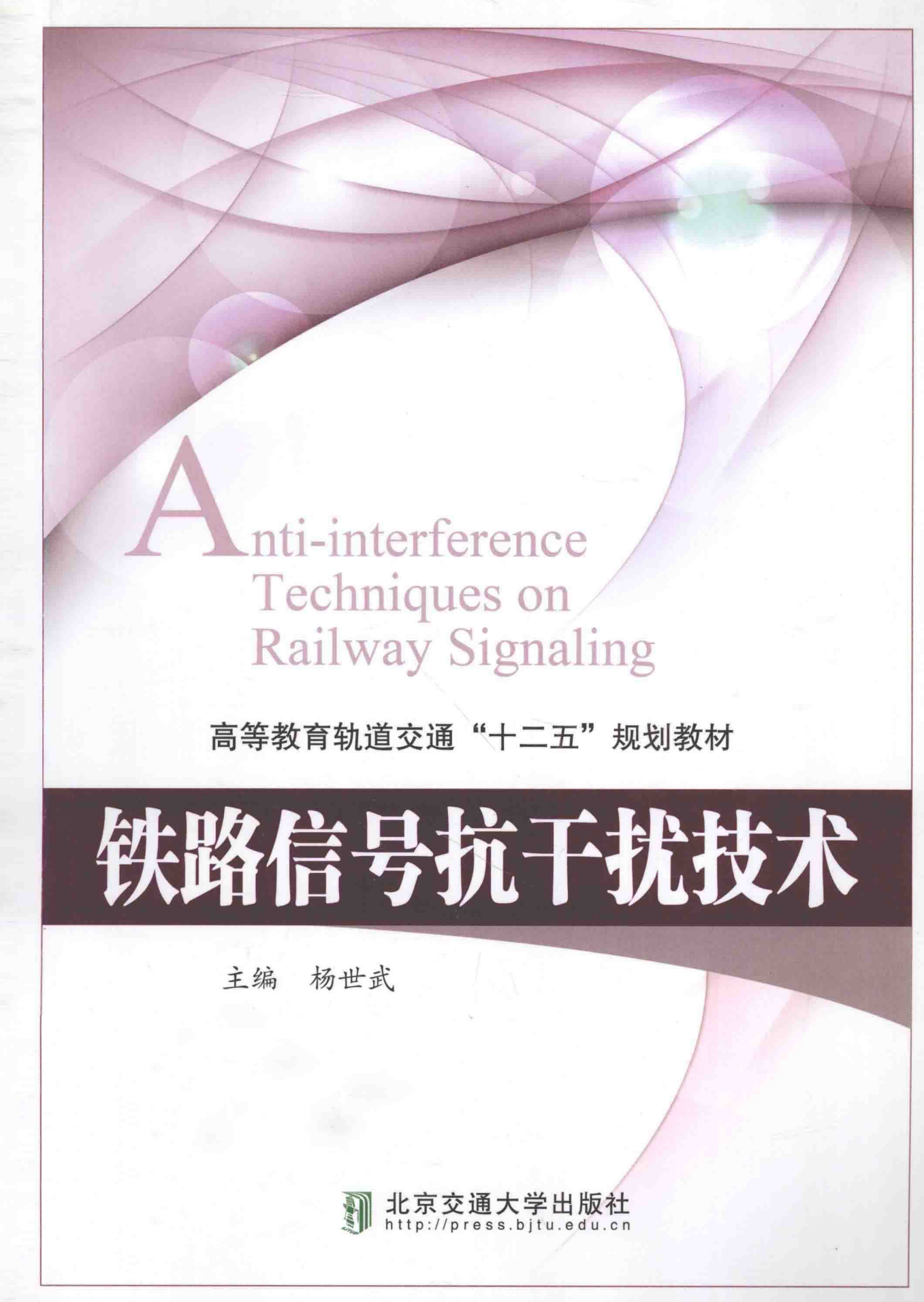




Anti-interference Techniques on Railway Signaling

高等教育轨道交通“十二五”规划教材

铁路信号抗干扰技术

主编 杨世武



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材

铁路信号抗干扰技术

杨世武 主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共分8章,主要内容有电磁兼容基本概念和理论概述、铁路信号系统环境特点及主要电磁干扰源、国内外铁路信号设备电磁兼容标准和抗扰度试验及干扰抑制对策、音频轨道电路对传导性干扰的防护技术、25 Hz 相敏轨道电路对牵引不平衡电流脉冲干扰的防护技术、室内和车载信号系统电磁兼容设计技术、信号设备雷电防护和综合接地技术、铁路信号设备电磁干扰典型案例分析。

