

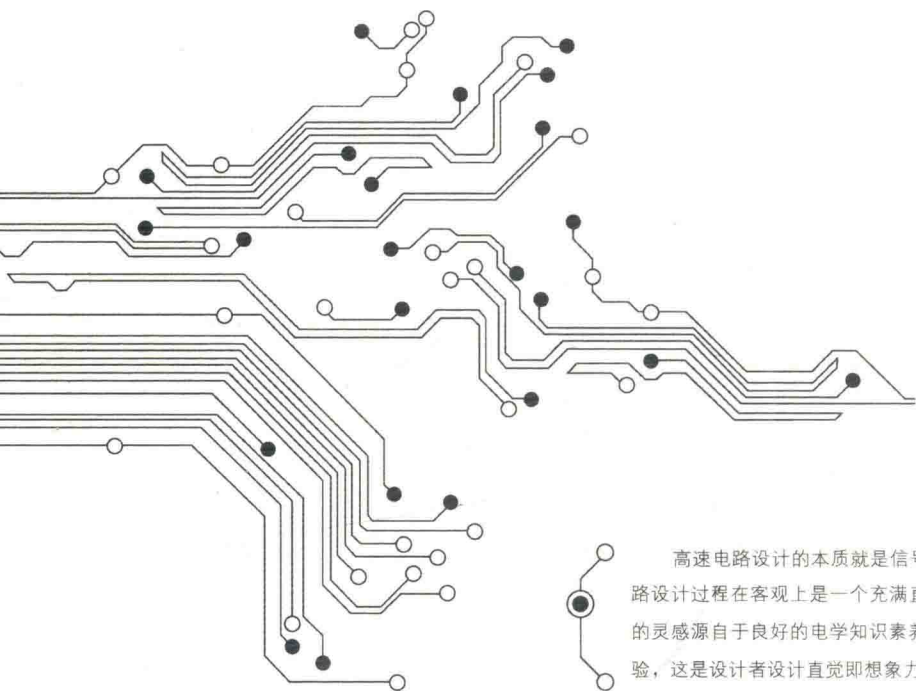
高速电路

信号完整性分析

◎ 主编：孙梯全

◎ 主审：汪泽焱

HIGH-SPEED
CIRCUIT SIGNAL
INTEGRITY ANALYSIS



高速电路设计的本质就是信号完整性设计，高速电路设计过程在客观上是一个充满直觉的过程，解决问题的灵感源自于良好的电学知识素养和丰富的工程实践经验，这是设计者设计直觉即想象力和创造性的源泉。



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

高速电路信号完整性分析

主编 孙梯全
主审 汪泽焱
参编 田俊杰 许凤慧 李延标
 卢 娟 冯 凯 娄朴根

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 提 要

高速电路设计的本质就是信号完整性设计,高速电路设计过程在客观上是一个充满直觉的过程,解决问题的灵感源自于良好的电学知识素养和丰富的工程实践经验,这是设计者设计直觉即想象力和创造性的源泉。

本书从电磁学的基础理论出发,深入浅出地阐述和分析了与信号完整性相关的电磁学知识,从理论和实践两个层面,详细探讨了高速电路信号完整性设计中的现实问题,论述了单一网络的信号完整性、两个或多个网络间的串扰、电源和地分配中的轨道塌陷及整个系统的电磁干扰和辐射等四类噪声源的成因,并给出了相应的解决方案。本书的编写融电学理论的体系性与工程实践的经验性于一体,侧重于引导读者建立完善的电学知识体系,充分认识电路高速效应的机理,结合工程实践,有效培养设计直觉。

本书既适合于电类工程师阅读,也可作为相关专业的本科生、研究生参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

高速电路信号完整性分析 / 孙梯全 主编. — 南京 :
东南大学出版社, 2018. 9

ISBN 978 - 7 - 5641 - 7988 - 5

I. ①高… II. ①孙… III. ①印刷电路—完整性—信
号分析 IV. ①TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 209202 号

高速电路信号完整性分析

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 16
字 数 196 千字
版 次 2018 年 9 月第 1 版
印 次 2018 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 7988 - 5
定 价 56.00 元



