

电磁兼容 (EMC) 技术及应用实例详解

<http://www.phei.com.cn>

◎ 张亮 主编

本书读者对象：

- 电磁兼容技术初学者
- 项目设计开发人员
- 系统测试人员
- 系统抽验及认证人员



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电磁兼容技术系列

电磁兼容（EMC）技术 及应用实例详解

张亮 主编

周新 曹振华 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从产品的设计和试验两条主线出发，系统地讲解了电磁兼容设计这门新技术，以及电磁兼容的相关标准与实施。在入门篇中通过各种电磁兼容试验，介绍了国家现行标准的试验技术，使读者能够对电磁兼容技术有充分的认识；在提高篇中本着实用的目的深入浅出、循序渐进讲解了电磁兼容的各种技术手段，并且尽量避免了冗长的理论公式，使读者能够很轻松地掌握电磁兼容这门技术；最后，在精通篇中本书通过一系列实例深化并补充了对电磁兼容标准和技术的理解。

本书适合作为电子工程师、EMC 工程师、EMC 检测工程师必备的参考资料，也可作为高等学校相关专业师生的课外教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电磁兼容（EMC）技术及应用实例详解 / 张亮主编. —北京：电子工业出版社，2014.4

（电磁兼容技术系列）

ISBN 978-7-121-22917-6

I. ①电… II. ①张… III. ①电磁兼容性—研究 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 067892 号

策划编辑：王敬栋（wangjd@phei.com.cn）

责任编辑：毕军志

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：三河市皇庄路通装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：35.75 字数：915.2 千字

印 次：2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：99.80 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

电磁兼容一般指电子、电气设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，既要求都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。

随着科技的发展，人们在生产、生活中使用的电子、电气设备越来越广泛。这些设备在工作中产生了一些有用或无用的电磁能量，这些能量影响到其他设备的工作，就形成了电磁干扰。严格地讲，只要将两个以上的元件（或电路、设备、系统）置于同一电磁环境中，就会产生电磁干扰。

近年来，电磁干扰问题越来越成为电子设备或系统中的一个严重问题，电磁兼容技术已成为许多技术人员和管理人员十分重视的内容。

（1）电子设备的密集度已成为衡量现代化程度的一个重要指标，大量的电子设备在同一电磁环境中工作，电磁干扰的问题呈现出前所未有的严重性。

（2）现代电子产品的一个主要特征是数字化，微处理器的应用十分普遍，而这些数字电路在工作时，会产生很强的电磁干扰发射。不仅使产品不能通过有关的电磁兼容性标准测试，甚至连自身的稳定工作都不能保证。

（3）电磁兼容性标准的强制执行使电子产品必须满足电磁兼容标准的要求。

（4）电磁兼容性标准已成为西方发达国家限制进口产品的一道坚固的技术壁垒。加入 WTO 以后，这种技术壁垒对我国相关产品的出口障碍会更大。

因此，对于电子工程师来说，电子、电气产品电磁兼容性已经成为一个不可回避的问题，可是现在有这样一现象：电子工程师对电磁兼容这项技术掌握得还不够全面，他们只知道高频干扰会带来一些问题；而电磁兼容检测工程师对电子电路的了解又不够充分，只知道怎样测试，却不知道这些试验的实质是什么。那么，怎样使工程师们在短期内熟练地掌握电磁兼容技术呢？显然，系统地学习一些知识将使其在实践中考虑问题的思路更清晰，处理问题更具有灵感。

目前，国内有关电磁兼容方面的书籍很多，这些书各有特色，广泛阅读这些书籍无疑能极大地丰富电磁兼容方面的知识，培养综合运用知识的能力。但是，国内的这些关于电磁兼容的书籍都存在着一个缺陷，那就是设计与测试脱节，有的书籍只是生搬硬套了电磁兼容标准，而有的则讲解了一大堆理论公式，使读者望而却步。鉴于这些原因，为了帮助我国的工程师们尽快提高电磁兼容水平，编者根据自己多年的电子电路及电磁



