

高等学校通信工程专业“十二五”规划教材

# 电磁场与微波技术

张具琴 主编  
吴显鼎 主审



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校通信工程专业“十二五”规划教材

# 电磁场与微波技术

张具琴 主编

乐丽琴 贺素霞 董雪峰 王 勇 副主编

吴显鼎 主审

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

## 内 容 简 介

本书按照教育部应用科技大学改革的战略要求,重点着眼于培养学生实践能力。本书将电磁场与电磁波、微波技术、天线与电波传播3部分内容有机结合,按照“由简单到复杂、由基础到应用”的顺序,介绍了电磁场和电磁波的基本理论和分析方法、长线传输线理论、微波传输线、微波网络理论、微波元件、微波有源器件与电路和天线概论等内容。每章末都有相应内容的小结,并给出了相关习题。附录中给出了基本坐标关系、常用矢量恒等式和一些微波材料参数,以便读者查阅。

本书中引入了MATLAB软件,给出了其在各部分具体实例的应用分析和详细程序,充分体现了现代分析方法与经典理论的融合,有利于读者对各部分内容的自主化和形象化学习,提高学习效率。

本书适合作为本科通信工程专业学生的教材,也可以作为相关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波技术/张具琴主编. —北京:中国铁道出版社, 2015. 8

高等学校通信工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-113-19932-6

I. ①电… II. ①张… III. ①电磁场-高等学校-教材  
②微波技术-高等学校-教材 IV. ①O441.4 ②TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第194387号

书 名: 电磁场与微波技术  
作 者: 张具琴 主编

策划编辑: 周 欣

责任编辑: 周海燕

读者热线: 400-668-0820

封面设计: 一克米工作室

责任校对: 汤淑梅

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 河北新华第二印刷有限责任公司

版 次: 2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.5 字数: 533千字

书 号: ISBN 978-7-113-19932-6

定 价: 43.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836

打击盗版举报电话:(010) 51873659

黄河科技学院作为全国 33 所入选应用科技大学改革试点战略研究项目的本科院校之一,全面、深入展开了转型发展工作,不断探索“产学研一体、教学做合一”的应用型人才培养模式,积极促进我国现代职业教育发展和现代职业教育体系建设。

本书积极吸取黄河科技学院应用科技大学改革试点的转型发展思路,认真整合相关教学改革成果,从培养学生的实践应用能力出发,对教材的内容及编排进行了仔细的推敲和研究,与传统的相关教材相比,有如下鲜明的特点:

(1) 教学内容遵循“淡化数学分析,强化技术应用;淡化抽象概念,强化量纲分析;淡化过程分析,强化逻辑思路;淡化内部原理分析,强化系统外部特性;淡化微观细节,强化宏观设计;淡化定量推导,强化定性分析”的原则,更倾向于与工程应用相结合。在理论分析上,注重抓住基本概念、基本理论、基本分析思路和基本分析方法,舍去了不必要的数学分析和推导,充分突出重要结论的分析和应用,并通过引入大量工程应用实例,做到理论与实践结合,明确知识的具体应用方向和应用方法,这对培养学生的工程意识和工程概念、培养学生理论和实践相结合的能力、锻炼学生的创新意识和创新能力具有重要作用。

(2) 引入 MATLAB 软件辅助教学,将 MATLAB 软件应用到各章的具体学习中,使得抽象的电波传输和复杂的天线特性分析能够更加形象生动地呈现出来,有利于学生的理解和掌握。通过具体程序仿真,也有利于学生的自主学习和实践,同时,用计算机辅助分析电磁场、微波系统和天线本身就给学生提供了一种分析问题和解决问题的方法,提高了学生解决问题的能力。

(3) 将电磁场与电磁波、微波技术、天线与电波传播 3 部分内容有机结合,按照“由简单到复杂,由基础到应用”的顺序,介绍了电磁场与电磁波、微波技术、天线与电波传播的基本概念、基本理论、基本分析方法及基本应用。增加了微波有源器件与电路的分析,改变了以往只能学习微波无源器件的现状,使学生能够真正接触到微波系统,锻炼了学生用所学知识解决实际微波系统问题的能力。

本书由黄河科技学院张具琴担任主编,完成了全书的结构设计、内容修改和定稿工作,并编写了第 1 章和第 2 章;黄河科技学院乐丽琴、贺素霞、董雪峰,中国电子科技集团公司第二十七研究所王勇担任副主编,分别编写了第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 5 章,第 7 章由乐丽琴、董雪峰、贺素霞共同编写。全书由郑州大学吴显鼎教授主审。

本书在编写过程中,参考和引用了不少相关的文献,并采纳了 MATLAB 软件的运行结果,谨向相关编著者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请广大读者指正。