本书为自动化专业类教材,适用于自动化(铁道信号)专业的高年级学生,同时也可作为从事铁路信号及轨道交通控制专业研发、管理、维护人员的参考书。

版权所有,侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

铁路信号抗干扰技术/杨世武主编. —北京:北京交通大学出版社, 2012. 10

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1196-7

I. ①铁… II. ①杨… III. ①铁路信号-抗干扰措施-高等学校-教材 IV. ①U284

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215335 号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:李晓敏

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:15.5 字数:387千字

版 次:2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1196-7/U·115

印 数:1~3000册 定价:35.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展的需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会
2012年8月

前 言

众所周知，高速、重载和电气化是当代铁路的趋势，中国铁路的发展取得了举世瞩目的成就。根据铁路网中长期发展规划，到 2020 年，全国铁路营业里程将达到 12 万公里以上，电气化率达到 60% 以上，客运专线长度可达 1.6 万公里。另外，我国城市轨道交通正进入高速发展时期，到 2020 年，规划线路长度约 3 000 公里。

在这一背景下，作为保障运输安全和效率的基础设施，传统的铁路信号（轨道交通运行控制）技术已难以适应需求，必须构建以微电子、计算机和通信技术为核心的列车运行控制系统，向集调度指挥、运行控制及自动驾驶为一体的综合自动化系统方向演化。有两方面需要重点关注：一方面，高速和重载必然引起牵引功率和牵引电流增大，使得信号系统的外部电磁环境更加复杂；另一方面，无线通信设施会直接导致射频辐射骚扰，高速微电子器件和宽带数据传输使电磁能量更容易发射，高集成度电路和小型化设备带来器件、电路、连接线及电缆之间串扰和电磁耦合更加严重，而低功耗和高灵敏度意味着信号电平降低和工作电流减小，对于干扰更加敏感。此外，设备工作环境还可能包含雷电电磁脉冲、静电等自然干扰源。显然，采用新技术的信号设备面临更复杂和严重的电磁干扰（EMI），在设备使用过程中，EMI 可能降低设备性能和安全程度，影响运输效率，甚至带来安全风险。毋庸置疑，高速和重载条件下信号系统的电磁兼容性（EMC）更加凸显出其重要性。

狭义上讲，电磁兼容性是电子和电气设备在使用中表现出来的与外部环境及其他设备之间和谐共存的一种特性，包含电磁骚扰源、传输途径和敏感设备 3 个要素。特别值得关注的是，铁路信号系统主要由弱电设备构成，必须考虑对电气化铁道和雷电等外界电磁干扰的防护，明确设备所处环境中干扰源的特点和耦合机理，从而采用适当的骚扰抑制技术即抗干扰技术。对信号设备 EMC 研究的目的除了保证功能正常和安全之外，还有助于有关人员建立电磁兼容理念并将其渗透到信号设备生命周期的各个环节。

尽管国内外在电磁兼容领域的专著和教材不乏精品之作，但是在轨道交通信号控制专业，目前还很难找到专门的适用教材。本书作为研究型教学的专科及本科专业教材，期望借鉴这一领域国际同行的先进理念，系统总结中国铁路信号电磁兼容技术领域的研究成果，体现当前新技术背景的变化，紧密结合现场实际。

本书在“铁路信号电磁兼容技术”基础上改编和补充而成，特色主要表现在以下 3 个方面。

（1）电磁兼容学科的理论性很强，而本专业强调工程应用。本书面向“卓越工程师培养计划”的要求，侧重挖掘相关学科之间的关联性，引导学生利用基本原理，掌握科学研究的方法。

（2）充分考虑学生的国际化培养，参照本领域研究现状，引用丰富的国际标准和术语，

注重内容的开放性，并在各个环节中体现。

(3) 紧密结合本行业重载、高速等背景下的电磁环境，有机融入实用方法、典型实例，将新技术和新成果转化为教材中的教学资源。

本书于2011年6月由北京交通大学正式立项，是北京交通大学2011年重点教学改革与建设项目网络课程立项教材，由北京交通大学杨世武任主编。全书共分8章：第1章由黄赞武、陈嵩编写；第2章由杨世武、毕红军编写；第3章由杨世武、王国栋编写；第4章由杨世武编写；第5章由杨世武、费锡康编写；第6章由杨世武、王国栋、王海峰编写；第7章由杨世武、陈嵩、陈建译编写；第8章由黄赞武、毕红军、李绍斌编写，全书由杨世武统稿。

