

天线理论与设计

〔美〕R.S.埃利奥特 编著

汪茂光 陈顺生 谷深远 译

国防工业出版社

天线理论与设计

〔美〕 R.S. 埃利奥特 编著
汪茂光 陈顺生 谷深远 译

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书由单个天线元的源-场关系、阵列的分析和综合、自阻抗与互阻抗的馈电结构,以及连续口径天线四部分组成。全书共十章:一、远区场的积分、互易性、方向系数;二、偶极子、圆环和螺旋的辐射方向图;三、喇叭、缝隙与贴片天线的辐射方向图;四、直线阵列的分析;五、直线阵列的综合;六、平面阵列的分析与综合;七、天线元的自阻抗与互阻抗;八、天线元与天线阵馈电结构的设计;九、行波天线;十、反射面与透镜。为便于自学、教学和阅读,每章末均附有习题和参考文献。在书的附录部分,收进了电场E矢量格林公式的推导等八项内容。本书适用于从事天线理论与设计的工程技术人员,以及有关大专院校师生。

antenna theory and design

Robert S. Elliott

Prentice-Hall, Inc. 1981

*

天线理论与设计

[美] R. S. 埃利奥特 编著

汪茂光 陈顺生 谷深远 译

责任编辑 耿新暖 杨其眉

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张20¹/₂ 541千字

1992年2月第一版 1992年2月北京第一次印刷 印数: 001—800册

ISBN 7-118-00893-1/TN·148 定价: 18.80元

译者序

天线理论与设计是工科高等院校中通信与电子系统和电磁场与微波技术等专业本科和研究生的主要课程之一，需要有一本既能系统深入地阐述天线基本理论，又能反映现代天线新技术，可供本科生和研究生连续学习之用的教科书或教学参考书。本书是美国洛杉矶加利福尼亚大学著名教授埃利奥特（Robert S. Elliot）根据他在该大学讲授“天线理论与设计”系列课多年的经验编著的一本教科书。本书的特点是既系统深入地阐述了天线理论，又介绍了一些常用天线及其馈线系统的工程设计方法。书中有大量特性曲线和工程设计数据，每章之后均附有习题和必要的参考文献。本书对具体天线型式的覆盖面很广，分别介绍了振子天线、环天线、螺旋天线、喇叭天线、波导缝隙天线、微带贴片天线、行波线天线、表面波天线、反射面天线和透镜天线的理论和工程设计方法，以及直线阵列和平面阵列的分析和综合方法。但本书并不是均衡地阐述每一种天线，而是重点介绍广泛应用于通信与雷达系统中的微波天线和天线阵。本书对天线阵的综合方法是具有特色的，所以近年来有人已把本书中阐述的天线阵综合方法称为埃利奥特综合法。

本书的另一特点是内容编排适当。根据理论和计算方法的深度，本书的内容可以组成天线系列课。较浅的部分可以作为工科大学本科高年级学生“天线原理”课的教学内容，较深的部分则可作为有关专业硕士研究生“天线理论与设计”课程的教学内容。课程的内容本书作者已在序言中作了妥善的安排。

本书是理论与工程设计并重的，所以，它不仅可作为大学本科生和研究生的教材或教学参考书，还可作为从事天线研制和设计的工程技术人员和高等学校教师的参考书。

本书共十章，分为四部分：第一部分（一至三章）由谷深远翻译，序言和第二部分（四至六章）由汪茂光翻译，第三、四部分（七至十章）和附录由陈顺生翻译。全书译稿由汪茂光校阅。

R.S.埃利奥特教授早年专攻过英国文学，他的著作文笔清新，结构严谨。由于译者水平所限，译文未能充分地反映作者的风格，请读者谅解；译文中的错误及不当之处，请读者批评指正。

译 者

原 序

在作者执教的大学里，每年都要开设一门关于天线理论与设计的九个月的系列课程。第一和第二学期[●]的课程是供四年级大学生和一年级研究生选修的；第三学期课程则是研究生水平的。学习这门系列课程，需要有中等水平的电磁理论和导论性传输线理论（包括史密斯圆图和波导模式分析）知识作为基础。本书就是根据天线系列课的讲稿编写而成的。