编者

2015 年 6 月

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第0章 绪 论 .....               | 1  |
| 0.1 电磁场理论和电路理论 .....        | 1  |
| 0.2 电磁波的频谱 .....            | 1  |
| 0.3 微波的特点及其应用 .....         | 3  |
| 0.4 本书的主要内容 .....           | 6  |
| 第1章 电磁场与电磁波的基本理论 .....      | 7  |
| 1.1 电磁场中的基本矢量 .....         | 7  |
| 1.1.1 电场强度 .....            | 7  |
| 1.1.2 电位移矢量 .....           | 8  |
| 1.1.3 磁感应强度 .....           | 9  |
| 1.1.4 磁场强度 .....            | 9  |
| 1.2 电磁场的基本方程 .....          | 11 |
| 1.2.1 全电流定律 .....           | 11 |
| 1.2.2 电磁感应定律 .....          | 13 |
| 1.2.3 高斯定律 .....            | 14 |
| 1.2.4 磁通量连续性定律 .....        | 15 |
| 1.3 麦克斯韦方程组 .....           | 15 |
| 1.3.1 麦克斯韦方程组的积分形式 .....    | 15 |
| 1.3.2 麦克斯韦方程组的微分形式 .....    | 16 |
| 1.3.3 数学知识补充 .....          | 17 |
| 1.4 边界条件 .....              | 18 |
| 1.4.1 边界上的电场强度和磁场强度 .....   | 18 |
| 1.4.2 边界上的电位移矢量和磁感应强度 ..... | 19 |
| 1.5 交变电磁场的能量及能流 .....       | 20 |
| 1.6 静态场 .....               | 23 |
| 1.6.1 静电场 .....             | 24 |
| 1.6.2 恒流电场 .....            | 30 |
| 1.6.3 恒流磁场 .....            | 32 |
| 1.7 平面电磁波 .....             | 37 |
| 1.7.1 平面电磁波概述 .....         | 38 |
| 1.7.2 理想介质中的均匀平面波 .....     | 38 |
| 1.7.3 导电媒质中的平面波 .....       | 43 |
| 1.7.4 电磁波的极化 .....          | 46 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1.7.5 正弦平面波在不同界面上的垂直入射 .....   | 48 |
| 1.7.6 正弦平面波在不同媒质分界面上的斜入射 ..... | 50 |
| 1.8 计算机仿真分析 .....              | 55 |
| 小结 .....                       | 58 |
| 习题 .....                       | 61 |

## 第②章 传输线理论 ..... 64

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.1 长线及分布参数电路模型 .....        | 64 |
| 2.1.1 长线概述 .....             | 64 |
| 2.1.2 分布参数电路模型 .....         | 65 |
| 2.2 无耗传输线方程及其解 .....         | 66 |
| 2.2.1 传输线方程 .....            | 67 |
| 2.2.2 无耗传输线方程的通解 .....       | 67 |
| 2.2.3 有耗传输线方程 .....          | 71 |
| 2.3 无耗传输线的基本特性 .....         | 72 |
| 2.3.1 传输特性 .....             | 72 |
| 2.3.2 特性阻抗 .....             | 73 |
| 2.3.3 输入阻抗和反射系数 .....        | 74 |
| 2.3.4 驻波系数和行波系数 .....        | 76 |
| 2.3.5 传输功率 .....             | 78 |
| 2.4 无耗传输线的工作状态 .....         | 79 |
| 2.4.1 行波工作状态 (无反射情况) .....   | 79 |
| 2.4.2 驻波工作状态 (全反射情况) .....   | 80 |
| 2.4.3 行驻波工作状态 (部分反射情况) ..... | 84 |
| 2.5 阻抗圆图及其应用 .....           | 87 |
| 2.5.1 阻抗圆图 .....             | 87 |
| 2.5.2 导纳圆图 .....             | 90 |
| 2.6 传输线阻抗匹配 .....            | 91 |
| 2.6.1 共轭匹配 .....             | 91 |
| 2.6.2 阻抗匹配 .....             | 92 |
| 2.7 计算机仿真分析 .....            | 95 |
| 小结 .....                     | 97 |
| 习题 .....                     | 98 |

