

建筑电气新技术丛书

电磁兼容与防雷接地

中国建筑学会建筑电气分会 主编

中国建筑工业出版社

建筑电气新技术丛书

电磁兼容与防雷接地

中国建筑学会建筑电气分会 主编

中国建筑工业出版社

本书是建筑电气新技术丛书中的一册。本书内容主要由建筑物电磁兼容技术、防雷接地与安全系统等两篇组成，每篇内容自成体系，系统完整地讲解了该部分的内容。

本书由国内权威专家编写，可供从事建筑电气设计、施工、监理、维护管理和其他相关专业的工程技术人员阅读，也适合高等院校有关专业作为工程实践教学环节和毕业设计的指导材料。

* * *

责任编辑：刘江 张磊

责任设计：赵明霞

责任校对：袁艳玲 王雪竹

编委会名单

主编：洪元颐

编委（按姓氏笔画排序）：

丁杰	马莎	王兆宏	王金元	王素英
王厚余	王燕峰	王勇	方磊	史永军
石萍萍	叶明	付胜权	牟晓生	孙成群
刘希清	刘屏周	刘侃	刘叶语	刘薇
刘寅颖	刘倩	刘伟	刘式良	孙牧海
戎一农	孙兰	孙金元	朱峰	朱立彤
朱江	孙先利	任红雷	杜毅威	杜金城
杨维迅	杨国胜	杨自佑	杨德才	杨守权
杨春龙	李道本	李祥发	李秀林	李加洪
李天璠	李义	李元贵	李允俊	李宏毅
陈汉民	陈建颺	陈众励	陈慈萱	陈杰甫
张文才	张艺滨	张环	张涓笑	张良洪
张野	张青虎	张跃	张浩	张振昭
张元芳	张昕	沈伟斌	吴献	金巍
周群	林卫东	郑朝晖	范君龙	武全力
姜国良	皇甫炳炎	贺湘琨	姚家祎	赵汝成
姚梦明	姚赤颺	施巨岭	段宏博	高小平
郭庭友	袁樵	黄春京	黄吉文	黄引达
黄妙庆	崔大志	黄逢	谢哲明	葛大麟
程春晖	韩金兰	韩丽	鲍世隆	熊凡
喻剑辉	龚增	雷宁秋	詹庆旋	魏志刚

前 言

建筑电气新技术丛书即将向全国读者印发出版了，对于建筑电气界来说这是一件大好事。

“建筑电气”广义的解释是：建筑电气是以建筑为平台，以电气技术为手段，在有限的空间内，创造人性化生活环境的一门应用学科。

“建筑电气”狭义的解释是：在建筑物中，利用现代先进的科学理论及电气技术（含电力技术、信息技术及智能化技术等），创造一个人性化生活环境的电气系统，统称为建筑电气。

我们在编著建筑电气新技术丛书时，考虑到建筑电气的范围广阔，项目繁多，特别是新技术层出不穷，尽可能不遗漏和全面一些。丛书共分六册，即：《建筑电气工程基础与 IT 技术应用》、《建筑供配电新技术》、《建筑照明》、《智能建筑新技术》、《电磁兼容与防雷接地》、《电气节能与太阳能应用技术》。

本丛书是以中国建筑学会建筑电气分会的第七届理事会部分领导成员洪元颐、张文才、王金元、杨维迅、陈建飏、陈众励、杨德才、陈汉民，并邀请了我国电气领域的老专家：王厚余、贺湘琨、刘希清、詹庆旋、刘屏周、王素英、李道本、姚家祎、黄妙庆、杨守权、张艺滨等，以及诸多的专家领衔编纂而成的，他们有孙成群、王勇、张野、孙牧海、张涓笑、高小平、龚增、黄春、刘侃、戎一农、施巨岭、张跃、方磊、陈慈萱、孙兰、张昕、叶明、姚梦明等；此外许多同仁帮助做了很多校阅工作，他们有杜毅威、葛大麟、石萍萍、李宏毅等等；这项巨大的工程是大家辛劳地一砖一瓦堆砌起来的，在此我向七十余名作者及方方面面给予我们支持的同仁致以深深的感谢。

洪元颐

目 录

第一篇 建筑物电磁兼容技术

第一章 概述	2
第一节 电磁场理论与电磁兼容性概述.....	2
第二节 辐射骚扰及危害.....	9
第三节 传导骚扰及危害.....	9
第四节 静电及危害	15
第五节 电能质量	17
第六节 电磁屏蔽	19
第二章 供配电系统谐波防治技术	25
第一节 谐波的产生	25
第二节 配电系统谐波危害	28
第三节 谐波源	37
第四节 常见谐波源参数	39
第五节 公共电网的电能质量标准	47
第六节 用电设备的谐波限值	50
第七节 谐波的防治	53
第八节 谐波治理措施	57
第九节 滤波技术	60
第三章 防静电工程	66
第一节 防静电工程分级标准	66
第二节 防静电工程设计	67
第三节 防静电工程材料	80
第四节 防静电工程检测	82