(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

在微电子技术和电路与系统技术迈向新的发展阶段的今天,高速电路信号完整性(Signal Integrity, SI)分析和设计有其特殊重要性,在某种程度上已成为新一代高速、超高速系统分析和设计体系中的瓶颈。信号完整性问题作为高速电路设计的重要内容已经成为当今电路设计者无法回避的问题,设计者不能再继续像以往对待低速电路那样仅仅专注于电路的逻辑功能设计了,而必须切实理解信号完整性原理,有效融入信号完整性设计方法,才能充分保证高速电路的功能和性能。高速电路设计的本质就是信号完整性设计,解决高速电路的信号完整性问题是设计好高速电路系统的关键所在。

一般认为,当系统工作在 100 MHz 时,就会产生信号完整性问题。事实上,信号完整性问题是由于信号上升时间和/或下降时间太短引起的,工作在低频的系统如果信号或时钟的上升或下降时间过短,也可能存在信号完整性问题。另外,随着系统和器件工作频率的不断攀升,为了保证足够长的信号稳定时间,必然也会造成信号上升时间和下降时间的缩短,信号完整性问题也就会愈发突出。

从设计的角度看,高速数字电路的印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)设计虽然是基于其原理电路的,但由于 PCB 设计过程不可避免地会引入各种分布参数,PCB 设计过程在不知不觉中更改了其相应电路的原理设计,电路所用元器件和 PCB 板的参数、元器件在 PCB 板上的布局、高速信号的布线等都可能引起信号完整性问题,从而导致系统工作不稳定,甚至完全不能正常工作。如何在 PCB 设计过程中充分考虑信号完整性因素,进一步优化原理设计,进而在 PCB 设计过程中采取有效控制措施,已经成为高速数字电路设计者必须面对的问题。

激烈的市场竞争要求一个产品从设计到投放市场的时间越短越好,但在产品研发过程中往往要花费大量的时间来解决信号完整性问题,这也是信号完整性问题越来越受到关注的主要原因。在高速电路的原理

设计和 PCB 设计时,充分考虑信号完整性问题,有助于提高产品设计的首件成功率,缩短产品研发周期,降低开发成本。

广义上的信号完整性包含了由互连线引起的、影响信号正确接收的所有问题,主要研究互连线上电压与电流信号相互作用时,其电气特性参数如何影响产品性能。如果信号从驱动端沿互连线传输到接收端后有正确的时序和幅度,则该电路具有较好的信号完整性;反之,当信号由于失真而不能被正确响应时,就出现了信号完整性问题。

所有信号完整性问题都至少与反射、串扰、电源和地分配网络中的轨道塌陷,以及电磁干扰(Electro-Magnetic Interference, EMI)与辐射这四个噪声源中一个有关。大多数信号完整性问题本质上都是来自传输线阻抗。传输线阻抗是一段互连线的基本电气特性,它描述了信号所感受到的互连线电气特征以及信号与互连线间相互作用。在“高速”领域,从电气性能的角度看,封装和互连对于信号不再是既没有阻抗也没有延迟的透明连接了,信号的传输过程受到了芯片、封装、电路板、接插件和连线电缆等所有互连设计及所用材料的分布参数的影响。分布参数是客观存在但又不易被准确测量的一组物理量,具有显著的频率相关性,其基本表现就是传输线对低频信号的近乎“透明”的传输和对高频信号的损耗和延迟。

高速电路设计过程在客观上是一个充满直觉的过程,解决问题的灵感往往源自良好的电学知识素养和丰富的工程实践经验,这是设计者设计直觉即想象力和创造性的源泉。“有两种工程师,一种是对信号完整性问题有着清晰认识的工程师,另一种是对信号完整性问题不明就里、人云亦云的工程师。”经验积累固然重要,但对于原因的清晰探究更加重要。科学研究是不断地追求原因的过程,理论分析可以帮助设计者解释现象、预测结果,为设计者及时纠正错误提供有效支撑,有助于缩短设计周期、降低生产成本。目前,很多高速数字系统的时钟已经远远超过 100 MHz,信号上升时间和下降时间也大大缩短,信号完整性问题使得首件产品很难做到一次成功。原来在低频领域起到透明连接作用的键合线、封装引线、芯片引脚、电路板上器件间的连接线条、接插件、连接电缆等,都成了信号完整性问题的来源。为此,要求设计人员必须具有良好的电学理论功底,对电学知识具有体系性的掌握,这样才能对互连线

