

航空和航天系统的 电磁干扰控制

[美] B·E·凯瑟 著
喻显荣 李玉兰 译

宇航出版社

航空和航天系统 的电磁干扰控制

[美] B·E·凯瑟 著
喻显荣 李玉兰 译

宇航出版社

内 容 简 介

本书提供了有关航空和航天系统中所用电子部件和分系统的电磁兼容性分析、设计和综合的基本知识以及技术进展情况。书中所阐述的基本原理及设计指南，对其它有关电磁干扰控制的领域亦可参考借鉴。

航空和航天系统的电磁干扰控制

[美] B·E·凯瑟 著

喻显荣 李玉兰 译

责任编辑：崔素言

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京通县建新印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：8.75 字数：202 千字

1989年9月第1版第1次印刷 印数：1—1000册

ISBN 7-80034-182-8/TN-008 定价：3.95元

译 序

人造卫星、宇宙飞船、运载火箭、导弹武器、喷气飞机都是当代科学技术成就的结晶。航空航天飞行器上包含许多电子设备分系统，这些分系统一般都与地面有关的通信、指挥、控制、遥测等分系统共同组成复杂而庞大的系统。航空航天系统的电子设备品种繁多，工作频率高、频带宽、结构密集，其中许多设备要经历地面、空中、甚至外层空间的恶劣电磁干扰环境。我们要求航空航天系统十分可靠而精确地工作，要解决的一个突出问题，就是要使整个系统中的各电子设备分系统内部，各分系统之间，与周围环境之间避免电磁干扰带来的相互影响，实现整个系统的电磁兼容，使系统在一定的干扰环境下，能够正常地工作，完成既定的任务。

解决电磁兼容性问题，采用的方法主要有三种：问题解决法、规范法和系统法。在电子技术发展的早期，电子设备的组成比较简单，电磁兼容技术研究工作开展较少，一般是在电子设备制成之后，在工厂和现场实验期间，出现了电磁干扰问题时，再有针对性地予以解决，这就称为问题解决法。用问题解决法来处理现代复杂的航空航天系统电磁兼容问题，将难免大量返工，甚至重新设计，费钱、费时、费工，实践证明这种方法行不通了。自50年代起，一些发达工业国家，在总结已有电磁兼容工作经验基础上，陆续编制一些电磁兼容标准规范，作为各电子设备或分系统实施电磁干扰控制的依据，它首先在军品中执行，继而扩展到民用产品，这就称为规范法。规范法至今仍然是实施电磁干扰控制行之有

效的方法。它的不足之处是可能引起过储量设计，谋求解决的问题并不一定是真正存在的问题，只是为了适应规范要求，因而有时很不经济。发展到70年代，在采用规范法的同时，逐渐用计算机对系统电磁兼容性作分析预测，对各种典型电子设备、分系统以至整个系统建立电磁干扰数学模型，以实施电磁干扰控制，这就称为系统法。系统法的优点是集中了电磁兼容和计算机辅助设计技术方面的一些成就，根据电磁兼容要求给出最佳的工程计算方法。系统法在一些先进技术国家已较成功地用于航空航天这类大系统的电磁干扰控制。应用系统法的趋势正在进一步发展。

《航空和航天系统的电磁干扰控制》一书的作者B. E. 凯瑟博士曾在美国航空航天技术部门工作多年，以后又从事电磁兼容教学和咨询工作。本书吸收了多年来国外航空航天系统电磁兼容技术工作的新成果，在介绍电磁兼容基本技术的基础上，对于航天器系统、飞机系统、再入系统、航空航天地面设备系统、地面支持设备系统的电磁干扰控制设计技术，都分别作了比较全面和概括的介绍。对于电磁干扰预测和分析、测试计划也作了重点介绍。这些内容极有价值。书中所介绍的原则，从系统分析一开始就予以采用，并在设计、制造与实验过程中不断地贯彻，对于实现航空航天系统的电磁兼容将收到很好的效果。也应看到，航空航天系统电磁干扰控制是综合性很强的工程实践工作，随着这方面工作的进展，书中所说的一些原则，将会得到进一步补充、修正和发展。本书可以作为设计指南使用，对于从事这一领域工作的工程技术人员和管理人员是一本难得的较好的参考书。

期望本书中译本的出版能对我国航空航天系统电磁兼容技术工作起到积极的推动作用，也能对其他类似大系统电磁

兼容技术工作起到一定的促进作用。全书第1、3、4、5、6、8章由喻显荣同志翻译，第2、7章由李玉兰同志翻译。译文对原文中的个别错误作了必要订正。由于航空航天系统电磁干扰控制涉及的技术面很广，译校者水平有限，译校时间较仓促，译文难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

