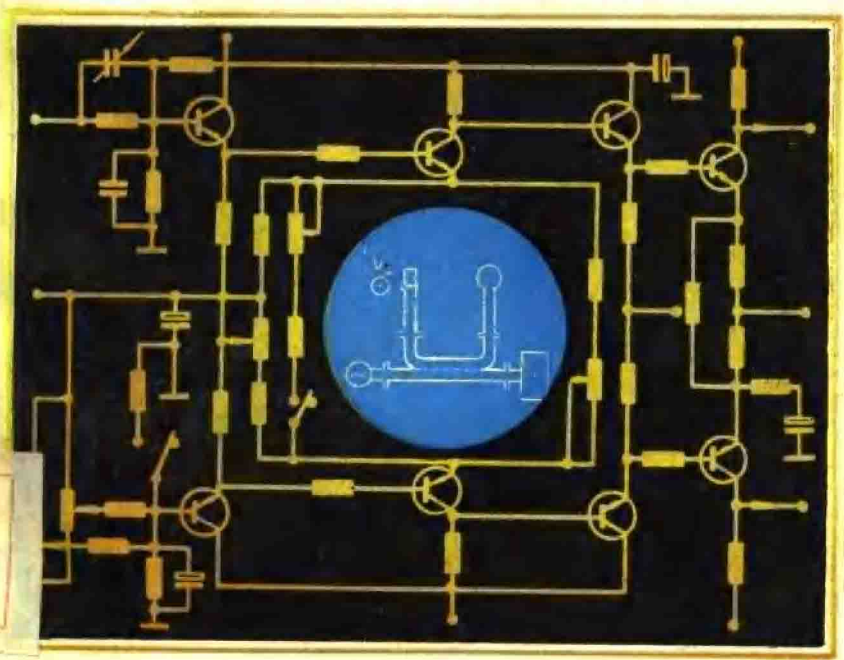




电子工业工人初级技术教材(九)

微波技术

电子工业工人技术教材编写组 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书是电子工业工人初级技术教材之一，内容包括：电磁场的基本知识，双线传输线，同轴线和微带线，波导，微波谐振器，微波元器件，微波测量。

本书着重从物理概念上深入浅出地阐明电磁场和微波技术方面的基础知识，并简要介绍了必要的工程计算方法。

本书除作为电子工业青、壮年工人专业技术培训教材外，也可供从事微波技术工作的具有中学文化程度的干部、工人自学参考。

电子工业工人初级技术教材(九)

微波技术

电子工业工人技术教材编写组 编

责任编辑 马征宇

*

国防工业出版社出版

河北涿中印刷厂印刷

内部发行

*

787×1092¹/₃₂ 印张10⁷/₈ 230千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷 印数：00,001—29,000册

统一书号：N15034·2639 定价：1.35元

前 言

为了适应电子工业青、壮年工人的专业技术培训的需要，按照部颁《电子工人初级技术理论教学计划、教学大纲》的要求，我们组织有关单位分别编写了《无线电知识》、《无线电识图与制图》、《无线电通用材料》、《无线电钳工装配工艺》、《无线电测量与仪器》、《电工》、《电子线路》、《脉冲技术》、《微波技术》、《机械制图》、《化学知识》等十一门工人初级技术基础理论课教材。

这套教材可作为电子工业四级工以下青、壮年技术工人培训用书，也适用于未经过专业培训、具有初中文化水平的干部、工人自学参考。

我们在编写《微波技术》的过程中，得到了国营北京广播器材厂、南京长江机器制造厂、兰州兰新机械厂、贵州永华仪器厂等单位的大力支持，在此表示感谢。

本书绪论和第一至第四章由范传立编写，第五至第七章由李源中编写，范传立负责主编工作。全书由刘顺安、经盛珂负责审稿。

在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业工人技术培训的需要，在文字叙述上尽量简明扼要、通俗易懂。但由于时间仓促，又缺乏经验，书中难免有不妥之处，诚恳希望读者提出宝贵意见。

电子工业工人技术教材编写组

目 录

绪论	1
第一章 电磁场的基本知识	8
第一节 有关电场的知识	9
第二节 有关磁场的知识	30
第三节 电场与磁场的联系	46
第二章 双线传输线	73
第一节 平行双线传输线中电磁波的传输特点	75
第二节 无耗传输线上波的传播	83
第三节 无耗传输线的工作状态	94
第三章 同轴线和微带线	128
第一节 同轴线	128
第二节 微带线	136
第四章 波导	162
第一节 波导是如何传输电磁波的	162
第二节 矩形波导	178
第三节 圆波导	193
第五章 微波谐振器	207
第一节 微波谐振器概述	207
第二节 平行双线谐振器	210
第三节 同轴谐振器	218
第四节 圆柱波导谐振腔	228
第六章 微波元器件	242
第一节 基本微波元件	242

