

# 微波器件 和电路

[美] S. Y. 利奥 著

科学出版社

# 微波器件和电路

[美] S.Y.利奥 著  
卢国铭 姜遵富 黄伟嘉 译

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书全面系统地论述了微波电子学的基本概念、理论与方法。全书共十章，内容包括微波电子学基本理论、传输线理论、微波无源器件、电真空器件、固体器件、微波集成电路和微波测量技术。每一章均有典型例题并附有大量习题。

本书可供从事微波理论和技术工作的科研、工程技术人员参考，也可作高等院校有关微波各专业的高年级学生、研究生的教材或教学参考书。

Samuel Y. Liao

## MICROWAVE DEVICES AND CIRCUITS

Prentice-Hall, Inc., 1980

## 微波器件和电路

[美] S. Y. 利奥 著

卢国铭 姜遵富 黄伟嘉 译

责任编辑 刘兴民 樊友民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1987年4月第一次印刷 印张: 24 插页, 1

印数: 0001—3,600 字数: 559,000

统一书号: 15031·795

本社书号: 4747-15-7

定价: 5.65元

## 译 者 的 话

本书是从美国 S. Y. 利奥教授 1980 年的著作“Microwave Devices and Circuits”翻译过来的。它系统全面地论述了微波电路、微波传输线理论、微波无源元器件、微波电真空器件和微波固体器件、微波集成电路和微波测量等方面的内容，深入浅出地叙述了基本概念、物理原理和数学方法，使读者能掌握分析微波电路的方法和技术。

本书的特点是：

一、选材对实际工作有较大意义，避免了实用中意义不大的内容，在论述方面亦尽力做到实用；

二、内容比较全面，论述简洁明了；

三、内容较新，注意吸收了最新成就和文献。

本书对高等院校微波器件和电路专业的教师、研究生和高年级学生来说，是一本很好的参考用书，对参加实际工作的微波电子学领域的工程技术人员亦有较大参考价值。

本书序言、绪论、第一、三、四、十章、附录、习题、索引及第二章的 2-3、2-4、2-5 节由卢国铭翻译，第五、七、八、九章及第二章的 2-0、2-1、2-2 节由姜遵富翻译，第六章及第二章的 2-6 节由黄伟嘉翻译。全书由卢国铭总校。

本书译成后，庄学曾、赵永翔、宋文淼、李英、钱志诚等同志曾分别对译稿的各章进行过仔细的审校，在此，谨向他们表示衷心的感谢。

限于译者的水平，译文不当之处在所难免，希望广大读者提出批评和指正。

1984年于北京

## 序 言

本书试图给电子工程系微波器件和电路专业的高年级或毕业班学生作为主课教科书。它的主要目的是让学生对常用的微波器件有一清楚的了解，并使其具有一些分析微波电路并对它进行测量的能力。本书是根据作者几年来授课的讲义（只教一个学期的课程），结合作者长期在微波电子学工业部门工作的经验编纂而成的。本书假定读者已经读完电磁学和固体电子学的基本课程。由于本书基本上是独立完整的，因此它也可供在微波领域工作的电子学工程师参考。

作者认为，教学和写作的基本观点是要把问题探究清楚。因此，为阐明问题的基本原理，全书尽量使用了数学分析的方法。

本书共分十章。第一、二章为导论，分别讨论电子与场之间的相互作用和平面波的有关问题。第三章论述了对高功率传输仍然很有用的传输线和波导。第四章叙述了在微波电路中常用的微波元件，如谐振腔、慢波结构、T形波导接头、定向耦合器和环形器等。第五章论及微波管，按照它们的工作和特性分为线性束管（O型）和交叉场管（M型）。第六章分析了十年来发展的微波固体器件。6-1节讨论了微波晶体三极管、隧道二极管和肖特基势垒门场效应晶体管（MESFET）。6-2到6-5节充分研究了转移电子器件（TED）、雪崩渡越时间器件、量子电子学固体器件和参量放大器。6-6节叙述了新近发展起来的工作在5-14 $\mu\text{m}$ 波长范围的红外器件和系统。近年来，随着微波集成电路的出现，微带线已经广泛用于微波电路之中。这是因为微带线为放置固体器件提供了一个敞开的易于接近的表面。第七、八章分别讨论微带线和微波集成电路。根据作者的实验，微波屏蔽和微波功率测量也是微波课程的一个重要部分。第九章和第十章研究的主题是在屏蔽室及无回声室中的微波电场强度和功率密度的测量问题。

