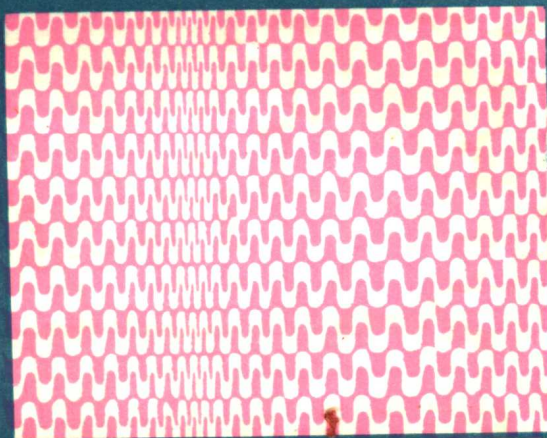


工程电磁场基础

徐永斌 何国瑜 卢才成 苏东林

北京航空航天大学出版社



北京航空航天大学出版社

徐永斌 何国瑜 卢才成 苏东林

工程电磁场基础

工程电磁场基础

徐永斌 何国瑜

卢才成 苏东林

北京航空航天大学出版社

(京)新登字166号

内 容 提 要

本书系统讲述了电磁场基本定律、静态场、电磁能、低频电磁场、平面波、电磁波的反射和折射、电磁辐射等电磁场工程的基础理论问题。书中侧重介绍工程中常用的基本概念，具有较强的实用性。

本书是电子工程专业本科大学生的教科书，也可供有关专业的研究生、教师和工程技术人员参考。

工 程 电 磁 场 基 础

GONGCHENG DIANCICHANG JICHU

徐永斌 何国瑜

卢永成 岑东林

责任编辑 卢永成

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张：33.5 字数：857千字

1992年9月第一版 1992年9月第一次印刷 印数：2000册

ISBN 7-81012-326-2/TN·018 定价：17.50元

前 言

本书是为电子工程专业本科大学生编写的电磁场理论课程的教科书。

电磁场理论课程是一门专业基础课。由于该课程的理论性强，数学推导繁复，公式、定理众多，方法不易掌握，因而是公认“难教、难学、难考”的一门课程。

我们在教学和科研工作中感到，学习电磁场理论关键在于对基本概念的理解和掌握。所以在书中，我们以较多的篇幅来阐述一些重要的电磁场概念的物理意义。在内容安排上，第一章和第三章介绍全部的电磁场基本定律，以便使读者建立对完整的电磁场理论体系的认识。在第五章中，我们将例题按照静电场边界条件的类型进行分类，以便于对边界条件这一难点的掌握。在各章中，我们尽量多举一些例题，帮助读者掌握解题的思路和方法。这对于读者理解和掌握概念问题也是有好处的。

本书第二章的矢量分析，是研究电磁场的重要数学工具。第四、五、六三章主要介绍静态场，第七章讨论物质中的场定律，第八章介绍了电磁场的功能关系。这些内容都是电磁场理论框架中的重要部分。第九章的低频电磁场，主要讨论的是电路理论与电磁场理论的关系。第十章均匀平面波，主要讨论平面波的传播特性。第十一章介绍的是电磁波的反射与折射问题；第十二章讨论电磁辐射问题。这些问题都是电磁场工程中的重要问题。

另外我们还认为，做为一本工科教科书，应该具有一定的工程实用性。因而在内容上，我们安排了静电场示意场图的画法、平面波极化旋转方向的工程判断法等内容。对在科研工作中涉及的一些问题，例如透波和吸波问题、有耗媒质中的波、电磁对偶原理等，也作了一定的介绍。我们还将电磁场的基本定理加以归纳，作为第十三章，以便读者在需要时查阅。其中有些内容超过了电子工程本科生电磁场理论教学大纲的要求。对于这些内容，我们都在目录中以“*”号标出了。在教学过程中，这部分内容可以选讲，也可以略去。将这部分内容略去，不会影响其余内容的连贯性。