兼容测试经验，编写了这本图书。本书在内容上力求通俗易懂，理论联系实际，尽量避免大量的计算公式；其中讲解了编者的大量实践经验，并且对电磁兼容标准也进行了详尽的讲解。电磁兼容测试检测工程师们可以根据本书了解电子产品电磁兼容测试的深层意义，而电子工程师可以在产品设计之初就避免出现电磁干扰的问题，提高产品的可靠性。书中还详细地讲解了电子产品在电磁兼容测试过程中出现的一些常见问题和补救方法，这对没有经过电磁兼容设计的产品测试是非常有帮助的。

本书由张亮担任主编，周新、曹振华担任副主编，参与编写的还有张伯龙、王贺、辛春娟、邓会国、马妙霞、寇海军、洪立彬等同志。

在本书的编写过程中，固安信通铁路信号器材有限责任公司的潘广明工程师和张伯虎工程师提供了大量的技术案例，北京市产品质量监督检验所电磁兼容检测室的武杰主任、刘广航工程师和刘堃工程师为本书提供了大量的测试实例，并且帮作者做了大量的校对工作，没有大家的帮助这本书是不可能顺利出版的，在此本人对各位的无私帮助标示衷心的感谢。

由于作者水平有限，错误之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者



目 录

入 门 篇

第 1 章 电磁兼容 (EMC) 基础知识	3
1.1 EMC (电磁兼容) 概念	3
1.2 各种各样的“干扰”	3
1.3 电磁兼容三要素	4
1.4 什么是分贝	5
1.5 天线	6
1.6 电磁兼容 (EMC) 相关标准	6
1.6.1 基础标准	7
1.6.2 通用标准	7
1.6.3 产品族标准	7
1.6.4 专用产品标准	7
1.6.5 电磁兼容标准的测试内容分类	8
1.6.6 电磁兼容的试验方法	8
1.7 电磁兼容试验概述	9
1.7.1 通用标准中各试验端口的骚扰标准	9
1.7.2 通用标准中的抗扰度标准	10
第 2 章 各试验项目详解	14
2.1 辐射发射 (辐射骚扰) 试验	14
2.1.1 试验目的	14
2.1.2 主要试验设备及必备条件	14
2.1.3 试验方法及试验配置	15
2.1.4 试验标准限值	17
2.2 传导骚扰测试	18
2.2.1 试验目的	18
2.2.2 主要试验设备及必备条件	18
2.2.3 试验方法及试验配置	18
2.2.4 试验标准限值	18
2.3 谐波电流测试	19
2.3.1 试验目的	19
2.3.2 主要试验设备及必备条件	20



2.3.3	试验方法及试验配置	20
2.3.4	试验标准限值	20
2.4	静电放电抗扰度试验	22
2.4.1	试验目的	22
2.4.2	主要试验设备及必备条件	22
2.4.3	试验方法及试验配置	23
2.4.4	试验等级	27
2.5	射频辐射电磁场抗扰度试验	27
2.5.1	试验目的	27
2.5.2	主要试验设备及必备条件	28
2.5.3	试验方法及试验配置	29
2.5.4	试验等级	31
2.5.5	GTEM 小室	32
2.6	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	35
2.6.1	试验目的	35
2.6.2	主要试验设备及必备条件	35
2.6.3	试验方法及试验配置	37
2.6.4	试验等级	41
2.7	浪涌 (冲击) 抗扰度试验	41
2.7.1	试验目的	41
2.7.2	主要试验设备及必备条件	42
2.7.3	试验方法及试验配置	50
2.7.4	试验等级	54
2.8	射频场感应的传导骚扰抗扰度试验	54
2.8.1	试验目的	54
2.8.2	试验设备及必备条件	55
2.8.3	试验方法及试验配置	56
2.8.4	试验等级	58
2.9	电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验	58
2.9.1	试验目的	58
2.9.2	试验设备及必备条件	59
2.9.3	试验方法	62
2.9.4	试验等级	62