在编写过程中，得到了北京交通大学远程学院、电子信息工程学院、教务处及多位同行的大力支持，抗电磁干扰研究中心的研究生参与并完成了大量仿真验证工作，信号抗干扰研究的前辈、北京交通大学吴运熙教授提出了宝贵的建议，在此表示诚挚的谢意。

本书面向铁道信号及轨道交通相关专业的专科及本科生，建议教学参考学时24～32。由于各章内容相对独立，可根据需要适当取舍。本书也可供相关科研、维护等技术人员参考。在阅读过程中，读者可从参考文献中获取更详细的信息。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中必然有错漏之处，敬请同行和读者不吝指正，或提出修改建议。编者联系方式：ysw@bjtu.edu.cn 010-51688696

编 者
2012年8月
于北京交通大学

目 录

第 1 章 电磁兼容基础	1	4.4 移频轨道电路和机车信号抗 干扰技术	121
1.1 电磁兼容导论	1	复习参考题	127
1.2 电磁骚扰源	5	第 5 章 25 Hz 相敏轨道电路对脉冲干扰 的防护	128
1.3 电磁骚扰的传播机理	11	5.1 25 Hz 相敏轨道电路简介	128
1.4 电磁骚扰抑制技术	21	5.2 脉冲干扰对相敏轨道电路 的影响	130
复习参考题	42	5.3 抗脉冲干扰理论分析及方案 设计	135
第 2 章 铁路信号系统干扰源	44	5.4 关键参数计算及抗干扰效果 分析	139
2.1 信号系统及其电磁环境	44	5.5 阻抗匹配技术的应用	144
2.2 电气化铁道干扰源	47	复习参考题	146
2.3 信号系统的电磁兼容设计	73	第 6 章 室内和车载信号设备电磁兼容 技术	147
复习参考题	75	6.1 室内信号系统及环境	147
第 3 章 铁路信号设备抗扰度试验	76	6.2 室内信号设备电磁兼容 设计	150
3.1 铁路信号设备电磁兼容标准 概述	76	6.3 机车和车辆电磁环境	166
3.2 铁路信号设备抗扰度要求	80	6.4 车载信号设备及电磁兼容 技术	171
3.3 抗扰度试验及分析	84	复习参考题	175
复习参考题	100	第 7 章 雷电防护和综合接地技术	176
第 4 章 音频轨道电路对传导性干扰 的防护	101	7.1 雷电对信号设备的影响	176
4.1 主要轨道电路制式及 FSK 信号特点	101	7.2 信号设备雷电防护技术	180
4.2 传导性干扰对轨道电路的 影响	110		
4.3 UM 系列轨道电路抗干扰 技术	114		

7.3 综合接地技术.....	194	8.3 电气化铁路传导性干扰典型	
7.4 信号防雷及电磁兼容综合		案例分析.....	229
设计.....	198	复习参考题	233
复习参考题	210	附录 A 模拟试题	234
第 8 章 铁路信号设备电磁干扰典型案例		A1 模拟试题一	234
分析	211	A2 模拟试题二	235
8.1 雷电干扰典型案例分析.....	211	参考文献	238
8.2 电磁干扰典型案例分析.....	221		

第1章

电磁兼容基础

【本章内容概要】

主要介绍电磁兼容的基本概念，同时对电磁骚扰源、电磁骚扰的传播机理和电磁骚扰的抑制技术进行详细介绍。

【本章学习重点与难点】

学习重点：电磁骚扰的耦合途径分析以及电磁骚扰的滤波、屏蔽和接地技术。

学习难点：结合电磁骚扰源和耦合途径对电磁骚扰的机理进行分析计算，另外一个难点就是如何根据电场、磁场、电磁场等不同的辐射场选用合适的屏蔽技术。

1.1 电磁兼容导论

1.1.1 电磁兼容的定义

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）的定义有好几种，从不同的角度有不同的定义，国家标准 GB/T 4365—2003《电工术语 电磁兼容》将电磁兼容定义为：“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骚扰的能力”。国家军用标准 GJB 72—1985《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》第 5.10 条将其定义为：“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其他设备的电磁发射导致或遭受不允许的降级；它也不会使同一电磁环境中其他设备（分系统、系统）因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级”。

