

高等学校教学用书



無線电技术基础

第一册

Р. А. 卡切爾尼可夫 著
А. М. 尼可拉也夫
天津大學電信系譯

人民教育出版社

73.45

162

高等学校教学用书



無線电技术基础

第一册

B. A. 卡切尔尼可夫, A. M. 尼可拉也夫著
天津大学电信系译

人民教育出版社



本书系根据苏联国立邮电书籍出版社(Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио)出版的卡切尔夫(В. А. Котельников)和尼克拉也夫(А. М. Николаев)合著的“无线电技术基础”(Основы радиотехники)1950年原的第一部分译出的。原书经苏联高等教育部审定为电工学院和电工各系的教科书。

在本书的绪论中,对于无线电技术的一般知识作有简单的叙述。在其后的各章中,则对各种电路作用到简单的和耦合的振荡回路时所发生的过程,加以比较详细的叙述和分析。材料的安排对于教学也比较合适;可供高等学校无线电各专业,电报、电话、通信专业之用,同时也可供从事于这方面工作的工程技术人员参考之用。

本书系由天津大学电信系管宝澄、马师亮、蔡六瑜、杨恩泽、朱平洋、诸维明、杨山、俞斯乐、汪维、言华、唐延中集体译出。由管宝澄、马师亮、蔡六瑜作最后校订。

簡 裝 本 說 明

目前 850 × 1168 毫米規格紙張較少,本書暫以 787 × 1092 毫米規格紙張印刷,定價相應減少 20%。希鑒諒。

无 綫 电 技 术 基 础

第二版

В. А. 卡切尔夫等著

天津大学电信系译

北京市书刊出版业营业登记证出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

商务印书馆上海分馆印装

新华书店上海发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K150.10-87 开本 787×1092 1/32 印张 10 10/16 插页 1
字数 21,000 印数 2,500 册 定价 0.96 元

1955年4月第1版 1962年4月上海第14次印刷

序 言

本书是 В. А. 卡切尔尼可夫 (В. А. Котельников) 許多年来在获得列宁勋章的莫斯科动力学院无线电工学系所讲授的无线电技术基础课程中的第一部分。

第一部分包括:无线电技术一般概述的緒論及在最简单的无綫电回路及其元件中所产生的过程的分析。

本課程的第二部分將讲述在非直綫性系統中的过程,而在第三部分則將討論含有分布参数,四端网络及滤波器的系統。

在各个高等技术学校所教的无线电技术基础課程中,其教材的安排是不相同的。本书材料的排列是按照莫斯科动力学院所采取的体系。这样的安排使得儿乎在学期的开始就可以按照課程开始实验工作,并可使实验落后于讲课不太多。

在进行叙述主要教材之前,作者认为有必要在緒論中对于无线电技术所利用的基本过程先給以通俗的、在完备性及严格性方面不苛求的概述。經驗証明,这样作会給課程提供出条件,特別是有必要在这一般概述中給以作为无线电技术的基础的輻射場的描写。作者否认沒有給予关于这种場的概念以前就开始本課程的可能性。由于在高等技术学校中通常电磁場理論是要迟一些才学习,所以給輻射場以严格的描述是不可能的。还有,輻射場的經典討論,由于数学工具的复杂性,是十分麻煩的。

为了构成等效綫路,本課程中采用了以公式(2.4)为基础的能量方法。因为在通行的电工理論基础課程的教本中这个公式沒有証明,故將它的証明附在本书的附录 1 里。应当指出,用鄔莫夫—坡印亭的复向量,公式(2.4)可以更容易地証明,并且更具有一般性。

06323

除了广泛采用的将已調振蕩分解成简单的正弦分量的方法之外,本书对于这种振蕩还使用了一般化的复数方法。这种一般化法的价值在于利用它可以很清楚地看出,在什么場合下通常的复数方法对于已調振蕩能够应用(在頻調过程的近似研究中,通常的复数方法用得很广泛)。