我们希望本书对于电子工程专业的教师和工程技术人员也有一定的参考价值。

由于水平所限，本书不足之处在所难免，我们欢迎各方面的批评指正。

北京航空航天大学

徐永斌 何国瑜

卢才成 苏东林

1991年10月

目 录

引 言

- 一、电磁学发展简史.....(1)
- 二、电磁场理论课程的特点.....(2)

第一章 自由空间中的电磁场定律

- 1.1 基本定义(3)
 - 1.1.1 电荷密度(3)
 - 一、体电荷密度 ρ (3)
 - 二、面电荷密度 η (4)
 - 三、线电荷密度 λ (4)
 - 四、点电荷 q (5)
 - 1.1.2 电流密度(5)
 - 一、体电流密度 J (5)
 - 二、面电流密度 K(6)
 - 三、线电流 I (7)
 - 1.1.3 基本场量(7)
 - 一、洛仑兹力公式.....(7)
 - 二、电场强度 E (8)
 - 三、磁场强度 H(8)
- 1.2 自由空间中的电磁场定律(8)
 - 1.2.1 场定律中符号的意义(9)
 - 1.2.2 各电磁场定律的数学物理意义(10)
 - 一、法拉第电磁感应定律的意义.....(10)
 - 二、修正的安培环路定律的意义.....(11)
 - 三、电场高斯定律的意义.....(11)
 - 四、磁场高斯定律的意义.....(12)
 - 五、电荷守恒定律的意义.....(12)
 - 1.2.3 电磁场定律整体的物理意义(13)
- 1.3 积分形式场定律的应用(15)
- 习 题.....(22)

第二章 矢量分析

- 2.1 标量场的梯度(24)
 - 2.1.1 标量场的等值面(24)
 - 2.1.2 标量场的梯度(25)
 - 一、位移的方向余弦和单位矢量.....(25)

二、方向导数.....	(25)
三、标量场的梯度.....	(26)
2.1.3 梯度的性质	(27)
2.1.4 标量场梯度的物理意义	(29)
2.1.5 例题	(30)
2.2 矢量场的散度和高斯定理	(30)
2.2.1 矢量场的场流图	(30)
2.2.2 矢量场的散度	(31)
一、散度的定义.....	(31)
二、散度的数学计算式.....	(31)
2.2.3 矢量场散度的性质	(34)
2.2.4 矢量场散度的物理意义	(34)
2.2.5 高斯定理	(36)
一、高斯定理.....	(36)
二、高斯定理的证明.....	(36)
2.2.6 自由空间中微分形式场定律的散度关系式	(37)
2.2.7 拉普拉斯运算符	(38)
2.2.8 例题	(39)
2.3 矢量场的旋度和斯托克斯定理	(40)
2.3.1 保守场和非保守场	(40)
2.3.2 矢量场的旋度	(41)
一、旋度的定义.....	(41)
二、旋度的数学计算式.....	(42)
2.3.3 矢量场的旋度的性质	(45)
2.3.4 矢量场旋度的物理意义	(45)
2.3.5 斯托克斯定理	(46)
一、斯托克斯定理.....	(46)
二、定理证明.....	(46)
三、保守场的判据.....	(47)
2.3.6 自由空间微分场定律中的旋度关系式	(47)
2.3.7 例题	(47)
习 题.....	(49)
第三章 自由空间的微分场定律	
3.1 微分场定律	(54)
3.1.1 微分场定律的数学物理意义	(54)
一、法拉第电磁感应定律的意义.....	(54)
二、修正的安培定律的意义.....	(54)
三、电场高斯定律的意义.....	(55)
四、磁场高斯定律的意义.....	(55)

五、电荷守恒定律的意义	(55)
3.1.2 微分场定律整体的意义	(55)
3.1.3 例题	(55)
3.2 边界条件	(56)
3.2.1 电磁场中的不连续界面	(56)
3.2.2 边界条件	(57)
一、边界法线方向上的关系式 (法向边界条件)	(57)
二、边界切线方向上的关系式 (切向边界条件)	(59)
3.2.3 边界条件的物理意义	(61)
一、电场强度切向边界条件的意义	(61)
二、磁场强度切向边界条件的意义	(61)
三、电场法向边界条件的意义	(61)
四、磁场法向边界条件的意义	(61)
五、电场和磁场边界条件的物理解释	(62)
六、电流边界条件的意义	(63)
七、边界条件所含的方向关系	(64)
3.2.4 微分场定律与边界条件的形式对应关系	(64)
3.3 微分场定律 (含边界条件) 的应用	(65)
3.3.1 已知场分布求源分布	(65)
3.3.2 已知源分布求场分布	(67)
习 题	(71)

