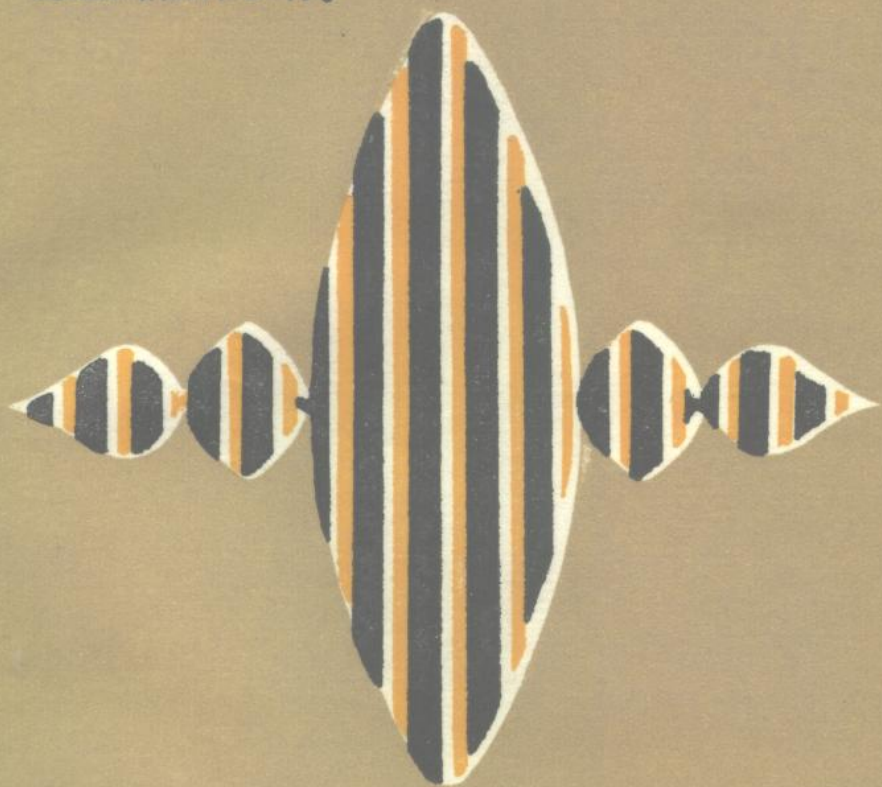


苏) В.И.彼特罗夫斯基 著
Ю.Е.谢杰利尼科夫



航空工业出版社

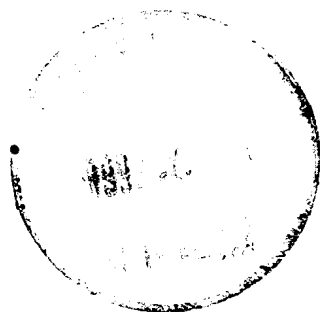
无线电电子设备电磁兼容性

361

无线电电子设备电 磁兼容性

〔苏〕 B.И.彼特罗夫斯基 著
Ю.Е.谢杰利尼科夫

冯家珍 李玉辉 肖耀明 译校



航空工业出版社

1992

9210156

(京)新登字161号

2031/01
内 容 简 介

本书研究无线电电子设备电磁兼容性——电磁环境的计算与预测方法,电磁兼容性的原理和保证方法。

本书内容充实,全面系统地介绍了电磁兼容性方面的基本知识,电磁兼容性问题的分析与试验研究方法,保证无线电电子设备电磁兼容性原理和方法,既有理论分析,又有实用方法介绍。

对从事电气和无线电电子设备有关人员及高等院校师生是一部重要的参考工具书。

无线电电子设备电磁兼容性

[苏] В.И.彼特罗夫斯基 著
Ю.Е.谢杰利尼科夫

冯家珍 李玉辉 肖耀明 译校

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

一 邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

1992年2月第1版

1992年2月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 9

印数: 1—3000

字数: 210千字

ISBN 7-80046-411-3/TN·014

定价: 7.80 元

译者前言

70年代以来,随着各种电气和无线电电子设备在国民经济各个领域的应用,这些设备之间的电磁兼容性问题日益突出,因此越来越受到人们的重视。

目前,就世界范围来说,电磁兼容性问题已经形成一门新的学科。国外,有关电磁兼容性方面的资料、文献很多;而在国内,比较全面系统地介绍无线电电子设备电磁兼容性的书并不多见。为了满足国内的需要,我们翻译了《无线电电子设备电磁兼容性》这本书。

