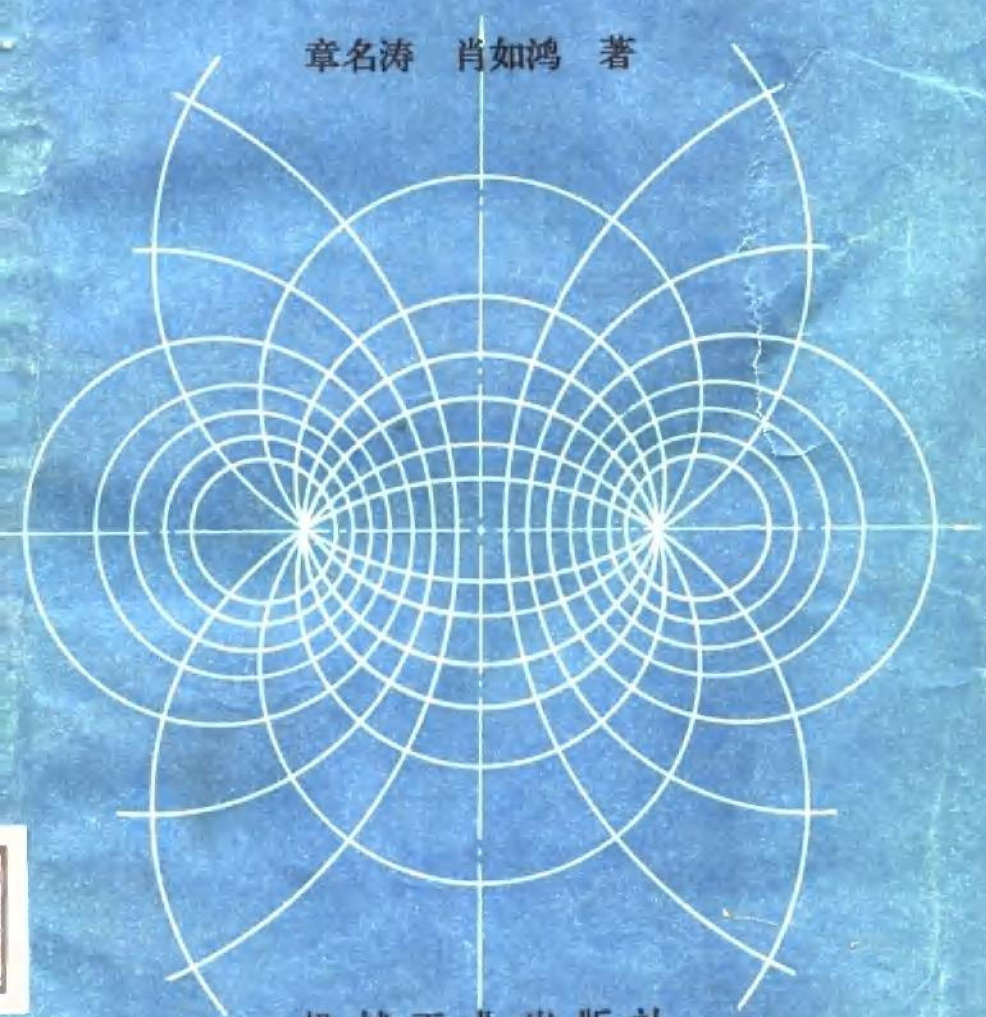


电机的电磁场

章名涛 肖如鸿 著

机械工业出版社



本书是作者多年来从事教学与科研工作的经验总结。它结合电机电磁场的各种实例，系统地阐述了电磁场问题的各种解法及其在电机工程中的应用。本书共六章，分别是：电磁场的理论基础；恒定磁场的解析法；交变磁场的解析法；电磁场的模拟；图解法及松弛法；有限元法。