第四章 静电场的标量位

4.1 静电场的标量位	(75)
4.1.1 静电场标量位的引入	(75)
一、在原点的点电荷电场的标量位	(75)
二、在空间某点的点电荷电场的标量位	(75)
三、点电荷系电场的标量位	(76)
四、分布在有限区域的带电系统的标量位	(76)
4.1.2 标量位 (电位) 的物理意义	(77)
4.1.3 电偶极子的电场和电位	(78)
一、直接计算电场	(79)
二、使用标量位计算电场	(80)
4.1.4 标量位的微分方程和边界条件	(81)
一、微分方程	(81)
二、一般边界条件	(82)
三、边界为偶极层时的条件	(83)
四、导体表面的边界条件	(84)
4.1.5 泊松方程的解	(86)
4.2 标量位的性质	(88)

4.2.1	极值定理	(88)
4.2.2	平均值定理	(89)
	一、格林定理	(89)
	二、平均值定理的证明	(89)
	三、平均值定理的应用	(91)
4.2.3	唯一性定理	(92)
	一、定理内容	(92)
	二、唯一性定理的证明	(93)
4.3	唯一性定理的应用	(95)
4.3.1	静电镜像法	(95)
	一、在无限大接地导体平板上方放置一个点电荷的系统	(95)
	二、接地导体角域内放置点电荷的系统	(96)
	三、接地导体球外放置一个点电荷的系统	(97)
	四、不接地不带电的导体球外放置一个点电荷的系统	(98)
	五、不接地、带电量为 Q 的导体球外放置一个点电荷的系统	(98)
	六、在一个接地的无限大导电平面上方放置一个偶极子的系统	(98)
4.3.2	电轴法	(99)
	一、两根相互平行且带等量异号电荷的无限长直导线的场	(99)
	二、两个等截面导体圆柱系统	(101)
	三、两个截面不相等的导体圆柱系统	(102)
4.4	复变函数在静电场问题中的应用	(102)
4.4.1	复电位 (复位函数)	(103)
4.4.2	保角变换 (保角映射)	(106)
4.4.3	许瓦兹-克里斯托弗尔变换	(112)
4.5	静电场示意场图的画法	(119)
4.5.1	静电场示意场图的作用	(119)
4.5.2	绘制静电场示意场图的基本法则	(120)
4.5.3	静电场示意场图实例	(127)
	一、在球形接地导体空腔内有一个点电荷	(127)
	二、两个不等量的异号电荷	(128)
	三、接地导体上的矩形空气槽	(130)
	四、矩形空气域	(131)
	五、两个同轴圆柱面间的空气域	(133)
	习 题	(133)

第五章 静电场的分离变量法求解

5.1	拉普拉斯方程的变量可分离解	(137)
5.1.1	在直角坐标系中	(137)
	一、平凡解 (明显解)	(138)
	二、一般解	(138)