授课内容不必受本书章节安排的限制。讲授者可以对内容进行选择，或者对章节的先后次序重新调整，以适合不同学制的学校在一个学期内（例如四个月为一学期或者三个月为一学期）讲授。每章的习题将有助于读者进一步理解课文，采用本书作为教科书的授课老师可以从出版公司购得解题手册。

作者感谢前辈同事Owen F. Foin, Jr. 教授和Mac Jarrett教授，他们阅读了本书手稿并提出了许多宝贵意见。本书手稿的主要部分最初由Virginia Sappington夫人打印的，作者在此也表示感谢。特别要感谢的是Elsie Taylor夫人，她最后娴熟地打印了全部手稿。作者也希望对出版本书的Prentice-Hall公司表示感激，特别要感谢监督本书出版的Virginia Huebner夫人。

作者对工学院院长James D. Matheny博士的不断鼓励和有益忠告表示衷心的感谢。作者愿将本书奉献给慈爱的母亲Hu Chi和给予谆谆教海的父亲Cheng Kung以作为对双亲的纪念。最后作者愿意对他妻子在本书写作过程中自始至终所给予的鼓励表示深深的感激。

S. Y. 利奥

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>绪论</b> .....                | 1  |
| 0-1 微波频率 .....                 | 1  |
| 0-2 微波器件 .....                 | 2  |
| 0-3 微波系统 .....                 | 2  |
| 0-4 微波测量 .....                 | 3  |
| <b>第一章 电子与场的相互作用</b> .....     | 5  |
| 1-0 引言 .....                   | 5  |
| 1-1 电子在电场中的运动 .....            | 5  |
| 1-2 电子在磁场中的运动 .....            | 8  |
| 1-3 电子在电磁场中的运动 .....           | 9  |
| 1-4 小结 .....                   | 11 |
| 推荐读物.....                      | 12 |
| <b>第二章 平面电磁波</b> .....         | 13 |
| 2-0 引言 .....                   | 13 |
| 2-1 电波和磁波方程 .....              | 13 |
| 2-2 坡印廷定理 .....                | 15 |
| 2-3 均匀平面波及其反射 .....            | 16 |
| 2-4 平面波在自由空间和无损电介质中的传播 .....   | 22 |
| 2-5 平面波在有损介质中的传播 .....         | 25 |
| 2-6 平面波在以塑料为基底的金属膜镀层中的传播 ..... | 33 |
| 2-7 小结 .....                   | 44 |
| 参考文献.....                      | 47 |
| 推荐读物.....                      | 47 |
| <b>第三章 传输线和微波波导</b> .....      | 48 |
| 3-0 引言 .....                   | 48 |
| 3-1 传输线 .....                  | 48 |
| 3-2 微波波导 .....                 | 70 |
| 3-3 小结 .....                   | 92 |
| 参考文献.....                      | 93 |
| 推荐读物.....                      | 93 |
| <b>第四章 微波元件</b> .....          | 94 |
| 4-0 引言 .....                   | 94 |
| 4-1 矩形谐振腔 .....                | 95 |
| 4-2 圆柱谐振腔和半圆柱谐振腔 .....         | 96 |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 4-3        | 谐振腔的Q值 .....                 | 98         |
| 4-4        | 重入式谐振腔 .....                 | 100        |
| 4-5        | 慢波结构 .....                   | 102        |
| 4-6        | 微波混合电路 .....                 | 104        |
| 4-7        | S参数 .....                    | 106        |
| 4-8        | T形波导 .....                   | 112        |
| 4-9        | 定向耦合器 .....                  | 116        |
| 4-10       | 环行器和隔离器 .....                | 120        |
| 4-11       | 小结 .....                     | 123        |
|            | 参考文献 .....                   | 125        |
|            | 推荐读物 .....                   | 125        |
| <b>第五章</b> | <b>微波管 .....</b>             | <b>127</b> |
| 5-0        | 引言 .....                     | 127        |
| 5-1        | 普通真空三极管、四极管和五极管 .....        | 128        |
| 5-2        | 线性束管(O型器件) .....             | 130        |
| 5-3        | 交叉场微波管(M型) .....             | 177        |
| 5-4        | 小结 .....                     | 184        |
|            | 参考文献 .....                   | 186        |