李 波*

1988年3月

*本书译文校者

前 言

本书提供了有关航空和航天系统中所用电子部件和分系统的电磁兼容性分析、设计和综合的基本知识以及技术进展情况。编写的意图是将它用作设计指南以及在这一重要领域内的阅读参考书。

本书对于从事实际工作的工程师和管理人员将有所帮助，本书中所介绍的原则从系统和分系统设计的一开始就得到运用时尤其如此。书中在介绍电磁兼容基本原理的同时，着重强调了由于外层空间和再入环境的苛刻条件（如温度和压力）以及体积、质量和功率等具体限制而给航空和航天系统的电磁兼容问题带来的特殊性。除讨论航天器、飞机以及再入飞行器的专门环境以外，书中还阐述了航空和航天系统地面设备以及地面支持设备的电磁兼容问题。这类设备往往必须在周围电子设备和机动车辆发出的强电磁干扰下工作。

作者在工业界工作多年，近年来又从事教学和咨询，因而具备相当的知识水平来满足大多数从事实践的工程师的需要。为限制篇幅，书中略去了冗长的数学推导，主要介绍由数学模型导出的结论性公式在实际运用时受到的制约、基本的物理原理、设计思路、应用范围以及系统性能实例分析。为便于参照和理解，书中搜集了大量论述性材料。每章末尾附有参考文献目录，供有兴趣的读者深入学习。

第1章对航空和航天的电磁兼容问题作了综述。第2章全面、深入地讨论了航天器的电磁兼容。该章的内容对航天器和一般航空电子设备的设计者都会有用，因为这两个领域内

有许多问题是共同的。第3章讨论航空和航天地面设备。第4章讨论飞机电磁兼容所特有的问题，包括雷达、通信和导航系统、静电沉积、流光以及雷电防护。第5章叙述地面支持设备，着重讨论这类设备在使用时经常所处的传导和辐射环境。第6章针对再入系统的电磁干扰控制，讨论了苛刻的再入环境对主要分系统造成的影响。

最后，在第7章里叙述了航空和航天电子系统电磁干扰的预测和分析，在第8章里，讨论了航空和航天电磁干扰的测试程序。

电机工程理学博士 B·E·凯瑟

于弗吉尼亚州维也纳

1979年8月

目 录

第1章 航空和航天电磁兼容性问题综述	(1)
1.1 航天系统	(3)
1.2 航空和航天地面设备	(6)
1.3 飞机系统	(8)
1.4 地面支持设备	(9)
1.5 再入系统	(12)
1.6 电磁干扰的预测与分析	(13)
1.7 电磁干扰测试程序	(14)
1.8 参考文献	(16)
第2章 航天系统的电磁干扰控制	(17)
2.1 电磁干扰控制计划	(17)
2.2 航天系统的电磁兼容性规范	(20)
2.2.1 航天系统的电磁兼容性规范概述	(21)
2.2.2 AFSC设计手册 DH1-4.....	(22)
2.2.3 航天系统的电磁兼容性要求 MIL-STD-1541 (USAF)	(23)
2.2.4 航天器系统和分系统的磁场限制 NASA/GSFC X-325-67-70号文件.....	(27)
2.2.5 电磁兼容性规范MSFC-SPEC-279.....	(28)
2.2.6 电爆分系统的设计要求和试验方法 MIL-STD-1512(USAF)	(29)
2.3 确定规范极限	(30)
2.4 频率规划	(35)
2.4.1 地球产生的射频环境	(35)
2.4.2 空载设备的频率表	(38)

2.5 发射、耦合和灵敏度	(42)
2.5.1 空载设备产生的干扰	(42)
2.5.2 场耦合机理	(44)
2.5.2.1 集总参数表达式	(49)
2.5.2.2 分布参数表达式	(52)
2.5.3 接收机的灵敏度	(54)
2.6 航天器电源系统的瞬态	(55)
2.7 系统级设计	(55)
2.7.1 接地计划	(56)
2.7.1.1 接地的类型和它们的符号	(60)
2.7.1.2 直流电源的返回线接地	(60)
2.7.1.3 分系统和接口的接地	(61)
2.7.1.4 屏蔽端接和互连	(62)
2.7.1.5 同轴电缆	(64)
2.7.1.6 电缆套	(64)
2.7.2 导线分类和线束捆扎	(64)
2.7.3 航天器系统的屏蔽	(67)
2.7.3.1 射频密封和搭接	(68)
2.7.3.2 航天系统的屏蔽材料	(68)
2.7.4 航天器系统的滤波	(69)
2.7.5 潜电路	(70)
2.7.6 电磁干扰控制设计中的热设计	(70)
2.7.7 磁场限制	(71)
2.7.8 装配期间及装配后的静电问题	(73)
2.8 分系统级设计	(74)
2.8.1 元件设计技术	(74)
2.8.1.1 二极管	(74)
2.8.1.2 印刷电路板	(75)
2.8.1.3 数模转换器	(76)