第二节	常见微波元件	254
第三节	常见微波器件	287
第七章	微波测量	300
第一节	驻波系数和阻抗的测量	300
第二节	功率测量	314
第三节	频率测量	324
第四节	衰减量的测量	333
参考资料	339

绪 论

微波技术在国防、通信、工农业生产、气象、天文、地质、医学等各领域获得了日益广泛的应用，因而引起了人们的重视和专门研究，逐步形成了独立的学科。

微波技术所涉及的知识面很广。本书根据电子工业部青、壮年工人技术培训的要求，仅对有关的基础知识做适当的讲述，主要内容有电磁场的基本知识，微波传输线，微波谐振器，微波元器件和微波测量等。

一、微波波段的划分

电磁波是客观存在的一种物质形式，通过专门设备可以感觉到它的存在。例如，我们用收音机可以收听到电台的广播节目，用电视机可以收看到电视台的电视节目，这些事实都表明，在我们周围的空间里存在着电台和电视台发射的电磁波。事实上，我们周围充满了很多各种类型的电磁波。

电磁波就是随时间变化的电磁场，它也具有波动的性质。在自由空间中，电磁波的波长 λ 和振荡频率 f 之间有如下关系：

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中， c 是电磁波在自由空间的传播速度，它等于光速，即约为 3×10^8 米/秒。这一速度大致相当于电磁波在一秒钟内

沿赤道绕地球传播七圈半。

不同波长（或频率）的电磁波，具有不同的特点和用途。在无线电技术中，常常将无线电波按波长或频率划分为若干波段，如表 1 所示。

表 1 无线电波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围
超长波	大于10000米	小于30千赫
长波	10000~1000米	30~300千赫
中波	1000~100米	300~3000千赫
短波	100~10米	3~30兆赫
米波	10~1米	30~300兆赫
微波	分米波	10~1分米
	厘米波	10~1厘米
	毫米波	10~1毫米

根据表 1 可知，微波波段是波长在 1 米到 1 毫米范围的电磁波，还可再细分为分米波段、厘米波段和毫米波段。

微波既然只是某一特定范围的电磁波，当然它仍具有电磁波所共有的一些基本属性。例如，电磁场的产生和传播服从电磁场的基本定律，传播速度为光速等。但它又具有区别于低频波段电磁波的许多特殊属性。例如，微波电磁波具有直线传播的特性。这种特性把微波通信站间的距离限制在 50~60 公里的范围。又如，在微波波段，辐射损耗和其它损耗将显著增加，普通传输线已不再适用，而必须使用特殊结构的微波传输线，如同轴线、微带线和波导等。

二、微波的基本特点

在《电工》、《电子线路》等课程中，我们讨论的对象的特点是：各构成部分如电路元件、器件、接线等的实际尺寸都远小于工作波长。在这种情况下，电路中各点的电压、电流都可以近似认为仅随时间变化，而与空间位置无关；电阻、电感、电容等电路元件都具有明确的含意，如电阻只服从欧姆定律，导线只起连接作用，均不包含电感和电容。就是说，把电路元件“模型化”了。这样建立起来的一整套分析低频电路的方法，就是电路理论。它为了解决低频电路的实际问题提供了必要的理论依据和计算手段。

到了微波波段，由于电磁波波长的缩短，使得被研究对象（电路和元器件等）的结构尺寸已接近于工作波长，导线上的电压和电流不但与时间有关，而且与传输线上的位置有关。电路中的电阻、电感、电容等元件也逐渐失去了低频电路中的明确概念和含意。因为随着工作频率的提高，要求电路中的 L 、 C 值很小，低频电路中常用的电感器、电容器等已无法使用，而电路中的分布电容、分布电感、分布损耗已起着决定性的作用。也就是说，低频电路理论已不再适用于微波电路。为此，针对微波电路的特殊性，又相应地建立了解决微波电路问题的基本理论和计算方法，这就是电磁场理论和微波技术。