根据作者在过去五年中讲授这门课程的经验，有些具有重要意义的各种论题在现有的教科书中难以见到。其次，其重要性已得到公认的某些新进展只能在一些科研论文中找到。学生们常常由于这些论文中所使用的符号不一致或由于要购买大量只能部分利用的课本造成经济困难而感到苦恼。上述这些就是我编写这本教科书的最初动机。感谢几批大学生相继为编纂本书所做的工作，他们的建议有益于最终的书稿。

本书内容的范围受到作者学识水平的限制和洛杉矶地区地方工业需要的影响。读者将会发现，本书的重点放在微波天线，特别是用于雷达和通信系统中的阵列天线上。这些天线的实际用途已扩展到占据天线领域的主要部分，所以希望这一安排将得到广泛的理解。但是，从本书目录中可以看出，其它论题也没有被忽略。

本书分为四部分。第 I 部分从电磁理论的综述开始，然后试图在源（天线）的集合同由这些源所产生的辐射场之间建立积分关系。再从这些积分关系出发把天线分为便于分析的两种类型。第一类是实际源已经熟知的天线，包括偶极子、环天线和螺旋天

● 美国大学中每学年分为四个学期——译者。

线，然后依次研究它们的方向图特性。第二类是其近场按合理的精度识别的天线，它们可以用等效源来分析。这一类天线包括喇叭、缝隙和贴片天线。这些天线都要比较详细地加以讨论。

第Ⅱ部分是论述一维和二维阵列的分析和综合。在第Ⅰ部分中研究过的天线单元构成了这些阵列的组成部分，因此重点放在方向图特性上。将介绍道尔夫 (Dolph) 和泰勒 (Taylor) 综合法，并扩展到要求具有任意边瓣结构的方向图的综合法。

第Ⅲ部分重点将转移到单独使用或用于阵列中的天线单元的阻抗特性上。将建立圆柱形偶极子自阻抗的海仑 (Hallén) 积分方程式，并扩展到带状偶极子。要研究几种解，包括用矩量法和函数展开法求得的解。应用了巴俾涅原理把这些结果扩展到缝隙。借助互易原理建立了在阵列天线设计中十分重要的互阻抗方程，然后用以计算最常用的天线单元。再把所有这些自阻抗和互阻抗方程用于设计单个天线元、直线阵和平面阵(包括扫描阵列)的馈电结构。

第Ⅳ部分是专门论述连续(或准连续)口径天线的。要研究像菱形和V形那样的长线天线，并分析许多表面波结构的性质。这包括像覆盖介质层和波纹形地平面那样的慢波型表面波结构和著名的漏波导一类的快波型表面波结构。本书最后介绍反射器和透镜，这类天线可以用许多光学原理来分析。

作者的教学实践中，天线课程包括三个阶段，每阶段讲授三个月，每周讲四小时。第一阶段讲授第一、二、四章，加上第五章的前6节、第七章的前15节、第八章的前12节和第九章的前3节。在介绍了基本原理之后就集中讲授线天线(偶极子、单极子、环天线和螺旋天线)。第二阶段讲授第三章，第七、八、九章的剩余部分和第十章全部。这阶段着重讲授口径天线(缝隙、贴片、反射器和透镜)。第三阶段专门讲授方向图综合，要用到第五章后半部和第六章全部，再加上某些最新的参考文献。

如果有人希望在一学期课程中均衡地讲授各种天线论题，则采用如下的内容编排是比较好的：1.1~1.6、1.10~1.18、2.1~

2.6、3.1~3.6、4.1~4.4、5.1~5.3、7.8、7.13~7.15、8.1~8.6、10.1~10.5和10.10~10.11。这样的安排可以向学生提供关于基本原理、线天线、口径天线、天线阵理论基础、有互耦时阵列的馈电问题以及把几何光学用于反射器和透镜天线的设计等方面的知识。