本书编写时贯穿了由浅入深、循序渐进的原则，着重从物理概念进行阐述，并结合各种实例导出各种解法的一般规律，本书是一本难得的关于电机电磁场的专著。

本书可供从事电机电器研究、设计的广大技术人员使用，也可供高等院校师生、研究生参考。

电机的电磁场

章名涛 肖如鸿 著

*

责任编辑：陈国华 贾玉兰

封面设计：郭景云

责任印制：庞云武

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $18^{1/4}$ · 字数 479 千字

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,000 · 定价：7.80 元

*

ISBN 7-111-00591-0/TM · 90

前 言

1873年麦克斯韦 (J.C.Maxwell) 在他的经典著作《论电与磁》(Treatise on Electricity and Magnetism) 中, 把深奥的物理知识与严密的数学理论结合起来, 创立了系统的电磁理论, 作出了划时代的贡献。一百多年来, 电磁场的理论研究和应用均得到了广泛发展, 它与人类的文明和科学技术的进步有着密切的关系。电磁场问题的解法是多种多样的, 有解析法、模拟法、图解法、数值解法等。近二十多年来, 由于计算技术的发展和电子计算机的应用, 使电磁场问题的数值解法在深度和广度上均提高到一个新的水平。自二十世纪六十年代把有限元法应用到电磁场领域以来, 求解电磁场问题中长期存在的难题有了新的突破, 如复杂的边界条件、介质的非线性及复杂的多种介质等的电磁场问题的求解, 均可获得足够精度的数值解。

电机是一种电磁-机械能量转换的装置, 是电力系统、电力拖动系统及自动控制系统中的基本元件。由于电机的定子与转子间的机电能量转换是以磁场作为耦合场的, 所以要准确地计算电机的参数、损耗、感应电势、电磁力等, 就必须深入研究电机内部各个部分的电磁场分布。为了提高电机的运行性能和可靠性, 提高控制电机的精度, 研制各种性能的高效电机及特殊电机, 均需要对电机的电磁场作更深入的分析研究和计算。本书的编写, 希望能对促进电磁场理论在电机及其它电气工程中的应用有所帮助。

本书是著者多年教学与科研实践的总结。其特点是对电磁场问题的各种解法作了较系统的论述。编写时贯穿了由浅入深、循序渐进的原则, 强调对物理概念的阐述, 并结合对电机电磁场的各种实例的求解, 导出各种解法的一般规律。就方法而论, 这些解法不仅适用于电机问题, 同时对解决其它电气工程设备中的电

磁场问题也有参考意义。

本书既可作为高等院校电机系、电力系高年级学生和研究生
的教材或教学参考书，亦可作为有关工程技术人员的参考书。

全书共六章。第1~5章由章名涛教授编写（这几章是著者
在1965年编写的《电机的电磁场》讲义的基础上修改、补充、整
理而成的），主要论述电磁场的理论基础、解析法、模拟法和图
解法；第6章及附录由肖如鸿副教授编写，主要论述各种二维电
磁场的有限元法及边界条件的处理方法，同时讨论了三维场及非
线性电磁场的有限元法，并介绍了用电子计算机解联立方程组
的方法及解算技巧。全书由肖如鸿整理。

