠性指标的合理分配;寻找系统中最薄弱的环节及相应的对策(如考虑是否使用屏蔽的方式),各模块和部件自身为满足可靠性指标的优化设计以及相互之间影响的防护措施,各模块和部件和系统接地的方案,元器件降额使用的确定,局部温升的平衡等。

2. 防止对人体的危害

人体长时间生活在比较强的电磁环境中,由于电磁能量对人体器官产生化学的和物理的作用,将会对人体造成严重的伤害,最终将损害人体的健康。

人体皮肤是防御电磁波侵入的屏障,它具有吸收、反射和穿透电磁波3种作用,在不同的射频频率下,这3种作用有明显不同。在1GHz以下,射频的辐射能量中的50%~60%将以穿透形式侵入人体;在1GHz~3GHz频率范围内,将全部为皮肤及皮下的脂肪和肌肉所吸收,因而对人体危害最大;而在3GHz以上,射频辐射则只有部分为皮肤吸收,大部分却被反射,因此危害相对小得多。

从医学的角度看,电磁辐射频率在1GHz~3GHz范围内,辐射能量将对人体的细胞加热,增加血液的流动和致热,从而使人体感觉神经受到这种致热刺激后产生病理、生理和神经的反应,最后导致对人体的多种器官造成病变和损伤。其中最敏感和最易损伤的器官有:造成眼睛出现水肿,导致晶体混浊而形成白内障,甚至可以造成失明。大脑的过热将导致大脑功能衰退以致产生病变。男性睾丸的过热将导致暂时或永久性的不育症。神经系统在高强度射频作用下,将刺激神经末梢和中枢神经系统,导致反应迟钝和疼痛以致痉挛。强烈的微波刺激还可导致血液的白细胞和红细胞的锐减,损害人体骨骼的生成,破坏人体骨髓的再生能力。

人体受电磁污染和造成影响的程度,大致与3个因素有关:一是微波的特性,即微波的频率和强度;二是微波照射的时间长短;三是人体自身采取的防护措施和被侵蚀的身体部位。因此长期处于高强微波污染环境工作的人员必须定期检查,以免得上“职业病”。

3. 防止灾害和事故,提高安全性

由电磁污染造成的灾害和事故主要是由静电放电效应造成的。静电主要源自物体的摩擦生电,导致大量的电荷积累在物体表面,尤其是在该物体的尖端部位则形成很高的场强而导致很高的电压放电。这种静电虽然能量不大,但往往也可对一些仪表仪器中的器件造成损伤,甚至对人体造成伤害或引爆燃料和弹药,从而间接地酿成事故。

这种摩擦生电的方式往往是不易被人发现的。例如在飞机上,有蒙皮跟空中诸如雨、雪、尘埃以及发动机排出的废气类的物质之间的摩擦,液压系统中高速流动的液体与其所流动的管道壁之间的摩擦,驾驶员身体跟衣物之间的摩擦。此外,同轴电缆由于弯曲和振动摩擦导致其表面的聚乙烯材料的带电。在日常生活和工作中,织物的摩擦导致人体带电,在印刷和复印过程中纸张的摩擦导致纸张带电而相互排斥等,这些都是常见的例子。

4. 提高系统的安全性

当前计算机及其相关设备作为信息和文字的处理系统已经广泛应用于军事、银行和各机要部门。这些单位处理的信息和数据都具有很高的机密性,为保证其安全性,一般都