许多朋友极其认真地阅读了各部分书稿并提出了宝贵意见。作者谨向亚历克索波洛斯(N. Alexopoulos)、巴特勒(C. Butler)、达德利(D. G. Dudley)、弗朗西斯恰提(G. Franceschetti)、罗远祉(Y. T. Lo)、戴振铎(C. T. Tai)和尤斯仑希(P. G. Uslenghi)教授以及工业界同事亚乔卡(J. Ajioka)、加林多-艾斯累尔(V. Galindo-Israel)、库默(W. H. Kummer)和洛甫(A. W. Love)致谢。在曾发现本书的错误并帮助我修改的许多大学生中,要特别感谢基姆(D. Kim)和夏夫纳(J. Schaffner)所作出的努力。

我要向我多年的同事和朋友,在休斯的卡诺加公园的雷达实验室主任阿尔文·克拉文(Alvin Clavin)表示特别热烈的感谢。在我已离开这一领域十年之后,他仍满怀信心地在休斯公司为我提供咨询,因而重新引起我对这一问题的兴趣。这种帮助遍及整个休斯公司,整个公司都慷慨地支持已编入本书的许多天线研究工作。我和休斯公司工程技术人员的合作内容是丰富而有价值的,其中必须特别感谢路易斯·库尔兹(Louis Kurtz)和乔治·斯特恩(George Stern)。还要感谢拉尔夫·琼森(Ralph Johnson)和安妮塔·煞托(Annette Sato)在休斯公司协助我用计算机计算。

R. S. 埃利奥特
于洛杉矶

目 录

译者序	III
原序	V
I 单个天线元的源-场关系	1
第一章 远区场的积分、互易性、方向系数	1
1.1 引言	1
1.2 自由空间中的静电场和静磁场	2
1.3 介质、磁性材料和导电材料	5
1.4 时变场	9
1.5 滞后位函数	10
1.6 玻印亭(Poynting)定理	13
1.7 斯特莱登-朱(Stratton-Chu)的解	18
1.8 无穷远处的条件	22
1.9 无源区内的场值	27
1.10 滞后位函数: 回顾	29
1.11 I类天线的远区场	31
1.12 谢昆诺夫(Schelkunoff)等效原理	36
1.13 II类天线的远区场	41
1.14 互易定理	45
1.15 天线发射与接收方向图的等效性	48
1.16 方向系数和增益	54
1.17 有效接收面积	56
1.18 电场的极化	61
参考文献	65
习题	65
第二章 偶极子、圆环和螺旋的辐射方向图	67
2.1 引言	67
2.2 中心馈电的偶极子	67
2.3 地平面的镜像	74
2.4 地平面上的单极子	77
2.5 地平面前的偶极子	78
2.6 小电流圆环	79
2.7 圆环上的行波电流	82

2.8 端射螺旋	84
参考文献	89
习题	89
第三章 喇叭、缝隙与贴片天线的辐射方向图	91
3.1 引言	91
3.2 末端开口的波导	91
3.3 喇叭的辐射	95
3.4 地平面上的中心馈电缝隙	99
3.5 波导馈电缝隙	102
3.6 波导馈电缝隙辐射器的理论	105
3.7 贴片天线	115
参考文献	126
习题	126
I 阵列的分析和综合	128
第四章 直线阵列的分析	128
4.1 引言	128
4.2 辐射元位置任意的阵列方向图公式	129
4.3 直线阵列——预备知识	133
4.4 谢昆诺夫单位圆法	145
参考文献	156
习题	157
第五章 直线阵列的综合	159
5.1 引言	159
5.2 和方向图与差方向图	160
5.3 和方向图的道尔夫-切比雪夫(Dolph-Chebyshev)综合法	161
5.4 直线阵列的波瓣宽度和最大方向系数的关系	167
5.5 直线阵列和方向图的最大方向系数	173
5.6 直线阵列的波瓣宽度和最大方向系数的关系	178
5.7 和方向图的泰勒(Taylor)综合法	178
5.8 修正的泰勒方向图	184
5.9 具有任意边瓣结构的和方向图	188
5.10 连续线源分布的离散化	197
5.11 差方向图的贝利思(Bayliss)综合	206
5.12 具有任意边瓣结构的差方向图	211
5.13 用于差方向图的离散化方法	214
5.14 产生无零点方向图的直线阵列的设计	216
参考文献	220
习题	220
第六章 平面阵列的分析与综合	223