第四章 电子与信息系统的抗干扰技术	87
第一节 电子与信息系统的抗扰度	87
第二节 辐射抗扰度测试及有关要求	93
第三节 传导抗扰度测试及有关要求	102
第四节 静电抗扰度测试及要求	128
第五节 电磁兼容防治技术及有关产品	130
第五章 人类生活环境与电磁场	142
第一节 架空输电线路电磁辐射的计算	142
第二节 人类生活环境电磁场强度限值	153
第三节 输配电设备电磁污染的预防与治理	155
第二篇 防雷、接地与安全系统	
第一章 建筑物供、配电系统的接地	159
第一节 3~10kV 供电系统的中性点接地方式	160
第二节 低压配电系统的接地	168
第三节 电气装置接地电阻值的确定	181
第二章 接地电阻及其计算	191
第一节 工频（或直流）接地电阻的概念	191
第二节 均匀土壤中工频接地电阻的计算	193
第三节 不均匀土壤中工频接地电阻的计算	205
第四节 冲击接地电阻及其计算	210
第三章 接地极附近的地表电位分布	217
第一节 跨步电位差和接触电位差	217
第二节 简单几何形状接地极的跨步电位差和接触 电位差计算	219
第三节 接地网的地表电位分布	223
第四节 接地装置所允许的跨步电位差和接触电位差	228
第四章 土壤电阻率	231
第一节 土壤和水的电阻率参考值	231
第二节 影响土壤电阻率的因素	232

第三节	人工改善土壤电阻率的方法	236
第五章	雷电及其特性	242
第一节	雷电的来源	242
第二节	雷云的对地放电	246
第三节	雷电参数	250
第四节	雷害的效应	253
第六章	防雷装置	262
第一节	直击雷防护装置	262
第二节	浪涌保护装置	283
第三节	防雷接地装置	291
第七章	建筑物雷电防护区和防雷等级的划分	294
第一节	建筑物的等效雷电截收面积及年预计雷击次数	294
第二节	建筑物入户设施的等效雷电截收面积及年预计雷击次数	296
第三节	建筑物的防雷分类	297
第四节	雷电防护区 (LPZ) 的划分	299
第五节	建筑物的雷电电磁脉冲防护等级	300
第八章	建筑物的雷电防护	303
第一节	建筑物的直击雷防护	303
第二节	建筑物的雷电侵入波防护	313
第三节	建筑物的雷电电磁脉冲防护	328
第九章	等电位连接	336
第一节	等电位连接的类别	336
第二节	建筑物内的等电位连接方式	340
第十章	通用电气设备接地	347
第一节	手持式电力设备的接地	347
第二节	移动式电气设备的接地	348
第三节	直流电气设备接地	349
第四节	电子设备的接地	350

第五节	电话交换机的接地·····	354
第六节	大、中型电子计算机的接地·····	356
第七节	医疗电气设备的接地·····	358
第八节	防静电接地·····	361

第一篇 建筑物电磁兼容技术

第一章 概 述

第一节 电磁场理论与电磁兼容性概述

电磁兼容性 (electromagnetic compatibility (EMC)) 是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作, 且不对该环境中的其他设备和系统构成不能承受的电磁干扰的性能。对于电磁兼容性的评估包括两个方面: 电磁干扰 (electromagnetic interference (EMI)) 和 (电磁) 敏感度 ((electromagnetic) susceptibility)。

电磁干扰指电磁骚扰引起设备、传输通道或系统性能下降。

(电磁) 敏感度指在有电磁骚扰的情况下, 装置、设备或系统不能避免性能降低的特性。敏感度高, 抗扰度低。

一、静电场

凡是有电荷的地方, 四周都存在着电场, 即任何电荷都在自己周围激发电场; 电场的基本性质是, 它对处于其中的任何其他电荷都有作用力, 称作电场力。

电场强度被定义为:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.1-1)$$

电场强度是一个相量, 其大小等于单位电荷在该处所受电场力的大小, 其方向与正电荷在该处所受电场力的方向一致。

电场强度是一种相量, 故服从相量迭加原理, 即

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (1.1-2)$$

两种介质间的分界面上电通密度 \vec{D} 的法向相量连续, 而电

场强度 \vec{E} 的切向分量连续。即：

$$\begin{aligned} D_{1n} &= D_{2n} \\ E_{1\tau} &= E_{2\tau} \end{aligned} \quad (1.1-3)$$