本书稿由汤蕴璆教授审阅，并提出了许多宝贵意见。在编辑
和出版过程中还得到很多同志的大力支持和帮助，在此一并致以
深切谢意。

由于电磁理论及其应用还在不断发展，加之我们的水平有
限，书中难免存在不少缺点、错误，敬请读者指正。

著 者

主要符号表

\mathbf{A}	矢量磁位	E_m	电场强度幅值
A_x, A_y, A_z	矢量磁位的 x, y, z 轴分量	E_t	直波的电场强度
B	磁通密度	E_o	回波的电场强度
\mathbf{B}	磁通密度矢量	E	第二类完全椭圆积分
B_x, B_y, B_z	磁通密度的 x, y, z 轴分量	$E(\phi, k)$	第二类不完全椭圆积分
B_r, B_α	磁通密度的 r, α 坐标分量	E_o	剖分单元总数
B_t, B_n	磁通密度的切向, 法向分量	e	电压, 剖分单元
B_{1m}	磁通密度的基波幅值	e_{1o}	转子绕组感应电势
B_{av}	平均磁通密度	e_d, e_q, e_o	感应电势的直, 交, 0 轴分量
b_{cu}	铜导线宽	F_1	定子磁势幅值
b_n	齿宽	F_2	转子磁势幅值
b_s	槽口宽	F_t	转子每极磁势
b_c	槽宽	F_{ad}, F_{aq}	直, 交轴电枢反应每极磁势
c	光速	$F(\phi, k)$	第一类不完全椭圆积分
C_o	分布电容	f	频率, 磁势
C_1	第一类边界	f	电磁力
C_2	第二类边界	G	面元求解域
C_{1o}	转子励磁的等效电流层电流密度幅值	g	气隙
C_{d1}, C_{q1}	直, 交轴电枢绕组等效电流层电流密度幅值	\mathbf{H}	磁场强度矢量
\mathbf{D}	电位移矢量	\mathbf{H}	磁场强度矢量的共轭值
\mathbf{D}	电位移矢量的共轭值	H_x, H_y, H_z	磁场强度的 x, y, z 轴分量
D	直径	H_r, H_α	磁场强度的 r, α 坐标分量
d	直轴下标: 厚度	H_t, H_n	磁场强度的切向, 法向分量
\mathbf{E}	电场强度矢量	H_{1m}	磁场强度的基波幅值
E_x, E_y, E_z	电场强度的 x, y, z 轴分量	H_{zo}	介质表面的磁场强度 x 轴分量
E_z	介质表面的电场强度 z 轴分量	h_s	槽高

I	电流有效值	k_s	卡氏系数 (亦称气隙系数)
I_s	转子电流	L	电感, 再附下标表示所属电路绕组
I_{fd}	励磁电流	L_0	剖分节点总数
I_{1d}, I_{1q}	直, 交轴阻尼绕组电流	l	弦长
$I_s(x)$	定子电流层的电流线密度分布	M	互感, 再附下标表示所属电路绕组
$I_r(x)$	转子电流层的电流线密度分布	M	磁化强度 (即单位体积的磁矩)
i_d, i_q, i_0	电枢电流的直, 交, 0 轴分量	m	一个磁偶极子的磁矩
J	电流密度矢量	$[m_0]$	复数单元系数矩阵的虚部
J_x, J_y, J_z	电流密度的 x, y, z 轴分量	m_{ij}	矩阵 $[m_0]$ 的元素
J	电流密度	N_r	转子导线数
J_l	电流线密度	N_1, N_2, N_3, N_m	基函数
$J_\nu(kr)$	ν 阶第一类贝塞尔函数	n	法向矢量
$[J]$	雅可比矩阵	P_0	输出功率
$[K]$	系数矩阵	P_m	电磁功率
$[K_0]$	单元系数矩阵	P	有功功率
$[k_0]$	复数单元系数矩阵的实部	$\{P\}$	右端向量
k_{ij}	系数矩阵的元素	p_i	右端向量的元素
K_r	有效电阻系数	p	极对数
K_x	有效电抗系数	Q	电荷量
K	第一类完全椭圆积分 (模为 k)	q	第二类边界条件的已知量, 交轴下标
K'	第一类完全椭圆积分 (模为 k')	R_0	直流电阻
k	第一类完全椭圆积分的模, 谐波次数	R	交流电阻; 半径
k'	第一类完全椭圆积分的辅模	R_1, R_2	定, 转子电阻或半径
k_1	定子绕组的基波绕组系数	r	场点与源点的距离; 半径
k_2	转子绕组的基波绕组系数	r_0	零序电阻
		r_0	单位长度矢量
		S'	斯列潘矢量
		s	转子转差率; 面积