由此可见，电磁兼容学科主要研究的是如何使在同一电磁环境下工作的各种电气电子系统、分系统、设备和元器件都能正常工作，互不干扰，达到兼容状态。在某种程度上也可以说是研究干扰和抗干扰的问题。

1.1.2 电磁干扰的危害

电磁干扰有可能使设备或系统的工作性能偏离预期指标，使其工作性能发生“降级”，甚至使系统效能发生永久性下降，严重时，还能将设备或系统摧毁。

电磁干扰对设备的危害是全方位的，各个行业都会存在这个问题，铁路信号设备受到的外部电磁干扰主要来自电气化牵引电流及雷电，由于电磁干扰可能引起信号设备错误动作。下面主要从铁路信号系统入手说明电磁干扰的危害。

1. 铁路信号电源系统的电磁干扰

电源系统为整个信号设备提供电源,所以电源系统上的电磁干扰将最终影响到所有的信号设备,而且电源系统是最容易接收电磁干扰的部分。一方面,电源系统要从室外电网引入电能并经过变压器进入室内电源屏,外电网和变压器由于位于室外,很容易遭受雷电和其他骚扰的影响,并将干扰传导进入室内设备上;另一方面,随着电源技术的发展,智能电源屏日益得到普及,而智能电源屏中大量使用的电子设备将很容易受到电磁的干扰。

2. 铁路信号电子设备的电磁干扰

传统的信号设备主要是以变压器、继电器等机电设备为基础构成的控制系统,对电磁干扰防护有天然的优势。20世纪90年代以后,铁道信号开始大量应用微电子、现代通信、自动控制和计算机等技术,系统主要由信息和通信设备构成,其特点是小型化、数字化和低功耗化。一方面,电子设备组成更加复杂,微电子器件工作频率、通信速率越来越高,而功耗、工作电压和电流逐渐降低,即信号更加敏感;另一方面,列车高速度、高密度和重载的发展又会带来牵引功率和电流的增加,可能导致电磁环境更加恶劣。

3. 电气化铁路轨旁设备的电磁干扰

电气化铁道产生的射频辐射干扰原因主要包括:牵引接触网的火花放电;接触网和受电弓滑板间离线引起电弧;电力牵引机车的换流过程;电气化铁道开关设备、电力机车内电机、调压器、开关设备在操作中的瞬态过程。

对轨道电路和机车信号等信号设备影响程度最严重的是传导性干扰即不平衡牵引电流,不平衡电流的大小由钢轨中牵引电流和轨道(包括扼流变压器等器材)的不平衡程度决定。多数轨道区段不平衡系数小于10%,不平衡电流有稳态和瞬态脉冲两种形式,较大不平衡电流以及脉冲电流中的直流分量易造成扼流变压器等铁芯器件的磁饱和,削弱信号传输。牵引电流存在脉冲电流形式,峰值可能超过1000 A,时间小于2 s。1975年4月,某车站由于机车升弓产生牵引电流冲击干扰,造成75 Hz交流计数轨道电路中轨道继电器错误励磁吸起,酿成重大事故。另外,导致25 Hz相敏轨道电路继电器瞬间误动作(闪红)的原因主要也是不平衡脉冲电流造成扼流变压器饱和以及接收器的过渡过程。

同时,电气化铁路对其周边其他的无线通信也会造成干扰,胶济线电气化对青岛流亭机场的导航就造成了一定的影响。

4. 铁路信号车载设备的电磁干扰

各种车载设备主要由电子设备构成,电磁干扰对车载设备影响非常明显。车载设备所受电磁干扰主要来源于两方面:一是电气化铁路电网的电磁干扰,二是不平衡牵引电流的电磁干扰。

对动车组设备间电磁环境的测量数据分析得到:空间磁场强度的最大值超过了70 dB $\mu\text{A}/\text{m}$ 。这些电磁骚扰主要是列车的牵引电流引起的。随着列车运行速度的提高,牵引电流也随之加大,伴随着不平衡电流的加剧。不平衡电流是影响轨道电路正常工作的一个主要原因。

1.1.3 电磁兼容的主要研究内容

电磁兼容学科研究的主要内容是围绕构成干扰的三要素进行的,即电磁骚扰源、传输途径和敏感设备。具体内容如下。

1. 电磁骚扰源

在了解电磁干扰的构成要素之前,需要对几个平常容易混淆的概念加以澄清。通常,人们对于“干扰”、“骚扰”、“噪声”等这几种电磁现象不加以区分,而在电磁兼容学科中它们分别有着不同的明确的定义。