提 高 篇

第 3 章	接地设计	67
3.1	接地设计概述	67
3.2	安全地	67
3.3	信号地	69



3.4	地线阻抗问题	70
3.4.1	导线阻抗	70
3.4.2	信号回路阻抗	72
3.5	地线干扰的来源	73
3.6	地线环路干扰	74
3.6.1	地线环路干扰现象	74
3.6.2	地线环路问题的解决方案	76
3.7	地线公共阻抗干扰	80
3.7.1	地线公共阻抗干扰的原因	80
3.7.2	地线公共阻抗干扰的解决方案	81
3.8	地线设计原则	81
3.8.1	单点接地	81
3.8.2	多点接地	83
3.8.3	混合接地	83
3.9	电路板上的地线设计	84
第4章	电磁屏蔽	87
4.1	屏蔽效能	87
4.2	电场屏蔽	88
4.2.1	电场屏蔽原理	88
4.2.2	电场屏蔽的设计要点	89
4.3	磁场屏蔽	89
4.3.1	磁场屏蔽原理	90
4.3.2	磁场屏蔽的设计要点	90
4.4	电磁场屏蔽	91
4.5	机壳的屏蔽设计	91
4.5.1	孔洞泄漏	92
4.5.2	缝隙泄漏	93
4.5.3	孔缝处理	93
4.5.4	电磁密封垫使用指导	95
4.5.5	显示窗口的屏蔽设计	100
4.5.6	通风孔的设计	101
4.5.7	控制杆的设计	102
4.5.8	导电涂层	102
4.5.9	其他辅料	104
4.6	搭接	105
第5章	干扰滤波	108
5.1	干扰滤波的作用	108
5.1.1	辐射相关	108
5.1.2	电快速瞬变脉冲群试验	109

5.1.3	静电放电试验	110
5.2	干扰电流	111
5.2.1	共模干扰电流	111
5.2.2	差模干扰电流	112
5.3	设计电磁干扰滤波器	112
5.4	滤波器设计过程中的问题	116
5.5	滤波电容的选择	118
5.6	绕制电感	123
5.7	选择磁芯	125
5.8	电源线滤波器	126
5.9	电源线滤波器的设计及使用方法	129
5.9.1	器件的使用	129
5.9.2	元件布局	130
5.9.3	滤波器结构设计	131
5.9.4	滤波器的安装	132
5.9.5	滤波器的选用	133
5.10	信号线滤波器	135
5.11	插入增益	138
5.12	滤波器对脉冲干扰的抑制	139
第 6 章	电缆及连接器的设计	141
6.1	电缆的电磁辐射	141
6.2	电缆的电磁抗扰度问题	145
6.3	电缆的分布参数对电磁兼容的影响	147
6.4	电缆在产品中的位置与共模电流的关系	147
6.5	敏感电路及骚扰源的位置与产品共模电流的关系	148
6.6	电缆中共模电流的抑制	151
6.6.1	减小共模电压	152
6.6.2	增加共模回路阻抗	153
6.6.3	共模滤波	156
6.6.4	电缆屏蔽	156
6.6.5	平衡电路	161
6.7	电缆之间的串扰	162
6.7.1	电缆串扰机理	162
6.7.2	容性耦合的对策	164
6.7.3	互感耦合	165
6.7.4	各种电缆分类	169
6.8	电磁场对电缆的影响	170
第 7 章	瞬态干扰抑制器件	178
7.1	气体放电管	179



7.1.1	概述	179
7.1.2	内部结构	179
7.1.3	工作原理	180
7.1.4	主要参数	180
7.1.5	参数分析	181
7.1.6	应用	182
7.1.7	故障	185
7.2	金属氧化物压敏电阻	185
7.2.1	概述	185
7.2.2	内部结构	186
7.2.3	主要参数	187
7.2.4	应用原则	190
7.2.5	响应速度问题	190
7.2.6	故障模式	192
7.2.7	注意事项	192
7.3	硅瞬态电压抑制二极管	192
7.3.1	概述	192
7.3.2	工作原理	193
7.3.3	主要参数	193
7.3.4	注意事项	197
7.4	固体放电管	201
7.4.1	概述	201
7.4.2	工作原理	202
7.4.3	主要参数	203
7.4.4	应用说明	204
7.4.5	故障模式	205
7.5	组合式保护器	206
7.5.1	概述	206
7.5.2	工作原理	206
7.5.3	应用说明	207
7.6	设计举例	208
7.6.1	交流电源端口防雷和防浪涌电路设计	208
7.6.2	直流电源端口防雷和防浪涌电路设计	210
7.6.3	信号端口防雷和防浪涌电路设计	212
第 8 章	隔离变压器	215
8.1	概述	215
8.2	隔离变压器原理	215
8.3	带屏蔽隔离变压器	216
8.4	超级隔离变压器	217