带来的“分布参数效应”的形成机理有准确的认知和把握,并在此基础上对设计过程中发现的各种信号完整性问题进行有针对性的分析和解决。因此,研究信号完整性相关理论具有十分重要的理论及实践意义。

目前,高速电路信号完整性分析在国内外已受到广泛的重视,并已然成为一个研究热点。国外对于高速数字电路的信号完整性问题已经进行了一些比较深入的研究,通过对互连系统进行建模仿真,基于电磁学、电路以及信号处理等基础理论知识,获得了很多建设性结论;通过对大量实际产品的设计验证,基于实践经验数据,总结出了一套具有实用价值的经验准则。

Intel、IBM、Sun 等国际领先的半导体企业,在十几年前就设立了专门的 SI 部门,分配大量的人力物力专门研究高速系统的 SI、PI (Power Integrity) 和 EMI 问题,在这些方面的投入也使得它们一直处于半导体产业的领先地位,牢牢垄断了整个高端电子产品行业。国内对信号完整性的研究已经起步,近年来,华为、中兴等大型通信电子企业相继设立了 SI 部门,专门从事高速电路的仿真、分析与设计,已然取得了一些骄人的成绩。台湾地区对 SI 的研究起步较早,当地通信电子行业借助这种先发优势,在通信电子产品的生产、研发方面达到了世界领先水平。

SI 问题一方面具有较强的实践性,另一方面又与电磁学、电路和信号处理等基础理论知识密切相关。本书从电磁学的基础理论出发,深入浅出地阐述了与信号完整性相关的电磁学、电路和信号处理等基础理论知识,从理论和实践两个层面,详细探讨了高速电路信号完整性设计中的一些现实问题,详细论述了单一网络的信号完整性、两个或多个网络间的串扰、电源和地分配中的轨道塌陷及整个系统的电磁干扰和辐射等四类噪声源的成因,并给出了相应的解决方案。本书的编写融电学理论的体系性与工程实践的经验性于一体,侧重于引导读者建立完善的电学知识体系,充分认识电路高速效应的机理,结合工程实践,有效培养设计直觉。

本书共 8 章,第 1 章,电路与信号。

本章阐述电路与信号的本质,基于“场”的思维,运用“路”的方法研究信号的本质,以便更好地理解信号完整性效应。

第 2 章,电阻、电容和电感。

第3章,传输线。

第2章研究电阻、电容和电感的电气特性,第3章研究传输线的电气特性,目的是进一步固化信号完整性设计直觉的理论基础。

第4章,反射与端接。

反射的最直接的原因就是传输线上的阻抗突变。在高速电路中,除了由于设计不良会引入阻抗突变之外,还存在很多非故意阻抗突变。本章研究的目的是准确预测阻抗突变,选择合适的设计和端接方案设计阻抗可控互连线,并尽可能保持信号受到的阻抗恒定。

第5章,传输线的串扰。

在高速数字系统设计中,串扰现象非常普遍,当前随着客户需求的提高,数字系统正向着尺寸更小、速度更快的方向飞速发展,串扰更成为设计人员的一个回避不了的问题,所以,理解串扰的机理、掌握解决串扰问题的方法,对设计人员来说至关重要。

第6章,差分对。

差分对是指用来传输差分信号的一对耦合传输线。差分互连得到了越来越广泛的应用,目前几乎所有的高速信号都使用差分互连。鉴于此,研究差分互连的电气特性显得尤为重要。

第7章,电源分配系统。

在高速数字系统中,稳定可靠的电源供应至关重要。电源完整性质量直接影响最终PCB板的信号完整性和电磁兼容性的好坏,因此,要认真设计电源分配系统(Power Distribution System, PDS),尽量减少电源噪声。

第8章,辐射和干扰。

信号完整性问题的根源也是电磁干扰的根源,前面讨论的降低反射、串扰的设计方法和提高电源完整性的相关技术,同时也是减弱噪声源的有效方法。干扰传输通道包括辐射和传导两种。辐射耦合包括场线耦合、孔缝耦合、以TEM波的形式传播的天线对天线耦合等。传导型干扰的传导路径包括电阻性、电容性、电感性的直接传导性耦合、通过公共地等传导的公共阻抗耦合、通过互容/互感传导的线间近场耦合。