电磁骚扰 (Electromagnetic Disturbance) 的定义为:“任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。”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。

电磁噪声 (Electromagnetic Noise) 是指“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”。例如,电气设备运行中经常产生的放电噪声、浪涌噪声、振荡噪声等,不带任何有用信息。

无用信号是指一些功能性的信号,如广播、电视、雷达等,本身是有用信号,但如果干扰其他设备的正常工作,则对被干扰的设备而言,它们是“无用信号”,所以电磁骚扰的含义比电磁噪声更广泛一些。

电磁干扰 (Electromagnetic Interference) 的定义是“由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。

由此可见,有时人们常把骚扰、噪声和干扰混同起来是一种不确切的表述。实际上,噪声是骚扰中的一类;骚扰是一种客观存在;只有在骚扰影响敏感设备正常工作时才构成了干扰。

电磁骚扰源可分为自然骚扰源和人为骚扰源。骚扰源的研究包括其发生的机理、时域和频域的定量描述,以便从源端来抑制骚扰的发射。

2. 传输途径

骚扰的传输途径有两条,通过空间辐射和通过导线传导,即辐射发射和传导发射。辐射发射主要研究在远场条件下骚扰以电磁波的形式发射的规律以及在近场条件下的电磁耦合。共模电流辐射也是重要研究内容之一。传导发射讨论传输线的分布参数和电流的传输方式对骚扰传输的影响,如共阻抗耦合、共模—差模电流转换等。

3. 敏感设备

这部分主要研究电磁骚扰如何导致设备性能降低或产生不希望有的响应,如何提高设备的抗干扰能力,即降低对骚扰的敏感度,提高抗扰度。

4. 电磁兼容控制技术

电磁兼容控制技术最常用的是屏蔽、滤波、接地。屏蔽用于切断空间的辐射发射途径;滤波用于切断通过导线的传导发射途径。接地的好坏则直接影响到设备内部和外部的电磁兼容性。此外,平衡技术、隔离技术等也是电磁兼容的重要控制技术。随着新工艺、新材料、新产品的出现,电磁兼容控制技术也得到不断的发展。

5. 电磁兼容测量

电磁兼容测量贯穿于电磁兼容分析、建模、产品开发、检验诊断等各个阶段。由于测量对象是电磁骚扰,不同于一般有用信号,因此骚扰的拾取、度量和不确定度分析等都有自己的特点,有关测量方法、仪器设备、测量场地的研究是电磁兼容学科的重要组成部分。

6. 电磁兼容标准

目前国际上权威性的电磁兼容标准有 CISPR 标准、IEC 标准、欧盟的 EN 标准、德国的 VDE 标准、美国的 FCC 标准和军用标准 MIL-STD。我国目前现行的有 100 多种电磁兼容标准。这些标准规定了各个频段各种类型电气电子设备的骚扰发射限值和抗扰度限值,并规定了相应的试验方法、仪器设备和试验场地。标准是大量理论研究和科学实践的结晶,同时也渗透着巨大的商业利益,所以对标准的研究和制订是历次国际会议的重要议题。由于我国的电磁兼容标准大多是等同采用国际先进标准,因此对标准的来龙去脉、理论依据、实施方法的研究也是我国电磁兼容界必须进行的课题。

7. 电磁兼容分析预测和设计

分析、预测和设计是电磁兼容学科发展的高级阶段,在产品使用后出现电磁兼容问题再去着手解决将浪费大量的时间和经费,因此应该在产品开发的最初阶段就进行电磁兼容的分析和预测,取得必要的数 据,然后进行电磁兼容设计。分析和预测的关键在于数学模型的建立和计算机分析程序的编制。数学模型包括根据实际电路、布线和参数建立起来的全部骚扰源、传输途径和敏感设备的模型。分析程序应能计算所有骚扰源通过各种可能途径对每个敏感设备的影响,并判断这些综合影响的危害是否超出相应标准的限值和设计要求,然后进行修整补充和再计算。系统越复杂,分析和预测的难度就越大。