|            | 推荐读物 .....                   | 187        |
| <b>第六章</b> | <b>微波固体器件 .....</b>          | <b>188</b> |
| 6-0        | 引言 .....                     | 188        |
| 6-1        | 微波晶体三极管,隧道二极管和微波场效应晶体管 ..... | 190        |
| 6-2        | 转移电子器件(TED) .....            | 218        |
| 6-3        | 雪崩渡越时间器件 .....               | 238        |
| 6-4        | 量子-电子固体器件 .....              | 248        |
| 6-5        | 参量器件 .....                   | 261        |
| 6-6        | 红外器件和系统 .....                | 268        |
| 6-7        | 小结 .....                     | 286        |
|            | 参考文献 .....                   | 289        |
|            | 推荐读物 .....                   | 294        |
| <b>第七章</b> | <b>微带传输线 .....</b>           | <b>296</b> |
| 7-0        | 引言 .....                     | 296        |
| 7-1        | 微带线的特性阻抗 .....               | 296        |
| 7-2        | 微带线的损耗 .....                 | 299        |
| 7-3        | 微带线的品质因数Q .....              | 305        |
| 7-4        | 小结 .....                     | 306        |
|            | 参考文献 .....                   | 307        |
| <b>第八章</b> | <b>微波集成电路 .....</b>          | <b>308</b> |
| 8-0        | 引言 .....                     | 308        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 8-1 材料                     | 309        |
| 8-2 制造                     | 312        |
| 8-3 混合微波集成电路               | 315        |
| 8-4 小结                     | 319        |
| 参考文献                       | 319        |
| 推荐读物                       | 320        |
| <b>第九章 微波屏蔽</b>            | <b>321</b> |
| 9-0 引言                     | 321        |
| 9-1 电磁兼容                   | 321        |
| 9-2 平面波在屏蔽室内的传播            | 322        |
| 9-3 无回声室内平面波的传播            | 328        |
| 9-4 小结                     | 330        |
| 参考文献                       | 331        |
| 推荐读物                       | 331        |
| <b>第十章 微波电场和功率密度的测量与计算</b> | <b>332</b> |
| 10-0 引言                    | 332        |
| 10-1 基本场方程                 | 332        |
| 10-2 测量的单位                 | 333        |
| 10-3 自由空间衰减                | 336        |
| 10-4 发射功率与电场强度的换算          | 338        |
| 10-5 接收功率与电场强度的换算          | 339        |
| 10-6 接收电压与电场强度的换算          | 340        |
| 10-7 小结                    | 341        |
| 参考文献                       | 341        |
| <b>附录A 物质的常数</b>           | <b>342</b> |
| <b>附录B 贝塞尔函数</b>           | <b>344</b> |
| <b>附录C 微波器件和电路实验</b>       | <b>345</b> |
| <b>习题</b>                  | <b>351</b> |
| <b>汉英名词对照索引</b>            | <b>370</b> |



# 绪 论

本书的中心论题是微波器件和微波电路的基本原理及其应用。微波技术已经越来越广泛地被采用在诸如射电天文学、长距离通信、空间导航、雷达系统和导弹电子系统这样一类应用中。由于微波技术在研究和工业部门应用的增长率一年比一年高，使即将参加微波领域工作的学生和已经在微波领域工作的电子工程师们，都面临着需要懂得微波器件和电路在理论上和实验上的设计和分析。

## 0-1 微波频率

微波一般是指波长从 30cm 到 1 mm (频率从 1 GHz 到 300GHz) 范围内的电磁波。微波中各频段的命名是从第二次世界大战中考虑雷达的保密而得来的，它从来没有得到任何工业部门、科研单位或者政府机构的官方批准。1969年 8 月，美国国防部参谋长联席会议办公室通知陆海空三军，使用如表 0-1 所示的新的微波各频段的分类表。1970年 5 月 24 日，美国国防部正式通过了另一个微波频率的波段名称 (见表 0-2)。微波器件的现状\*是，真空微波放大器和振荡器的工作频率已达 40GHz，固体微波器件可达 100GHz。

