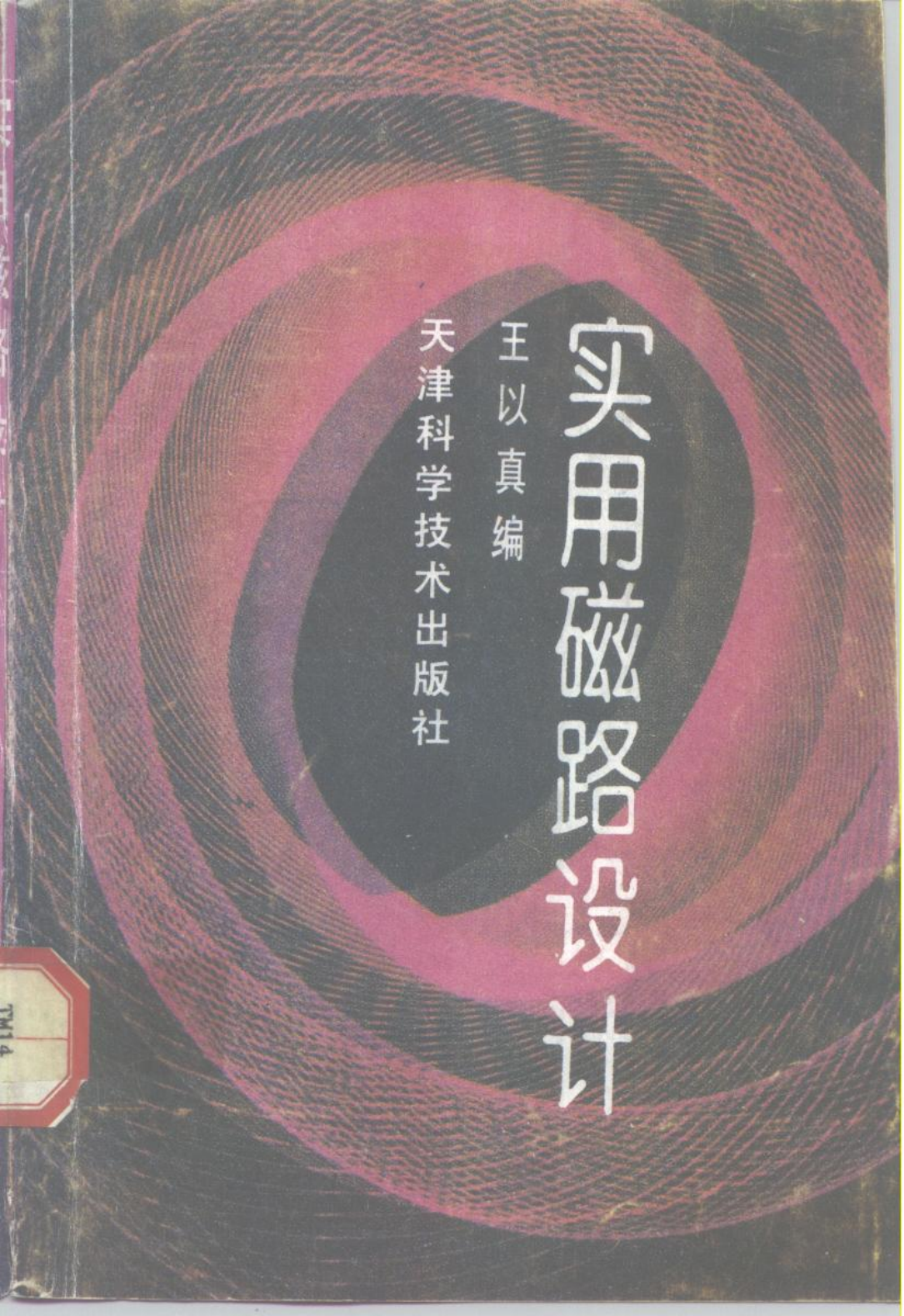




实用磁路设计

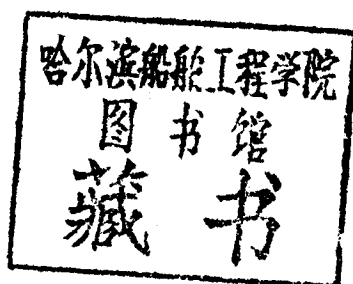
王以真编

天津科学技术出版社

366471

实用磁路设计

王以真 编



天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑：徐 彤

实用磁路设计

王以真 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本850×1168毫米 1/32 印张5.75 字数141 000