其中 $D = \epsilon E$

静电场的边值问题的唯一性定理表明，边界条件可将空间里电场的恒定分布唯一地确定下来。

静电屏蔽现象是指在静电平衡状态下，腔内无其他带电导体的导体壳和实体一样，内部没有电场。这样，导体壳的表面就保护了它所包围的区域，使之不受导体壳外表面上的电荷或外界电场的影响。静电屏蔽现象可以从唯一性定理得到解释。

二、静磁场

电流产生磁场，不随时间变化的电流，即直流电流产生的就是静磁场。

磁场中某点小磁针 N 极指向就是该点磁感应强度 \vec{B} 的方向。

磁场内某一点放一小段长度为 Δl 、电流为 I 与磁场方向垂直的导体，若导体所受的力为 ΔF ，则磁感应强度大小被定义为：

$$B = \frac{\Delta F}{I \Delta l} \quad (1.1-4)$$

磁场强度 \vec{H} 的定义：在任何磁介质中，磁场中某点的磁感应强度 \vec{B} 与该点处的磁导率 μ 的比值为该点的磁场强度。即

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (1.1-5)$$

三、电磁场

电磁现象是一个不可分割的统一体。宏观电磁场遵守经典的麦克斯韦方程。基本非麦克斯韦方程是与时间相关的电磁场量所

满足的方程，是麦克斯韦方程的瞬时形式，积分形式如下：

$$\begin{aligned}\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \\ \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \iint_S \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \\ \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} &= \iiint_V \rho dV \\ \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} &= 0\end{aligned}\tag{1.1-6}$$

式中 \vec{E} ——电场强度 (V/m)；

\vec{H} ——磁场强度 (A/m)；

\vec{D} ——电位移相量或电通密度 (C/m^2)；

\vec{J} ——电流密度 (A/m^2)；

ρ ——电荷密度 (A/m^3)。

当电磁场 $\omega=0$ ⁽¹⁾，即 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}=0$ ， $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}=0$ 的极限情况下，麦

克斯韦方程中的电场强度 \vec{E} 和磁场强度 \vec{H} 去耦，一组方程描述的是静电场的特性，其源是静电荷。另一组方程描述的是静磁场的特性，其源是恒稳电流。

洛仑兹力：

带有电量 q ，运动速度为 \vec{v} 的质点，在电磁场中受到的力为洛仑兹力，方程描述：

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})\tag{1.1-7}$$

坡印廷定理：

注：也就是电磁场的角频率为零。

对于时谐电磁场，通过单位面积的功率流由复相量 \vec{S} 定义：

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (1.1-8)$$

这就是复数坡印廷相量，而 $\vec{E} \times \vec{H}$ 叫做坡印廷相量。

电磁波谱：

麦克斯韦方程组对电磁波的频率没有限制。已知的电磁波谱从特长无线电波的几百赫兹延续到宇宙辐射的极高能 γ 射线的 10^{24} 赫兹量级，如图 1.1-1 所示。电磁波谱是一种有限的资源。在短短的 100 年的时间里。人们已对各无线电波频段开发了成功的应用。

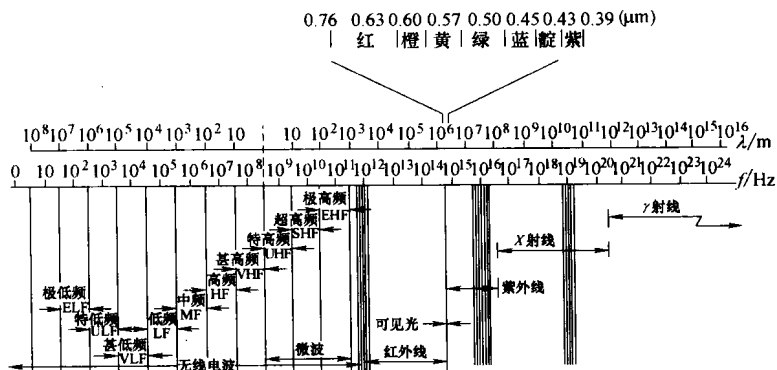


图 1.1-1 电磁波谱

四、电磁兼容

(一) 概念

电磁兼容是指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。

(二) 电磁兼容的三要素

1. 电磁兼容通常需要指明某个特定的空间。例如，同一个房间、同一机柜。

2. 电磁兼容必须同时存在骚扰的发射体和感受体。

3. 电磁骚扰通过一定媒体（耦合途径）将发射体和感受体结合在一起。这个媒体可以是空间，也可以是公共电网或公共阻抗。

（三）电磁兼容的限值间关联

在一个特定的空间内，如何使系统内和系统之间骚扰源的发射水平与感受体的抗扰性水平实现最佳配合，这就是系统电磁兼容性设计的关键所在。为将电磁兼容各种变量之间的关联有个明确的概念，用图示的方式表示。从图 1.1-2 中可以看出，系统设计任务就是选择合理的兼容性水平，并寻求足够的兼容性裕量。