5.1.2	在柱坐标系中	(140)
一、	平凡解	(140)
二、	与 z 变量无关的二维一般解	(141)
三、	柱坐标中拉普拉斯方程解的物理意义	(142)
5.1.3	在球坐标系中	(144)
一、	平凡解	(145)
二、	一般解	(145)
三、	球坐标中拉普拉斯方程解的物理意义	(147)
5.2	静电场问题求解实例	(149)
5.2.1	边界电位值已知的静电系统	(150)
例1	(上下为导体板, 左右为源的矩形二维空气域)	(150)
例2	(扇形域)	(154)
例3	(锥面间域)	(155)
例4	(导体块上的空气槽)	(156)
例5	(有导体角的矩形域, 迭加原理)	(160)
例6	(立方域)	(161)
5.2.2	带有自然边界条件的静电系统	(163)
例1	(导体上的半无界缝)	(163)
例2	(已知电位分布的圆柱面)	(165)
例3	(已知电位分布的球面)	(166)
5.2.3	带有电位导数边界条件的静电系统	(168)
例1	(平板电容器)	(168)
例2	(长方体形电阻器)	(169)
例3	(矩形导体片)	(171)
例4	(内有面电荷的二维矩形空腔)	(173)
例5	(带面电荷的圆柱面)	(175)
例6	(带面电荷的球面)	(177)
例7	(两种导体构成的半圆形电阻)	(179)
5.2.4	带有趋势性边界条件的静电系统	(181)
例1	(中心放置电偶极子的导体球壳)	(181)
例2	(中心放置点电荷的导体球壳)	(183)
例3	(上下异号的线电荷)	(185)
例4	(均匀电流场中的导体球)	(186)
例5	(均匀电场中的导体圆柱)	(187)
5.3	柱坐标系中三维拉普拉斯方程的分离变量解	(189)
习 题		(198)
第六章 静磁场与位函数的远区多极子展开式		
6.1	静磁场的矢量位	(203)
6.1.1	毕奥-沙瓦定律	(203)

一、电流元产生的磁场	(203)
二、闭合电流线产生的磁场	(203)
三、分布电流产生的磁场	(204)
6.1.2 磁场的矢量位	(204)
一、静磁场方程	(204)
二、磁场的矢量位	(205)
三、磁矢位的方程	(205)
四、磁矢位方程的解	(206)
五、磁矢位的物理意义	(207)
六、边界条件	(207)
6.1.3 例题	(207)
6.2 静磁场的标量位	(210)
6.2.1 磁标位	(210)
一、磁标位的定义	(210)
二、一个电流环的磁标位	(211)
三、磁标位的方程和方程解族	(212)
四、边界条件	(213)
6.2.2 例题	(213)
6.3 位函数在远区的多极子展开式	(216)
6.3.1 静电标量位 $\Phi(r)$ 的多极子展开式	(216)
一、 $\frac{1}{r_{QP}}$ 的级数展开式	(217)
二、 $\Phi(r)$ 的展开式	(217)
三、电位 $\Phi(r)$ 多极子展开式的物理意义	(218)
四、多极子展开式的应用	(219)
6.3.2 磁矢位 $A(r)$ 的远区多极子展开式	(220)
习 题	(223)

第七章 有物质存在时的宏观场定律

7.1 物质极化的宏观模型	(226)
7.1.1 极化的概念	(226)
7.1.2 极化强度 P	(228)
7.1.3 极化电荷与电场高斯定律	(229)
一、极化电荷	(229)
二、宏观极化模型下的电场高斯定律	(230)
7.1.4 极化电流与修正的安培定律	(231)
一、极化电流	(231)
二、宏观极化模型下的修正安培定律	(232)
7.2 极化问题举例	(232)

7.2.1 永久极化物体	(232)
一、永久极化板	(233)
二、永久极化球	(234)
7.2.2 非永久极化物体	(236)
一、均匀电场中的电介质球	(236)
二、填充均匀 ϵ 材料的平行板电容器	(239)
三、填充非均匀 ϵ 材料的电容器	(240)
四、空心介质球心放置一个电偶极子	(241)
7.3 物质磁化的安培电流模型	(243)
7.3.1 物质磁化的机理	(244)
7.3.2 磁化强度 M	(245)
7.3.3 磁化电流密度	(246)
7.3.4 安培电流模型下的场定律	(248)
7.3.5 永久磁化圆柱的磁场	(249)
7.4 物质磁化的磁荷模型	(250)
7.4.1 物质磁化的机理	(250)
7.4.2 磁荷模型下的磁化强度	(251)
7.4.3 物质中的磁场高斯定律	(252)
7.4.4 物质中的法拉第电磁感应定律	(252)
7.4.5 永久磁化圆柱的磁场	(253)
7.4.6 有均匀磁介质的磁场系统	(255)
一、均匀磁场中的磁介质球	(256)
二、空心磁介质球心放置一个磁偶极子	(259)
7.5 物质中的场量组成关系和场定律	(261)
7.5.1 物质中的场量组成关系	(261)
一、单值关系	(261)
二、多值关系	(262)
三、各向同性和各向异性	(263)
7.5.2 物质中的电磁场定律	(265)
一、 B - D 形式的场定律	(265)
二、 E - H 形式的场定律	(265)
三、对称形式的场定律	(266)
习 题	(268)