与低频相比，微波具有以下几个特点：

(1) 微波波长与一般物体的几何尺寸相近，因此微波很容易被物体反射。利用微波的这一特性，根据发射波和反射波返回的时间间隔，可以探测目标到发射机之间的距离，这

就是无线电定位（又称雷达）的基本原理，也是雷达为什么要工作在微波波段的主要原因。

(2)微波可以直接通过高空的电离层而不被反射。这一特点对于卫星通信、导弹发射、航天技术等科学领域是很重要的，因为这些技术都需要电磁波通过电离层以完成通信和遥测、遥控的任务。

(3)由于微波波段的频率高，波长短，若使用普通传输线将导致损耗显著增加，因而必须采用特殊结构的微波传输线。目前，在微波技术中普遍使用的微波传输线有平行双线传输线、同轴线、微带线和波导等。

为了有效地使用和研究微波传输线，相应地建立了研究微波传输线的理论基础和分析方法。这也是本书的基本内容之一。

(4)由于工作频率高，波长短，使得微波电路中所用元件的结构和原理也与低频电路不同。在低频电路中常用的电阻、电感、电容等元件（常称为集中参数元件），在微波电路中均由一些特殊结构的元件所代替。例如，图1(a)为微波电路中使用的匹配负载。其吸收片由介质片上涂敷一层金属粉末（或石墨）构成，起吸收电磁能的作用，相当于低频电路中的电阻器。图1(b)为微波电路中使用的微波谐振器，由一个封闭的金属腔构成，相当于低频电路中的谐振电路：环形腔部分相当于谐振电路的电感，而中心部分的金属圆板则相当于电容。这种结构除起谐振电路作用外，还可以将高频电磁能封闭在腔体内，以减少电磁能的辐射损耗，提高谐振器的品质因数。由此可见，微波谐振器与低频电路的谐振回路作用相同，但结构和工作原理却有显著区别。

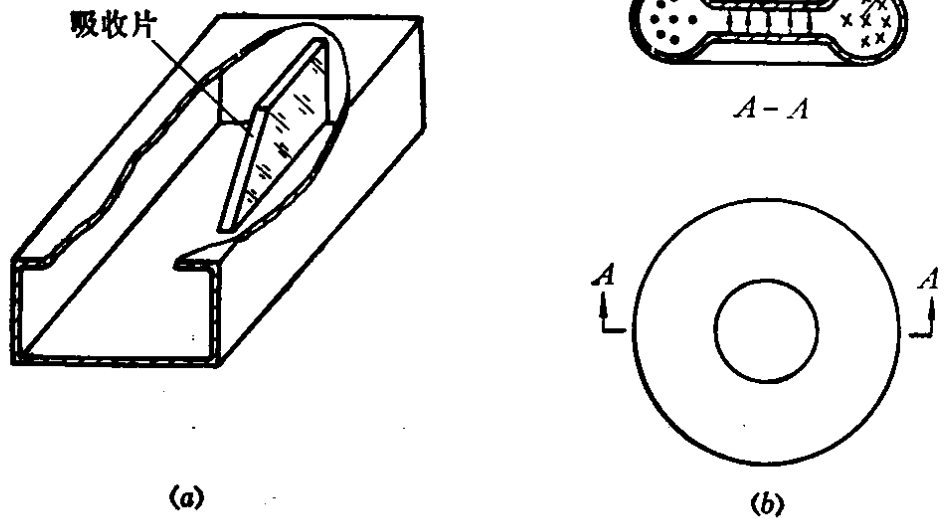


图1 微波电路中的元件
(a) 吸收式全匹配负载；(b) 微波谐振器。

最后还应指出，对微波电路的测量也与低频电路不同，这将在本书最后一章中介绍。

三、微波技术应用简介

1. 通信技术中的应用

所谓无线电通信，就是用电磁波传递信息的技术，如无线电话、电报等。微波通信则是利用微波进行通信的总称。

微波通信具有传递信息容量大，清晰，稳定可靠等优点。例如，微波中继通信是目前常用的一种微波通信系统。该系统每隔 50~60 公里视距建立一个通信站，把微波信号象接力赛跑似地传送到很远的地方，所以又称为微波接力通信。我国各省市收看中央电视台节目，就是利用上述系统进行的，如图 2 所示。