T	单位面积上的张力	x_{fid}	励磁绕组与直轴阻尼绕组的互电抗
T_{τ}, T_n	张力的切向, 法向分量	x_{afd}	直轴电枢绕组与直轴阻尼绕组的互电抗
t	时间	$y_r(kr)$	r 阶第二类贝塞尔函数
U	感应电势	Z_0	波阻抗
U_1, U_2	定, 转子电压	Z	介质阻抗
U_2'	折合到定子边的转子电压	α	圆柱坐标的角度坐标, 许-克变换中的多边形外角
u	位函数, 第一类椭圆积分, 正交曲线坐标, w 复平面的实轴	β	介质系数
u_0	第一类边界条件的已知量	σ	气隙, 变分
V	电位, 体积, 体元求解域	δ_0	透入深度
V_s	静电场电位	ϵ_0	真空的电容率
W	能量	ϵ	介质的电容率; 转子偏心距
W_s	单元能量	ϵ_r	介质的相对电容率
w	能量密度; 匝数; 保角变换的 w 复平面	θ	椭圆积分的模角
X_0	电密均匀分布时的电抗	λ	比磁导; 波长
X	电密不均匀分布时的电抗	λ_c	电流密度不均匀分布时的比磁导
$x_d(p), x_q(p)$	直, 交轴运算阻抗	μ_0	真空的磁导率
x_d, x_q	直, 交轴同步电抗	μ	介质的磁导率
x_{ad}, x_{aq}	直, 交轴电枢反应电抗	μ_r	介质的相对磁导率
$x_d^{\sigma}, x_q^{\sigma}$	直, 交轴超瞬变电抗	μ_{st}	静态磁导率
x_s	定子漏抗	$\mu_{st}^{(1m)}$	用 H 的基波幅值 H_{1m} 查得的静态磁导率
x_l	励磁绕组漏抗	μ_s	介质表面的磁导率
x_m	励磁电抗	μ_1	轭部磁导率
x_0	零序电抗	μ_x, μ_y	x, y 轴方向的等效磁导率
x_{fd}	励磁绕组自电抗	μ	复磁导率
x_{afd}	直轴电枢绕组与励磁绕组的互电抗	Π	坡印亭矢量
		$\tilde{\Pi}$	复数形式的坡印亭矢量
		ρ	体电荷密度

σ	电导率, 面电荷密度	φ_{0m}	磁位分布的基波幅值
τ	极距; 质量体密度	ψ	磁链, 再附下标表示 所属电路绕组
Φ	磁通量	ψ_a, ψ_d, ψ_0	直, 交, 0 轴电枢绕 组的磁链
Φ_1	基波磁通	ψ_{t0}	励磁绕组的磁链
Φ_{1l}	基波漏磁通	ψ_{1d}, ψ_{1q}	直, 交轴阻尼绕组的 磁链
Φ_k	k 次谐波磁通	ω	角频率
Φ_d, Φ_q	直, 交轴磁通		
Φ_{tc}	转子表面的直轴磁通		
φ	标量磁位, 再附下标 表示相应处磁位		

目 录

前言

主要符号表

第一章 电机中电磁场的理论基础.....	1
§1-1 概述	1
§1-2 电磁场的基本方程及其应用范围	1
§1-3 标量位及其应用	10
§1-4 电机中的磁势	12
§1-5 矢量位及其应用	16
§1-6 毕奥-萨伐尔定律	24
§1-7 介质分界面上的分界条件和镜像法	26
§1-8 电磁场能量及坡印亭矢量	31
§1-9 电感计算	38
§1-10 感应电势	47
§1-11 电磁力	51
§1-12 两个有相对运动的坐标系统中的麦克斯韦方程组	68
第二章 电机中恒定磁场的解析法.....	75
§2-1 气隙中一根载流导线产生的磁场分布	75
§2-2 气隙中正弦磁势产生的磁场分布	82
§2-3 凸极电机气隙中的正弦磁密分布	88
§2-4 平板极中的磁场分布	91
§2-5 有齿电枢中的磁场分布	95
§2-6 圆柱坐标及球坐标系统	100
§2-7 载流导体和线圈在圆柱形气隙中产生的磁场分布	105
§2-8 定子极、转子极及气隙均为圆柱形时, 定子 k 次谐波 磁势所产生的磁场分布	118
§2-9 电流区的磁场分布	124
§2-10 半闭口圆形槽的漏感系数	127
§2-11 复变函数的应用。共轭函数	131

