

《电磁兼容理论与应用技术丛书》

电磁兼容设计

白同云 吕晓德 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

前 言

20世纪，人类取得了辉煌的科技成就。从量子理论、相对论的创立、脱氧核糖核酸双螺旋结构的发现、信息科学的诞生，到人类基因组序列“工作框架图”的绘就，世界科技发生了深刻的革命，社会生产力极大提高。可以预计，21世纪科学技术的进一步发展，特别是信息技术和生命科学的不断突破，将对世界政治、经济、文化生活产生更加深刻的影响。本世纪初，数字化将成为信息技术发展的新动力，集成电路将进入集成系统的新阶段，密集波分复用通信系统的传输能力将极大提高，个人移动通信、因特网的技术和能力也将成倍提高。远程教育、远程医疗、电子商务、电子邮件、虚拟现实的发展，将使人们的生产、学习和生活方式发生深刻的变化。

电磁兼容学是一门尖端的综合性学科。目前人类取得的科技成就和享受到的、高科技带来的深刻变化，是同人类几十年来在电磁兼容方面所进行的努力密不可分的。与此同时，由于电能的应用越来越广泛，许多电磁干扰问题仍在困扰着人们的生产和生活，电磁兼容的重要性将越来越得到重视。工业产品的电磁兼容设计就是治理电磁环境、实现可持续发展的必要手段。

近年来，我国有关的科技工作者，在电磁兼容设计方面进行了大量卓有成效的工作，取得了显著的成果。本书作为“电磁兼容理论与应用技术丛书”的一个分册，力求概括地反映电磁兼容设计的全貌。

本书共 10章。第 1章和第 2章介绍电磁兼容设计的基本概念

和设计的基础；第 猿章至第 苑章介绍分层与综合的设计方法，按照在电磁兼容设计中的重要性，依次阐明有源器件的选择和印制电路板设计、地线设计、屏蔽设计、滤波设计以及瞬态骚扰的抑制等；第 愿章介绍电磁兼容预测中的主要算法，重要针对场的方法，包括低频类、高频类算法；第 怨章则侧重电磁兼容预测的应用：在介绍预测步骤等基本问题的基础上，就辐射骚扰、传导骚扰和线间串扰的典型问题进行预测分析及控制讨论；最后介绍了几种应用软件，供工作中参考。

本书的撰写是在以北京邮电大学高攸纲教授为主编的“电磁兼容理论与应用技术丛书”编委会和北京邮电大学出版社李杰社长的统一指导下进行的，他们给予了作者许多热情的帮助与支持，特表示衷心的感谢！

本书的第 员章第 员源节至 员源节，第 圆章至第 苑章由白同云撰写，第 员章 员缘节、第 愿章和第 怨章由吕晓德撰写，最后由白同云统稿成书。由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬希指正。