本书系作者多年教学经验的积累,于1986年由苏联“无线电与通信”出版社出版。书中比较全面系统地介绍了电磁兼容性方面的基本知识,电磁兼容性问题的分析方法与试验研究方法,保证无线电电子设备电磁兼容性的原理和方法。全书内容全面,充实,重点突出;既有理论分析,又有实用方法介绍。本书对从事电气和无线电电子设备的研究、设计、生产、使用和管理方面的技术人员是一本有益的参考书;对高等院校无线电电子专业的教师、大学生也是一本不可多得的教学参考书。

本书由肖耀明(序言、第六章和第七章),李玉辉(第一章、第四章、第五章),冯家珍(第二章、第三章)共同翻译并校对。在翻译和出版过程中,曾蒙航空航天工业部机载设备总公司有关领导和航空工业出版社编辑部的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平所限，加之时间紧迫，书中难免有误，不当之处，敬请读者指正。

译者 1991年9月

序 言

从20世纪初起，各种电气工程和无线电电子设备开始有了飞速的发展。这些设备在人类活动的各个领域中的应用产生着巨大的影响，其意义难以估计。这个发展过程目前正在以日益增长的速度持续着。

电气和无线电电子设备的广泛应用导致这些设备在周围空间所产生的电磁场电平增加。这些电磁场恶化了其它同类设备的工作条件并降低其使用效率，因而成为对其它同类设备的干扰。在这一过程中，不难看出辩证的发展特点：在一定技术领域中的发展过程越来越受到技术在量上的增长所引起的相反现象的抑制。进一步的发展过程需要克服这种趋势，即包括保证各种设备兼容工作的，新的质量水平上的发展过程。用来保证各种无线电工程、电子和电气工程设备同时并兼容工作的，无线电电子学的新方向称为无线电电子设备电磁兼容性。

保证无线电电子设备兼容工作属于最现实的技术问题之一。因为电工技术和无线电电子学不断发展的过程，强化了采用新设备的效果对其兼容工作条件的依赖关系。我们列举一些导致电磁兼容性问题尖锐化的最主要的原因：

同时工作的无线电技术设备，尤其是安装在移动目标上的设备总数在增长；

无线电发射机的功率在提高，某些型号的无线电设备的发射机功率达到数十兆瓦；

许多现代无线电设备使用的频带在加宽：

尽管目前许多无线电频段已经严重超载，可是无线电频段的负荷仍在增加：

以模拟技术，尤其是数字技术为基础的自动操纵，控制、检测及其他设备，其中包括微计算机和微处理器的应用越来越广泛。这些设备成为非有意的干扰源，同时也受干扰的作用：

在设备配置密度增加的情况下，活动目标上，特别是舰船和飞机上的无线电电子设备装备程度仍在增加：

在相当大的地区上分布着地面无线电设备，其数量不断增加。由于配置在飞行器上的无线电设备，出现在地面无线电设备的直线视距范围内，所以飞行器无线电设备的工作条件在恶化。

在技术发展的早期阶段，保证设备兼容工作主要靠改进个别电路和结构的方案，以及对各个无线电设备使用的无线电频率实行计划分配。现在，采用个别的局部措施已经不够了，从整体上说，问题具有明显的系统性特点。在任何无线电电子设备寿命期的所有阶段，都必须考虑电磁兼容性要求。在研究问题时，把研制和设立具体的无线电电子设备，同保证它在使用过程中与其它无线电电子设备的兼容性隔裂开来是不合理的。如果忽视电磁兼容性方面，直到引起设备兼容性遭到破坏，则保证无线电电子设备电磁兼容性的代价就太昂贵了。而且又不能令人满意。

由于技术上的迫切需要，出现了无线电电子设备电磁兼容性的问题，并且到今天已经列为无线电电子学一系列最重要问题之一。显然，不考虑电磁兼容性的条件就不可能进行各种用途的无线电电子设备的设计、制造和使用。每一个无

线电电子学方面的专家，都应该了解保证无线电电子设备电磁兼容性的原理，并在实际工作中应用这些知识。因此，在对无线电工程师进行业务培训过程中，列入电磁兼容性问题就成为必要的了。