§2-12	许瓦兹-克利司多菲尔变换	138
§2-13	主极与电枢之间的边缘磁通	144
§2-14	有槽电枢的气隙磁场分布——卡氏系数	148
§2-15	椭圆积分与椭圆函数在保角变换中的应用	158
§2-16	等槽节距电枢的气隙磁场分布	170
§2-17	转子偏心时的气隙磁场	181
§2-18	端部磁场的概念	189
第三章 电机中交变电磁场的解析法		198
§3-1	交变电磁场的麦克斯韦方程及坡印亭矢量	198
§3-2	平面电磁波的传播	202
§3-3	给定电流下的平板电磁场	207
§3-4	给定磁通下的平板电磁场	209
§3-5	平行槽中载流导线的电磁场及涡流损耗	214
§3-6	圆形槽中载流导线的电磁场及涡流损耗	223
§3-7	实心转子中的二维行波电磁场 (直角坐标, $\mu = \text{const}$)	229
§3-8	实心转子中的二维行波电磁场 (圆柱坐标, $\mu = \text{const}$)	243
§3-9	实心转子中的三维行波电磁场 (直角坐标, $\mu = \text{const}$)	254
§3-10	实心转子中的三维行波电磁场 (圆柱坐标, $\mu = \text{const}$)	262
§3-11	实心转子中饱和的影响, 磁滞环与 n 阶抛物线法	269
§3-12	实心转子中饱和的影响, 矩形磁化曲线法	279
§3-13	实心磁极的隐极同步电机	286
§3-14	实心磁极的凸极同步电机简介	302
第四章 电磁场的模拟		306
§4-1	电磁场的数学模拟	306
§4-2	电解槽的模拟原理	311
§4-3	电解槽	317
§4-4	电磁场方程的差分表述	320
§4-5	电阻网络模拟解拉氏方程	323
§4-6	网络模拟的边界	326

§4-7	电阻网络模拟解泊松方程	329
§4-8	电阻电容网络模拟解热传导方程	333
§4-9	电阻电容网络模拟解非线性问题	338
§4-10	电阻电容网络模拟装置及其应用	341
§4-11	误差分析	345
§4-12	物理模拟原理	348
第五章	电磁场的图解法及松弛法	356
§5-1	作图法解拉氏方程	356
§5-2	考虑饱和影响的作图法	361
§5-3	作图法解泊松方程	362
§5-4	松弛法解拉氏方程	367
§5-5	松弛法的边界问题	371
§5-6	圆柱坐标的松弛法	372
§5-7	考虑饱和影响的松弛法	376
§5-8	松弛法解泊松方程	378
§5-9	有限差分法解热传导方程	383
第六章	电磁场的数值解法——有限元法	388
§6-1	概述	388
§6-2	泛函和变分的概念	391
§6-3	电磁场的泛函和条件变分问题	397
§6-4	齐次边界条件时, 平面恒定磁场的有限元法	409
§6-5	非齐次边界条件和周期性条件的处理	426
§6-6	重心坐标	442
§6-7	轴对称恒定磁场的有限元法	456
§6-8	似稳交变电磁场的有限元法	464
§6-9	用有限元法分析时各种电磁场问题的格式一览表	474
§6-10	采用六节点三角形单元时的有限元法	475
§6-11	采用四边形单元时的有限元法——等参元 有限元法	489
§6-12	加权余数法	507
§6-13	非线性电磁场问题的有限元法	515
§6-14	采用四面体单元时三维场的有限元法	531
§6-15	采用三棱柱体单元时三维场的有限元法	535