2. 雷达技术中的应用

雷达是无线电定位的简称。它是利用电磁波测量目标(飞

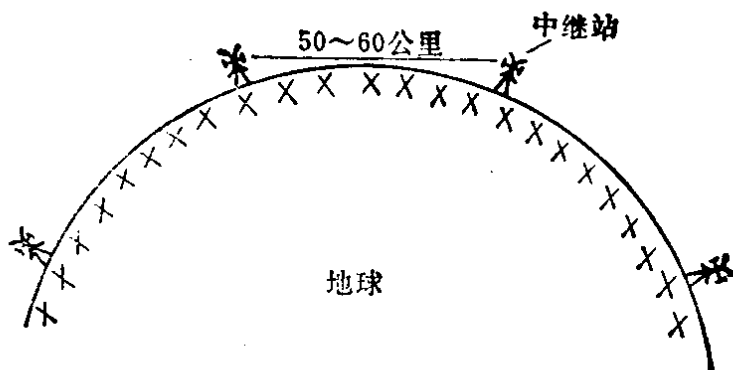


图2 微波中继通信示意图

机、舰船、导弹、人造卫星等) 的方位、距离、速度等参数的设备, 如图3所示。目前使用最广泛的是微波波段的雷达。因为微波易被目标反射, 也易被天线所汇聚(即把电磁波能量集中在一个方向上)而发射出去, 因而可提高雷达探测目标参数的精度。厘米波段雷达是目前使用较多的一种雷达。

3. 广播电视技术中的应用

广播电视是利用电磁波传送图象和声音的设备。根据国际规定, 它工作在米波段(47

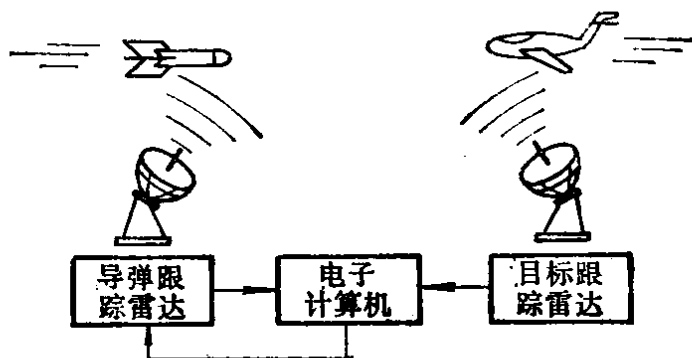


图3 微波雷达探测目标示意图

兆赫~223兆赫) 和分米波段(470兆赫~958兆赫)。目前我国电视台大部分工作在米波段(1~12频道), 而国外大部分电视台已应用于分米波段(13~81频道)。后者为微波波段电视, 具有容量大、图像清晰的优点。我国上海电视台已首次使用分米波段(第20频道)播送电视节目。今后我国将会大力发展分米波段的电视广播。

4. 微波在加热方面的应用

在工农业生产中，用电磁能对产品进行加工已成为重要的工艺手段，其中用得最广泛的是微波加热工艺。它的特点是加热速度快，受热均匀，容易实现自动控制和效率高等。

利用微波对介质的热效应可以对绝缘材料(如环氧树脂、酚醛树脂、胶木粉、塑料等)实现加热成型和塑化封装等，也可以用于粮食、木材、纸张、陶瓷的干燥。例如纸张一般要求含有8%的水分，并要求干燥过程中受热均匀，用微波加热就容易实现上述工艺要求。

利用微波只在金属表面产生热效应的特点，可以对金属制品进行表面淬火。利用微波可在真空中对材料进行加热的特点，可用来对电真空器件内部的零件进行高频除气工艺。这些都是其它工艺手段难以做到的。

近年来，在医疗(如微波理疗、灭菌)、轻工(如食品加工、卷烟烘干、塑料粘合)等方面也越来越多地开始利用微波加热这一工艺手段。

5. 微波在其它领域的应用

在原子能工业中，为了产生高能粒子，可用微波对粒子(电子、质子、中子等)实现加速，制成回旋加速器或直线加速器。

在医学中，利用微波可杀死人体内癌细胞的效能，制成了微波治癌机。

在工农业生产中，可以利用微波测量温度、厚度、长度、线径等，为自动化生产提供了有效的检测手段。

总之，微波在各个领域的应用实例不胜枚举。随着四化建设事业的发展，微波技术必将获得越来越广泛的应用。

第一章 电磁场的基本知识

绪论中已指出：在微波波段，低频电路中的基本概念和分析方法已不再适用。为了反映微波电路中所存在的电磁现象，必须应用电磁场的概念和知识去研究微波电路中的问题，并建立相应的分析方法。