新的教学课程《无线电电子设备电磁兼容性》适合于为这些目的服务，因而被推荐列入各类高等学校教学计划。在培养无线电电子学专家的系里，这是一门新的课程。该课程的研究方法尚未达到被认为属于经典课程那种程度，例如，像《无线电接收设备》，《超高频天线与设备》，《信息传输系统》以及其它课程。主要的原因之一是，虽然在解决实际问题积累了相当多的经验，但是电磁兼容性的理论尚未发展到足够的程度。另一个原因则与直到不久前高等学校存在轻视电磁兼容性的作用的倾向有关。此外，形成这门教学课程的复杂性同整个问题的综合性特点有关。因此，在范围上要使这门课程的内容与目前所有电路学的、系统工程的和结构的专业相当，这样的课程内容未必是可能的。对于这些专业来说，这门课程的内容和篇幅应有实质上的区别。

目前，有大量的电磁兼容性方面的资料来源——专题著作，大量的杂志刊物，科学技术会议丛刊以及各种标准文件。独自研究清楚大量资料，对未经培训的读者来说，是特别困难的。因此，在教科书中根据无线电电子学所采用的专业来划分出电磁兼容性问题的必要性已经是不可避免的了。本书是供无线电技术高等学校电路技术和系统工程专业使用的教科书。本书打算用于电磁兼容性学科的初步研究，并且认为，读者是通晓无线电技术电路和信号的，无线电发射设备和接收设备的，超高频天线与设备的，无线电系统的，信息传输系统的理论基础；以及掌握了无线电技术高等学校教

学大纲范围内的全部数学资料。

《无线电电子设备电磁兼容性》(索引号YMY-T-6/960)课程的教学大纲所规定的问题确定了本书的内容。其目的是阐述无线电电子设备电磁兼容性方面的必要的基础知识。学完本课程以后,学生应该了解产生干扰的原因,无线电电子设备各种元件对产生干扰和遭受干扰过程有影响的性能与特征,分析电磁兼容性指标的原则,基本方法与设备,保证电磁兼容性的原则和基本方向,以及应该对电磁兼容性领域的组织方面,标准和技术文件具有清楚的了解。研究本课程要确信考虑无线电电子设备在宽频带内各种特性和缺陷的必要性,而且在许多情况下,对仅在工作频带最近的邻域评价设备工作情况的基础上建立起来的标准的错误,以及影响无线电电子设备电磁兼容性的各种因素的知识也都要考虑。学习本课程应该有助于培养系统性的观点,其中包括在解决无线电电子设备设计、生产和使用的任何问题时必须考虑产生的干扰和易受干扰。

鉴于目前的条件和《无线电电子设备电磁兼容性》课程的上述特点,写成本书是非常困难的任务。附带的困难是它的综合特点。正如已经指出过的,电磁兼容性问题包含范围广泛的对象和现象。该课程的教学应该依据学生已经了解的,产生干扰和遭受干扰作用的设备各种元件的性质和特点。但是,在现有的教学课程中,特别是在《无线电技术电路与信号》、《超高频天线与设备》、《无线电接收设备》、《无线电发射设备》中这些内容并未得到充分反映,也很少在相应的教科书中阐述。因此,尽管本书的篇幅有限,在对产生干扰和遭受干扰的无线电电子设备各种元件的性质做概括性分析时,作者不得不进行必要的解释。附带的困难是由术语的特

殊性造成的，电磁兼容性领域的术语还没有完全形成，没有包括所有已被使用的概念；其中某些术语仍旧是争论的题目。因此，为避免误解起见，作者遵循了国家制定的全苏标准23611-79，23872-79，24375-80和其他术语标准，而对未被标准所包括的概念，则采用了科学技术文献中最常用的术语。

本书主要根据专题论著和定期刊物的资料，同时考虑了在以 A. H. 图波列夫命名的喀山劳动红旗勋章和人民友谊勋章，航空学院和全苏一些主要高等学校《无线电电子设备电磁兼容性原理》课程的教学经验而写成的。根据作者们的意见，书中材料是按照授课时便于讲解的顺序安排的。

本书大部分由作者们共同写成。第2.3.4小节，第3.3，4.3.7.9.7.10节由B. И. 彼特罗夫斯基单独写成。第7.5~7.7节和第6章(除6.5节以外)由Ю. Е. 谢杰利尼科夫写成。