白同云 吕晓德
于中国科学院电子学研究所
圆园园年 员月

目 录

1

概 论

员	电磁兼容设计的目的	员
员	电磁兼容设计的基本内容	员
员	电磁兼容设计的效费比与方法	员
员	电磁兼容性管理	员
员	电磁兼容预测	员

2

电磁骚扰源与耦合途径 员

员	电磁环境	员
员	电磁骚扰的特性与分类	员
员	自然骚扰源与人为骚扰源	员
员	综合电磁环境	员
员	电磁骚扰的耦合途径	员

3

有源器件的选择和印制电路板设计

猿戮	有源器件敏感度特性和发射特性	猿圆
猿圆	表面安装技术(猿戮).....	猿缘
猿猿	在印制板级控制电磁发射和抗扰度	猿圆

4

地线设计

猿戮	接地系统	猿缘
猿圆	地线阻抗	猿猿
猿猿	接地要求	猿源
猿源	接地技术应用	猿缘
猿缘	地环路问题	猿缘
猿远	屏蔽电缆的接地	猿远

5

屏蔽设计

猿戮	屏蔽原理	猿圆
猿圆	孔缝屏蔽	猿苑
猿猿	电缆辐射及其抑制	猿缘

6

滤波设计

滤波器的构造	源
滤波器元件	源
电源线滤波器	源
耦合信号滤波器	源
铁氧体耦合抑制元件	源
宽频带抗电磁骚扰材料	源
几种实用的滤波器	源

7

瞬态骚扰的抑制

电快速瞬变脉冲群	源
雷击浪涌	源
静电放电产生的电磁骚扰	源
瞬变骚扰吸收器	源

8

电磁兼容预测中的主要算法

引言	源
场的方法	源
路的方法	源

电磁兼容预测应用

引言	.....	圆蒙
预测建模、预测方程及预测步骤	.....	圆蒙
传导骚扰预测	.....	圆施
感应骚扰预测	.....	圆源
辐射骚扰预测	.....	圆愿
电磁兼容预测软件	.....	圆苑

附录 搭接中的电化学腐蚀

参考书目与文献

1 概 论

随着现代科学技术的发展,电气及电子设备的数量及种类不断增加,使电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁骚扰,使各种设备正常运转,是一个急待解决的问题;另一方面,恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。电磁兼容学正是为解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴学科。

1.1 电磁兼容设计的目的

1.1.1 电磁骚扰及其危害

电磁骚扰发射(EMI)是人们早已发现的古老问题。1820年英国著名科学家希维赛德发表了《论干扰》的文章,这是研究骚扰问题最主要的早期文献。1831年法拉第发现电磁感应定律,指出变化的磁场在导线中将产生感应电动势。1864年麦克斯韦引入位移电流的概念,指出变化的电场将激发变化的磁场,并由此预言电磁波的存在。这种电磁场的相互激发并在空间传播,正是电磁骚扰存在的理论基础。1887年柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”,成员包括著名的赫姆霍兹、西门子等人。1888年赫兹用实验证明了电磁波的存在,同时该实验也指出了各种打火系统向空间发射电磁骚扰,从此开始了对电磁骚扰问题的实验研究。1892年英国邮电部门研究了通信骚扰问题,同期美国的《电子世界》杂志也刊登了电磁感应方面的论文。1903年英国

有关部门对民用无线电骚扰问题进行了分析,发现其中缘是电气设备引起的。

民用射频干扰的研究始于无线电广播。约从20世纪40年代开始,各国都相继开展了广播业务,由于接收质量受到环境噪声的骚扰,工程刊物上开始发表有关文章。1957年有关国际组织在巴黎举行了一次特别会议,研究如何处理国际性无线电骚扰问题。与会者普遍认为,为避免商品贸易和无线电业务中出现障碍,需要在无线电骚扰测试方法和限值方面保证有一定的统一性并制定国际标准。会议建议由国际电工委员会(IEC)和国际广播联盟(ITU)的国家委员会,并邀请有关国际组织,共同组织一个联合委员会。1958年12月15日至17日在巴黎举行了国际无线电干扰特别委员会(ITU-R)第一次正式会议,从此开始了对电磁骚扰及其控制技术的世界性的有组织的研究。

那么,究竟什么是电磁干扰(EMI)和电磁骚扰(EMS)呢?

电磁干扰是指电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。这里,电磁骚扰是指任何可能引起装置、设备或系统性能降低,或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。可见,电磁骚扰仅仅是客观存在的一种物理现象,而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。严格地说,只要把两个以上的元件置于同一环境中,工作时就会产生电磁干扰的后果。随着科学技术的发展,人们在生产及生活中使用的电气及电子设备的数量越来越多,这些设备工作的同时,往往要产生一些有用或无用的电磁能量,这些能量会影响其他设备或系统的工作,这就是电磁骚扰。在两个系统之间的骚扰,称为系统间骚扰;在系统内部各设备之间的骚扰称为系统内骚扰。有人将电磁骚扰的危害程度分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼的五个等级。那么,电磁骚扰

究竟有些什么危害呢？

首先，介绍几个国外航天系统的故障事例。

(员) 土星 V 阿波罗 11 号事件

1968年 7月 16日上午，土星 V 阿波罗 11 号火箭—载人飞船发射后，飞行正常。起飞后 猿猿秒飞行高度为 员忽园皂时，火箭遭到雷击。起飞后 缘缘秒飞行高度为 源忽园皂时，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。