提到电磁场，有些人对“场”的概念似乎有些生疏，其实在日常生活中所遇到的“场”现象实例是很多的。例如，指南针总是指向南北方向，这是地球磁场作用的结果；地球周围还存在着“引力场”，对地球周围的物体产生引力作用，这种“场”使物体具有重量，并使空中的物体自由落向地面。

这些现象表明“场”是客观存在的一种特殊物质，只要加以注意或用仪器检测，就可以观察到它的存在。场具有区别于普通物质的特殊性质。例如，实物可以在空间以任意速度运动，但电磁场在真空中的运动速度永远是大约 3×10^8 米/秒。又如，某一物体已占据的空间，另一物体则不能再去占据该空间，但几个电磁场可以同时占据同一空间。这些事实表明，电磁场具有特殊的运动规律和矛盾。根据生产和科学研究的需要，人们对电磁场进行了实验和研究，并总结出了电磁场的基本定律（麦克斯韦方程组）——电磁场理论：静电荷[●]产生静电场；恒定电流[●]（运动电荷）产生恒磁场；交变磁

● 指对于观察者相对静止的电荷。

● 指不随时间变化的电流。

场产生交变电场；交变电场产生交变磁场等。电磁场理论是研究微波技术的基础和工具。因此，在学习微波技术时，首先应学习和掌握电磁场理论的基本知识。

第一节 有关电场的知识

自然界中最早发现的电磁现象是静电现象，它是由静电荷间的相互作用而产生的。例如，摩擦起电并吸引轻微物体的现象，就是静电荷相互作用的结果。本节主要讲述静电荷产生的电场即静电场的一些性质。

一、电场强度 E

1. 电荷产生电场——库仑定律

实验发现，相距一定距离的带电体之间存在着相互作用力，如果两个带电体带有同性电荷，其间将产生相互排斥的力；相反，如果带有异性电荷，则将产生相互吸引的力。这种作用力称为静电力。库仑从实验结果首先总结出点电荷之间相互作用的基本规律，称为库仑定律。其结论是：在真空中，两个点电荷之间所产生的作用力的大小与两个电量的乘积成正比，与其间距离的平方成反比；作用力的方向在二电荷间的连线上，大小相等，方向相反。这是静电学中的重要定律之一，如图 1-1 所示。如果用 q_1 和 q_2 表示两个点电荷的电量， r 表示其间的距离， F 表示电荷间作用力的大小，则可将库仑定律写成

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1-1)$$

式中， $1/4\pi\epsilon_0$ 为比例常数， ϵ_0 是真空中介电常数，在实用

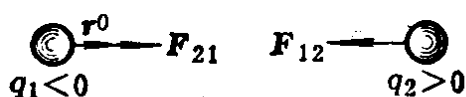
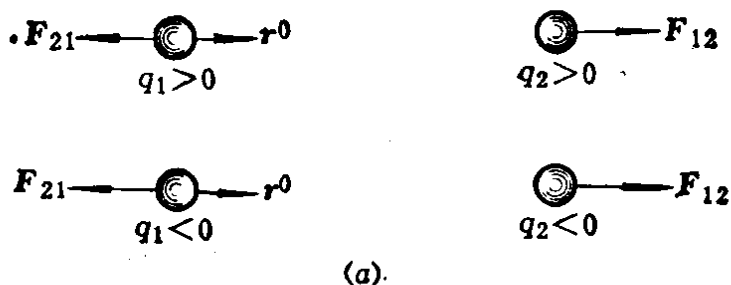


图1-1 点电荷间的作用力

单位制中其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \quad \text{库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2$$

根据图 1-1, 库仑定律还可以写成矢量式^①

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-2)$$

在图 1-1 中, \mathbf{F}_{12} 表示 q_1 作用于 q_2 上的静电力; \mathbf{F}_{21} 表示 q_2 作用于 q_1 上的静电力; \mathbf{r}^0 为单位矢量, 表示由 q_1 指向 q_2 且大小为 1 的矢量。对照式 (1-2) 和图 1-1 可以看出, \mathbf{F} 的方向与 q_1 和 q_2 的正负有关。当 q_1 与 q_2 同性时, q_1 和 q_2 的积为正值, 这时 \mathbf{F}_{12} 与 \mathbf{r}^0 方向相同, \mathbf{F}_{21} 与 \mathbf{r}^0 方向相反, 这表明两电荷间为斥力, 如图 1-1 (a) 所示。当 q_1 与 q_2 为异性时, q_1 与 q_2 的积为负值, 这时 \mathbf{F}_{12} 与 $-\mathbf{r}^0$ 的方向相同,