6.1	引言	223
6.2	矩形栅格阵列, 矩形边界和可分离型分布	224
6.3	圆形泰勒方向图	242
6.4	修正圆形泰勒方向图: 各边瓣为任意高度的环形边瓣	248
6.5	修正圆形泰勒方向图: 起伏式环状边瓣	251
6.6	广义泰勒分布的采样: 矩形栅格阵列	257
6.7	广义泰勒分布的采样: 圆形栅格阵列	263
6.8	圆形栅格阵列的改进型离散化方法	266
6.9	有矩形边界的矩形栅格阵列: 曾-郑不可分离型分布	272
6.10	矩形栅格阵列的离散化方法	279
6.11	圆形贝利斯方向图	285
6.12	修正的圆形贝利斯方向图	293
6.13	用于平面阵列以产生差方向图的离散化方法	294
6.14	平面口径的可分离型与不可分离型激励的性能比较	299
6.15	远区场的傅立叶积分表示式	304
	参考文献	312
	习题	312
Ⅷ	自阻抗与互阻抗馈电结构	316
	第七章 天线元的自阻抗与互阻抗	317
7.1	引言	317
7.2	天线上的电流分布: 通式	318
7.3	任意截面积的柱形振子	321
7.4	圆形截面柱形振子, 海伦方程	324
7.5	矩量法	326
7.6	海伦积分方程的解: 脉冲函数	328
7.7	海伦积分方程的解: 正弦基函数	335
7.8	中心馈电圆柱形振子的自阻抗: 感应电动势(EMF)法	338
7.9	中心馈电圆柱形振子的自阻抗: 斯托勒(Storer)的变分解	347
7.10	中心馈电圆柱形振子的自阻抗: 海伦积分方程的零阶与一阶解	351
7.11	中心馈电圆柱形振子的自阻抗: 金-米德尔顿(King-Middleton) 二阶解	353
7.12	中心馈电带状振子的自阻抗	366
7.13	细长振子间互阻抗公式的推导	371
7.14	振子的准确场: 正弦电流分布	375
7.15	细长振子间互阻抗的计算	389
7.16	地平面上中心馈电缝隙的自导纳: 布克(Becker)关系式	383
7.17	地平面上中心馈电缝隙阵列: 自导纳与互导纳	389
7.18	微带贴片天线的自阻抗	392
	参考文献	396

习题	397
第八章 天线元与天线阵馈电结构的设计	399
8.1 引言	399
8.2 后接地平面的同轴线馈电单极子的设计	399
8.3 置于地平面上的巴伦馈电振子的设计	403
8.4 双线馈电缝隙: 开放式和背腔式	407
8.5 加接地平面的同轴线馈电螺旋	410
8.6 端射对称振子阵的设计	411
8.7 八木-宇田型对称振子阵: 二元阵	417
8.8 八木-宇田振子阵: 三元或多元	422
8.9 与频率无关的天线: 对数周期阵列	425
8.10 背置地平面的直线振子阵列	436
8.11 背置地平面的平面振子阵列	440
8.12 扫描阵列的设计	443
8.13 波导馈电缝隙阵列的设计: 有效缝隙导纳(阻抗)的概念	448
8.14 矩形波导宽壁上的纵向并联缝隙阵列: 基本设计公式	454
8.15 波导馈电缝隙直线阵列的设计	460
8.16 波导馈电缝隙平面阵列的设计	468
8.17 波导馈电缝隙阵列的和与差方向图: 考虑互耦	473
参考文献	478
习题	479
IV 连续口径天线	481
第九章 行波天线	481
9.1 引言	481
9.2 长线天线	482
9.3 菱形与V形天线	484
9.4 敷介质的平面导体	489
9.5 波纹平面导体	494
9.6 表面波的激励	496
9.7 表面波天线	500
9.8 快波天线	508
9.9 槽形波导天线	519
9.10 准谐振式离散分布行波缝隙阵列[主瓣在 $\theta_0 = \arccos(\beta/k)$]	522
9.11 准谐振式离散分布行波缝隙阵列[主瓣接近边射方向]	531
9.12 频率扫描阵列	532
参考文献	537
习题	537
第十章 反射面与透镜	539