## 第③章 微波传输线 ..... 102

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 3.1 引言 .....          | 102 |
| 3.2 同轴线 .....         | 103 |
| 3.3 带状线 .....         | 107 |
| 3.4 微带传输线 .....       | 108 |
| 3.5 耦合带状线和耦合微带线 ..... | 111 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 3.6   | 金属波导传输线的一般理论 .....        | 115 |
| 3.7   | 矩形波导 .....                | 117 |
| 3.7.1 | 矩形波导中传输模式及其场分布 .....      | 117 |
| 3.7.2 | 矩形波导中传输模式的纵向传输特性 .....    | 120 |
| 3.7.3 | 矩形波导中传输模式的场结构 .....       | 123 |
| 3.7.4 | 矩形波导中传输功率、功率容量及设计尺寸 ..... | 128 |
| 3.8   | 圆波导 .....                 | 130 |
| 3.9   | 计算机仿真分析 .....             | 133 |
|       | 小结 .....                  | 135 |
|       | 习题 .....                  | 136 |
| 第④章   | 微波网络基础 .....              | 138 |
| 4.1   | 微波网络概述 .....              | 138 |
| 4.2   | 等效传输线 .....               | 139 |
| 4.3   | 微波元件等效为微波网络的原理 .....      | 141 |
| 4.4   | 二端口微波网络 .....             | 143 |
| 4.5   | 微波网络的工作特性参量 .....         | 155 |
| 4.6   | 计算机仿真分析 .....             | 157 |
|       | 小结 .....                  | 159 |
|       | 习题 .....                  | 161 |
| 第⑤章   | 微波元件 .....                | 163 |
| 5.1   | 基本电抗元件 .....              | 163 |
| 5.1.1 | 波导中的基本电抗元件 .....          | 163 |
| 5.1.2 | 同轴线基本电抗元件 .....           | 166 |
| 5.1.3 | 微带线基本电抗元件 .....           | 167 |
| 5.2   | 终接元件、转接元件与分支元件 .....      | 169 |
| 5.2.1 | 微波终接元件 .....              | 169 |
| 5.2.2 | 微波转接元件 .....              | 171 |
| 5.2.3 | 微波分支元件 .....              | 172 |
| 5.3   | 阻抗调配器与阻抗变换器 .....         | 176 |
| 5.3.1 | 阻抗调配器 .....               | 176 |
| 5.3.2 | 阻抗变换器 .....               | 179 |
| 5.4   | 衰减器和相移器 .....             | 181 |
| 5.4.1 | 衰减器 .....                 | 181 |
| 5.4.2 | 移相器 .....                 | 182 |
| 5.5   | 定向耦合器 .....               | 182 |
| 5.5.1 | 定向耦合器的技术指标 .....          | 183 |
| 5.5.2 | 波导型定向耦合器 .....            | 184 |
| 5.5.3 | 平行耦合线定向耦合器 .....          | 185 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 5.5.4      | 分支定向耦合器 .....           | 186        |
| 5.5.5      | 微带环形电桥 .....            | 187        |
| 5.6        | 微波谐振器 .....             | 188        |
| 5.6.1      | 微波谐振腔的基本参量 .....        | 189        |
| 5.6.2      | 几种常用的微波谐振器 .....        | 190        |
| 5.6.3      | 谐振器激励与耦合 .....          | 192        |
| 5.7        | 微波滤波器与微波铁氧体元件 .....     | 193        |
| 5.7.1      | 微波滤波器 .....             | 193        |
| 5.7.2      | 铁氧体元件 .....             | 195        |
| 5.8        | 计算机仿真分析 .....           | 198        |
| 小结         | .....                   | 201        |
| 习题         | .....                   | 201        |
| <b>第⑥章</b> | <b>微波有源器件与电路 .....</b>  | <b>204</b> |
| 6.1        | 微波晶体管放大器 .....          | 204        |
| 6.1.1      | 概述 .....                | 204        |
| 6.1.2      | 微波晶体管放大器的稳定性 .....      | 205        |
| 6.1.3      | 小信号微波晶体管放大器的设计 .....    | 208        |
| 6.1.4      | 微波晶体管功率放大器 .....        | 212        |
| 6.2        | 微波混频器 .....             | 213        |
| 6.2.1      | 金属-半导体结二极管 .....        | 214        |
| 6.2.2      | 变容二极管 .....             | 216        |
| 6.2.3      | 收信混频原理及其等效电路 .....      | 218        |
| 6.2.4      | 混频器的主要特性 .....          | 221        |
| 6.2.5      | 混频器基本电路 .....           | 223        |
| 6.2.6      | 混频器设计举例 .....           | 227        |
| 6.3        | 微波振荡器 .....             | 228        |
| 6.3.1      | 概述 .....                | 228        |
| 6.3.2      | 负阻型振荡器的工作原理及其电路 .....   | 228        |
| 6.3.3      | 微波晶体管振荡器的工作原理及其电路 ..... | 231        |
| 小结         | .....                   | 234        |
| 习题         | .....                   | 235        |
| <b>第⑦章</b> | <b>天    线 .....</b>     | <b>238</b> |
| 7.1        | 引言 .....                | 238        |
| 7.2        | 天线基本理论 .....            | 239        |
| 7.2.1      | 概论 .....                | 239        |
| 7.2.2      | 基本振子的辐射 .....           | 240        |
| 7.2.3      | 天线的电参数 .....            | 242        |
| 7.2.4      | 接收天线理论 .....            | 249        |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7.3 线天线.....           | 252 |
| 7.3.1 对称振子天线 .....     | 252 |
| 7.3.2 天线阵 .....        | 257 |
| 7.3.3 地面天线 .....       | 266 |
| 7.3.4 常用天线设备 .....     | 274 |
| 7.4 面天线.....           | 283 |
| 7.4.1 面天线分析方法 .....    | 283 |
| 7.4.2 抛物面天线 .....      | 285 |
| 7.4.3 卡塞格伦天线 .....     | 290 |
| 7.5 电波传播 .....         | 293 |
| 7.5.1 电波传播的基本概念 .....  | 293 |
| 7.5.2 视距传播 .....       | 295 |
| 7.5.3 天波传播 .....       | 298 |
| 7.5.4 地面波传播 .....      | 300 |
| 7.5.5 不均匀媒质的散射传播 ..... | 301 |
| 7.6 天线的仿真分析 .....      | 302 |
| 小结 .....               | 305 |
| 习题 .....               | 306 |
| 附录 A 基本坐标及变换关系 .....   | 309 |
| 附录 B 矢量恒等式 .....       | 313 |
| 附录 C 常用导体材料的特性 .....   | 315 |
| 附录 D 常用介质材料的特性 .....   | 316 |
| 参考文献 .....             | 317 |