编者

2018年4月

目 录

1	电路与信号	(1)
1.1	电磁场理论	(1)
1.1.1	麦克斯韦方程组的一般形式	(1)
1.1.2	稳恒场中的麦克斯韦方程	(4)
1.1.3	无界均匀导电媒质中的时谐平面电磁波	(7)
1.1.4	良导体的趋肤效应	(12)
1.2	电磁场理论与电路理论	(14)
1.2.1	准静态场近似	(14)
1.2.2	集总化的假设	(18)
1.2.3	电压和电流	(22)
1.2.4	电路基本元件	(23)
1.2.5	电路基本定律	(26)
1.3	信号的本质	(29)
1.3.1	正弦波	(29)
1.3.2	傅里叶变换	(31)
1.3.3	信号的频谱特征与上升时间	(36)
1.3.4	信号带宽与上升时间	(40)
1.3.5	互连线的带宽	(45)
2	电阻、电容和电感	(47)
2.1	电阻	(47)
2.1.1	直流电阻、交流电阻与电导	(47)
2.1.2	导体的表面阻抗	(49)
2.1.3	电阻率、电导率和复电导率	(49)
2.1.4	介质材料的漏电阻	(50)

2.1.5	电阻元件的频率特性	(52)
2.2	电容	(54)
2.2.1	电容的定义	(54)
2.2.2	电容的电路方程	(56)
2.2.3	部分电容	(56)
2.2.4	平行板电容	(58)
2.2.5	介电常数、等效介电常数和复介电常数	(59)
2.2.6	电容元件的频率特性	(62)
2.3	电感	(63)
2.3.1	电感的定义	(64)
2.3.2	回路自感和回路互感	(65)
2.3.3	局部自感和局部互感	(68)
2.3.4	磁导率	(69)
2.3.5	电感元件的频率特性	(71)
2.3.6	交流电感	(72)
3	传输线	(75)
3.1	时谐信号驱动下的传输线	(75)
3.2	传输线的分布参数	(77)
3.3	均匀传输线分析	(78)
3.3.1	均匀传输线方程	(79)
3.3.2	均匀传输线方程的解	(80)
3.4	均匀传输线的传输特性	(82)
3.5	均匀传输线的反射系数	(87)
3.6	均匀无耗传输线	(88)
3.7	均匀传输线的阻抗	(95)
4	反射与端接	(99)
4.1	阻抗的非故意突变	(99)
4.2	反射形成的机理	(105)

4.3	多次反射与反弹图	(108)
4.4	理想状态下的反射	(109)
4.5	上升时间、线长与反射	(117)
4.6	电抗性负载的反射	(125)
4.6.1	容性负载的反射	(125)
4.6.2	感性负载的反射	(136)
4.7	端接策略	(148)
5	传输线的串扰	(158)
5.1	互感和互容	(158)
5.2	前向串扰和后向串扰	(159)
5.3	串扰分析	(162)
5.3.1	容性串扰	(162)
5.3.2	感性串扰	(167)
5.3.3	模态与远端串扰	(169)
5.4	传输线间距和 3-W 原则	(177)
5.5	保护线和分流线	(180)
6	差分对	(186)
6.1	差分信号与共模信号	(186)
6.2	差分阻抗和共模阻抗	(187)
6.3	返回平面与差分阻抗	(189)
6.4	差分信号和共模信号的端接	(191)
6.5	差分信号向共模信号的转化	(194)
6.6	动态线对差分对的串扰	(195)
6.7	返回路径中的间隙	(196)
7	电源分配系统	(198)
7.1	同步开关噪声	(198)
7.1.1	芯片内部开关噪声	(199)
7.1.2	芯片外部开关噪声	(200)