在本书的附录中,附有一些参考資料,以便于在实际工作中查考。

作者对 А. И. Богацка 工程师在編写及原稿准备付印时所給予的許多帮助表示感謝,并对在本书的曲綫計算方面完成了許多工作的 И. Н. Николаева 工程师表示感謝。

在审查原稿时, И. Г. Кляцкин 教授, Г. А. Ремез 讲师, Н. И. Чистяков 技术科学博士, Л. Д. Белькинд 教授, А. Н. Казанцев 教授以及其他同志曾提出許多宝贵的意見,为此,作者表示深刻的謝意。

讀者对本书的意見請寄莫斯科基洛夫街 40 号邮电出版社(Москва, ул. Кирова, 40, Связьиздат)。

目 录

序言

第一章 緒論 1

- § 1-1. 課程的目的和任务 1
- § 1-2. 不用导綫来傳送电报的初次試图 1
- § 1-3. 輻射場 2
- § 1-4. A. C. 波波夫发明无綫电, 第一次的无綫电报通訊 10
- § 1-5. 各种不同波长的无綫电波的傳播 14
- § 1-6. 应用电子管的无綫电报 18
- § 1-7. 无綫电话 23
- § 1-8. 电视 25
- § 1-9. 无綫电定位术 28
- § 1-10. 苏联无綫电技术的发展 29
- § 1-11. 課程的內容 33

第二章 无綫电綫路的基本元件(电容器、电感綫圈、电阻元件)..... 35

- § 2-1. 引言 35
- § 2-2. 确定阻抗的能量方法 36
- § 2-3. 电容器中的能量損失, 有損失电容器的阻抗 39
- § 2-4. 固定电容器的类型和結構 43
- § 2-5. 可变电容器的类型 47
- § 2-6. 在电感綫圈中的能量損失, 綫圈的阻抗(不考虑电場) 49
- § 2-7. 电感綫圈的阻抗(考虑电場) 56
- § 2-8. 获得低損失綫圈的方法 61
- § 2-9. 恒定电感的綫圈的結構 63
- § 2-10. 可变电感的綫圈的結構 67
- § 2-11. 电阻元件的等效綫路 69
- § 2-12. 电阻元件的結構 70

第三章 电場和磁場的屏蔽 74

- § 3-1. 引言 74
- § 3-2. 电場的屏蔽 74

§ 3-3. 磁場的屏蔽	76
§ 3-4. 单导綫和双导綫的屏蔽	84
第四章 串联振蕩回路中的强迫振蕩	86
§ 4-1. 引言	86
§ 4-2. 串联振蕩回路的阻抗和导納	86
§ 4-3. 一般失調, 相对失調	89
§ 4-4. 回路的通頻帶	95
§ 4-5. 回路的品质因数	97
§ 4-6. 串联振蕩回路中元件上的电压	98
§ 4-7. 諧振时振蕩回路中的能量关系	108
第五章 并联振蕩回路中的强迫振蕩	110
§ 5-1. 引言	110
§ 5-2. 无損失并联回路的电抗	110
§ 5-3. 有損失并联回路的阻抗	116
§ 5-4. 等效并联綫路	125
§ 5-5. 并联諧振时电流間的关系	126
§ 5-6. 并联回路接向发电机	128
第六章 幅調振蕩及其在振蕩回路中的作用	131
§ 6-1. 引言	131
§ 6-2. 調幅系数	132
§ 6-3. 对于幅調振蕩的复数方法一般化	133
§ 6-4. 將幅調振蕩分解成載頻振蕩和傍頻振蕩	139
§ 6-5. 幅調振蕩的頻譜图	140
§ 6-6. 幅調电台載頻的分配	142
§ 6-7. 幅調振蕩的向量图	142
§ 6-8. 幅調电压加在具有复数导納电路上的作用(一般情形)	145
§ 6-9. 在对載頻有对称导納值的电路中幅調电压的作用	149
§ 6-10. 前面几节所得結果的一般化	151
§ 6-11. 幅調电势在串联振蕩回路中的作用	153
§ 6-12. 幅調电压在并联振蕩回路中的作用	159
§ 6-13. 調幅无畸变的条件	163
§ 6-14. 幅調振蕩的功率	164
第七章 頻調和相調振蕩及其对于振蕩回路的作用	166