电磁兼容学科的研究内容十分广泛,本书主要讨论铁路信号系统中的电磁兼容性问题。

1.1.4 电磁兼容的发展

EMC 的发展经历了从“路”到“场”,从低频到高频,从狭义的电磁干扰到广义的电磁兼容的过程。早在 1934 年就由国际电工委员会(IEC)发起并联合一些国际组织成立了国际无线电干扰特别委员会(CISPR),保护音频广播免遭干扰。在 IEC 组织内,还有一个与 CISPR 并列的设计电磁兼容的组织,即 IEC 第 77 技术委员会(IEC/TC77)。国际上涉及电磁兼容的标准化组织主要就是上述这两个组织及 IEC 的大约 50 多个关心特定产品的电磁兼容方面问题的产品技术委员会和分委员会。1945 年美国军方制订了世界上最早的军用电磁干扰标准 JAN-I-225,用于控制机载电气设备的电磁干扰。进入 20 世纪 60 年代以后,世界上一些技术先进的国家全面深入地开展了电磁兼容的研究工作,包括对电磁兼容测量技术的研究和相应测量仪器的开发。CISPR 制订了一系列的民用推荐标准,美国军方制订了全面的军用标准 MIL-STD-461/462。这些标准随着新产品、新系统和新技术的不断出现也随之进行不断地补充、修改和扩展。

我国从 1957 年成为 IEC 的成员,从 1976 年开始组织对应于 CISPR 各分委员会的工作组,正式参加 CISPR 的活动。为了对应 CISPR 的工作,于 1986 年成立了“全国无线电干扰标准化技术委员会(CTCSRI)”。为了进一步规划和推进全国电磁兼容标准制、修订工作,加强与 IEC/TC77 的联系,国家质量技术监督局标准化司于 1997 年成立“全国电磁兼容标准化联合工作组”。此后于 2000 年撤销原“全国电磁兼容标准化联合工作组”,批准成立“全国电磁兼容标准化技术委员会”,以对应 TC77 的工作。2000 年成立“电磁兼容标准协调小组”,以协调上述两个标准化技术委员会的工作,并对应国际电工委员会电磁兼容顾问委员会开展有关标准化工作。

我国的第一个民用电磁兼容标准是1966年发布的机械工业部部标,是有关船用电工产品的无线电干扰。此后因国内的形势而停顿。我国的第一个电磁兼容国家标准是1983年发布的GB 3907—1983《工业无线电干扰测量方法》。时至今日,我国已陆续制定了一百多部关于电磁兼容的国家标准和数十部国家军用标准,各有关行业如邮电、铁路等部门也纷纷制定相应的行业标准和规范。目前国家正在加快建立和完善电磁兼容认证体系,以保证中国的电磁兼容事业能正常地健康地发展。2003年8月1日,我国正式开始实施“中国强制认证”制度,即通常所说的“3C”(China Compulsory Certification, CCC)认证制度。该认证制度中即包含产品的电磁兼容认证内容。



图 1-1 我国的强制产品认证标志

1.2 电磁骚扰源

1.2.1 电磁骚扰源分类

电磁骚扰源分散性很大,分类方法很多,可以从骚扰的来源划分,可以从发生机理划分,还可以从传输方式、频率范围、时域特性等方面来分类。这里主要从来源和发生机理来分类。

1. 按来源分类

电磁骚扰源有自然骚扰源和人为骚扰源,如图1-2所示。

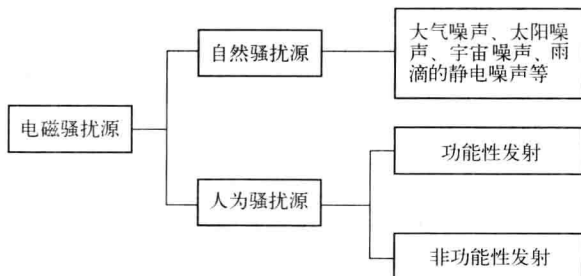


图 1-2 电磁骚扰源分类

自然骚扰源是指由自然界的电磁现象产生的电磁噪声,比较典型的有:

- 大气噪声,如雷电;
- 太阳噪声,如太阳黑子活动时产生的磁暴;