7.2	电源分配系统阻抗设计	(202)
7.3	电容退耦原理	(205)
7.3.1	从储能的角度说明	(205)
7.3.2	从阻抗的角度说明	(206)
7.3.3	电源、地平面和去耦电容	(210)
7.4	从电源系统的角度进行去耦设计	(212)
7.4.1	目标阻抗	(212)
7.4.2	需要的电容量	(212)
7.4.3	相同容值电容并联	(214)
7.4.4	不同容值电容的并联与反谐振	(215)
7.4.5	ESR 对反谐振的影响	(216)
7.4.6	参考平面层的作用	(218)
8	辐射和干扰	(219)
8.1	辐射干扰的产生机理及抑制方法	(219)
8.1.1	差模辐射	(220)
8.1.2	共模辐射	(223)
8.1.3	天线接收原理	(225)
8.2	共模抑制技术	(226)
8.3	屏蔽原理	(232)
8.4	磁屏蔽	(235)
8.5	电磁屏蔽	(237)
8.6	屏蔽体上的孔缝	(239)
	参考文献	(244)

(1) 电场的高斯定律:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \rho dV \quad (1.1)$$

(2) 磁场的高斯定律:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.2)$$

(3) 电场的环路定律:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.3)$$

(4) 磁场的环路定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \iint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.4)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度矢量; \mathbf{D} 为电场感应强度矢量, 也叫电位移矢量; \mathbf{B} 为磁感应强度矢量; \mathbf{H} 为磁场强度矢量; \mathbf{J} 为传导电流的电流密度矢量; ρ 为体电荷密度; $\iint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$ 代表位移电流, 定义为电位移矢量随时间的变化率对曲面的积分; $\iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$ 代表传导电流。

位移电流与传导电流两者的共同点在于都可以在空间激发磁场, 但二者也有本质的不同:

(1) 传导电流是自由电荷的定向运动, 而位移电流的本质是变化着的电场, 不是电荷作定向运动形成的电流;

(2) 传导电流在通过导体时会产生焦耳热, 而位移电流不会产生焦耳热;

(3) 位移电流也即变化着的电场, 可以存在于真空、导体、电介质中, 而传导电流只能存在于导体中。

式(1.1)是电场的高斯定律, 描述了电场的性质, 反映总的电场和电荷之间的关系。在一般情况下, 电场可以是自由电荷的电场, 也可以是变化磁场激发出的感应电场, 而感应电场是涡旋场, 它的电位移线是闭合的, 对封闭曲面的通量无贡献。该方程说明, 在时变的条件下, 从任意一个闭合曲面 S 出来的 \mathbf{D} 的净通量, 应等于该闭合曲面所包围的闭合体 V 内全部自由电荷的总和。由式(1.1)的边界条件引出导体屏蔽腔。

式(1.2)是磁场的高斯定律, 也叫磁通连续性原理, 描述了磁场的性质。磁场可以由传导电流激发, 也可以由变化电场的位移电流所激发, 它们的磁场都是涡旋场, 磁感应线都是闭合线, 对封闭曲面的通量无贡献。该方程说明, 对于任意一个闭合曲面, 有多少磁通进入曲面就有同样数量的磁通离开, 即磁感应线既无始端又无

终端,同时也说明并不存在磁单极子,即不存在与电荷相对应的磁荷。

式(1.3)是电场的环路定律,即法拉第电磁感应定律,描述了变化的磁场激发电场的规律。虽然电场和电荷有关系,但电场和磁场的关系总符合这一定律。该方程说明电场强度 E 沿任意闭合曲线 l 的线积分等于穿过由该曲线所限定曲面 S 的磁通对时间的变化率的负值。这里提到的闭合曲线 l ,并不一定要由导体构成,它可以是介质回路,甚至只是任意一个闭合轮廓。

式(1.4)是磁场的环路定律,描述了传导电流(电荷的定向运动)和变化的电场(产生位移电流,位移电流不产生焦耳热)激发磁场的规律。该方程说明了磁场和电流及变化的电场之间的联系,是由安培环路定律推广而得到的全电流定律,其含义是:磁场强度 H 沿任意闭合曲线 l 的线积分等于穿过此曲线限定的曲面的全电流。

麦克斯韦方程组的积分形式反映了空间某区域的电磁场量(D 、 E 、 B 、 H)和场源(电荷 q 、电流 I)之间的关系,如图 1.1 所示。

微分形式的麦克斯韦方程组描述空间逐点的电磁场量和电荷、电流之间的关系。麦克斯韦方程组的微分形式如下:

(1) 电场的高斯定律:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.5)$$

(2) 磁场的高斯定律:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.6)$$

(3) 电场的环路定律:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.7)$$

(4) 磁场的环路定律:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.8)$$

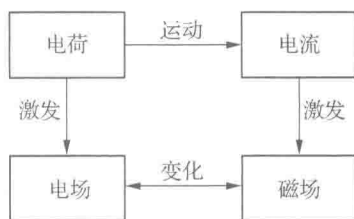


图 1.1 场量与场源的关系

式(1.5)是静电场高斯定律的推广,说明在时变条件下,电位移 D 的散度等于该点的自由电荷的体密度。

式(1.6)是磁通连续性原理的微分形式,说明磁通密度 B 的散度恒等于0,即 B 线是无始无终的,也就是说不存在与电荷对应的磁荷。

式(1.7)是法拉第电磁感应定律的微分形式,说明电场强度 E 的旋度等于该点磁通密度 B 的时间变化率的负值,即电场的漩涡源是磁通密度的时间变化率。

式(1.8)是全电流定律的微分形式,它说明磁场强度 \mathbf{H} 的旋度等于该点的全电流密度,即磁场的漩涡源是全电流密度,位移电流与传导电流一样都能产生磁场。

概括地说,麦克斯韦方程组的四个方程说明了变化的磁场能在周围空间产生电场,而变化的电场能在周围空间产生磁场;进一步地,均匀变化的磁场能在周围空间产生恒定的电场,均匀变化的电场能在周围空间产生恒定的磁场,而非均匀变化的磁场能在周围空间产生非均匀变化的电场,非均匀变化的电场能在周围空间产生非均匀变化的磁场。

应用麦克斯韦方程组解决实际问题时,要考虑介质对电磁场的影响。对于均匀媒质,有 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$, 其中 ϵ 、 μ 、 γ 分别为媒质的介电常数、磁导率和电导率,即媒质的电磁参数。对于非均匀介质,要考虑电磁场量在不同介质的分界面处的边值关系。真空的介电常数为 $\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \approx 8.85 \text{ pF/m}$ 、磁导率为 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 、电导率为 $\gamma = 0 \text{ S/m}$ 。

1.1.2 稳恒场中的麦克斯韦方程

静电场是指电量不随时间变化的、相对于观察者静止的电荷在周围空间产生的电场。稳恒磁场也称静磁场,静磁场是指恒定不变的电流产生的、不随时间变化的磁场。静电场和静磁场称为稳恒场。

1) 稳恒场中的麦克斯韦方程

对于稳恒场, $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$, 方程组就还原为静电场和静磁场的方程:

(1) 静电场的高斯定律:

$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \rho dV = q_0, \text{ 或 } \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.9)$$

(2) 静磁场的高斯定律:

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0, \text{ 或 } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.10)$$

(3) 静电场的环路定律:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0, \text{ 或 } \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1.11)$$

(4) 静磁场的安培环路定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = I_0, \text{ 或 } \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.12)$$

式(1.9)还可变为 $\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\iiint_V \rho dV}{\epsilon} = \frac{q_0}{\epsilon}$, $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ 。式(1.9)说明静电场

电场感应强度 D 在任意闭曲面 S 上的通量等于闭曲面 S 所包围的带电体 V 内的净电量; 在静止电荷周围有静电场, 静电场电场强度是有源场(有散场), 静止电荷是其通量源。电场线从正电荷出发, 终止于负电荷。

式(1.10) 说明静磁场磁感应强度 B 在任意闭曲面 S 上的通量等于零, 磁感应线是连续闭曲线, 因此, 静磁场高斯定律也称为磁通连续性定律; 静磁场是无散场, 没有通量源。

式(1.11) 说明静电场电场强度在任意环路上的环量均等于零; 静电场电场强度不存在漩涡源, 是无旋场。换句话说, 在静电场中, 电场力做功与路径无关, 仅取决于起点和终点的位置。对于如图 1.2 所示的闭合路径 l , 将式(1.11) 用于此闭合路径得:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint_{l_1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} - \oint_{l_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