§ 7-1. 引言	166
§ 7-2. 振荡的频率	166
§ 7-3. 频调振荡	169
§ 7-4. 相调振荡	171
§ 7-5. 频调及相调振荡的向量图	173
§ 7-6. 频调和相调与幅调相比的优越性	174
§ 7-7. 将频调和相调振荡分解成载波和傍频振荡	176
§ 7-8. 频调和相调振荡的频谱图	182
§ 7-9. 频调和相调电压在其有复数导纳的电路中的作用	185
§ 7-10. 研究频调或相调线路的近似方法	188
第八章 脉冲在振荡回路中的作用。频谱函数法	196
§ 8-1. 引言	196
§ 8-2. 振荡回路中的自由振荡	196
§ 8-3. 振荡回路中的不稳定过程	200
§ 8-4. 将周期性脉冲的系列分解为傅氏级数	210
§ 8-5. 脉冲的频谱函数	213
§ 8-6. 由脉冲的频谱函数求脉冲	232
§ 8-7. 用频谱函数的方法求电流和电压	233
§ 8-8. 振荡回路中作用有脉冲时的近似研究法	236
§ 8-9. 在具有理想谐振曲线的电路中非周期性振荡的作用	240
§ 8-10. 借助于脉冲频谱函数确定它所给出的能量	246
§ 8-11. 无线电接收中的干扰	248
第九章 耦合回路	251
§ 9-1. 引言。耦合回路举例。耦合形式	251
§ 9-2. 初级及次级的等效线路	252
§ 9-3. 耦合回路中的谐振	258
§ 9-4. 耦合回路中的能量关系	259
§ 9-5. 当变动 x_1 时耦合回路中的谐振现象	263
§ 9-6. 当变动 x_2 时耦合回路中的谐振现象	271
§ 9-7. 当变动 x_1 及 x_2 时耦合回路中的谐振现象	273
§ 9-8. 当变动电势频率时耦合回路中的谐振现象 (回路中一为非振荡回路, 另一为振荡回路)	278
§ 9-9. 当变动电势频率时耦合振荡回路中的谐振现象 (回路无损失)	281
§ 9-10. 当变动电势频率时耦合振荡回路中的谐振现象 (耦合很弱并且两谐振频	

率相差很多)	288
§ 9-11. 当变动电势频率时耦合振荡回路中的諧振現象(同样的两个回路)	290
§ 9-12. 当变动电势频率时耦合回路中的諧振現象(临近耦合频率时的一般情况)	295
§ 9-13. 已調振蕩在耦合回路系統中的作用	297
§ 9-14. 脉冲对于耦合着的相同回路的作用	298
§ 9-15. 脉冲在耦合回路中的作用(一般情况)	309
附录	313
1. 公式(2.3), (2.4)的証明	313
2. 应用在无綫电技术方面的几种介质的 ϵ_r 和 $\operatorname{tg} \delta$ 值	314
3. 几种固定电容器的 TKC 和 $\operatorname{tg} \delta$ 值	315
4. 平板形和圆柱形电容器的电容	316
5. 可变电容器片形的計算	317
6. 苏联几种国产磁介体的主要参数	320
7. 綫圈电感的計算	320
8. 綫圈导綫的最佳直徑求法	323
9. 几种电感綫圈的 TKL 平均值	325
10. 綫圈互感的計算	325
11. 几种电阻元件的主要数据	330
12. 在本书内遇到的基本电量和磁量的简写符号	330