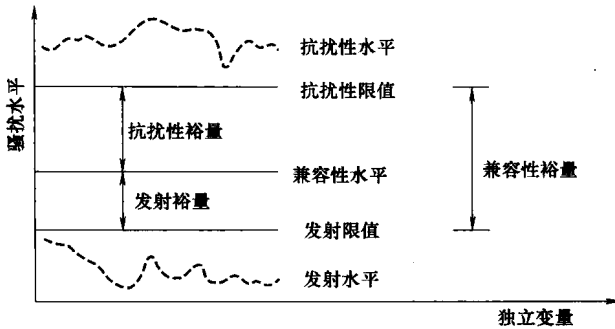


图 1.1-2 电磁兼容各限制间关联

（四）电磁骚扰源分类

向外发射电磁骚扰的源称为电磁骚扰源，大致可分为自然骚扰源和人为骚扰源。

1. 自然骚扰源

1) 闪电

由闪电引起的冲击电流可高达 10 万 A，上升时间仅几个微秒。此冲击电流波会在系统中感应出高达 100~200kV 浪涌电压（骚扰）。与雷雨伴生的雷电云，其电场强度高达几十 kV/m，在导体端部可引发静电放电，造成大气电磁噪声（骚扰）。

2) 太阳与宇宙射线

因太阳磁暴造成电离层变动,引起电波传播衰落起伏,影响短波和超短波通信。宇宙射线的带电粒子流会在短波、超短波频段引起通信骚扰。

2. 人为骚扰源

1) 静电放电

人为静电放电的放电脉冲电压高达数千伏,对人身和设备都会造成骚扰及损害,也能引起油罐爆炸、集成电路失效。

2) 核电磁脉冲

由核爆炸引起的电磁脉冲同时释放出 X 射线和伽马射线。此核电磁脉冲上升时间约为 10ns,持续时间约为 600ns,其场强高达 50kV/m,足以对系统的电子设备构成破坏。

3) 电气、电子系统电磁骚扰源

此类骚扰源是日常生活中遇到最多的骚扰源。

(1) 汽车点火系统骚扰

点火系统火花放电的电磁骚扰,其频率主要集中于电视频段和超短波通信频段。

(2) 高压电力线的骚扰

来自超高压输电线路及绝缘子表面放电,其频率主要分布在中、短波频段,通常在 30MHz 以下频段为主。

(3) 工、科、医高频设备

包括感应加热、高频介质加热、微波加热、高频焊接设备、高频医疗器械等,是城市中重要的骚扰源。其频谱分布十分宽广,从低频(谐波)、高频直至超高频、微波频段都存在。

(4) 数字电路装置

包括计算机、程控交换机、工业程序控制器、电子仪器等,由于电子电路的开关过程,引起快速脉冲电流变化,其频谱从数十赫兹到数百赫兹内均存在。

(5) 高频振荡电路

包括发射机、接收机及时钟本振频率等基频及其谐波。其发

射频率可从几十千赫兹到几百千赫兹。

(6) 电网开关操作过程及晶闸管导通过程

开关过程形成强烈的电流脉冲，在电网线路上形成严重骚扰，其频谱主要在中波、短波、超短波频段。

(7) 家用电器骚扰（包括微电机、控制器、定时器）

由于电机换向器换向过程及定时器的开关动作均会对电网形成骚扰源。其骚扰频谱从几十千赫兹到数百兆赫兹均可获得。

(8) 电网电压波动

由供电电网电压的暂时跌落以至中断，或者大容量负荷的突然投切，各相电压间的瞬变不平衡都将导致电压波形畸变，伴随高次谐波产生。传导骚扰频率虽然较低，从几百赫兹到几十千赫兹，但能量巨大，可对与电网相连的电子电器设备产生骚扰或引起误动作。

(五) 电磁骚扰传播途径

电磁骚扰大致有三个传播途径：

1. 辐射途径

骚扰源如果不是处于一个全封闭的金属外壳内，他就可以通过空间向外辐射电磁波，其辐射场强取决于装置的骚扰电流强度、装置的等效辐射阻抗，以及骚扰源的发射频率。如果骚扰源的金属外壳带有缝隙与孔洞，则辐射的强度与骚扰波长有关。当孔洞的大小与波长可比拟时，则可形成骚扰子辐射源向四周辐射。另外，辐射场中的金属物体还可形成二次辐射。

2. 传导途径

骚扰源可通过与其相连的导线向外部发射，也可通过公共阻抗耦合，或接地回路耦合，将骚扰带入其他电路，此种传导发射是骚扰传播的主要途径。

3. 感应耦合途径

感应耦合途径是介于辐射途径与传导途径之间的第三条途径。当骚扰源的频率较低时，骚扰电磁波的辐射能力相当有限。同时骚扰源又不直接与其他导体连接，此时电磁骚扰能量可通过