故障分析及试验研究的结果表明，此次事故是由于火箭及其火箭发动机火焰所形成的导体（火箭与飞船共长 员园皂，火焰折合导电长度约 园园皂）在飞行中，使云层至地面之间及云层至云层之间人为地诱发了雷电造成的。

(圆) 丘比特导弹雷击事件

1965年秋，一系列的雷电使部署在意大利的美国丘比特导弹武器系统多次遭到严重的损坏。甚至系统中隔离较好、原以为与外界环境无关的元件也受到了严重的影响。

(猿) 民兵 I 导弹飞行故障

民兵 I 导弹的遥测试验弹多次发射成功后，1966年开始进行战斗弹状态的飞行试验。前两发弹均遭到失败。这两发弹的故障现象相似，都是在 I 级发动机机前炸毁的。一个高度为 苑忽皂，另一个为 园忽皂。在炸毁前，两发弹的制导计算机均受到脉冲干扰而失灵。经过分析，故障是由于导弹飞行到一定高度时，在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电，它产生的骚扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

(源) 大力神 III 悦运载火箭故障

1966年大力神 III 悦运载火箭的 悦 1 号火箭在起飞后 忽缘秒飞行高度 园忽皂时，制导计算机发生故障。悦 2 号火箭起飞后 苑远秒飞行高度为 员忽皂时，制导计算机也发生了故障。经过分析，故障原因是制导

计算机中采用了液体循环冷却方案，冷却液在外部带有钢丝编织网套的聚四氟乙烯软管内流动。此钢丝套软管是用经阳极化处理的铝支架分段固定的，由于金属网套的不少处因支架阳极化氧化层破裂而接地。但有几段未接地，当冷却液流动时，金属网套没有接地的部分与火箭地之间产生电压，当火箭飞行高度增加，气压下降到一定值时，此电压产生的火花放电使计算机发生了故障。

（缘）欧罗巴 II 火箭故障

欧罗巴 II 火箭的第一发（代号云鹏）于 1971 年 10 月 10 日发射。火箭起飞后，飞行高度约 1000 米，制导计算机发生故障，姿态失控。约 1 分钟后，火箭炸毁。故障分析与模拟试验的结果表明，火箭在主动段飞行中产生了静电荷。这些电荷逐渐积累并贮存于介质材料的表面。由于气动加热，介质材料温度升高，其电阻值相应减小。对于静电而言，介质材料便从绝缘体变为导体。这样，部分电荷便转移到相邻的未接地的金属体上。当飞行高度增加，气压下降到一定值时，即发生静电放电而引起计算机故障，从而导致飞行失败。

（远）侦察兵火箭飞行故障

1970 年，美国的侦察兵火箭发射后飞行正常，但在 II 级发动机点火后不久即炸毁。初步分析认为，由于指令自毁电路级间连线与 II 级点火电路共用同一分离插头，点火电路及指令自毁火工品电路是由同一电池供电，而且是共用负母线。当气压降低到一定值时，在级间分离插头的点火电路接点与自毁电路接点之间出现电弧放电，而且在热分离时，在插头护盖盖好之前，发动机火焰等离子体使电弧大为加速。这样形成的低电阻电离通道使 II 级自毁系统引爆而失败。

（苑）德尔它火箭事故

1970 年在肯尼迪角发射场，德尔它运载火箭的 III 级主发动机发生意外的点火事故，死三人。在塔尔萨城对德尔它火箭进

进行测试时,也发生过一起Ⅲ级 ~~载~~ 发动机意外点火事故。分析结果表明,在肯尼迪角发射场的事故是由于操作罩在第三级轨道观测卫星上的聚乙烯罩衣时,造成静电荷的重新分布,结果使漏电流经过发动机的一个零件达到点火电爆管的壳体而引起误爆。在塔尔萨城发生的事故是由于一个技术员戴着皮手套偶然磨擦发动机喷管的塑料隔板,使发动机点火电爆管引线上感应静电荷而引起。

(愿) 宇宙神导弹爆炸事件

一发宇宙神导弹在起飞后数秒即发生爆炸,并造成发射台严重损坏。这是因为接地汇流条与连接面之间连接件紧固不够而产生锈蚀,此锈蚀表面形成了非线性整流结(锈螺栓效应),从而产生了可使指令接收机收到虚假指令信号而引起爆炸。