表0-1 美国军用微波波段

| 名 称  | 频率范围 (GHz)     |
|------|----------------|
| P 波段 | 0.225—0.390    |
| L 波段 | 0.390—1.550    |
| S 波段 | 1.550—3.900    |
| C 波段 | 3.900—6.200    |
| X 波段 | 6.200—10.900   |
| K 波段 | 10.900—36.000  |
| Q 波段 | 36.000—46.000  |
| V 波段 | 46.000—56.000  |
| W 波段 | 56.000—100.000 |

表0-2 美国新的军用微波波段

| 名 称  | 频率范围 (GHz)  | 名 称  | 频率范围 (GHz)     |
|------|-------------|------|----------------|
| A 波段 | 0.100—0.250 | H 波段 | 6.000—8.000    |
| B 波段 | 0.250—0.500 | I 波段 | 8.000—10.000   |
| C 波段 | 0.500—1.000 | J 波段 | 10.000—20.000  |
| D 波段 | 1.000—2.000 | K 波段 | 20.000—40.000  |
| E 波段 | 2.000—3.000 | L 波段 | 40.000—60.000  |
| F 波段 | 3.000—4.000 | M 波段 | 60.000—100.000 |
| G 波段 | 4.000—6.000 |      |                |

\* 目前的水平已大大超过这两个数字。——译者注

## 0-2 微波器件

当真空管的物理尺寸与波长相接近时，管内电子渡越时间、极间电容和引线电感等限制了真空管在微波波段的运用，这个问题在三十年代后期变得明确了。1935年，A. Heil和O. Heil提出利用渡越时间效应和集总调谐电路来产生微波。1939年，W. C. Hahn和G. F. Metcalf提出了微波管的速度调制理论。四个月后，R. H. Varian和S. F. Varian阐述了应用速度调制理论的双腔速调管放大器和振荡器。1944年，R. Kompfner发明了螺旋线行波管（TWT）。从此以后，一些新的原理广泛用于微波能量的产生与放大，从而使微波管的概念与传统真空管概念大不相同。

微波的发生与放大历来都是借助速度调制理论来完成的。然而近年来，研制了微波固体器件如隧道二极管、体效应（Gunn）二极管、转移电子器件（TED）、雪崩渡越时间器件（IMPATT）和诸如脉泽和激光器等量子电子器件来实现微波的产生与放大。TED和IMPATT器件概念的提出和随后的发展是过去十年间\*杰出的技术成就之一。B. K. Ridleg和T. B. Watkins在1961年和C. Hilsum在1962年都各自预言了在砷化镓中会产生转移电子效应。1963年J. B. Gunn报告了他的“Gunn效应”。所有微波固体器件的共同特性是负阻性，它可用于微波的振荡和放大。由于TED和雪崩渡越时间器件的发展极其迅速，因此它们已被确认为最重要的微波固体器件之一。

## 0-3 微波系统

标准的微波系统由发送分系统和接收分系统组成。发送分系统包括，微波振荡器、波导和发送天线；接收分系统包括，接收天线、传输线或波导、微波放大器和接收机。图0-1所示为一典型的微波系统。