式(1.12) 说明恒定电流是静磁场磁感应强度的漩涡源, 电流能产生环形磁场, 在恒定电流附近有静磁场, 静磁场是有旋场。

稳恒场中的麦克斯韦方程可以扼要地概括为, 净电荷产生恒定的电场, 而恒定的电场不会产生磁场, 恒定电流源产生恒定的磁场, 而恒定的磁场不会产生电场。

2) 不同导电媒质的分界面的边界条件

由式(1.11)、式(1.12) 可得恒定电流场中不同导电媒质分界面的边界条件。如图 1.3, 恒定电流场中不同导电媒质分界面两侧的电场强度切向分量连续, 但其法向分量不连续, 即

$$\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t} \quad (1.13)$$

$$\mathbf{E}_{1n} \neq \mathbf{E}_{2n} \quad (1.14)$$

而电流密度的法向分量连续, 但其切向分量不连续, 即

$$\mathbf{J}_{1n} = \mathbf{J}_{2n} \quad (1.15)$$

$$\mathbf{J}_{1t} \neq \mathbf{J}_{2t} \quad (1.16)$$

而由于 $\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}$, 所以,

$$\gamma_1 \mathbf{E}_{1n} = \gamma_2 \mathbf{E}_{2n} \quad (1.17)$$

$$\frac{\mathbf{J}_{1t}}{\gamma_1} = \frac{\mathbf{J}_{2t}}{\gamma_2} \quad (1.18)$$

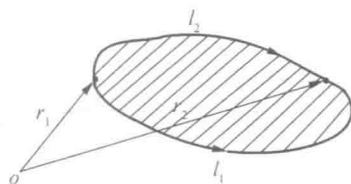


图 1.2 闭合路径 l

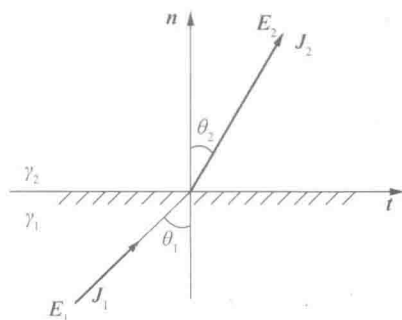


图 1.3 恒定电流场中不同导电媒质的分界面

(1) 良导体与理想介质的分界面

对于如图 1.4 所示的良导体与理想介质的分界面,良导体的电导率 $\gamma_1 \neq 0$,而理想介质的电导率 $\gamma_2 = 0$ 。由于 $\gamma_2 = 0$,则理想介质中的电流密度 $\mathbf{J}_2 = \gamma_2 \mathbf{E}_2 = 0$,所以有 \mathbf{J}_2 的法向分量 $\mathbf{J}_{2n} = 0$,切向量 $\mathbf{J}_{2t} = 0$ 。根据式(1.13)和式(1.14),良导体中电场的切向量 $\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t} = \mathbf{J}_{1t}/\gamma_1$,法向量 $\mathbf{E}_{1n} \neq \mathbf{E}_{2n}, \mathbf{E}_{1n} = \mathbf{J}_{1n}/\gamma_1 = 0, \mathbf{E}_{2n} \neq 0$,根据式(1.15)和式(1.16),良导体中的电流密度 \mathbf{J}_1 的法向量 $\mathbf{J}_{1n} = \mathbf{J}_{2n} = 0, \mathbf{J}_1$ 仅在分界面的切线方向上存在,即 $\mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_{1t}, \mathbf{J}_{2t} \neq \mathbf{J}_{1t}$,进而可得 $E_{2t} \ll E_{2n}$ 。可见,如图 1.5 所示,在均匀导体内电流沿平行于导体表面流动, \mathbf{E}_2 不垂直导体表面,导体表面不是等位面,导体也不是等位体,这是由于 γ_1 有限,导体中沿电流方向存在电场。而在静电场中,导体内电场强度 $\mathbf{E} = 0$,介质中的场强总是垂直导体表面,导体是等位体,其表面是等位面。在这一点,恒定电场与静电场有根本的区别。