- 宇宙噪声，来自银河系及其他星系；
- 雨滴的静电噪声。

人为骚扰源，是指由电气电子设备和其他人工装置产生的电磁骚扰。这些骚扰包括功能性的无用信号和非功能性的电磁噪声。人为电磁骚扰源的分类见表 1-1。

表 1-1 人为电磁骚扰源的分类

分 类	名 称	典型的骚扰源
功能性发射	电磁能利用	通信系统、电视广播系统、雷达、导航设备、高频辐射加热等
	武器装备	核致电磁脉冲、电子对抗机、电磁脉冲炮弹
非功能性发射	高压电网及设备	开关操作、电力故障、整流器、电机等
	工业及医疗设备	电弧炉、荧光灯、工业电炉、空调、计算机、高频或超高频理疗装置、高频手术刀、电测仪、X 光机等
	机器及工具	电锯、吸尘器、电熨斗、轧钢机、射频电弧焊机、射频感应加热器等
	运输工具	点火装置、电力机车及接触网
	消费电子设备	电冰箱、电熨斗、电动剃须刀、个人计算机等
	静电放电	衣服之间摩擦、在地毯上行走等

2. 按发生机理分类

1) 放电噪声

放电是一种很常见的电磁现象。例如，雷电是由于雷云之间或雷云和大地之间产生火花放电而产生的；静电放电是由于人身所带的静电在接触到金属物体后火花放电造成的；整流子电机转动时，电刷与整流片之间产生火花放电；电气化铁道受电弓在高压接触网下滑动时伴随一系列火花；带电感负载的开关断开时触点间有火花跳过；高压输电线常出现淡蓝色的电晕放电并滋滋作响；荧光灯、霓虹灯利用辉光放电发光等。

由于放电而产生噪声是最常见的现象，这时往往伴随着急剧的电流电压的瞬时变化，即 di/dt 或 du/dt 很大。

放电的类型有好几种。随着带电体之间的电压等级和放电条件（带电体的距离、气体类型、气压等）的不同，分为暗流、辉光、电晕、火花、弧光放电等。当带电体间电压超过放电起始电压后气隙开始击穿，但保持何种放电状态则由放电电路条件决定，这是由放电回路电阻 R 和场强 E 所决定。放电时回路里伴随着脉冲电流，这是产生电磁噪声的根源，同时火花和电晕本身也会向外辐射噪声。

2) 接触噪声

接触噪声是由于触点间接触电阻发生变化而产生的，如触点静压力变化、振动、冲击、滑动、虚接、氧化、污渍、表面损坏等都会引起接触电阻变化。此外，触点上的金属氧化物整流检波效应；不同金属材料接触时的温差热电动势；医疗电子设备电极处的涂料极化引起的电压波动等都可能产生电磁噪声。

3) 过渡现象

过渡现象即电气电子电路中电流电压的瞬态变化 di/dt 、 du/dt 。这是产生噪声的根本原因，也是普遍发生的现象。例如，高速数字脉冲的上升沿、下降沿；电力电子器件工作时的

瞬态电压电流变化；电源接通时白炽灯和电动机的冲击电流；电力设备开闭或故障时的异常电压变化；导线上感应到雷电后产生的尖峰衰减振荡等。

4) 反射现象

反射现象是指空间电磁波传播时遇到障碍物被反射并与原信号叠加，如电视重影、传输线与负载和源内阻抗不匹配引起反射等。

5) 非功能性噪声

电子电路工作时存在着一些与完成特定功能无关的信号，如由于分布电感、分布电容产生的振荡，波形失真引起的高次谐波、电源噪声等。

6) 无用信号

这里的无用信号是指功能性信号，是完成特定功能时使用的信号，如广播、电视、移动通信、雷达、导航等信号，但如果对其他设备产生干扰则对敏感设备而言是无用的。

1.2.2 瞬态骚扰

瞬态骚扰指时间很短，幅值较大的电磁干扰。常见的瞬态骚扰有静电放电（ESD）、雷击浪涌、电快速脉冲群（EFT），这些是设备需要通过试验验证其抗扰度的基本瞬态骚扰。

1. 静电放电

静电放电骚扰（ESD）是由两个具有不同静电电位的物体直接接触或静电感应引起的，通常发生在对地短接的物体暴露在静电场时。ESD 通常会产生强大的尖峰脉冲电流，包含丰富的高频成分，其上限频率取决于放电空间的相对湿度、物体靠近速度、放电物体形状等，可以超过 1GHz。在高频时，设备的电缆甚至电路板上的印制走线都会变成非常有效的接收天线。因而，对于典型的模拟或数字设备，ESD 一般会产生高电平噪声，导致电子设备严重损害。静电放电脉冲的上升时间很短，因此寄生电容对它来说是直接导通的，而对电感则变为大阻抗，即使接地线仅有几纳亨的电感，对 ESD 来说也具有较高阻抗，所以有无安全地线（具有较高感抗）对系统的静电放电影响不大。