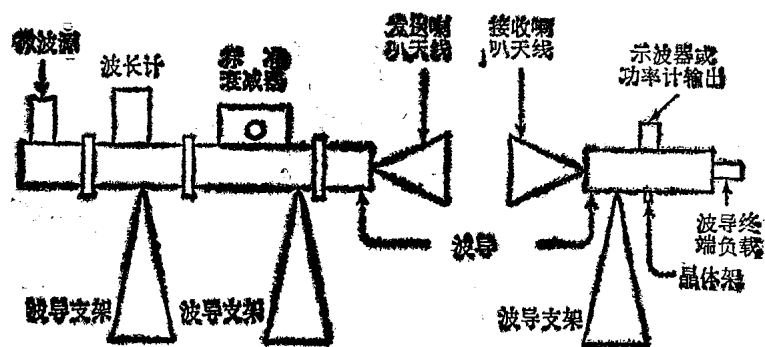


图0-1 微波系统

为了设计一个微波系统并对它进行试验，就需要对有关元件有足够的了解。因此，本书除微波器件外，还将叙述谐振腔、微带线、混合电路和微波集成电路等。

\* 指六十年代。——译者注

## 0-4 微波测量

微波测量的精确度是电子学工程师主要关心的问题。理论上，发射机应该只发射电能，而接收机只接收电能。但是，在普通实验室里很少出现这种情况，因为同一个电子装置就既能发射电能或者接收电能。因此，电子装置常常受到不需要的电磁波能量的干扰，同时也常常发送出邻近装置不拟接收的电磁波能量。这是电磁兼容的基本问题。电子设备必须与其它设备连起来工作，而不引起被连接设备的工作发生故障或性能下降。一个设计理想的设备应该既不辐射不希望的能量，也应不受任何不希望接收的能量的影响。为此，设备必须用一种媒质封闭起来，使得不希望有的电磁波能量无论是离开还是进入该设备时都受到有效的衰减。对微波测量来说，理想的封闭是屏蔽房和无回波室，这将在第九章中叙述。第十章将讨论微波测量。

### MKS单位，前缀和物理常数

除了另外指出的以外，本书全部用了有理化米·千克·秒（RMKS）单位（国际单位制）。表0-3列出了最常用的 MKS单位。

表0-3 MKS单位

| 量   | 单 位                        | 符 号 |
|-----|----------------------------|-----|
| 埃   | $10^{-10}$ 米               | Å   |
| 电容  | 法拉 = C/V                   | F   |
| 电荷  | 库仑: A·s                    | C   |
| 电导  | 姆欧                         | Ω*  |
| 电流  | 安培 = C/s                   | A   |
| 频率  | 周/秒                        | Hz  |
| 能   | 焦耳                         | J   |
| 场   | 伏/米                        | E   |
| 磁通量 | 韦伯 = V·s                   | ψ   |
| 电感  | 亨利 = $\frac{V \cdot s}{A}$ | H   |
| 长度  | 米                          | m   |
| 微米  | $10^{-6}$ 米                | μm  |
| 功率  | 瓦 = J/s                    | W   |
| 电阻  | 欧姆                         | Ω   |
| 时间  | 秒                          | s   |
| 速度  | 米/秒                        | v   |
| 电压  | 伏特                         | V   |

表 0-4 列出了由度量衡国际委员会推荐的前缀。它们已经被国家标准局接受并被电气和电子工程师协会应用。

\* 姆欧，非许用单位。法定许用单位为西门子 S，1 S = 1 Ω。后同。——译者注

表0-4 前 缀

| 前 缀 | 系 数        | 符 号   |
|-----|------------|-------|
| 兆兆  | $10^{12}$  | T     |
| 千兆  | $10^9$     | G     |
| 兆   | $10^6$     | M     |
| 千   | $10^3$     | k     |
| 百   | $10^2$     | h     |
| 十   | 10         | da    |
| 分   | $10^{-1}$  | d     |
| 厘   | $10^{-2}$  | c     |
| 毫   | $10^{-3}$  | m     |
| 微   | $10^{-6}$  | $\mu$ |
| 毫微  | $10^{-9}$  | n     |
| 微微  | $10^{-12}$ | p     |
| 毫微微 | $10^{-15}$ | f     |
| 微微微 | $10^{-18}$ | a     |

本书中常用的物理常数列于表 0-5。

表0-5 物 理 常 数

| 常 数       | 符 号          | 值  |
|-----------|--------------|--|
| 玻耳兹曼常数    | $k$          | $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$                                      |
| 电子电压      | eV           | $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$  |
| 电子电荷      | $q$          | $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  |
| 电子质量      | $m$          | $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$                                       |
| 电子电荷与质量之比 | $e/m$        | $1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$                                      |
| 自由空间的导磁率  | $\mu_0$      | $1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ , 或 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ |
| 自由空间的介电常数 | $\epsilon_0$ | $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$                                      |
| 普朗克常数     | $h$          | $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$                         |
| 在真空中的光速   | $c$          | $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$  |