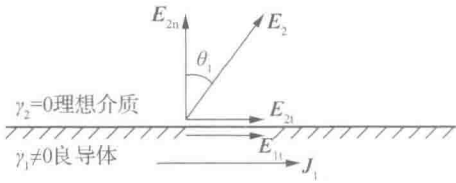


图 1.4 良导体与理想介质的分界面

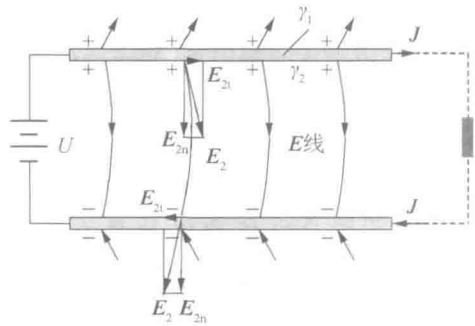


图 1.5 平行双线间的准 TEM 波

(2) 载恒定电流的均匀导电媒质内部无(体)电荷存在

因为 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$,而 $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} = \frac{\gamma}{\epsilon} \mathbf{D}$,所以 $\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left(\frac{\gamma}{\epsilon} \mathbf{D} \right) = \frac{\gamma}{\epsilon} \nabla \cdot \mathbf{D} = 0$,又因为 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$,所以 $\rho = 0$ 。这说明,载恒定电流的均匀导电媒质内部无(体)电荷存在,电荷分布在载流导体的表面。

3) 静电场中的导体

导体中存在大量能自由运动的带电粒子,它们受电场力作用而定向运动,形成电流。最常见的导体是金属,其中的带电粒子是自由电子,自由电子带负电荷,失去电子的金属离子带正电荷但不能移动。

若对导体施加静电场 \mathbf{E}_0 ,导体中的自由带电粒子会在静电场作用下定向运动并积累于导体表面,形成某种电荷分布,称为感应电荷;这种电荷分布在导体内产生与 \mathbf{E}_0 方向相反的电场 \mathbf{E}' ,如图 1.6 所示。带电粒子的运动会持续到 \mathbf{E}' 与 \mathbf{E}_0 完全

抵消,这时导体内的总电场强度为零,导体处于静电平衡状态。静电平衡状态下的导体内部电场强度处处为零,电荷只分布于导体表面,导体内部无净电荷。导体上没有电荷的定向运动,因此导体上任意两点间的电位差必为零,导体是等位体,其表面是等位面,电场线与导体表面垂直。

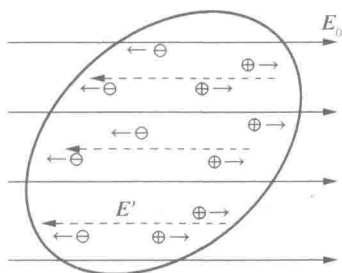


图 1.6 导体的静电平衡过程

1.1.3 无界均匀导电媒质中的时谐平面电磁波

随时间作简谐变化(包括正弦变化和余弦变化)的电磁波称为时谐电磁波,又称为正弦电磁波。等相位面(波振面)为平面的时谐电磁波称为时谐平面电磁波。特别地,时谐平面横电磁波(TEM波)是一种在电子工程实践中广泛应用的电磁波,而任意时变形式的电磁波都可以用傅里叶级数或傅里叶积分展开成时谐电磁波的叠加,另外,通过研究无界均匀有耗媒质中的时谐平面 TEM 波的传播特性和传播参数,可很容易地推导出良导体和良介质中的时谐平面 TEM 波的传播特性和传播参数,所以研究时谐平面 TEM 波具有特别的意义。图 1.7 给出了时谐平面 TEM 波在无耗媒质中传播的典型特征,其电场、磁场和传播方向相互垂直,且呈右手螺旋关系,电场、磁场相位相同。

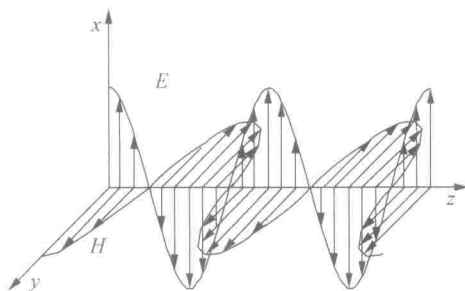


图 1.7 时谐平面 TEM 波

1) 时谐平面 TEM 波

电导率 $\gamma \neq 0$ 且为有限值的媒质称为导电媒质,如金属、石墨等。在均匀、线性、