静电放电对电路的干扰机理有两种：一是静电放电电流直接流过电路，对电路造成损坏；二是静电放电电流产生的电磁场通过电容耦合、电感耦合或空间辐射耦合等途径对电路造成干扰。

静电放电脉冲电流产生的电磁场可以直接穿透设备，或通过孔洞、缝隙、通风孔、输入/输出电缆等耦合到敏感电路。其辐射波长从几厘米到数百米，这些辐射能量产生的电磁噪声将损坏电子设备。其造成损坏的主要原因是由 ESD 电流产生热量导致设备的热失效，或由 ESD 感应产生的高电压导致元器件的绝缘击穿，当然，绝缘击穿也可能激发大的电流，从而导致设备热失效。

2. 雷击浪涌

雷击浪涌骚扰是指由雷电在电缆上电击或感应产生的瞬变电压脉冲，它通常经电源线或信号线等途径窜入并损害电气、电子设备。雷击实际上也是一种静电放电现象。

关于雷击详细的论述请参见本书的后续章节。

3. 电快速脉冲群（EFT）

电快速脉冲群（EFT）往往从系统内部产生，在电气设备中普遍存在，通常由继电器、

电动机、变压器等电感元件产生。

电快速脉冲群由电路中的感性负载断开时产生。其机理是：在电感负载的电路中，当开关断开时，由于电感上的电流不能突变，为了维持这个电流，电感上会产生很高的反电动势，当此电动势达到一定的大小时会将开关触点击穿，发生辉光放电（气体电离）和弧光放电（金属气化），形成导电回路，继而在电源回路中产生很大的脉冲电流，负载电感的寄生电容开始放电，电压下降，下降到一定程度时通路断开，断开后电感又产生反电动势，重复以上过程，形成了电快速脉冲群。

EFT 由一连串的脉冲群组成，对电路的影响较大，因为这一连串的脉冲群可以在电路的输入端产生累积效应，使骚扰电平幅度最终超过电路的噪声门限。脉冲串的周期越短，对电路的影响越大。这是因为当脉冲串的周期很短时，电路的输入电容没有足够的时间放电，就又开始新的充电周期，容易达到较高的电平。

抑制电快速脉冲群的骚扰并不是一件容易的事情，仅用滤波器来抑制难以达到目的，往往需要用几种方法配合起来使用方能取得较好的效果。大量实验数据表明，EFT 骚扰的能量不像雷击浪涌那么大，一般不会损害元器件，一般只会使设备出现“软故障”，如程序乱序、数据丢失等。

4. 三种瞬态骚扰的特性比较

以上三种瞬态骚扰是常见的瞬态骚扰源，其各有特点，抑制方法也各不相同，其特性比较见表 1-2。

表 1-2 三种瞬态骚扰特性比较

骚扰类型	上升时间	能量	电压（高负载阻抗）/kV	电流（低负载阻抗）
ESD	< 1 ns	低	> 15	人体放电：几十安 装置放电：几百安
雷击浪涌	μs 级	高	< 10	几千安
EFT	5 ns	中 (单脉冲)	< 10	几十安

抑制瞬态骚扰常用的器件称为瞬态骚扰吸收器，主要有气体放电管（避雷管）、压敏电阻、硅瞬态电压吸收器等。

1.2.3 铁路信号系统中常见的电磁骚扰源

1. 电力电子器件的噪声

电力机车或电动车组是典型的机电一体化系统。随着交流电气化铁道的发展，电力机车及电动车组成为目前我国铁路的主力运营车种。在电拖动机车（包括电力机车、电动车组以及电力传动内燃机车）上，都有整流及变流装置。从早期的水银式和引燃管式变流器，到 20 世纪 60 年代后就被大功率半导体器件构成的变流器所替代。起初仅用大功率二极管进行交流一直流间的整流。晶闸管和电子控制器件出现后，牵引整流器便具有交一直流间的可控整流和有源逆变、直一直流间的变换的功能，并且试制出直—交流间的变换器。变流器技术进入电力电子器件时代。当前，机车变流器上普遍采用 GTO（可关断晶闸管）、GTR（大功率晶体管）及 IGBT（GTR 和 MOSFET 的合成器件）等电力电子器件。