① ϵ_0 的单位还可以写成, 库仑/伏特·米或法拉/米, 以后会用到。

② 斜黑体字母表示有向量, 即矢量, 下同。

F_{21} 与 $-\mathbf{r}^0$ 的方向相反, 这表明两电荷间为引力, 如图 1-1(b) 所示。总之, 矢量表达式 (1-2) 中 \mathbf{r}^0 的正负表示电荷间作用力的方向, 而大小由模值 $|q_1 q_2| / 4\pi\epsilon_0 r^2$ 即式 (1-1) 计算。

库仑定律中的 q_1 和 q_2 要求是点电荷。所谓点电荷, 是指象几何点那样小的带电体, 实际上, 这种电荷是不存在的。实验表明, 只要带电体的几何尺寸比带电体之间的距离小很多倍, 就可将带电体视为点电荷。因此, 点电荷的含意是相对的。

〔例 1-1〕 在空气中有两个点电荷 $q_1 = 2 \times 10^{-7}$ 库仑, $q_2 = 4.5 \times 10^{-7}$ 库仑, q_1 作用于 q_2 上的力的大小为 $F_{12} = 0.1$ 牛顿。试求两个点电荷间的距离。

〔解〕 将式 (1-1) 变换后, 得到

$$r = \sqrt{\frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 F}} \quad (\text{米})$$

由于空气的介电常数与真空中的值近似相同, 故有

$$\begin{aligned} 4\pi\epsilon_0 &= 4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \text{库仑}^2 / \text{牛顿} \cdot \text{米}^2 \\ &= 0.11 \times 10^{-9} \text{库仑}^2 / \text{牛顿} \cdot \text{米}^2 \end{aligned}$$

将数据代入上式得

$$r = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-7} \times 4.5 \times 10^{-7}}{0.11 \times 10^{-9} \times 0.1}} \approx 9 \times 10^{-2} \text{米}$$

2. 电场强度 E

库仑定律给出了静电荷间相互作用力的定量关系。库仑力表明在电荷周围存在着电场。为了定量地描述电场的这种性质, 我们引用电场强度这一物理量。

如图 1-2 所示, 我们做以下实验: 在电荷 q 周围引入一

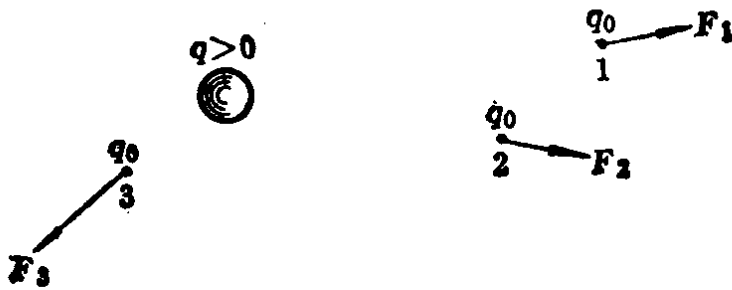


图1-2 静电荷周围的电场

个实验电荷 q_0 。由于电荷 q 周围存在着电场，因而，当实验电荷 q_0 置于不同位置时，将受到大小和方向各不相同的静电力，如图中 F_1 、 F_2 、 F_3 等。根据实验发现，当试验电荷 q_0 的位置不变而只改变它的电量大小时，它所受力的方向保持不变，而受力大小与其电量 q_0 成正比地变化。也就是说，在给定电场中的确定位置上，试验电荷所受力 F 与其电量 q_0 的比，保持恒值。所以比值 F/q_0 完全可以用来描述电荷 q 周围电场中的各点性质，为此我们规定 F/q_0 为电场强度。显然电场强度也是个矢量，我们用 E 表示：

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1-3)$$

上式表明，电场中某点的电场强度 E 等于单位正电荷在该点所受的静电力。

如果力的单位为牛顿，电量单位为库仑，则电场强度单位就等于牛顿/库仑。又因为 $1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 焦耳/米}$ ， $1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 伏特} \cdot \text{库仑}$ ，所以电场强度单位也可表示为伏特/米。

因为电场强度 E 是矢量，所以几个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 在某点产生的总电场 E ，应等于各点电荷在该点产生的电场强度 E_1, E_2, \dots, E_n 的矢量和，这称为场强叠加原理。这一

● 试验电荷指电量足够小的正电荷，当把它置于电场中时，不应原电场产生显著影响。