2.8.1.4	继电器	(76)
2.8.1.5	固态开关	(77)
2.8.2	分系统设计考虑	(77)
2.8.2.1	指令和控制分系统	(77)
2.8.2.2	遥测系统	(80)
2.8.2.3	电源分系统	(81)
2.8.2.4	生命支持系统	(83)
2.8.2.5	通信系统	(83)
2.8.2.6	科学仪器	(86)
2.8.2.7	稳定和导航系统	(87)
2.8.2.8	火工装置	(88)
2.9	航天器的环境数据	(93)
2.10	发射后航天器的静电问题	(101)
2.10.1	近地静电	(101)
2.10.2	近地轨道静电	(103)
2.10.3	同步轨道静电	(104)
2.11	参考文献	(107)
第3章	航空和航天地面设备的电磁干扰控制	(111)
3.1	计算机接口	(112)
3.2	遥测系统	(116)
3.2.1	频分多路遥测	(116)
3.2.2	时分多路遥测	(121)
3.2.2.1	模拟时分多路	(121)
3.2.2.2	数字时分多路	(123)
3.2.3	遥测电路的电磁兼容性	(124)
3.3	检测与记录	(127)
3.3.1	设计综合	(127)
3.3.1.1	机柜地线	(128)
3.3.1.2	交流电源地线	(128)

3.3.1.3	直流电源地线	(128)
3.3.1.4	信号屏蔽接地	(129)
3.3.1.5	射频屏蔽接地	(129)
3.3.1.6	关键电路地线	(129)
3.3.1.7	系统考虑	(129)
3.3.2	干扰控制计划	(130)
3.3.3	特殊部件的抗干扰设计技术	(132)
3.3.3.1	按键开关	(132)
3.3.3.2	拨动开关	(132)
3.3.3.3	旋转开关	(133)
3.3.3.4	针形插座	(134)
3.3.3.5	面板指示灯	(134)
3.3.3.6	设备盖	(135)
3.3.3.7	光源屏蔽	(135)
3.4	靶场环境	(136)
3.4.1	干扰源的特性	(138)
3.4.2	干扰判据	(139)
3.4.3	干扰分析	(140)
3.4.4	干扰抑制技术	(141)
3.4.5	机动车辆干扰	(142)
3.5	参考文献	(143)
第4章 飞机系统的电磁干扰控制		(144)
4.1	频率规划	(145)
4.2	天线的安置	(148)
4.3	电源分配	(154)
4.3.1	由电源引起的干扰	(154)
4.3.2	负载引起的干扰	(161)
4.3.3	射频拾取和再辐射	(162)
4.4	雷达和警报系统	(164)

4.5	通信系统	(165)
4.6	导航系统	(166)
4.6.1	战术空军导航系统	(167)
4.6.2	定位导航指示仪	(170)
4.6.3	自动定向仪	(171)
4.6.4	空中交通管制雷达信标系统	(172)
4.6.5	距离测量设备	(172)
4.6.6	仪表低空进场系统	(173)
4.6.7	远距导航系统	(174)
4.6.8	微波着陆系统	(174)
4.6.9	甚高频全向信标	(175)
4.6.10	台卡导航系统	(176)
4.6.11	多区无线电信标	(176)
4.6.12	无线电高度计	(176)
4.7	武器系统	(177)
4.7.1	光学瞄准仪	(180)
4.7.2	敌我识别系统	(181)
4.8	控制器件(继电器和电磁线圈)	(182)
4.9	对静电沉积、流光和雷电的防护	(184)
4.9.1	静电放射器	(186)
4.9.2	雷电防护	(189)
4.9.2.1	雷达天线罩与座舱罩	(193)
4.9.2.2	避雷器	(194)
4.9.2.3	绝缘部件	(194)
4.9.2.4	机外吊舱	(194)
4.9.2.5	加油口盖	(194)
4.9.2.6	进入点	(195)
4.9.2.7	操纵面	(195)
4.9.2.8	感应电压	(196)

4.9.2.9	跨接线	(196)
4.9.2.10	复合材料	(197)
4.10	参考文献	(198)
第5章 地面支持设备的电磁干扰控制		(201)
5.1	地面支持设备环境	(203)
5.1.1	辐射环境	(203)
5.1.2	传导环境	(208)
5.2	地面支持设备的类型	(209)
5.2.1	导弹测试设备	(209)
5.2.2	武器发射测试装置	(210)
5.2.3	飞机测试装置	(211)
5.2.4	厂内测试设备	(212)
5.2.5	模拟系统	(212)
5.2.6	轴线校准设备	(212)
5.3	地面支持设备电磁兼容性指南	(213)
5.4	参考文献	(215)
第6章 再入系统的电磁干扰控制		(216)
6.1	热防护	(216)
6.2	元件对温度的敏感性	(217)
6.3	各分系统的电磁干扰抑制技术	(219)
6.3.1	导航与制导系统	(219)
6.3.2	遥测分系统	(220)
6.3.3	信标和跟踪系统	(220)
6.3.4	电源系统	(220)
6.3.5	击发和弹射电路	(221)
6.3.6	线束	(221)
6.4	参考文献	(221)
第7章 电磁干扰预测和分析		(222)
7.0.1	系统间和系统内的电磁兼容性	(223)