# 第0章 绪 论

## 0.1 电磁场理论和电路理论

无线电中的电磁理论体系可分为两大类：电磁场理论和电路理论。电磁场是指在无限大空间中或在一定区域范围内所发生的电磁过程，这时要研究的是电场  $\mathbf{E}$  和磁场  $\mathbf{H}$  随空间位置  $(x, y, z)$  和时间  $t$  的变化规律，对电磁场问题通常是用电磁场理论，即通过麦克斯韦方程组结合边界条件来求解，这种方法通常称为“场解法”；对于较复杂的边界值问题，可借助于计算机、用数值计算方法来解决。电路通常由电感、电容和电阻等集总参数的无源电路元件以及电源构成，要研究的是电路各节点电压、各支路电流与时间的关系，对电路问题的分析通常用基尔霍夫定律为基础的电路理论来求解，这种求解方法通常称为“路解法”。

电磁场理论和电路理论两者是不同的，但又是相辅相成的。电磁场理论是微波理论和技术的基础，它是分析微波问题的主要工具，但是应该指出：电路理论的许多概念和方法在微波技术中仍具有十分重要的意义，例如，在微波中所应用的等效电压、等效电流和阻抗等参数就是电路中相应参数的推广；对有些微波问题，可以用等效电路概念把场的问题转化为电路的问题，因为用电路理论进行求解比较方便，微波网络也就是低频网络在微波条件下的推广。相反，在低频技术中，不但电感、电容的计算需要电磁场理论，而且其信号的辐射和在空间的传播、相邻电路间的耦合等问题也必须应用电磁场理论来解决，因此，不应当把电磁场理论和电路理论割裂开来，片面地认为在微波中只需要电磁场理论而在低频中只需要电路理论，正确的方法是全面地掌握电磁场理论和电路理论，根据实际问题的需要选用，或将“场”和“路”的概念和方法结合起来进行处理。

## 0.2 电磁波的频谱

从“场”的观点出发，让我们来观察无线电磁波：当非匀速运动的电荷（如交变电流）将激发时变电磁场，而离开激发源的自由电磁场在空间以电磁波的形式传播，复杂波形的电磁波总可用傅里叶级数（或积分）展开成简谐电磁波的叠加。因而可将电磁波按其频率的高低来分类，如图 0.2.1 所示，表 0.2.1 列出了国际无线电频谱的波段划分。

表 0.2.1 国际无线电频谱的波段划分

| 波 段 号 | 符号 (中译名)  | 频率范围<br>(下限除外包括上限) | 相当米制划分        | 波段的米制缩写 |
|-------|-----------|--------------------|---------------|---------|
| 4     | VLF (甚低频) | 3 ~ 30 kHz         | 万米波           | B. Mam. |
| 5     | LF (低频)   | 30 ~ 300 kHz       | 千米波           | B. km.  |
| 6     | MF (中频)   | 300 ~ 3 000 kHz    | 百米波           | B. hm.  |
| 7     | HF (高频)   | 3 ~ 30 MHz         | 十米波           | B. dam. |
| 8     | VHF (甚高频) | 30 ~ 300 MHz       | 米 波           | B. m.   |
| 9     | UHF (超高频) | 300 ~ 3 000 MHz    | 分米波 (十分之一米波)  | B. dm.  |
| 10    | SHF (特高频) | 3 ~ 30 GHz         | 厘米波 (百分之一米波)  | B. cm.  |
| 11    | EHF (极高频) | 30 ~ 300 GHz       | 毫米波 (千分之一米波)  | B. mm.  |
| 12    | 超极高频      | 300 ~ 3 000 GHz    | 亚毫米波 (万分之一米波) | B. dmm. |