1992年11月第1版

1992年11月第1次印刷

印数：1—3 500

ISBN 7-5308-1173-8/TN·15 定价：3.85元

序 言

当这本《简明磁路设计》送到读者手中时，离初稿的油印本已经过去了六年。早在1986年东北工学院、辽宁机械工程学会准备举办“磁路设计讲座”时邀请我来主持这一讲座。我想，这是一件有意义的事，而且在天津电声器材厂讲授、编写“扬声器概论”亦有磁路设计章节，于是便贸然答应下来。

在着手编写讲义时，发现问题并不那么简单，比最初设想更为困难，更为复杂。

1. 磁路设计和电路设计不同，电路设计的参考书可以很方便找出三种五种，而专门讲磁路设计的资料、专著却很少，中文少外文亦少。这些资料又很分散。由此，编写有关磁路设计的书籍就逾显困难。

2. 磁的发现固然应用很早，磁学也是一门古老的学科。由于磁路与电路是有区别的，是分散弥漫于空间之中。因此精确的磁路设计有相当难度，随之带来设计方法的不够完善，不够完美。在一些场合下，要借助经验来弥补不足。而经验又需要每个设计者去积累。是书本难以描述的。

因此这本书只能举其荦荦大端，读者却免不了会感到隔靴搔痒。

本书主要内容来自国内外专家学者论著，引用参考文献，遵循先贤先哲范例，不论名家与否，一律列于书后。编著者无非使用综合之法，汇纳百川之水。对所收集到的资料，钩沉辨异、删繁就简、浓缩发挥、诠释解说。编著者着眼不是创新，而是站在磁路设计、使用者之立场，为读者提供一些有用的资料，在实际工作中节省一点时间。对磁学研究来说，换了一种视角而已。还

有一点也要说明，本书虽泛讲磁路设计，重点实为扬声器的磁路设计。

编著者处在生产工厂，诸事杂冗、四处奔波。所有文字不过忙里偷闲，集腋成裘而毕，并非一气呵成。以至结构松散，体例不一。斧凿之痕常见，精当之论少有。所以在1986年讲义印成之后，搁在一边，听任试用。居然几年入内，不断有人索取，表示欢迎。并建议何不正式出版。天津科学技术出版社不顾当前一些困难，慨然同意出版，对编著者也是一种鼓励。

事隔五年，斗转星移，世间多有变化。回视原稿，理应有所增删。框架仍维持原状，内容稍作扩充，以包罗近年进展；或斧削约简，以求词顺意达。平心而论，这本书学术价值虽不甚高，但前后所花工夫与历程，其中甘苦非亲身经历是不能体会的。

在本书编写过程中，高真、李淑萍、宋家兰、黄仕安、徐庆香诸同志给与许多鼓励和支持，在此表示诚挚的谢意。

王以真

1991.10

目 录

本书引用符号	(1)
第一章 磁性材料	(4)
1.1 概述	(4)
1.1.1 物质的磁性	(4)
1.1.2 磁的基本参量	(5)
1.1.3 磁化曲线	(10)
1.1.4 磁性材料	(12)
1.1.5 永磁材料退磁曲线	(13)
1.1.6 等磁能积曲线	(15)
1.1.7 磁性材料的用途	(18)
1.2 永磁材料	(18)
1.2.1 铝镍钴合金	(18)
1.2.2 铝、镍、钴永磁材料使用注意事项	(21)
1.2.3 铁氧体永磁材料	(22)
1.2.4 铁氧体永磁材料使用注意事项	(26)
1.2.5 稀土永磁材料	(29)
1.2.6 稀土钴永磁材料使用注意事项	(32)
1.2.7 可加工永磁合金	(35)
1.2.8 单畴微粉磁体	(35)
1.2.9 设计与材料工艺间的关系	(36)
1.2.10 常见的磁体状况	(37)
1.3 软磁材料	(41)
1.3.1 工业纯铁	(41)
1.3.2 铁镍合金	(42)
第二章 磁路设计基本原理	(43)
2.1 磁体的用途与分类	(43)

2.2	磁路设计的任务	(44)
2.3	磁路的若干问题	(45)
2.3.1	磁体	(45)
2.3.2	磁路	(46)
2.3.3	磁通的折射定律	(52)
2.3.4	磁阻	(53)
2.3.5	工作点	(56)
2.3.6	工作点的选择	(60)
2.4	如何选择永磁磁体	(63)
2.5	如何选择软磁材料	(65)
2.6	磁路的基本类型	(67)
2.7	聚磁问题	(72)
2.8	永磁体的磁极面积、长度和气隙间的关系	(77)
2.9	磁路与电路之比较	(78)
2.10	退磁	(80)
2.11	磁屏蔽	(83)
2.12	双磁体磁路	(85)
2.12.1	双磁体磁路的出现	(85)
2.12.2	双磁体磁路的结构和原理	(85)
2.13	交流磁路	(87)
2.14	磁单位	(88)
第三章	磁路设计方法	(91)
3.1	设计的依据和要求	(91)
3.2	等效电路法	(92)
3.3	有限元法	(93)
3.4	理想磁路的计算方法	(93)
3.5	磁导法	(96)
3.5.1	磁导法设计举例 (一)	(97)
3.5.2	低温工作点的变化	(102)
3.5.3	磁导法设计举例 (二)	(102)