第一章 緒論

§ 1-1. 課程的目的和任务

“無線电技术理論基础”这門課有两个目的：第一个就是給出关于無線电技术的一般概念，以便在专业课程里对無線电技术的各部分作进一步研究时，已經有了关于無線电技术的完整概念；第二个就是給出在無線电技术的设备中，被广泛应用着的那些基本过程的理論和对这些过程加以叙述。

在現今，無線电技术被非常广泛的用于各方面的問題上：不用导綫傳送电报（無線电报）、声音（無線电话和無線电广播）、活动的或不活动的画片（电视和传真电报）；傳送和接收使船舶或飞机能够确定自己位置 and 航綫的訊号（無線电导航）；依靠無線电訊号的帮助，来发现空間各种目标，例如，飞机，船舶和潜水艇等（無線电定位术）；用高频电流将各种物体加热，旨在使之干燥，表面淬火以及熔炼；在医学中应用高频电振荡，等等。

为了預先認識一下無線电技术，在这章下面各节中，将对于应用在無線电技术中的基本过程給以簡略叙述。

§ 1-2. 不用导綫來傳送电报的初次試图

無線电技术的发展是从 A. C. 波波夫在 1895 年发明無線电报开始的；在此之前，曾經发明过有綫电报，以及很多次徒劳无功地想用电来实现不用导綫傳送电报的試图。

1832 年，在俄国，俄罗斯科学家 П. Л. 希林格发明了第一个电磁式电报的器具。那是用沿着导綫发送不同方向的电流的方法来进行傳送消息，每一个字母都对应有发送电流的一定組合。在接收的地方，

按照进入电流所生的磁針偏轉来接收信号。随着这个发明之后,又发明了些其他的电报器具,也是利用电流的磁作用。

当傳送的地方与接收的地方有联系起来的必要的时候,纵令用一根导綫(可以利用大地作为第二根导綫)来联系也会带来很多的不方便。因此,在十九世紀四十年代,就开始试图实現在远距离間不用导綫来傳送电报的訊号。很自然地就发生了这样的問題:究竟能否利用带电物体所建立起来的电场,或电磁鉄所建立的磁场来达到上述目的呢?然而简单的推論証明,这种电场或磁场离开了产生地点以后,减弱得很快。所以不能利用它在远距离来傳送訊号。事实是这样,带电物体的电场是与距离的平方成反比地减少。此外,在大地的影响下,这种电场将更加格外的减弱。从电工基础中知道:位于地面之上的电荷将在地面感应有大小相同符号相反的电荷。因此,在距离这些电荷很远的地方,将要建立起大小几乎相同的反方向的电场,这样就使得合成电场格外减弱。計算証明,在远距离时这种电场的减弱大略是与由产生地点距离的三次方成反比。从磁鉄和电磁鉄得来的磁场,也减弱得同样迅速,因为它们必定要具有相反符号的磁极。

由于电场强度和磁场强度迅速地减弱(反比于距离的立方),有很多次不用导綫想依靠这样的场来傳送訊号的试图,即使在比較近的距离內(数公里的样子),也都遭到了失敗。

§ 1-3. 輻射場

要实現在远距离不用导綫来傳送訊号,仅是在对电磁学的实验数据作了理論上綜合的基础上发现了輻射电磁场以后,才显示出是可能的;在自由空間,这种輻射电磁场强度的减弱是与离出发点距离成正比例的。