8.5	实际安装	220
第 9 章	整机电路及电路板的设计	221
9.1	电源线及地线上的噪声	221
9.1.1	噪声的产生	221
9.1.2	抑制噪声的方法	222
9.2	电路板上的骚扰源	226
9.3	扩谱时钟	227
9.4	单层板和双层板的设计	230
9.4.1	单层板	230
9.4.2	双层板	230
9.4.3	电路板设计的一般规则	231
9.4.4	电路布局	231
9.4.5	布线	231
9.4.6	多层电路板	237
9.5	关于电路设计的建议	244
9.6	信号传输畸变及其解决方法	245
9.7	信号线滤波	247
9.7.1	概述	247
9.7.2	信号线 EMC 滤波线路举例	248
9.8	电路板互连电缆的设计	257
9.9	电路板及设备上的开关触点的处理	260
9.9.1	开关断开时瞬态骚扰形成的原理	260
9.9.2	开关切换瞬态干扰抑制	261
9.10	操作按钮与电子线路配合的问题	263
9.11	电路之间的耦合	264
9.12	电路板的局部屏蔽	265
9.13	从时序上降低电路受干扰的概率	266
9.14	软件抗扰措施	267
9.14.1	看门狗	268
9.14.2	其他措施	268
第 10 章	产品的电气设计和装配	269
10.1	电气设计的原则	269
10.2	元器件、电气配件的排布和安装	269
10.3	排布导线	271
10.3.1	排布导线注意事项	271
10.3.2	汇流排的设计安装	273
10.4	产品的安全性与可靠性	274
10.4.1	绝缘与耐压	274
10.4.2	电磁骚扰与防护	275



10.4.3	产品的可靠性	277
10.5	机柜间电缆的处理	277
第 11 章	电磁兼容故障的诊断及整改	279
11.1	产品电磁兼容定性	279
11.1.1	摸底试验配置	279
11.1.2	定性试验配置	280
11.2	产品电磁兼容故障的定位	281
11.2.1	故障判断	282
11.2.2	故障信号的测试	282
11.2.3	故障定位总结	283
11.2.4	故障排查举例(变频调速系统)	283
11.3	电磁兼容故障整改	287
11.3.1	辐射发射超标	287
11.3.2	传导发射超标	289
11.3.3	电源谐波发射超标	290
11.3.4	静电放电抗扰度不合格	291
11.3.5	射频电磁场辐射抗扰度不合格	296
11.3.6	电快速脉冲群抗扰度不合格	297
11.3.7	浪涌(冲击)抗扰度不合格	299
11.3.8	射频场感应传导抗扰度不合格	301
第 12 章	低压电器产品的电磁兼容问题	303
12.1	概述	303
12.2	国家标准中对低压电器电磁兼容的要求	305
12.2.1	GB/T14048—2006 标准中对低压开关及控制设备的电磁兼容要求	306
12.2.2	GB18499—2008 标准中对剩余电流动作保护器(RCD)的电磁兼容要求	310
12.3	低压电器产品的电磁兼容故障整改及电磁兼容设计举例	312
12.3.1	剩余电流动作保护器使用中的常见故障及整改	312
12.3.2	智能脱扣器的软硬件设计及抗扰措施	314
第 13 章	单片机、可编程控制器及工控机的抗扰问题	317
13.1	单片机系统的抗扰设计	317
13.1.1	单片机系统的电磁骚扰问题	317
13.1.2	单片机系统的硬件电磁兼容设计	318
13.1.3	单片机系统的软件电磁兼容设计	326
13.2	可编程控制器的抗扰问题	329
13.2.1	可编程控制器的概念	329
13.2.2	可编程控制器系统中的骚扰来源	330
13.2.3	可编程控制器系统的抗扰设计及措施	331
13.2.4	可编程控制器系统中的软件抗扰措施	333
13.3	工控机的抗扰问题	334