第八章 电磁场的能量和功率

8.1 静电场和静磁场的能量	(272)
8.1.1 静电场的能量	(272)
8.1.2 静电场能计算举例	(277)
8.1.3 静磁场能量	(278)
8.1.4 静磁场能计算举例	(282)

8.2 坡印廷定理	(283)
8.2.1 电磁场供给运动电磁荷的功率	(283)
一、电磁场对运动电磁荷的电磁力	(284)
二、电磁场供给运动电磁荷的功率	(284)
8.2.2 坡印廷定理	(285)
一、微分形式的坡印廷定理	(285)
二、积分形式的坡印廷定理	(286)
8.2.3 坡印廷定理的量纲单位分析	(286)
8.2.4 坡印廷定理的物理解释	(288)
一、对微分形式坡印廷定理的物理解释	(289)
二、对积分形式坡印廷定理的物理解释	(289)
三、在解释坡印廷定理上的假说性	(290)
8.2.5 对 \mathbf{S} 和 ω 的补充规定	(291)
8.2.6 坡印廷定理在物质中的应用	(292)
8.3 静态功率流与损耗	(294)
8.4 物质中的极化能和磁化能	(300)
8.4.1 极化能和电能	(300)
8.4.2 磁化能和磁能	(304)
8.4.3 磁能计算举例	(305)
8.4.4 物质宏观模型与坡印廷定理的关系	(307)
8.5 小结	(308)
习 题	(310)

第九章 时变场的低频特性

9.1 平行板系统中的交变电磁场	(314)
9.1.1 交变电磁场的严格解	(314)
9.1.2 平行板系统的低频响应	(318)
9.2 时变场的幂级数解法	(321)
9.3 低频系统中的场	(325)
9.3.1 平行板系统	(325)
一、参考点的选取	(325)
二、零阶场	(326)
三、一阶场	(328)
四、高阶场	(330)
五、场分布和等效电路	(331)
9.3.2 单匝电感器	(333)
一、系统的参考点	(333)
二、零级近似场	(334)
三、一级近似场	(334)
四、二级近似场	(336)

五、高阶场	(337)
9.3.3 多匝线圈	(338)
一、不考虑线圈存在时的一阶电场	(338)
二、放入线圈后的一阶电场	(338)
三、计算 a 、 b 两点间的端电压	(339)
9.4 电路理论与电磁场理论的关系	(340)
习 题	(343)
第十章 平面电磁波	
10.1 自由空间中均匀平面波的时域解	(345)
10.1.1 均匀平面波的电场和磁场时域解	(345)
10.1.2 均匀平面波的传播特性	(350)
10.2 正弦律时变场	(351)
10.2.1 复矢量	(351)
10.2.2 复数形式的场定律	(353)
10.2.3 复矢量乘积的物理意义	(354)
10.3 正弦律均匀平面波	(355)
10.3.1 均匀平面波的频域解	(355)
10.3.2 复数形式的坡印廷定理	(359)
10.3.3 复数坡印廷定理与微波网络的关系	(362)
10.4 平面波在有耗媒质中的传播	(364)
10.4.1 有耗媒质中的均匀平面波解	(364)
10.4.2 半导电媒质中均匀平面波的传播	(366)
10.4.3 良导体的趋肤效应	(367)
10.4.4 相速、群速和色散	(369)
10.5 电磁波的极化状态	(372)
10.5.1 电场极化状态的概念	(372)
10.5.2 极化方向的工程判断法	(375)
一、瞬时场极化方向的判断	(376)
二、复数场极化方向的判断	(377)
10.5.3 波的分解与合成	(379)
一、线极化波的分解	(379)
二、椭圆极化波的分解	(380)
三、圆极化波的分解	(381)
10.6 沿任意方向传播的均匀平面波	(382)
10.6.1 波的数学表达式	(382)
一、一般形式	(382)
二、在直角坐标系中的表达式	(383)
*三、在柱坐标系和球坐标系中的表达式	(383)
10.6.2 波的特性	(384)