我們都知道,在空間交变的磁场将产生电场;反之亦然。

設将导綫 AB 放在磁场中,并与磁感应綫垂直(图 1-1)。如果这

根導線以速度 v 沿着垂直于其軸及磁場的方向在移動，則正如大家所知道的，在導體內會呈現電勢，其值將等於①

$$e = Bvl = \mu Hvl,$$

這裡 v 為移動的速度，

B 為磁感應，

H 為磁場強度，

μ 為磁導係數，

l 為導線 AB 處於磁場中的部分的長度。

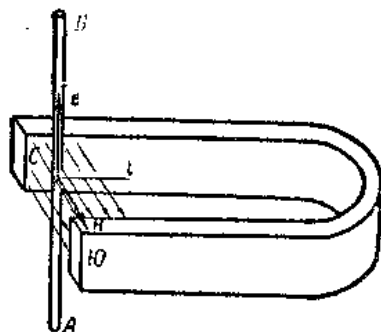


圖 1-1. 當磁場運動時，電場和導線 AB 中電勢 e 的發生。

電勢的方向可以按照右手定則來確定。如假設導線是向左移動，則電勢的方向就向上，如圖 1-1 上箭頭所示的方向。

假使現在反過來是導線保持不動，而使磁鐵向相反方向移動（就是向右边），則顯然地會在導線中感應同樣的電勢。這樣一來，如有電荷 q 向着電勢的相反方向在導線上通過，它將作功

$$qe = q\mu Hvl,$$

因此，在這電荷上的作用力為

$$\frac{qe}{l} = q\mu Hv,$$

而在單位電荷上所受的力為

$$\boxed{E = \mu H v.} \quad (1.1)$$

但作用在單位電荷上的力就是電場強度。因此如果磁場是向垂直于其力線的方向移動，則這個磁場就引起了垂直于磁場及其移動方向的電場。這個電場的強度可用 (1.1) 式來確定，而其方向則如圖 1-2 所示（與圖 1-1 相對應）。

① 這裡和以後的式子，都是使用實用單位，但在某些特殊聲明的場合下，長度不是以米作為單位而是以厘米為單位。

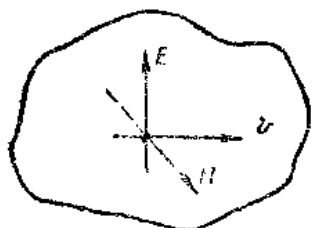


图 1-2. 当磁场 H 沿 v 的方向移动时所产生电场 E 的方向, 及当电荷以同样 v 的方向移动时所产生磁场的方向。

我们现在来研究电场的运动。设有正电的无限长圆柱 (图 1-3) 顺着自己轴向箭头所示方向移动。设在此圆柱单位长度上的电荷是 q_1 。那么在单位时间内会有电量 $q_1 v$ 通过与圆柱轴垂直的截面, 也就是说, 有等于 $i = q_1 v$ 的电流流过圆柱。

距离圆柱轴 r 处的磁场强度, 可以按全电流定律用下面的方程式来确定

$$2\pi r H = i = q_1 v,$$

由此得

$$H = \frac{q_1 v}{2\pi r}. \quad (1.2)$$

H 的方向可按照螺旋定则来确定, 如图 1-3 中箭头所示。从圆柱的单元长度 Δl 中出来的电力线数目等于

$$\frac{q_1 \Delta l}{\epsilon}.$$

这里 ϵ 为介质的介电系数。

在距离圆柱轴 r 处, 这些电力线所穿过的面积是

$$S = 2\pi r \Delta l,$$

由此得出距圆柱轴 r 处的电场强度 (等于在单位面积上电力线的数目) 等于

$$E = \frac{q_1 \Delta l}{\epsilon 2\pi r \Delta l} = \frac{q_1}{\epsilon 2\pi r}.$$

将上式代入 (1.2), 即得

$$H = \epsilon E v. \quad (1.3)$$

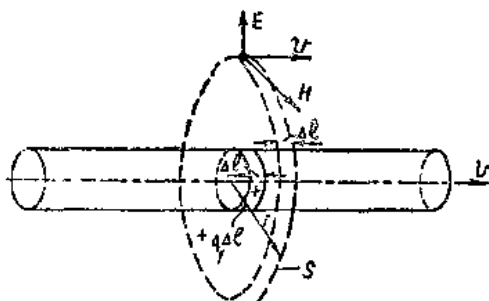


图 1-3. 圆柱的运动电场所建立的磁场。

可以这样假設,磁場不是直接由电流(也就是电荷的移动)所引起,而是由在每一点上与电荷以同一速度 v 运动的电場 E 建立的。虽然(1.3)式的关系是在个别場合下建立的但若认为磁場总是由电場的运动引起的,那末在他种場合也必定保有这个关系。