13.3.1	工控机使用中的硬件抗扰措施	335
13.3.2	工控机使用中的软件抗扰措施	336
第 14 章	医疗电子设备的电磁兼容	341
14.1	医疗电子设备电磁兼容问题的特殊性	341
14.1.1	概述	341
14.1.2	医疗电子设备的特殊性与复杂性	342
14.1.3	医疗电子设备的电磁兼容要求	342
14.2	医疗电子设备和系统的电磁兼容性要求	343
14.2.1	骚扰发射的限制	343
14.2.2	电网污染保护要求	344
14.2.3	抗扰度要求	344
14.3	国内医用电子设备电磁兼容现状	345
14.4	医疗设备的安全与电磁兼容问题的总结	346
14.5	医疗电子设备安全与电磁兼容的整改措施	349
14.5.1	漏电流问题	349
14.5.2	电磁环境问题	350
14.5.3	电气安全与电磁兼容常用整改措施	351
14.6	电磁兼容设计实例	355
14.6.1	超声设备电磁场抗扰措施	355
14.6.2	医用洗片机控制器的电磁兼容设计	356
14.6.3	心脏除颤器测试分析仪的电磁兼容设计	357
14.6.4	医疗建筑的电磁兼容设计原则	360
第 15 章	家用电器的电磁兼容测试及整改	363
15.1	概述	363
15.2	家用电器电磁兼容测试的标准化	364
15.2.1	家用电器、电动工具和类似器具的电磁发射要求	366
15.2.2	家用电器、电动工具和类似器具的抗扰度要求	369
15.3	电磁兼容故障整改举例	371
15.3.1	电动工具电磁干扰的抑制	371
15.3.2	小家电电磁发射超标整改	375
15.3.3	变频空调单片机控制电路抗扰设计举例	379
第 16 章	变频调速系统的电磁兼容测试与整改	385
16.1	概述	385
16.2	国家相关标准	386
16.2.1	标准适用范围	386
16.2.2	电气传动系统的抗扰度	386
16.2.3	电气传动系统的发射要求	388
16.3	变频器的传导骚扰	389
16.3.1	变频器传导骚扰测试	390



16.3.2	试验报告	390
16.3.3	测试结果分析	391
16.3.4	传导骚扰的抑制措施	392
16.4	变频器谐波问题的整改	392
16.4.1	变频器输入侧谐波抑制	393
16.4.2	变频器输出侧谐波抑制	396
16.5	变频器使用中的其他问题	399
16.5.1	接地问题	399
16.5.2	布线问题	401
16.5.3	布局问题	404
16.6	变频器输入侧故障	411
16.7	系统防雷	413
16.7.1	易受雷击的部分	413
16.7.2	防雷保护	414
第 17 章	开关电源的传导骚扰	416
17.1	开关电源认证和电磁兼容测试	416
17.2	开关电源的电磁兼容试验	417
17.3	开关电源的电磁骚扰	418
17.3.1	整流电路	418
17.3.2	开关换能部分	419
17.3.3	次级整流电路	419
17.3.4	稳压控制电路	420
17.3.5	分布电容问题	420
17.4	开关电源的传导发射测试	421
17.4.1	交流电源端口传导发射限值	421
17.4.2	传导发射试验配置	422
17.5	传导骚扰抑制技术	424
17.5.1	差模滤波	424
17.5.2	共模滤波分析	425
17.5.3	输入滤波电路	427
17.5.4	电源滤波器实际电路分析	429
17.5.5	滤波电路中各元件简介	434
17.5.6	影响电磁骚扰的其他因素	445
第 18 章	不间断电源的噪声抑制	446
18.1	概述	446
18.1.1	不间断电源简介	446
18.1.2	应用领域	447
18.1.3	不间断电源解决的问题	447
18.2	不间断电源的种类	448

18.2.1	后备式电源	448
18.2.2	在线互动式电源	449
18.2.3	在线式电源	449
18.3	不间断电源的电磁骚扰抑制	451
18.3.1	骚扰限值	451
18.3.2	测试方法	458
18.3.3	不间断电源产品的电磁兼容设计	464
18.4	不间断电源的选用	465
18.4.1	不间断电源的选择	465
18.4.2	不间断电源的关键技术	467
18.4.3	不间断电源的主要指标	469
18.5	不间断电源使用时的注意事项	471
18.6	电池的保养	472
18.6.1	常见电池种类	472
18.6.2	各种电池的优缺点	474
18.6.3	电池相关问题	474