# 第一章 电子与场的相互作用

## 1-0 引言

在这一章中我们将讨论电子与场的相互作用。这里我们假定电子束是在一均匀电场、磁场或电磁场中运动，这是因为电子束在三维场中的运动是由非齐次的微分方程所决定的，但是在大多数情况下，要得到这种微分方程在不均匀场中的解是非常困难的并且往往不精确。另一方面，目前所有微波器件中电子与场的相互作用都使用了均匀场。

本章的主要目的是给读者提供一个了解电子与场相互作用的基础，至于具体微波器件将在以后的章节中讨论。

## 1-1 电子在电场中的运动

在叙述场及场和电子间的相互作用问题时，首先要涉及到几个电和磁的实验定理，其中最基本的电荷力的定理是库仑定理，它表明在不论其符号是相同的还是相反的二电荷之间，存在着一个互相吸引或排斥的力，即

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{u}_{R12} \quad (\text{N}) \quad (1-1-1)$$

式中  $Q$  = 电荷 (C)

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \approx 1/36\pi \times 10^{-9} \text{F/m}$  为自由空间的介电常数

$R$  = 电荷间距离 (m)

$\mathbf{u}$  = 单位矢量

这里要注意，由于本书中的单位均采用 MKS 制，所以上述式子中出现了  $4\pi$  的因子。

由电荷产生的电场强度定义为每单位电荷的力，即

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{Q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{u}_R \quad (\text{V/m}) \quad (1-1-2)$$

假如有几个电荷，电场变为

$$\mathbf{E} = \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{4\pi\epsilon_0 R_m^2} \mathbf{u}_{R_m} \quad (1-1-3)$$

为了决定电子在电场中的轨迹，这个力必定与电子的质量和加速度有关，其关系由牛顿第二运动定律给出。于是

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{E} = m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-1-4)$$

式中  $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$  为电子的质量

$\mathbf{a}$  = 加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$v$  = 电子的速度 (m/s)

$e = 1.602 \times 10^{-19}$  C, 电子电荷为负

这里可看出由于电子具有负电荷, 所以力是与场反方向的。于是当一个电子在电场  $\mathbf{E}$  中运动时, 它经受到一个  $-e\mathbf{E}$  牛顿的力。在直角坐标系中, 电子在电场中运动的微分方程给出为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_x \quad (1-1-5a)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_y \quad (1-1-5b)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_z \quad (1-1-5c)$$

式中  $e/m = 1.759 \times 10^{11}$  (C/kg), 即电子电荷与电子质量之比

$E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$  分别为  $\mathbf{E}$  在直角坐标中的分量

在许多情况下, 电子在电场中的运动方程采用圆柱坐标是很有用的。圆柱坐标 ( $r$ ,  $\phi$ ,  $z$ ) 由图 1-1-1 表示。

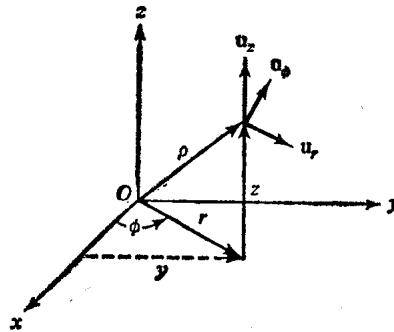


图1-1-1 圆柱坐标

这里可看出

$$x = r \cos \phi \quad (1-1-6a)$$

$$y = r \sin \phi \quad (1-1-6b)$$

$$z = z \quad (1-1-6c)$$

相反

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (1-1-7a)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = \sin^{-1}\frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}} = \cos^{-1}\frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (1-1-7b)$$

$$z = z \quad (1-1-7c)$$

在  $r$ ,  $\phi$ ,  $z$  增加的方向上, 其单位矢量  $u_r$ ,  $u_\phi$ ,  $u_z$ , 也分别表示在上图中, 其中  $u_z$  是常数, 而  $u_r$  和  $u_\phi$  是  $\phi$  的函数; 即

$$u_r = \cos \phi u_x + \sin \phi u_y \quad (1-1-8a)$$

$$u_\phi = -\sin \phi u_x + \cos \phi u_y \quad (1-1-8b)$$

式 1-1-8 对  $\phi$  的微分可列出为

$$\frac{d\mathbf{u}_r}{d\phi} = \mathbf{u}_\phi \quad (1-1-9a)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_\phi}{d\phi} = -\mathbf{u}_r \quad (1-1-9b)$$