因此,若电場是向着垂直于其力綫的方向移动,則这个电場将引起垂直于电場及其移动方向的磁場。这个磁場强度可以用(1.3)式来确定,而其方向将符合图 1-2。因此,运动的电場建立磁場,反之,运动的磁場也建立电場。

可以創造这样的条件:在空間移动的电場和磁場彼此互相支持,它們的存在与任何电流和电荷无关。实际說来,如观察一下如图 1-2 所示的电磁場,电和磁的分量是彼此垂直的,并且也与它們运动方向垂直。若假設在这个場中,磁場分量仅是靠电場分量的运动来維持,那么根据(1.3)式,它的强度将是

$$H = \epsilon E v。$$

如果現在假設电場分量仅是靠运动的磁場分量来維持,則从(1.1)式知

$$E = \mu H v = \mu \epsilon E v^2。$$

將 E 約去后,就得知电場和磁場分量是能够不要外界的供給而彼此互相支持;条件是它們能滿足下面的等式

$$1 = \mu \epsilon v^2,$$

也就是說,須要它們能用下示的速度运动

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}。 \quad (1.4)$$

我們来計算一下这个場在真空中傳播时的速度。

在真空中: $\epsilon = \epsilon_0 = 0.0886 \times 10^{-10}$ 法/米^①,

$\mu = \mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ 亨/米,

① 本书所采用的单位表可参考附录 12。

因此

$$v = 2.998 \times 10^8 \text{ 米/秒} = c, \quad (1.5)$$

也就是說, 電場和磁場分量相互支持着的電磁場的运动速度應該等于光速。依靠电荷移动所建立起的这种場, 后来可以不依赖于电荷而存在。这种電磁場叫做輻射場。

在真空中輻射場的電場分量强度和磁場分量强度之間, 从(1.1)式和(1.4)式知存在有下面的关系

$$\frac{E}{H} = \mu c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 377 \frac{\text{伏} \cdot \text{米}}{\text{安} \cdot \text{米}} = 377 \text{ 欧}。 \quad (1.6)$$

这种場存在的可能性, 在 1873 年被馬克斯威尔根据在理論上綜合了累积到那个时代的实验資料而发表的“論电与磁”所証明。馬克斯威尔还指出光是輻射的電磁場。

馬克斯威尔这种关于輻射電磁場的工作, 在 Г. 赫芝 1888 年发表



它根据这项工作而作的偶极子輻射場的研究工作之前, 一直沒有得到广泛的傳布。赫芝从理論上和实验上証明, 如将两个金属小球(图 1-4)用导綫联接起来(所謂的偶极子), 并迅速地将它們交变充电, 則在这样偶极子的周圍就会形成輻射場。图 1-5 示当偶极子按正弦規律交变充电时, 在不同的瞬时所形成場的电力綫^①。按照这些图我們可以看到輻射場的形成。图

图 1-4. 偶极子。 1-5 所示为与图 1-4 同样的偶极子, 只是尺寸縮小了些。在与图 1-5 a 相对应的瞬間, 沿着偶极子开始有正弦电流流过, 将上面的小球充以正电荷, 将下面的小球充以負电荷。这种电荷, 就在偶极子的周圍建立起電場, 而且随着小球上电荷的增加而充滿了偶极子