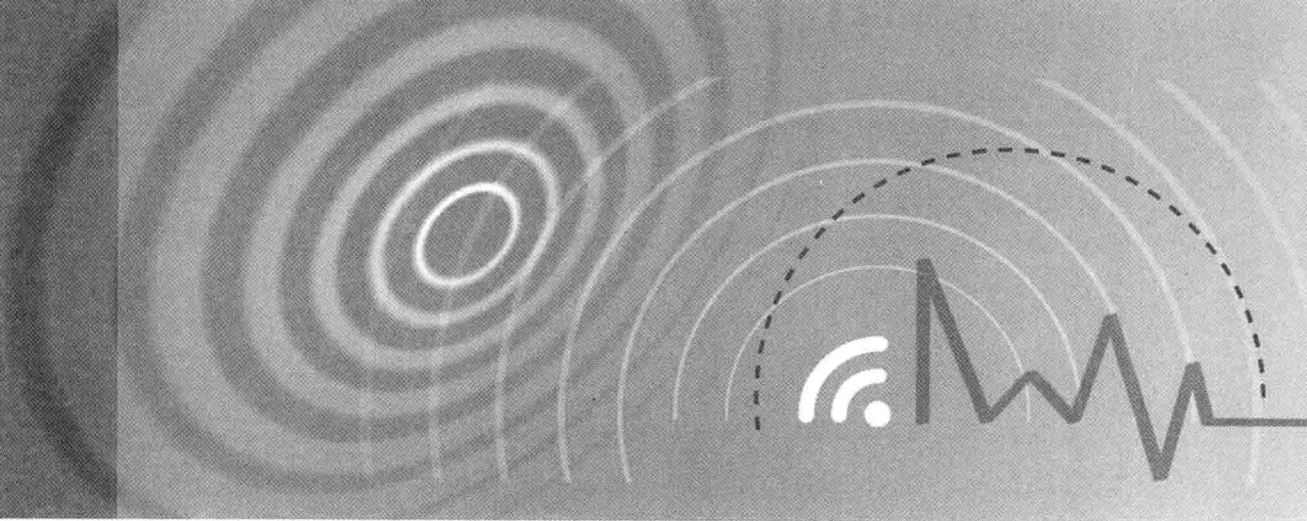
精 通 篇

第 19 章	汽车电子产品的电磁兼容	479
19.1	概述	479
19.2	车载电子、电气产品的电磁兼容问题	480
19.2.1	车载电子产品的电磁兼容	480
19.2.2	汽车内部的电磁环境	481
19.2.3	车载电子、电气产品电磁兼容的标准化	481
19.2.4	部分国家标准简介	482
19.3	ISO7637 标准	484
19.3.1	概述	484
19.3.2	试验条件	485
19.3.3	瞬态电压发射试验	485
19.3.4	抗扰度试验	490
19.3.5	不合格整改措施	505
19.4	车载电子产品电磁兼容设计	506
19.4.1	电磁兼容设计的目的	506
19.4.2	电磁兼容设计涵盖的项目	506
19.5	电磁兼容设计实例	508
19.5.1	行车记录仪的抗扰设计	508
19.5.2	车载数字视听设备的电磁兼容设计	511
19.5.3	电磁兼容其他措施	515
第 20 章	铁路信号的电磁兼容技术	517



20.1	概述	517
20.2	信号系统电磁环境	518
20.2.1	电磁环境分类	518
20.2.2	电磁兼容与安全可靠性	519
20.2.3	电气化铁道的干扰源	519
20.2.4	雷电与信号防雷	527
20.3	铁路信号系统电磁兼容标准	534
20.3.1	国际标准	534
20.3.2	国家标准对铁路信号设备电磁兼容的具体要求	541
20.4	信号产品电磁兼容设计举例	545
20.4.1	信号产品继电器端口防浪涌设计	545
20.4.2	信号产品 CAN 接口防脉冲群设计	546
附录 A	电磁兼容检验报告样本	547
附录 B	电磁试验现场布置	555





入门篇

- ❖ 电磁兼容 (EMC) 基础知识
- ❖ 各试验项目详解