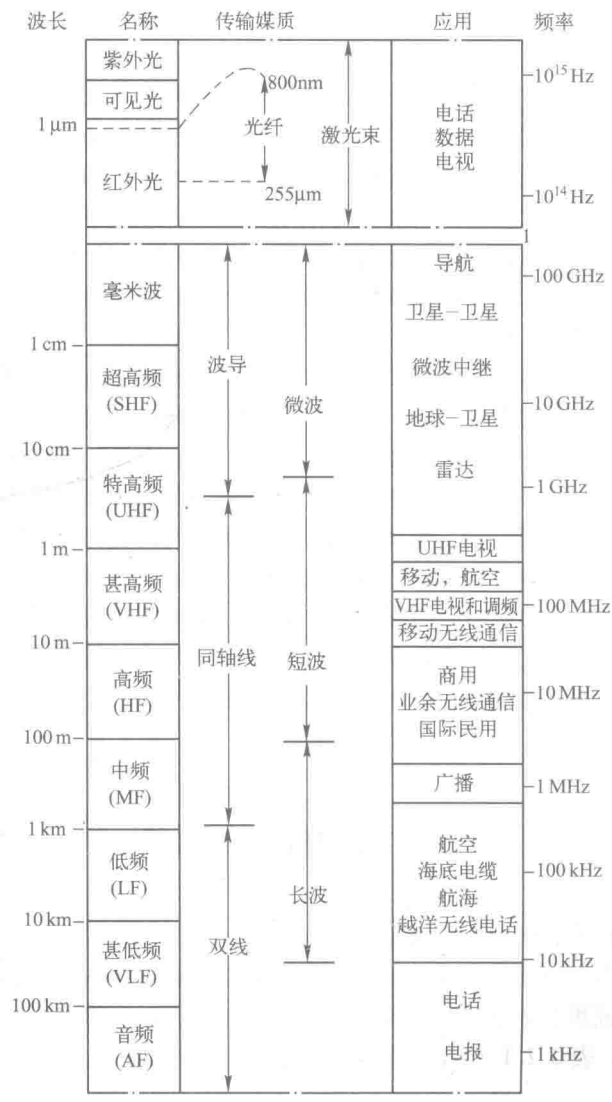


图 0.2.1 电磁波频谱

微波是无线电波中高频率波段,其频率范围为  $300\text{ MHz} \sim 3\,000\text{ GHz}$ 。微波波段是相当宽的,它几乎是普通无线电波的长、中、短各波段总和的  $10\,000$  倍。这就给目前比较拥挤的频率资源提供了广阔的应用空间。在通信和雷达工程中,常使用英文字母来表示微波波段的名称,如表 0.2.2 所示。

表 0.2.2 微波常用波段代号、对应波长与频率

| 波段代号 | 标称波长/cm | 波长范围/cm  | 频率范围/GHz  |
|------|---------|----------|-----------|
| L    | 22      | 15~30    | 1.0~2.0   |
| S    | 10      | 7.5~15   | 2.0~4.0   |
| C    | 5       | 3.75~7.5 | 4.0~8.0   |
| X    | 3       | 2.4~3.75 | 8.0~12.5  |
| Ku   | 2       | 1.67~2.4 | 12.5~18.0 |
| K    | 1.25    | 1.1~1.67 | 18.0~27.0 |
| Ka   | 0.8     | 0.75~1.1 | 27.0~40.0 |

注:  $1\text{ MHz} = 10^6\text{ Hz}$ ,  $1\text{ GHz} = 10^9\text{ Hz}$ ,  $1\text{ THz} = 10^{12}\text{ Hz}$ 。

### 0.3 微波的特点及其应用

(1) 微波的特点。既然微波也是电磁波,为什么又要把微波从整个电磁波谱中划分出来专门加以研究呢?主要是因为其波长比普通无线电波小得多,相应的频率高得多,引起电磁波性质发生了变化,使得微波具有一系列不同于普通无线电波的特点。

① 微波波长短:微波的波长范围为  $0.1\text{ mm} \sim 1\text{ m}$ ,如此短的波长与地球上的物体(如建筑物,飞机,导弹)的尺寸相比要小得多或属于同一个数量级。当波长比物体尺寸小得多时,微波的性质类似于可见光( $0.76 \sim 0.40\text{ }\mu\text{m}$ ),称为似光特性。利用这个特性可以获得方向性很高的天线(如抛物面天线)。还可利用其直线传播的特点进行微波中继通信、无线电定位等。当微波波长与物体尺寸是属同一个数量级时,微波与声波相似,许多波导系统的元件可以在声学系统中找到相应的器件,例如:波导管相当于声学中的传声筒,号角天线相当于声学中的扬声器;各种谐振腔也可以在声学中找到相应的音响器件,如开槽天线相当于声学中的笛或箫等。

② 微波振荡周期短( $10^{-8} \sim 10^{-12}\text{ s}$ ):这样短的周期已和真空器件中的电子渡越时间属同一个数量级,使得常用的真空电子器件已经不能满足使用要求。下面以 NPN 晶体管为例加以说明。

NPN 晶体管电路示意图如图 0.3.1 所示,其基极 b 接入信号如图 0.3.2 所示, $R$  上的输出电压经过直流滤波后得到的交流信号为图 0.3.2 所示信号的放大信号。但考虑到电子渡越时间(即电子由发射极 e 极传输到集电极 c 极所需要的时间,记为  $T_d$ )后,输出信号会发生严重的失真。

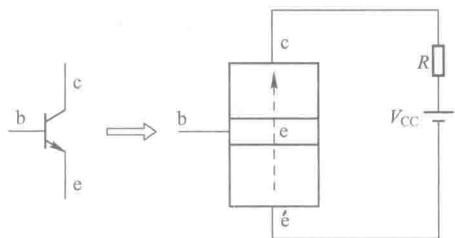


图 0.3.1 NPN 晶体管电路示意图

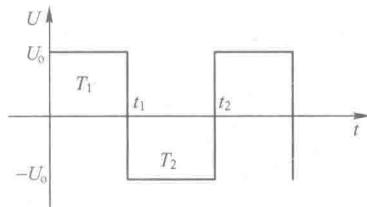


图 0.3.2 基极 b 的输入信号

电子渡越时间对信号传输的影响：对交流信号而言，在  $T_1$  期间发射结正偏，e 极发射的电子向 c 极运动，若不考虑电子渡越时间，晶体管导通，R 上有放大信号输出；在  $T_2$  期间，发射结反偏，晶体管截止。而当需要考虑渡越时间  $T_d$  时，若  $T_d > T_b$ ， $T_d > T_2$ ，则