(怨) 民兵 I 导弹系统故障

民兵 I 导弹系统按 ~~配~~ 军标进行测试时,出现了一些由于大的瞬态过程引起的系统问题。比较典型的问题是接至喷管控制装置的大的启动电流(约为 ~~员~~)产生了虚假状态显示。

(员) 土星 I 故障

在对土星 I ~~杂~~ 火箭进行发射前测试时,并未向火箭发出自毁指令,但自毁指令接收机却收到了自毁信号。这是由于对另外一个火箭发出的自毁信号与两个遥测通道的载频相混频,形成了与自毁指令接收机所需频率相同的信号。混频作用是由围绕火箭的金属框架与服务结构之间出现的“锈螺栓效应”造成的。

(员) 土星 I ~~杂~~ 级的骚扰

当土星 I ~~杂~~ 级进行自动发射程序测试时,在电缆网中出现了大的瞬态过程。此骚扰电平使检测工作难以正常进行。经研究发现,此骚扰是箭上发射机的射频能量经过解调及网络作用引起的。

(员) 其他骚扰问题

在运载火箭进行系统测试时,由于电源切换、技术状态变换、继电器或步进电磁元件动作时所引起的瞬态骚扰,会对制导计算机、稳定控制电子电路等敏感电路产生骚扰而使之不能正常工作。

其次,我们再介绍一些其他事例:

美国航空无线电委员会 砸烂曾在一份文件中提到,由于没有采取对电磁骚扰的防护措施,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 员以上。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。员年美国西北航空公司曾发表公告,限制乘客使用移动电话、调频收音机等,以免骚扰导航系统。

雷击引起的浪涌电压,属于高能电磁骚扰,具有很大的破坏力。员年至 员年我国南京、茂名、秦皇岛等地的油库以及武汉石化厂,均因遭受雷击引爆原油罐,造成惨剧。员年 远月 圆日傍晚,雷电击中北京国家气象局,造成一定的破坏和损失。因为雷击有直接雷击和感应雷击两种,避雷针只能局部地防护直接雷击,对感应雷击则无能为力,对感应雷击则需采用电磁兼容防护措施。

此外,长期受到电磁辐射还将影响人体健康并造成电磁污染。高频辐射大于一定限值时,会使人产生失眠、嗜睡等植物神经功能紊乱,以及脱发、白血球下降、视力模糊、晶状体混浊、心电图改变等症状。

由于电磁骚扰的频谱很宽,可以覆盖 园- 源频率范围,电磁污染已和水与空气受到的污染一样,正在引起人们极大的关注。

综上所述,可以看到,电磁骚扰有可能使设备或系统的工作性能偏离预期的指标或使工作性能出现不希望的偏差,即工作性能发生了“降级”。甚至还可能使设备或系统失灵,或导致寿命缩短,或使系统效能发生不允许的永久性下降,严重时,还能摧毁设备或系统。而且还将影响人体健康。若不引起重视,人类将受到不同

程度的惩罚,甚至为此付出巨大的代价。

为了保障电子设备和系统的正常工作,许多国家和国际组织都先后开展了控制和抑制电磁骚扰的研究。早期的研究还只是局限于抗电磁骚扰,只是被动地从防范或补救出发,不仅费用高,而且效果差。自从电磁兼容这个新概念出现以后,抗电磁骚扰技术才进入了一个新的时期,即从防范或补救的时期,进入到主动进行预测分析、主动进行设计、主动采取防护措施的新时期。

1.1 电磁兼容

电磁兼容(EMC),对于设备或系统的性能指标来说,直译为“电磁兼容性”,但作为一门学科来说,应该译为“电磁兼容”。美国IEEE学报IEEE Transactions on EMC于1970年改名为IEEE Transactions on EMC,若以此作为电磁兼容学科形成的标志,距今已逾30余年了。30多年来,电磁兼容的基础不断深化,内容不断发展,范围不断扩大,系统不断完善。

电磁兼容是研究在有限的空间、时间和频谱资源等条件下,各种用电设备(广义的还包括生物体)可以共存,并不致引起降级的一门科学。电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境下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骚扰的能力。它有以下三方面的含义:

(1) 电磁环境应是给定的或可预期的。

(2) 设备、分系统或系统不应产生超过标准或规范所规定的电磁骚扰发射(EMI)限值的要求;电磁骚扰发射就是从骚扰源向外发出电磁骚扰能量的现象,它是引起电磁骚扰的原因。

(3) 设备、分系统或系统应满足标准或规范所规定的电磁敏感性(EMS)限值或抗扰度(AE)限值的要求;电磁敏感性,即在存在电磁骚扰的情况下,设备、分系统或系统不能避免性能降低的能力;抗扰度即设备、分系统或系统面临电磁骚扰不降低运行性

能的能力。

员戮猿 电磁兼容设计的目的

怎样才能实现电磁兼容呢？这要从分析形成电磁干扰后果的基本要素出发。由电磁骚扰源发射的电磁能量，经过耦合途径传输到敏感设备，这个过程称为电磁干扰效应。因此，形成电磁干扰后果必须具备三个基本要素：

(员) 电磁骚扰源

任何形式的自然或电能装置所发射的电磁能量，能使共享同一环境的人或其它生物受到伤害，或使其他设备、分系统或系统发生电磁危害，导致性能降级或失效，即称为电磁骚扰源。

(圆) 耦合途径

耦合途径即传输电磁骚扰的通路或媒介。

(猿) 敏感设备(灾戮肆)

敏感设备是指当受到电磁骚扰源所发射的电磁能量的作用时，会受到伤害的人或其它生物，以及会发生电磁危害，导致性能降级或失效的器件、设备、分系统或系统。许多器件、设备、分系统或系统可以既是电磁骚扰源又是敏感设备。

为了实现电磁兼容，必须从上面三个基本要素出发，运用技术和组织两方面措施。所谓技术措施，就是从分析电磁骚扰源、耦合途径和敏感设备着手，采取有效的技术手段，抑制骚扰源、消除或减弱骚扰的耦合、降低敏感设备对骚扰的响应或增加电磁敏感性电平；为了对人为骚扰进行限制，并验证所采用的技术措施的有效性，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，控制与管理频谱的使用，依据频率、工作时间、天线方向性等规定工作方式，分析电磁环境并选择布置地域，进行电磁兼容性管理等。

电磁兼容性是电子设备或系统的主要性能之一，电磁兼容设

计是实现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。必须在设备或系统功能设计的同时,进行电磁兼容设计。

电磁兼容设计的目的是使所设计的电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容。其要求是使电子设备或系统满足相关标准的规定并具有两方面的能力:①能在预期的电磁环境中正常工作,无性能降低或故障;②对该电磁环境不是一个污染源。

为了实现电磁兼容,必须深入研究以下五个问题:

第一,对于电磁骚扰源的研究,包括电磁骚扰源的频域和时域特性,产生的机理以及抑制措施等的研究。

第二,对于电磁骚扰传播特性的研究,即研究电磁骚扰如何由骚扰源传播到敏感设备,包括对传导骚扰和辐射骚扰的研究。传导骚扰是指沿着导体传输的电磁骚扰,辐射骚扰即由器件、部件、连接线、电缆或天线,以及设备或系统辐射的电磁骚扰。

第三,对于敏感设备抗干扰能力的研究。这种抗干扰能力常以电磁敏感性或抗扰度表征,电磁敏感性电平越小,抗扰度越低,抗干扰能力越差。

第四,对于测量设备、测量方法与数据处理方法的研究。由于电磁骚扰十分复杂,测量与评价需要有许多特殊要求,例如测量接收机要有多种检波方式,多种测量带宽、大过载系数、严格的中频滤波特性等,还要求测量场地的传播特性与理论值符合得很好等,如何评价测量结果,也是个重点问题,需要应用概率论、数理统计等数学工具。

第五,对于系统内、系统间电磁兼容性的研究。系统内电磁兼容性是指在给定系统内部的分系统、设备及部件之间的电磁兼容性,而给定系统与它运行时所处的电磁环境,或其他系统之间的电磁兼容性即系统间电磁兼容性,这方面的研究需要广泛的理论知识与丰富的实践经验。

还应当指出,由于电磁兼容是抗电磁骚扰的扩展与延伸,它研