附录 联立代数方程组的解法及系数矩阵的

压缩存贮法	548
附录一 迭代法	548
附录二 高斯消去法	552
附录三 矩阵分解法	556
附录四 梯度法	559
附录五 系数矩阵的压缩存贮	566

第一章 电机中电磁场的理论基础

§1-1 概 述

在电机理论中存在着许多电磁场的问题，而在电机学里往往用电路和磁路的方法来处理。因为在电机学里，主要是介绍电机的基本原理和它的主要性能，因此尽量把问题简化。在那里，磁场的分布是用最简单的方式近似地描绘的，参数和损耗往往是根据电路、磁路的一般方法计算或者用实验方法直接求得的，电势和转矩是按理想的磁场分布求出的等。在电机设计课里，需要计算漏磁、有效电阻、电抗、铁心表面损耗、气隙磁密*分布等等，这时就需要电磁场的知识才能得到相应的计算公式。近代的电机对计算的准确度要求更高，不能再满足于过去的简化或近似方法。有些问题（实心转子电机就是其中的典型例子）则非从电磁场理论入手不可。因此，近来研究电机的工作者对电机中的电磁场问题愈来愈重视。

关于电磁场理论的书籍很多，涉及的范围也很广。本章的目的是想把有关电机的一些电磁场理论比较系统地综合起来，以便于应用。

§1-2 电磁场的基本方程及其应用范围

所谓电磁场的基本方程指的就是麦克斯韦方程组，它们一般是用微分形式写出：

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1-3)$$

* 磁密是磁通密度的简称。

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1-4)$$

在真空中（在空气中也近似正确），有

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{J} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (1-5a)$$

式中 ε_0 ——真空（或空气）的电容率；

μ_0 ——真空（或空气）的磁导率。

在介质材料中有

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (1-5b)$$

式中 $\mu = \mu_r \mu_0$ ——介质的磁导率；

μ_r ——介质的相对磁导率；

$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ ——介质的电容率；

ε_r ——介质的相对电容率。

在本章中，一般地说，每个黑体字母表示空间矢量，因此在三维空间中它有三个分量。例如在直角坐标中， $\mathbf{H} = e_x H_x + e_y H_y + e_z H_z$ ；式中 e_x 、 e_y 、 e_z 是沿坐标 x 、 y 、 z 的单位矢量。分量 H_x 、 H_y 、 H_z 以及整个矢量 \mathbf{H} 都是所在点 x 、 y 、 z 的函数。如果这些矢量和分量随时间变化（例如在交变电磁场中），那么所表示的是它们的瞬时值。如果对这些矢量取 x 、 y 、 z 的微分，例如 $\frac{\partial H_x}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial E_z}{\partial x}$ 等，是指对所在点（观察点）微分。

电荷密度 ρ 是标量，它是坐标的函数，亦可以是时间的函数。

式(1-1)~式(1-5)是电磁场的宏观表示。它们的应用是普遍的，既可用于恒定电磁场，亦可用于似稳电磁场和交变电磁场。

在恒定电磁场中，所有的场量不随时间而变化。在似稳电磁场里，因为交变的频率较低，源点和场点的距离较近，这里就不存在滞后位的问题（即某一瞬间的 \mathbf{H} 值取决于同一瞬间的 \mathbf{J} 值，不用考虑波的传播问题），这实际上等于不考虑位移电流密

度 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 的作用。又因电机里的电压不高，在研究电机中的电磁场时往往可以忽略 \mathbf{D} 和 ρ 。另外，电机中的交变电磁场通常符合上述的似稳条件，所以实际是按似稳电磁场处理的。根据上述说明，在电机中应用的麦克斯韦方程组是