正偏时：晶体管不导通。因为  $T_d > T_1$ ，即在  $T_1$  期间电子从 e 极向 c 极运动所需的时间  $T_d > T_1$ ，电子尚未到达 c 极，晶体管为截止状态。

反偏时：有一定的集电极电流。因为在  $T_2$  期间，e 极已经停止发射，但在  $T_1$  期间发射的电子可能会因为惯性到达 c 极，晶体管也不截止。

这就造成输出信号严重失真。

因此微波所用的晶体管必须采用新的方法来制造。如微波电子管有速调管、磁控管和行波管等，微波固体器件有体效应管、PIN 管和场效应管等。

③ 微波能穿透电离层：由于微波频率很高，它能穿透高空的电离层。利用这一特点可以进行卫星通信和宇航通信，这为天文观察提供了一个窗口，使射电天文学的研究成为可能。

由于太阳紫外线及宇宙射线的照射使大气层产生电离，形成多层等离子体层状结构，如图 0.3.3 所示，按电子密度一般可分为 D 层、E 层、 $F_1$  层和  $F_2$  层，电离层是一种带电粒子层，对电磁波的传播产生严重影响。

对普通无线电波（300 MHz 以下的电磁波），产生极强的反射（几乎为全反射），能实现环球通信，如图 0.3.4 示；另一方面，普通电磁波被屏蔽于地球附近，无法实现宇宙通信。

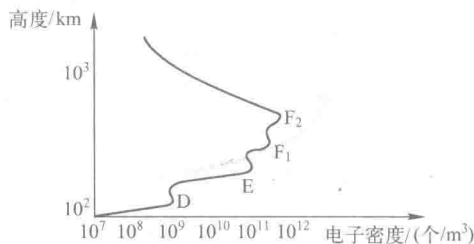


图 0.3.3 大气电离层分布图

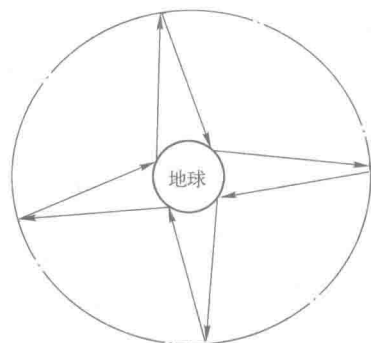


图 0.3.4 环球通信原理示意图

而微波由于其波长很短，能穿透电离层，则可实现宇宙通信，故称为观察宇宙之窗。在此基础上，宇宙通信、卫星通信及导航、射电天文学都得到很大的发展。

④ 微波具有明显的量子特性：微波像光波一样具有波粒二象性（即表征传播特性的波动性和表征能量特性的粒子性），其量子特性的能量子能量为

$$E = h \cdot f \quad (\text{单位:焦[耳],J})$$

其中，普朗克常量  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。考虑微波的频率范围 300 MHz  $\sim$  3000 GHz，则微波能量子的能量  $E$  为  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ eV}$ 。这个能量范围刚好处于生物细胞精细能级的能带之中，当微波与生物体发生相互作用时，可改变生物细胞结构。利用该特性，微波被广泛的用于食品加热、医疗卫生、制药、工业生产、生物遗传学等。

由于微波具有这些特点，使微波的应用范围、研究方法、传输系统、微波元件和器件以及测量方法均与普通无线电波不同，因此把微波从普通电磁波中划分出来专门研究，尤其是近些年来其发展越来越快，新应用更是层出不穷。下面，简单介绍几种主要的应用。

(2) 微波的应用。微波的实际应用相当广泛，这里介绍几种典型应用：

① 雷达是微波技术最早期应用。微波雷达能够准确地测定目标方位、距离和高度。它不仅用来发现敌机,跟踪和侦察导弹、宇宙火箭。导航飞机和船只,跟踪人造卫星,控制宇宙飞船飞行,而且能够测定风速、风向、雨和雪的分布、云层的高度和厚度,从而对天气进行预报;探测地下资源,测定水下目标,实现汽车防撞系统和绘制地图等。

② 微波通信是微波技术的重要应用。由于微波频带宽,信息容量大,因此微波设备可用于多路通信,例如,960路、1860路等;特别是目前广泛应用的移动通信,几乎都在微波频率范围内,电视广播主要采用的也是微波频率。由于微波频率高,它既不受外界工业干扰及天电干扰的影响,又不受季节、昼夜变化的影响,因而性能稳定,通信质量高,由于微波波长短,可以用合理尺寸制作出高增益、强方向性的天线,这就提供了小功率发射机实现稳定通信的可能性;由于微波会穿透电离层,因此,不能利用电离层的反射来实现远距离通信,只能借助于微波中继通信和卫星通信来实现远距离通信。只要利用太平洋、大西洋和印度洋上空3个卫星就能进行全球通信。

③ 微波加热器是微波技术的新应用。在最近几十年,微波单纯作为能源,在微波技术应用发展史上是一个新突破。微波加热具有加热均匀、内外同热、加热时间短、产品质量好等优点。因此微波加热在工农业生产、食品加工和造纸工业等方面得到了广泛的应用。