*10.7	无耗媒质中的非均匀平面波	(388)
*10.8	频率极高时媒质中的波	(391)
10.8.1	电介质中的波	(391)
10.8.2	金属中的波	(394)
10.8.3	电离层和等离子体中的波	(395)
	习 题	(397)

第十一章 平面波的反射与折射

11.1	在自由空间与理想导体分界面处的反射现象	(403)
11.1.1	正入射	(404)
11.1.2	斜入射	(406)
	一、垂直极化	(406)
	二、平行极化	(410)
11.2	在两种介质分界面处的反射和折射现象	(411)
11.2.1	垂直极化	(412)
	一、入射角 $\theta_i = 0$	(414)
	二、入射角 $\theta_i > 0$	(415)
11.2.2	平行极化	(419)
*11.3	导电媒质表面的反射和折射	(422)
11.3.1	导电媒质中的实数折射角	(423)
	一、媒质II是良导体	(424)
	二、媒质II是不良导体	(426)
11.3.2	良导体中的透射功率	(426)
11.3.3	导电表面的反射	(428)
	一、媒质II是良导体	(429)
	二、媒质II是不良导体	(431)
11.4	透波和吸波现象	(431)
11.4.1	透波现象	(431)
	一、电磁波正入射	(431)
	*二、电磁波斜入射	(435)
	*三、多层介质板的透波现象	(437)
*11.4.2	吸波现象	(438)
	一、干涉型吸收材料	(440)
	二、宽带吸收材料	(440)
	习 题	(442)

第十二章 电磁波的辐射

12.1	时变场的位函数	(445)
12.1.1	标量位和矢量位	(445)
*12.1.2	赫兹电矢量 Π	(448)
12.2	时变场位函数方程的解	(450)

*12.2.1	克希荷夫积分	(450)
12.2.2	达朗贝尔公式	(454)
12.3	交变电偶极子的辐射	(456)
12.3.1	交变电偶极子的电磁场量	(457)
一、	矢量位 $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{r})$	(457)
二、	磁场强度 $\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r})$	(458)
三、	电场强度 $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$	(458)
12.3.2	交变电偶极子场的分析	(459)
一、	近区场	(459)
二、	远区场	(460)
三、	辐射场的方向性	(461)
四、	辐射功率	(461)
五、	辐射电阻	(462)
2.4	交变磁偶极子的辐射	(462)
12.4.1	通过复数矢量位 $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{r})$ 求电磁场	(463)
12.4.2	使用电磁对偶原理求电磁场	(464)
12.5	缝隙元的辐射	(465)
*12.6	半波天线	(468)
*12.7	天线阵	(471)
*12.8	线天线电磁场的精确计算	(473)
*12.9	天线的输入功率和输入阻抗	(476)
	习 题	(479)
*第十三章	电磁场的基本定理	
13.1	格林定理	(481)
13.1.1	标量格林定理	(481)
13.1.2	广义格林定理	(482)
13.1.3	矢量格林定理	(484)
13.2	亥姆霍兹定理	(485)
13.3	静态场的几个定理	(486)
13.3.1	标量位 ϕ 的唯一性定理	(486)
13.3.2	平均值定理	(486)
13.3.3	无极值定理	(486)
13.3.4	汤姆生定理	(486)
13.3.5	恩绍定理	(486)
13.3.6	矢量位 A 的唯一性定理	(486)
13.4	坡印廷定理	(487)
13.5	电磁力的定理——麦克斯韦定理	(488)
13.6	时变场的唯一性定理	(490)
13.7	相似原理	(492)