本书是编写无线电电子设备电磁兼容性方面的教科书最初的一次尝试，作者预料到本书难免存在缺点，并以感激的心情接受批评意见，请将意见按地址101000，莫斯科，邮政局a/я693，邮至《无线电与通信》出版社。

主要缩写词目录

- ИП——干扰源
- НТД——标准技术文件
- НЭМП——非有意电磁干扰
- ПИ——附加辐射
- ПКП——附加接收通道
- РП——干扰感受器
- РПУ——无线电接收设备
- РПД——无线电发射设备
- РРЛ——无线电通信中继线路
- РЧР——射频资源
- РЭС——无线电电子设备
- ЭВП——电真空器件
- ЭМО——电磁环境
- ЭМС——电磁兼容性

目 录

第一章	电磁兼容性问题.....	(1)
1.1	无线电干扰种类	(1)
1.2	非有意干扰作用途径	(3)
1.3	对无线电电子设备的干扰作用	(5)
1.4	影响无线电电子设备电磁兼容性的因素	(8)
第二章	在主频带外辐射和接收无线电信号的无线 电电子设备特性	(12)
2.1	概述	(12)
2.2	无线电发射设备特性	(16)
2.2.1	基本辐射和不希望的辐射	(16)
2.2.2	不希望的无线电辐射的定量描述	(30)
2.2.3	频率稳定度	(34)
2.3	天线装置与传播介质	(35)
2.3.1	概述	(35)
2.3.2	影响电磁兼容性的馈线特性.....	(38)
2.3.3	影响电磁兼容性的天线装置特性.....	(41)
2.3.4	影响电磁兼容性的传播介质特性.....	(51)
2.3.5	无线电设备壳体、馈线、高频连接线的辐射与接 收	(61)
2.4	无线电接收设备特性	(66)
2.4.1	接收通道	(66)
2.4.2	阻塞、交叉失真和互调	(71)
2.4.3	频率选择性特性	(75)
第三章	工业无线电干扰.....	(81)

3.1	基本原理	(81)
3.2	主要工业干扰源	(82)
3.2.1	连续干扰源	(82)
3.2.2	脉冲干扰源	(83)
3.2.3	与直接使用电磁能无关的干扰源	(87)
3.2.4	受电磁场照射的可变接触——接触干扰源	(88)
3.3	工业干扰作用途径及其影响特点	(91)
第四章	电磁兼容性分析方法	(104)
4.1	概述	(104)
4.2	取得确定分析评价的方法	(109)
4.3	取得概率评价的方法	(126)
4.3.1	概率法	(126)
4.3.2	电磁兼容性的成对评价	(127)
4.3.3	成组评价	(132)
第五章	电磁兼容性特性的模拟与试验研究方法	(137)
5.1	试验研究方法	(137)
5.1.1	试验研究任务	(137)
5.1.2	电磁兼容性特性的测量特点	(138)
5.1.3	测量误差	(140)
5.1.4	测量标准化与计量保证	(140)
5.1.5	全尺寸试验	(141)
5.1.6	模拟法	(142)
5.1.7	试验台测量与试验	(145)
5.1.8	电磁兼容性特性测量方法	(146)
5.2	影响电磁兼容性的无线电发射设备的参数测量	(147)
5.2.1	测量特点	(147)
5.2.2	附加辐射参数测量	(150)
5.2.3	带外辐射参数测量	(157)
5.2.4	无线电发射设备允许频移测量	(159)

5.3	影响电磁兼容性的无线电接收设备参数测量	(160)
5.3.1	测量特点	(160)
5.3.2	无线电接收机参数测量方法	(167)
5.4	工业干扰测量方法	(178)
5.4.1	概述	(178)
5.4.2	工业干扰电平测量	(180)
5.4.3	无线电电子设备对工业干扰的敏感度测量	(182)
第六章	保证电磁兼容性原理	(185)
6.1	保证设备电磁兼容性的任务与方法	(185)
6.2	射频资源	(186)
6.3	保证电磁兼容性作为有效利用射频资源的一项任务	(189)
6.3.1	保证电磁兼容性方法的内容	(189)
6.3.2	保证综合系统上和综合系统之间的电磁兼容性任务的特点	(190)
6.4	在各种等级上保证电磁兼容性任务的特点	(192)
6.4.1	概述	(192)
6.4.2	保证元件、部件级的电磁兼容性	(193)
6.4.3	保证设备级的电磁兼容性	(194)
6.4.4	保证综合系统、系统级的电磁兼容性	(197)
6.4.5	保证无线电业务级的电磁兼容性	(201)
6.5	在保证无线电电子设备电磁兼容性的实践中制定标准	(205)
6.5.1	制定标准的目的与原则	(205)
6.5.2	应当制定标准的无线电电子设备电磁兼容性参数	(207)
6.5.3	电磁兼容性方面的国际标准与国家标准	(208)
第七章	保证无线电电子设备电磁兼容性的方法	(210)
7.1	在不同等级保证电磁兼容性方法的内容	(210)