④ 在生物医学方面,微波技术具有更广泛的应用。应用微波不仅可以诊断疾病,如诊断肺气肿、肺水肿、癌症及测量心电图等,又能用来治病,如微波理疗机和微波针灸可以治疗关节炎、风湿等疾病。

⑤ 微波遥感和微波全息照相。因为各种物质都会不同程度地辐射微波,因此,在人造卫星上利用微波遥感技术通过接收和处理目标的微波辐射信号可确定目标的特性,如可测定大气、海洋、土壤的成份和温度的分布等,由于微波的传播不受昼夜变化和天气变化的限制,故它优于红外和可见光遥感。

微波全息照相是利用微波能够穿透不透光的非金属介质的特性对物体进行照相的技术,保安人员可利用微波全息照相发现隐藏的手枪,利用卫星对地球作全天候微波全息照相,可及时掌握火山及冰川的活动情况、农作物的生长和病虫害情况。美国阿波罗宇宙飞船还拍摄了月球表面浮土下的地层情况,金星探测器拍摄了由不透光大气包围着金星表面照片。

⑥ 科学研究方面的应用。根据各种物质对微波吸收的情况不同,可以用来研究物质内部的结构,这种技术称为微波波谱技术。有关这方面的知识称为微波波谱学;利用微波能穿透电离层并受天体反射的特点,可借助雷达来观察天体情况,为研究宇宙天体提供了新的途径,应用微波技术来研究天文现象的科学称为射电天文学和雷达天文学;利用大气对微波的吸收和反射特性,借助雷达来观察雨、雪、冰雹、雾、云等的存在和变化的情况,可以预报附近地区的天气情况,把微波技术应用于气象研究而形成一门新的科学,称为微波电气象学。

在微波广泛应用的同时,应该注意对微波辐射的防护。因为任何一个辐射源向空间辐射电磁波,除接收对象外,必然对其他区域造成干扰或污染。微波辐射对人体有害,其影响的效果随波长的增加而减小,而这种伤害主要是由于微波对人体的热效应和非热生物效应所引起的。

微波的热效应是指微波加热引起人体组织升温而产生的生理损伤,其中眼睛和睾丸部位最为敏感。人眼组织富含水分,而血液流通量少,所以,易吸收微波辐射,导致温度升高。若辐射强度超过 $80\text{ mW}/\text{cm}^2$ 时,就会伤害人眼晶状体。当其强度达到 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ 时,可以导致“微波白内障”。然而,职业性的低强度微波慢性作用可加速晶状体衰老,还可能引起视网膜改变。很多微波作业人员,还有眼疲劳或眼痛等症状。睾丸由于血液循环不良,它对电磁辐射也十分敏感,较高强度的微波辐射,可能抑止精子的生长,从而影响生育。

微波的非热生物效应是指除热效应外对人体的其他生理损伤,主要是对神经和心血管系统

的影响,对于微波非热生物效应的影响和机理至今还在继续研究。为了确保人体安全,对大功率微波设备的操作人员应采取适当的防护措施,如用铜丝或铅丝等细的金属丝与柞蚕丝混合织成的防护服、围裙等,可降低辐射功率密度。还有防护眼镜、防护头盔和面罩均能有效地保护眼睛或整个头部。

## 0.4 本书的主要内容

本书计划学时为72学时。全书主要内容为7章(除“绪论”),重点介绍电磁场的基本理论和微波技术分析方法及应用。第1章介绍电磁场和电磁波的基本理论,主要介绍电磁场的基本概念、基本定理和基本分析方法,电磁波的传播规律及特性。第2章介绍的长线理论是微波传输线的工程计算基础,解决了沿纵向传送(传输方向)中的工作状态、工程计算、匹配等一系列问题。第3章介绍的波导理论是微波传输线分析方法的理论基础,解决了传输线沿横截面上的分部特性及相应传输的特性参数。其基本概念也适用于光导纤维(光纤)。第4章介绍的网络理论是微波的等效电路理论,解决了“化场为路”的方法,并把场与路的描述统一起来。第5章微波元件是微波系统中所出现的各种不均匀部分,用来完成传输过程中的各种功能(连接、分支、耦合、滤波、匹配、隔离等),编者应用前几章的理论来描述它们的机理。第6章微波有源元件与电路,主要介绍几种典型的有源电路及其简单的设计方法。第7章天线主要介绍了天线的主要特性参数和几种常用天线设备特性,对于电波传播也做了概述。

本书采用国际单位制(SI),用到的基本单位包括:长度单位米(m);质量单位千克(kg);时间单位秒(s);电流单位安[培](A),并有相应的导出单位。对于简谐电磁场使用时间因子 $e^{j\omega t}$ 表示。

# 第1章 电磁场与电磁波的基本理论

## 本章结构

本章主要讨论电磁场和电磁波的基本概念和基本理论。在普通物理电磁学部分的基础上,引出麦克斯韦方程组,导出电磁场的边界条件和能量关系,然后分别对静电场、恒流电场和恒流磁场进行介绍,最后讨论平面电磁波在无界媒质和有界媒质中的传播规律。