13.8	二重性原理和电磁对偶原理.....	(493)
13.9	等效原理.....	(496)
13.10	感应定理	(498)
13.11	互易定理	(499)
13.12	天线远场定理	(502)
13.13	克希荷夫-惠更斯原理.....	(504)
13.14	费马原理	(505)
附录A	矢量的代数运算.....	(506)
附录B	坐标系的有关概念.....	(510)
附录C	立体角的有关概念.....	(517)
主要参考书	(520)

引 言

电磁场理论是研究电磁场运动规律的科学，它具有较完整的理论结构和较高的实用价值。它不仅是微波、天线、电波传播等工程技术的理论基础，而且在科学技术的各个领域中也得到日益广泛的应用。

当前电磁场理论与电路理论、系统理论被认为是现代电子工程技术的基本理论，是电子工程技术人员必备的基础知识。

一、电磁学发展简史

人类探索电磁运动规律的道路是曲折而漫长的。人类很早就注意到自然界的雷电现象。大约三千多年前，人类就有了有关天然磁石、摩擦起电的知识。其后，我们的祖先还造出了指南针，对世界科学的发展做出了不朽的贡献。

但是，对电磁现象进行系统的研究，上升为理论并加以运用，则是18世纪中叶以来，特别是19世纪中叶后的事情。这当然是由社会生产水平和科学发展水平导致的。

在17世纪中叶，德国马德堡市的冯·魁克(Von Guencke)制成了摩擦起电机，从而使人们可以人为地得到较大数量的电荷，为进行电学的初步实验打下了基础。1745年，荷兰莱顿大学教授马森布罗克制成了莱顿瓶，可以将得到的电荷储存起来，供电学实验用。1752年，很多国家的科学家进行了雷电实验，其中著名的有美国科学家富兰克林(Flanklin, 1706—1790)和俄国科学家罗蒙诺索夫(Ломоносов, 1711—1765)。这些科学家的实验结果证明了自然界的雷电与摩擦起电得到的电在电的性质上是完全一样的。但在进行这项实验时，却有几位科学家，如俄国的利赫曼，被雷电击中身亡，为电磁学的发展献出了自己的生命。为了免遭雷电的危害，富兰克林在1753年发明了避雷针，从而将电学的研究成果首次用于工程实际中。1771—1773年，英国科学家卡文迪什(Cavendish, 1731—1810)进行了著名的静电实验，证明了在静电情况下，导体上的电荷只能分布在导体的表面。在总结实验的基础上，法国科学家库仑(Coulomb, 1736—1806)在1785年提出了第一个电学定律——库仑定律，开始走上将电学研究理论化的道路。1799年，意大利科学家伏打(Volta, 1745—1827)制成了伏打电池，这是人类制造的第一个化学电源，它使电流和磁学实验得以进行。1819年，丹麦教授奥斯特(Oersted, 1777—1851)在准备示教实验时发现电流对磁针的作用，这表明电流与磁现象之间有联系。1822年，法国科学家安培(Ampère, 1775—1836)提出了安培定律。将电流和磁场的相互作用关系上升为理论，1820—1825年，德国科学家欧姆(Ohm, 1787—1854)，得出第一个电路定律——欧姆定律。1831年，英国科学家法拉第(Faraday, 1791—1867)在经过十年研究之后发现变化的磁场可以产生电场，得到了法拉第电磁感应定律。为解释电磁感应定律，他在1837年提出力线的概念。从而首先使得对电磁现象的描述脱离开超距作用的见解。建立了“场”概念的雏形。1840年，英国科学家焦耳(Joule, 1818—1889)提出焦耳定律，揭示出电磁现象的能量属性。在同时期有人研制出使用永久磁铁的发电机，这是第一个机械电源，实现了由机械能向电能的转变。1844年，美国画家莫尔斯(Morse, 1791—1872)发明了有线电报，将电磁学的成果用于通讯方面。1848年，德国科学家克希荷夫(Kirchhoff, 1824—1887)提出了克希荷夫电路定律，使电路理论结构趋于完善。1862—1865年，英国科学家麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879)提出了“场”