XII

10.1 引言	539
10.2 几何光学: 光程方程	540
10.3 简单反射面	547
10.4 口径遮挡	553
10.5 赋形柱形反射面的设计	556
10.6 双弯曲赋形反射面的设计	562
10.7 反射面天线的辐射方向图: 口径场法	566
10.8 反射面天线的辐射方向图: 电流分布法	577
10.9 赋形双反射面系统	580
10.10 单面介质透镜	584
10.11 分区透镜	589
10.12 透镜天线的表面失配, 频率响应和介质损耗	591
10.13 介质透镜天线的远区场	594
10.14 赋形柱面透镜的设计	596
10.15 人工介质: 圆片与条带	598
10.16 人工介质: 金属片(约束型)透镜	602
10.17 龙伯(Luneburg)透镜	605
参考文献	615
习题	616

附录

A. 电场 E 矢量格林公式的推导	619
B. A 和 ϕ 的波动方程	622
C. 契比雪夫多项式的推导	623
D. $\cos^m \nu$ 的一般展开式	626
E. 带状振子磁矢位函数的近似解	627
F. 平面导电屏的绕射: 巴比涅原理	631
G. 柱坐标中的远区场	639
H. $\csc^2 \theta$ 方向图的应用	642

I 单个天线元的源-场关系

本书的第 I 部分由三章组成。首先是建立源的集合体(天线)和这些源所产生的辐射场之间的一般关系(远场方向图);然后用这个场和源的公式导出最常遇到的天线单元(偶极天线、环天线、螺旋天线、喇叭天线、缝隙天线和贴片天线)的方向图特性。我们将会发现,这些辐射器使用在仅要一个单元的场合是比较理想的,把它们用于阵列中,还有一些其他优点。关于这个问题,将在本书的第 II 部分进行讨论。

第一章 远区场的积分、互易性、方向系数

1.1 引言

这一章主要是根据产生辐射场的所有源来建立远离源的各点上电磁场矢量 E 和 H 的公式。源的集合体叫天线,而要导出的那些公式则构成了通常称为天线方向图分析和综合的基础。

当进行深入地分析时,将会自然地把天线分成两种类型。有些辐射器,例如偶极子和螺旋天线,它们的电流分布可以相当精确地假设出来。对于这些天线,有一组公式是很有用的。但是,还有另外一些辐射器,例如缝隙天线和喇叭天线,对它们的实际电流分布要进行估算则相当困难。但它们的近场却可以十分精确地被加以描述。在这种情况下,为了估算电磁场可以用与此近场完全对应的等效源来替代实际源,这一步骤导出了对这类天线十分有用的另外一组公式。

本章首先简单地复习有关电磁场理论,包括引入延迟位函数,继之严格推导斯屈拉顿-朱(Stratton-Chu)积分式〔根据格林

(Green)定理)。此积分根据体积 V 内部的源和包围 V 的曲面 S 上的场值求出 V 内任意一点的场。该公式具有的优点是，既可用于上述两类天线中的任何一类，又可用于两类天线的混合情况。由于场点远离天线，此公式化简后可得出简综的积分公式。再由这些积分公式，可以导出不同类型的天线的方向图特性。

互易定理的一般推导过程给出之后，其结果可以用来证明发射天线和接收天线的方向图是完全相同的。本章还介绍了辐射方向图方向性的概念，最后还将推导天线的有效接收面与其发射时的方向性之间的关系。

A. 有关电磁场理论的复习●

通常我们假设本书的读者对于电磁场的基本理论已具有中等水平，并且具有传输线分析（包括使用史密斯（Smith）圆图）和波导模概念的基本知识。下面几节将简略复习有关场的理论，其主要目的是为了介绍所采用的符号和强调某些有用的相似性^④。