## 1.1 电磁场中的基本矢量

电磁场是物质的基本形态之一,除了用力和功这2个普遍的物质特性参数来进行描述外,这里引用电磁学中的4个基本场矢量:电场强度( $E$ )、电位移矢量( $D$ )、磁感应强度( $B$ )和磁场强度( $H$ )对其进行介绍。

### 1.1.1 电场强度

由库仑实验定律可知,在点电荷 $+Q$ 形成的电场中,如图1.1.1所示,电荷为 $+q$ 点电荷所受电场力 $F$ 为

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} r_0 \quad (1.1.1)$$

式中: $q$ 为检验电荷的电荷量,它必须足够小,不致会影响 $+Q$ 的电场分布。 $F$ 为 $+q$ 所受到的电场力。 $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\epsilon_r$ 为相对介电常数, $r$ 为 $+Q$ 和 $+q$ 之间的距离, $r_0$ 为 $r$ 单位矢量(由 $+Q$ 指向 $+q$ )。

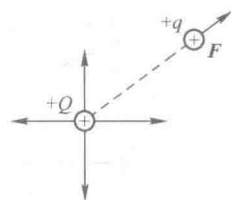


图1.1.1 点电荷相互作用示意图

电场中某点的电场强度 $E$ 定义为单位正电荷在该点所受的力,即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.1.2)$$

在国际单位制(SI)中,力 $F$ 的单位为牛[顿](N),电荷量 $q$ 的单位为库[仑](C),电场强度 $E$ 的单位为伏/米(V/m)。

所以可得点电荷 $+Q$ 的电场中的电场强度为

$$E = \frac{F}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} r_0 \quad (1.1.3)$$

式(1.1.3)可以看出,电场强度是其源(这里为电荷 $+Q$ )和物质 $\epsilon_0\epsilon_r$ 共同作用的结果。为了深入研究电场强度,下面将这2个方面的影响分开讨论。

### 1.1.2 电位移矢量

如果电介质中存在电场,则电介质中分子将被极化,极化的程度用极化强度来表示。此时电介质中的电场采用电位移矢量  $D$  来描写。其定义为

$$D = \varepsilon E \quad (1.1.4 a)$$

式中:  $\varepsilon$  为介质中的介电常数,  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  为真空或空气的介电常数,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  法/米 (F/m)。在 SI 单位制中,  $D$  的单位为库/米<sup>2</sup> (C/m<sup>2</sup>)。由量纲分析法可以看出,电位移矢量即为面电荷密度,对真空而言有

$$D_0 = \varepsilon_0 E_0 \quad (1.1.4 b)$$

注意,这里的  $D$  为与  $\varepsilon$  无关的量!以点电荷为例,由  $D$  的计算式可以明显看出来。由式 (1.1.3)、式 (1.1.4 a) 可得

$$D = \varepsilon E = \frac{Q}{4\pi r^2} r_0 \quad (1.1.4 c)$$

量纲分析  $[D] = \left[ \frac{Q}{4\pi r^2} \right] = \left[ \frac{\text{库}}{\text{米}^2} \right]$ , 引入电位移矢量  $D$  使得求电场强度  $E$  的问题分解为求  $D$ 、 $\varepsilon$ , 其中反映电荷源的影响  $D$  可以由高斯定理求出,第 1.2.3 节将具体分析,这里重点讨论介质对电场的影响,即确定  $\varepsilon$  的方法。

通常  $\varepsilon$  确定的方法有 2 种。

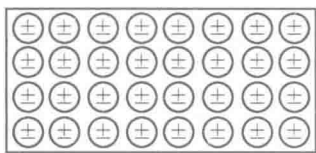
#### 1. 测量法

已知  $Q$ 、 $q$ 、 $r$ , 测量力  $F$ , 可得

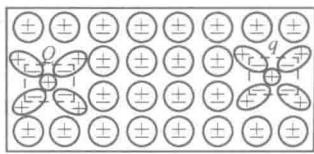
$$\varepsilon = \frac{Qq}{4\pi Fr^2} \quad (1.1.5)$$

#### 2. 理论分析法

(1) 介质的电极化现象。取  $+Q$ 、 $+q$  置于介质中,由于电荷的相互作用,使得在  $+Q$  和  $+q$  周围将产生异号的附加电荷,这些异号的附加电荷是由介质中的原子或分子的核外电子受电荷  $+Q$  和  $+q$  的吸引力作用,使得介质中原子或分子的正负电荷中心不再重合而等效出来,如图 1.1.2 所示。



(a) 无外电场时正负电荷中心重合



(b) 外场  $+Q$ 、 $+q$  存在时介质电极化

图 1.1.2 电介质的电极化

(2) 电极化的影响。由于该异号附加电荷的存在,使得  $+Q$  和  $+q$  的等效电荷量下降,代入库仑定律可得介质中的电场力相对于真空中电场力下降为真空中的  $1/\varepsilon_r$ , 即

$$\frac{F_0}{F_{\text{介质}}} = \frac{1}{\varepsilon_r} \quad (1.1.6)$$

这是因为真空中的库仑力为  $F_0 = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ , 而介质中的库仑力  $F_{\text{介质}} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2}$ , 故可导出式 (1.1.6)。

(3) 异号附加电荷的计算。介质中的电场力的下降量,取决于  $+Q$ 、 $+q$  在介质中引起的电