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1-6)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-7)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1-8)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (1-9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-10)$$

下面我们联系电机来说明这些式子的意义。

一、首先考察式(1-6)。 \mathbf{J} 是某一个坐标系统（例如直角坐标）中某一点的电流密度， \mathbf{H} 是同一坐标系统中同一点的磁场强度，它们之间的关系就是式(1-6)，不论电流密度 \mathbf{J} 是在铜线里还是在铁心里（涡流）。

用行列式表示旋度，有

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix}$$

于是，把式(1-6)的分量全部写出，可得

$$\begin{aligned} & \mathbf{e}_x \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) + \mathbf{e}_y \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ & + \mathbf{e}_z \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \\ & = \mathbf{e}_x J_x + \mathbf{e}_y J_y + \mathbf{e}_z J_z \end{aligned} \quad (1-11)$$

注意，某一点的 \mathbf{J} 并不决定那一点的 \mathbf{H} ，而仅决定那一点的 \mathbf{H} 的旋度，且旋度是一种微分算子，见式(1-11)。设在三维空间中考虑任一点的 \mathbf{J} ，取 \mathbf{J} 的方向为 z 向，则该点的 $\mathbf{J} = J_z \mathbf{e}_z$

$\times J_z$, 而 $J_x = J_y = 0$, 这样可以清楚地认识那一点的情况, 而不失去一般性。由式(1-11), 对等式左右两边的第三项均乘以 $dx dy$, 得

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} dx dy - \frac{\partial H_x}{\partial y} dy dx = J_z dx dy$$

再沿图1-1中的 AB 、 BC 、 CD 、 DA 取回路积分

$$\begin{aligned} \oint_{ABCD} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= H_x dx + \left(H_y + \frac{\partial H_y}{\partial x} dx \right) dy \\ &\quad + \left(-H_x - \frac{\partial H_x}{\partial y} dy \right) dx + (-H_y) dy \\ &= \frac{\partial H_y}{\partial x} dx dy - \frac{\partial H_x}{\partial y} dy dx \end{aligned}$$

比较以上两式, 得

$$\oint_{ABCD} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = J_z dx dy \quad (1-12)$$

或

$$\begin{aligned} e_z J_z &= e_z \frac{\oint_{ABCD} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}}{dx dy} = e_z \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \\ &= e_z \text{rot}_z \mathbf{H} \end{aligned} \quad (1-13)$$