本书全部使用MKS有理化单位，在复习中所引入的各种源和场量的量纲都列在本书相应章节。

1.2 自由空间中的静电场和静磁场

设有一与时间无关的电荷分布

$$\rho(x, y, z) \quad (1.1a)$$

(单位为 C/m^3) 位于自由空间中，它所产生的静电场为 $E(x, y, z)$ 。同样，与时间无关的电流分布

④ 想省略这些复习的读者可以从 1.7 节开始学习。

⑤ B 和 E (或 H 和 D)的成对出现， μ_0^{-1} 的应用，约化源的引入以及这一复习中最初一些公式的并列编号等，都是为了着重强调静电场和静磁场之间的相似性。这么做是因为我们相信这些相似性的感性知识有助于对这一问题的深入理解。参看R. S. Elliott, "Some Useful Analogies in the Teaching of Electromagnetic Theory," IEEE Trans, on Education, E-22 (1979), 7-10, Reprinted with Permission.

$$\mathbf{J}(x, y, z) \quad (1.1b)$$

(单位为A/m²) 将产生一个静磁场 $\mathbf{B}(x, y, z)$ 。为了强调静电学与静磁学之间的相似性, 把问题归属于约化源分布有时是有利的, 所谓“约化”源分布是

$$\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0} \quad \frac{\mathbf{J}(x, y, z)}{\mu_0^{-1}} \quad (1.2)$$

其中, ϵ_0 是自由空间的介电常数, μ_0^{-1} 是自由空间导磁率的倒数。

库仑定律是静电学的基本实验定理, 它可以用以下公式来描述

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1.3a)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \int_V \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta)\mathbf{R}dV}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad (1.4a)$$

式中 \mathbf{R} 是从源点 (ξ, η, ζ) 指向场点 (x, y, z) 的距离, 而 \mathbf{F} 则是处在 (x, y, z) 的电荷 q 由于它与源系统 (ξ, η, ζ) 之间的相互作用所受的力。

同样, 比奥-萨瓦 (Biot-Savart) 定律可作为恒定磁场的基本实验定理而引入, 并且可以用下面的公式来表示

$$\mathbf{F} = q\mathbf{V} \times \mathbf{B} \quad (1.3b)$$

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \int_V \frac{\mathbf{J}(\xi, \eta, \zeta) \times \mathbf{R}dV}{4\pi\mu_0^{-1}R^3} \quad (1.4b)$$

完成对(1.4a)的矢量运算后可以证明

$$\nabla \times \mathbf{E} \equiv 0 \quad (1.5a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.5b)$$

用同样的方法得出式(1.4b)的旋度和散度

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{\mu_0^{-1}} \quad (1.5c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} \equiv 0 \quad (1.5d)$$

公式(1.5)就是静态场的麦克斯韦方程。

⊕ E 原文误为 B ——译者。

对式 (1.5 b) 积分并应用散度定理就得出了 高斯 (Gauss) 定律, 即

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV = \text{闭合面所包围的总约化电荷} \quad (1.6 a)$$

同样, 对式 (1.5 c) 积分并应用斯托克斯 (Stokes) 定理即得出安培 (Ampere) 环路定律

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \frac{\mathbf{J}}{\mu_0} \cdot d\mathbf{S} = \text{闭合面所包围的总约化电流} \quad (1.6 b)$$

以同样的方法, 对式 (1.5 a) 和 (1.5 d) 积分, 接着应用斯托克斯定理或散度定理就得到下面的关系

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \equiv 0 \quad (1.7 a)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \equiv 0 \quad (1.7 b)$$

从式 (1.7 a) 可以断定 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 是一个保守场, 而任意两点之间的积分 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 则与路径无关。由式 (1.7 a) 可以证明 \mathbf{B} 的磁通线处处连续。

式 (1.4 a) 可以变换成下面的形式

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (1.8 a)$$

其中

$$\phi(x, y, z) = \int_V \frac{\rho(\xi, \eta, \xi) dV}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (1.9 a)$$

它是静电场的位函数。用同样的方法可把公式 (1.4 b) 改写成下述形式

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.8 b)$$

其中

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \int_V \frac{\mathbf{J}(\xi, \eta, \xi) dV}{4\pi\mu_0^{-1} R} \quad (1.9 b)$$