7.2	减少导线之间的耦合	(216)
7.3	接地	(225)
7.4	屏蔽与滤波	(230)
7.5	根据空间因素保证电磁兼容性	(232)
7.6	根据时间因素保证电磁兼容性	(237)
7.7	一组无线电电子设备内各发射机功率选择	(241)
7.8	根据频率因素保证电磁兼容性	(244)
7.9	频率规划	(248)
7.10	根据给定的电磁环境配置无线电电子设备的方法	(250)
7.10.1	设备配置最佳化原则	(250)
7.10.2	配置问题的数学表示法及其解法	(251)
7.10.3	根据保证电磁兼容性组合件、插件、部件的最佳分 布算法	(263)

第一章 电磁兼容性问题

1.1 无线电干扰种类

不希望的电磁能影响称为电磁干扰，这种影响使(或可使)设备的工作质量变坏。无线电干扰是相当于9千赫~3000千兆赫射频频段的干扰。

无线电电子设备在各种不同性质的电磁干扰影响的条件下工作，这些干扰在其产生、构成、频谱和时间特性方面各不相同。它们可能是自然产生的和人为造成的。

自然干扰是由自然界中客观存在的，同人类活动无直接联系的电磁过程所引起的。这类干扰的产生有以下几个基本原因：

大气中产生的电过程（雷电、北极光、在发生沙暴和雪崩消失时的静电放电等等）；

地表，对流层和电离层的热无线电辐射；

地球以外的(宇宙的)干扰源产生的噪声无线电辐射。

根据自身的特点，自然无线电干扰呈现连续的或宽带的脉冲过程，这种过程在大多数接收机的通频带范围内可以认为近似于标准的白噪声。

人为产生的干扰是由人类活动引起的，并且都以工程上各种电磁过程为前提，其中分为有意的和非有意的干扰。

有意干扰是为了破坏某些具体的无线电电子设备的正常工作而专门造成的。制造干扰和抗干扰，被列入称为无线电

电子对抗的专门的无线电技术领域的问题范畴内。这类问题相当特殊，并且不作为电磁兼容性问题来研究。

非有意干扰是由人为造成的干扰源产生的。这种干扰不是为了破坏无线电电子设备的工作而有意设置的。它们是在各种无线电工程、电子和电气设备工作时产生的。非有意干扰分为无线电装置辐射引起的干扰和各种电子及电气装置工作时产生的工业干扰。

同样可以把任何电路都客观固有的存在于各种装置和仪器中的内部噪声划归无意干扰。它们是由各种波动过程引起的，并且总是与有用信号同时存在于实际电路中，因此，限制了利用弱信号的可能性。导电材料中的噪声是由晶格的无规则热振荡造成的，电真空器件的噪声除了热振荡外，还可由散弹效应、栅极噪声导致的电流分布噪声及其它因素引起的。固体器件的噪声是由结点电阻的热噪声，壁垒中及半导体层中的散弹噪声的综合。上述的波动过程有随机的特点，并且在总体上表现为在实用设备通频带内具有实际均匀频谱密度的正态过程。

对某些设备而言，因为外部电磁干扰和内部噪声在能量上是等效的，所以，通常借助于统一的参量来评价它们。这种参量被称为天线噪声温度 T_a ，用开尔文温标计量单位测量。认为天线噪声温度是由天线内电阻所产生的，并且能够按照下列公式来确定输入到匹配接收机的，由天线所接收的在频带 B 上产生的噪声干扰功率 P_{na} ：

$$P_{na} = kT_a B,$$

式中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦/开〔尔文〕—波兹曼常数。天线噪声温度的引进实现了外部噪声干扰及内噪声同热噪声的等量代换。该热噪声是由处于假定温度 T_a 下的天线内阻在频带 B