在圆柱坐标中位移矢量 $\rho$ 可表示为

$$\rho = r\mathbf{u}_r + z\mathbf{u}_z \quad (1-1-9c)$$

将式(1-1-9c)对 $t$ 进行一次微分得到速度,二次微分得出加速度方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = \frac{d\rho}{dt} &= \frac{dr}{dt}\mathbf{u}_r + r\frac{d\mathbf{u}_r}{dt} + \frac{dz}{dt}\mathbf{u}_z = \frac{dr}{dt}\mathbf{u}_r \\ &+ r\frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{d\mathbf{u}_r}{d\phi} + \frac{dz}{dt}\mathbf{u}_z = \frac{dr}{dt}\mathbf{u}_r + r\frac{d\phi}{dt}\mathbf{u}_\phi + \frac{dz}{dt}\mathbf{u}_z \end{aligned} \quad (1-1-10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \left[ \frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 \right]\mathbf{u}_r + \left( r\frac{d^2\phi}{dt^2} + 2\frac{dr}{dt}\frac{d\phi}{dt} \right)\mathbf{u}_\phi + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{u}_z \\ &= \left[ \frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 \right]\mathbf{u}_r + \frac{1}{r}\frac{d}{dt}\left( r^2\frac{d\phi}{dt} \right)\mathbf{u}_\phi + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{u}_z \end{aligned} \quad (1-1-11)$$

因此在圆柱坐标中电子在电场中的运动方程给出为

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = -\frac{e}{m}E_r \quad (1-1-12a)$$

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dt}\left( r^2\frac{d\phi}{dt} \right) = -\frac{e}{m}E_\phi \quad (1-1-12b)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m}E_z \quad (1-1-12c)$$

这里 $E_r$ ,  $E_\phi$ 和 $E_z$ 是 $\mathbf{E}$ 在圆柱坐标中的分量。

从式(1-1-4)可看出,电场把一个单位正电荷从点 $A$ 移到点 $B$ 时所做的功为

$$- \int_A^B \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = -\frac{m}{e} \int_{V_A}^{V_B} v dv \quad (1-1-13)$$

由定义可知,  $B$ 点相对于 $A$ 点的电位 $V$ ,是把单位正电荷从 $A$ 点移到 $B$ 点时外力为克服场所做的功。即

$$V \equiv - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1-14)$$

将式(1-1-14)代入式(1-1-13)并积分运算后得

$$eV = -\frac{1}{2} m(v_B^2 - v_A^2) \quad (1-1-15)$$

式(1-1-15)的左边是势能,右边表示动能的变化。功或能量的单位称为电子伏特(eV),意思为假如一个电子降落通过1V的电位,那么它的动能将增加1eV。即,

$$1\text{ eV} = (1.60 \times 10^{-19}\text{ C})(1\text{ V}) = 1.60 \times 10^{-19}\text{ (J)} \quad (1-1-16)$$

假如一电子从静止开始加速运动到电位为 $V$ 伏的地方,它的末速度为

$$v = \left( \frac{2eV}{m} \right)^{1/2} = 0.593 \times 10^6 \sqrt{V} \text{ (m/s)} \quad (1-1-17)$$

因为 $d\mathbf{l}$ 是在电场 $E$ 方向距离的增量,因此在距离 $d\mathbf{l}$ 内电位的变化 $dV$ 可表示为

$$|dV| = E d\mathbf{l} \quad (1-1-18)$$

在矢量表示法中

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (1-1-19)$$

式中负号表示场是从较高电位的区域指向较低电位的区域。式(1-1-19)既适用于有空间电荷的区域又适用于无电荷的区域。

## 1-2 电子在磁场中的运动

实验发现，一个在磁通密度为 $\mathbf{B}$ 的磁场中运动的带电粒子经受到一个力，这个力正比于电荷 $Q$ 、它的速度 $\mathbf{v}$ 、磁通密度 $\mathbf{B}$ 以及矢量 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{B}$ 之间夹角的正弦。其力的方向垂直于矢量 $\mathbf{v}$ 和矢量 $\mathbf{B}$ 的平面。因此由磁场施加在带电粒子上的力用矢量形式可表示为