7.0.2 模型和程序	(224)
7.1 模型	(225)
7.1.1 系统间分析模型	(225)
7.1.2 系统内分析模型	(229)
7.1.2.1 非线性模型	(229)
7.1.2.2 统计考虑	(231)
7.1.3 使用模型的注意事项	(231)
7.2 计算机程序	(232)
7.2.1 挑选最好的程序	(236)
7.3 制订系统和设备的规范	(236)
7.4 参考文献	(239)
第8章 电磁干扰测试大纲	(241)
8.1 测试计划	(241)
8.1.1 飞行器外辐射电平测量	(249)
8.1.2 舱内辐射电平的测量	(250)
8.1.3 电源母线传导发射测量	(253)
8.1.4 输入插座传导发射测量	(253)
8.1.5 接地板传导发射	(255)
8.2 测试步骤	(255)
8.3 元件和分系统测试	(256)
8.4 系统级测试: 航天器、飞机和再入系统	(257)
8.4.1 测试设备	(258)
8.4.2 测试顺序	(262)
8.5 参考文献	(264)

第1章 航空和航天电磁兼容性 问题综述

航空和航天系统的电磁兼容设计是一项重大的工程问题。它们的部件和分系统不仅复杂多样，而且必须设计得能在狭小的体积范围内协调地工作。航空和航天系统的电磁兼容不仅包含普通设备所具有的那些问题，而且还有一系列由航空和航天飞行任务的性质所导致的特殊问题。设备可能会经受温度和压力的剧烈变化，以及冲击、振动和侵蚀环境。

大多数航空和航天系统的原理与结构都很复杂，因此，从管理的角度来看，它们的电磁干扰控制便成为头等重要的课题。电磁干扰控制的观念必须在项目一开始就纳入系统、分系统及部件的设计之中，包括对结构配置作基本选择。电磁兼容工程师们所遵循的常规步骤是：干扰预测、接地和布线分类、屏蔽，最后用滤波来解决剩下的问题。这一系列步骤的次序对航空和航天系统特别重要，因为屏蔽将增加质量，滤波会降低可靠性，这都是不希望发生的。因此，本书中特别强调怎样在开始阶段就根据部件和分系统的数据及分析结果进行合理的设计。本书最后一章提供了测试步骤。如果设计者自始至终遵循本书提出的全部原则，那么，他只要通过测试便可放心确认，所设计的系统能象预期的那样正常工作。

航空和航天系统有许多共性，但为读者方便起见，本书

按照系统的类型加以叙述，即航天系统、航空和航天地面设备、飞机系统、地面支持设备，以及再入系统。不过，为节省篇幅，避免重复，每个问题将在其最可能频繁地发生的场合所相应的标题下予以讨论。对于在几类系统中以同等机会出现的问题，则按本书的次序在首先涉及该问题的章节中讨论。举例来说，电磁场耦合问题在第2章（航天系统）中叙述，因为全书首先需要在此处深入讨论这个问题。关于确立规范极限以及接地技术的讨论也是如此。地球综合射频环境在第2章中讨论，因为这个问题看来是航天系统所特有的。相反，静电沉积和雷电是飞机电磁兼容的主要问题，因而放在第4章里讨论。关于无源交叉调制以及不同金属接触处的二极管效应在电路中引起附加信号的讨论也是如此。

每一类航空和航天系统（例如航天器、飞机等）都有特点，因而也就有它们各自的问题。相应的地面设备也是如此。航天系统的特点是装配密集、复杂程度高，而且处于射频环境之中，电源分系统布局特殊，致使高、低电平（发射机的输出和接收机的输入）彼此密切靠近。此外，在飞行任务的各个阶段（检测、发射、轨道飞行及再入），航天系统还将遇到各种各样的电磁环境。

航空和航天地面设备不仅必须和它们所操纵的飞机、导弹及航天器相容，而且还应该和它们所在的地面基地的环境相容。

飞机系统在体积和质量方面的限制不如航天系统那样严格，但飞机上却有一套特别的导航与控制装置，必须在近地射频环境里工作。武器系统一旦装备到飞机上，其中的军械线路需要专门的防护，以免提前引爆。和航天系统一样，飞机系统也会在空中或机场遇到各种电磁环境。