式(1-13)的写法是为了强调一下旋度的物理意义, 即 $\text{rot} \mathbf{H}$ 的 z

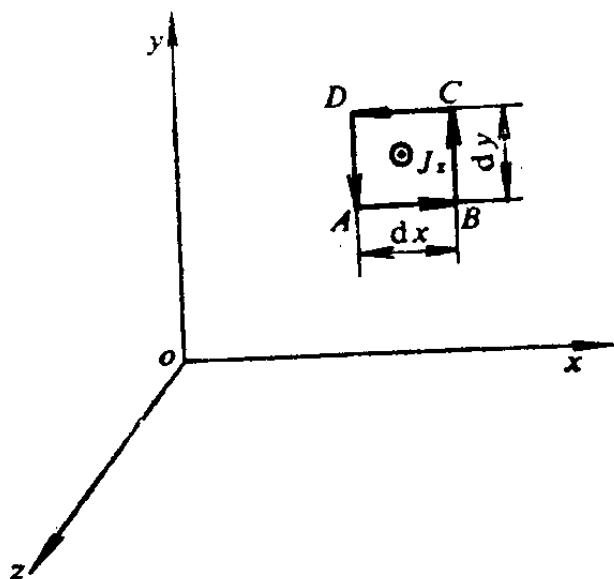


图1-1 旋度的意义

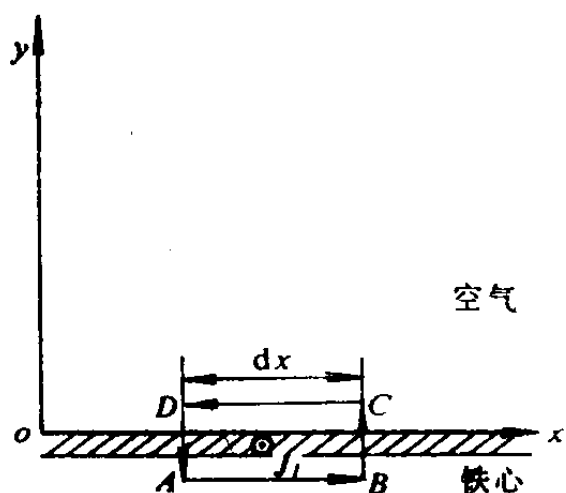


图1-2 电枢表面电流的影响

分量是 \mathbf{H} 沿 $ABCD$ 的线积分除以 $ABCD$ 的微分面积 $dx dy$ 。推广之，可得

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = n \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S}$$

式(1-12)应用举例：如图1-2表示 $z=0$ 处的剖面， $x-z$ 面为电枢表面， x 方向为电机切向， y 方向为电机径向， z 方向为电机轴向。今设电流层存在于电枢表面上，其线电流密度 J_1 [A/m] 为 z 轴方向。当取 $ABCD$ 的回路积分时，并认为铁心的磁导率 μ_{Fe} 为 ∞ ， $BC \ll CD$ ，可得

$$-H_x dx = J_1 dx$$

则

$$H_x = -J_1 \quad (1-14a)$$

若当 $y > 0$ 处是铁， $y < 0$ 处是空气时，可得

$$H_x = J_1 \quad (1-14b)$$

式(1-14a)、式(1-14b)中的 H_x 和 J_1 的量纲均为 A/m，在这种特殊情况下， J_1 直接决定了 H_x ，且式(1-14a)、式(1-14b)常常可用作考虑电枢反应时电枢表面的边界条件。但在式(1-12)、式(1-13)所表达的一般情况下， \mathbf{J} 只能决定 \mathbf{H} 的旋度。它的性质是特定的一种对距离的微分，即使 \mathbf{J} 是一个已知的函数，也不能直接用式(1-6)或式(1-11)求出 \mathbf{H} 。

式(1-6)是全电流定律的微分形式。下面再说明一下它的积分形式。

先推广式(1-12)，设以任一单元面积 $d\mathbf{S}$ 代替 $dx dy$ ，它的边是 AB' 、 $B'C'$ 、 $C'D'$ 、 $D'A$ ，并且 $ABCD$ 就是 $AB'C'D'$ 在 $x-y$ 平面上的投影，见图 1-3。因为选 \mathbf{J} 的方

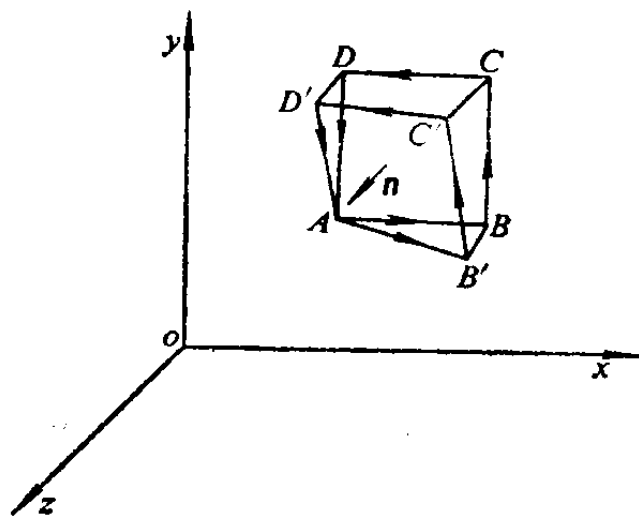


图1-3 式(1-15)的说明