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1-2-1)$$

因为电子具有负电荷，则

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1-2-2)$$

在直角坐标系中，一个电子在磁场中的运动方程可写为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left( B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) \quad (1-2-3a)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left( B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right) \quad (1-2-3b)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left( B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right) \quad (1-2-3c)$$

因为

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = (B_z r v_\phi - B_\phi v_z) \mathbf{u}_r + (B_r v_z - B_z v_r) \mathbf{u}_\phi + (B_\phi v_r - B_r v_\phi) \mathbf{u}_z \quad (1-2-4)$$

对圆柱坐标来说，电子在磁场中的运动方程可为

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} \left( B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \quad (1-2-5a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left( r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = -\frac{e}{m} \left( B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \quad (1-2-5b)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left( B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (1-2-5c)$$

图1-2-1所示为一个电子以 $v_x$ 的速度进入一个垂直于 $v_x$ 的恒定均匀磁场中的运动情况。电子的速度假定为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{u}_x \quad (1-2-6)$$

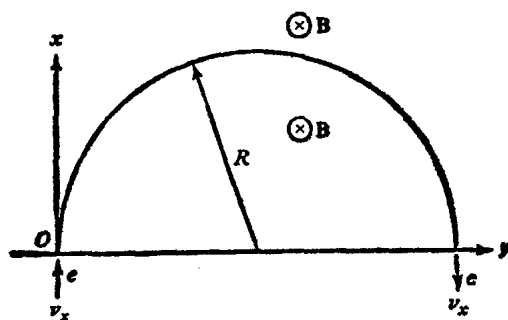


图1-2-1 一个电子在横向磁场中的圆周运动



这里  $u_x$  为在  $x$  方向的单位矢量。

因为由磁场施加在电子上的力，在每一瞬间均垂直于电子的运动方向，因此这个力没有对电子做功，因而电子速度保持不变。磁场假定为

$$\mathbf{B} = B_x u_x \quad (1-2-7)$$

那么在电子刚进入磁场的一瞬间，其磁力为

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B} = evB u_y \quad (1-2-8)$$

这说明力的大小保持不变而运动方向由于磁场的拉力而在一个圆形轨迹上改变。这种磁力类似于将一团东西绑在一根绳上，以一个不变的速度作圆周运动，其绳拉力的大小保持不变，方向始终向着圆心并且垂直于运动方向。在圆周上任一点的向外的离心力等于拉力。即

$$\frac{mv^2}{R} = evB \quad (1-2-9)$$

这里  $R$  为圆的半径。

从式 (1-2-9) 得到其轨迹半径为

$$R = \frac{mv}{eB} \text{ (m)} \quad (1-2-10)$$

电子圆周运动的回旋角频率是

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{eB}{m} \text{ (rad/s)} \quad (1-2-11)$$

周期表示为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{eB} \text{ (s)} \quad (1-2-12)$$

这里要注意到，轨迹的半径是与电子速度成正比的，但角频率和周期却与速度或者半径无关。这意味着在相同周期内，运动较快的电子或粒子将在较大的圆周上运动，而运动较慢的粒子则作较小的圆周运动。这个重要的结果是磁聚焦微波器件的工作基础。

### 1-3 电子在电磁场中的运动

假如电场和磁场同时存在，那末电子的运动将随两个场的方向而定。在两个场的方向相同或相反时，磁场对电子不施加力，电子的运动仅以 1-1 节中叙述的方式依赖于电场。直线束管（O 型器件）使用了其方向与电子束同轴的磁场，该磁场使电子束在整个管子长度上维持不散开。在这些管子中，电子接收了电场的全部位能而不受磁场的影响。

当电场  $\mathbf{E}$  和磁场  $\mathbf{B}$  互成直角时，磁力就加到了电子束上。这种场的类型称为交叉场。在交叉场器件（M 型器件）中，由阴极发射的电子被电场加速并且速度愈来愈大。但是速度愈大，由于磁场的作用而使它们的轨迹愈弯曲。由于电场  $\mathbf{E}$  和磁通量  $\mathbf{B}$  引起的作用在电子上的劳伦兹力给出为

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-3-1)$$

在交叉场中电子的运动方程，在直角坐标和圆柱坐标中分别表示为