^① 这张图是取自 К. Н. 列斯参斯基的著作(可参考“莫斯科动力学院学生科学技术学会的报告”, 1948 年, 卷二)。

周圍愈來愈大的空間(圖 1-5 a, b, c 和 d; 圖 1-5 i 是相當於最多的電荷)。因為偶極子的場是對稱的, 所以圖 1-5 b 和圖 1-5 c 以及其後的各圖中僅畫出了空間的四分之一。在這個圖中, 標示有在指定瞬間偶極子上電荷的大小(用正弦曲線上的小圓圈)。

充電電流和運動的電場在偶極子的周圍建立起場。磁場的力綫是以偶極子軸綫為中心的許多同心圓。這些力綫的截面是用小圓圈在圖的平面上表示出來^①。如前所述, 充滿在偶極子周圍空間的磁場, 將影響到電場的形成。

當偶極子的電荷在減少時, 靠近偶極子的一部分電力綫將向偶極子聚攏, 而由於運動磁場所建立的靠外面的部分, 却繼續離開偶極子, 這種電場的運動又支持運動著的磁場。這種過程的結果, 就使得當偶極子的電荷減少時, 在電力綫中形成凹槽(圖 1-5 d), 然後得到力綫的“脫離”(圖 1-5 e, 1-5 m)。凹槽的出現是由於運動磁場作用在電場上的緣故。當放電時, 靠近偶極子的磁場與電流的方向一塊兒改變符號, 按照圖 1-2, 這個磁場將建立起向上方向的電場分量; 這個分量於是發生凹槽。已經脫離了的力綫繼續伴隨著磁場一齊離開了偶極子, 而留在偶極子處的力綫則向偶極子聚攏。

當偶極子的電荷變到等於零的時候, 與偶極子有關的電力綫並不會停止(圖 1-5 f)。這種留下來的力綫是被運動的磁場維持着。在下一個四分之一的周期中, 當偶極子以相反的極性充電時, 在它周圍又重新產生力綫; 這時早先脫離開的力綫仍然繼續離開偶極子(圖 1-5 u, κ , λ , m)。此後當偶極子放電時, 又發生力綫的“脫離”(圖 1-5 n, o, n, p)。其後的情況均照此類推。

“脫離開”的力綫新生部分的產生過程, 將發生於偶極子電荷變化的每一個半周期。“脫離開”的力綫就是輻射場。它們也稱為無線電波

① 在這種場合, 當磁力綫的方向是離開我們時, 我們就用十號來表示; 而當向着我們時, 就用點來表示。

或电磁波。

离开偶极子电磁波强度为同相位的两点其最近距离称为波长(图 1-5 p)。通常都用字母 λ 来表示。在真空中波长跟偶极子电流变化的频率 f 及周期 T 是以下面的式子相联系的:

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

这里 $c = 2.998 \times 10^8$ 米/秒是光速。

偶极子的尺寸越大,偶极子交变充电的频率越高,则同样的偶极子电流所产生的辐射电磁场功率也就越大。

静止的电荷和直流都不能产生辐射场。仅于电流有变化时,它才会产生;这时电流所建立的场就开始在空间移动。实验和理论上的研究都证明,如偶极子的尺寸能够和振荡的波长相比较时,则实际上辐射就是存在的。由于这个理由,要想使 50 赫的工业频率有良好的辐射,这个频率的相应波长为

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \text{ 米} = 6000 \text{ 公里},$$

就必须使偶极子有数千公里的长短才行。同时若频率为 10000 兆赫 $= 10^{10}$ 赫,相应的波长为

$$\frac{3 \times 10^8}{10^{10}} = 0.03 \text{ 米} = 3 \text{ 厘米},$$

所以从几个厘米长的偶极子就可得到良好的辐射。

辐射电磁场的强度是与离开产生点的距离成比例地减少,而在单位体积中场的能量是与距离的平方成比例地减少(象光的传播一样)。这种辐射的电磁场很显著地比电场和磁场有利;因为电场和磁场的强度,象以前所指出的,是与距离的立方成比例地减少,而其能量是与距离的六次方成比例地减少的。

用下面的方式就可以说明这个问题。取一个辐射场的单元,它占