3.5.4	考虑到低温变化的设计	(105)
3.6	图解分析法	(106)
3.7	数字计算法	(108)
3.8	有限元法举例	(111)
第四章	磁路设计举要	(115)
4.1	设计磁路要因时因地制宜	(115)
4.2	扬声器磁路设计	(116)
4.2.1	设计前的准备	(116)
4.2.2	磁路的制约	(127)
4.2.3	磁路和等效电路	(128)
4.2.4	线性驱动磁路	(128)
4.2.5	内磁式磁路设计方法	(130)
4.2.6	内磁式磁路实用设计法	(134)
4.2.7	外磁式磁路设计方法	(137)
4.2.8	程序化外磁式磁路设计	(139)
4.3	用图表法设计扬声器磁路	(141)
4.3.1	设计原则	(142)
4.3.2	设计图表的使用方法	(143)
4.4	稀土钴永磁体磁路设计	(144)
4.4.1	设计的特点	(144)
4.4.2	SmCe (CoCuFe) 磁路设计	(145)
4.4.3	附加磁体	(149)
4.5	电磁式换能器磁路	(150)
4.6	充磁机	(153)
4.6.1	电磁铁充磁机	(154)
4.6.2	脉冲冲磁机	(157)
4.7	磁流体及在扬声器上的应用	(158)
4.7.1	磁流体	(158)
4.7.2	磁流体与音圈的热传导	(158)
4.7.3	音圈的定心	(158)
4.7.4	音圈的机械阻尼	(158)

第五章 磁路系统测量	(159)
5.1 概述	(159)
5.2 磁通表和测磁线圈	(160)
5.2.1 测量方法	(160)
5.2.2 测磁线圈	(161)
5.2.3 误差分析	(162)
5.2.4 冲击电流计法	(164)
5.3 霍尔效应传感器	(164)
5.4 用测磁天平测量 B_g	(166)
附录 RC—7657A扬声器用铁氧体磁体标准尺寸	(166)
参考文献	(172)

本书引用符号

$M H_c$	内禀矫顽力
$B H_c$	B 矫顽力, 磁感应矫顽力
B_r	剩磁
M	磁化强度
H	磁场强度
F	磁体在磁场中所受的力
q_m	磁体所具有的磁荷
m	磁矩
L	从负磁荷到正磁荷 q_m 的长度矢量
V	体积
U	速度
B	磁感应强度
I	电流
L	导线长度
f	载流导体在磁场所受的力
B_i	内禀磁感应强度
K	磁化率
μ	磁导率
ϕ	磁通量
μ_r	相对磁导率
μ_0	真空磁导率
H_c	矫顽力
$(BH)_{\max}$	最大磁能积
V_m	磁体体积

V_p 粒子体积
 S' 盘厚
 P 导体电阻系数
 H_e 有效磁场强度
 μ_{ou} 可逆磁导率
 μ_m 最大磁导率
 μ_i 初始磁导率
 B_s 饱和磁感应强度
 H_s 饱和磁场强度
 H 内磁场强度
 F 磁势差
 S 场中某一面积
 B_d 工作点磁感应强度
 H_d 工作点磁场强度
 F_i 磁通势
 R_m 磁阻
 ρ_m 磁荷密度
 H_m ρ_m 产生的磁场
 H 外加磁化磁场在磁体所占空间内的磁场强度
 L_g 气隙长度
 F_g $F_g = H_g + L_g$
 F_F 磁路中软磁体所产生的总磁通损失
 F_{cor} 磁路中装配间隙产生的总磁通损失
 F_m 总磁动势
 K_r 磁通系数
 H_m 永磁体内的磁场强度
 L_m 永磁体内长度
 S_m 永磁体截面积
 S_g 气隙截面

ϕ_0 气隙通过磁通
 K_l 漏磁系数
 G 磁导
 N_b 磁体的感应退磁因子
 N 磁体的退磁因子
 G_u 比磁导
 r 凸度系数
 α 与 r 有关系数
 K 各向异性常数
 W_m 所需磁体重量

第一章 磁性材料

1.1 概 述

1.1.1 物质的磁性

磁性是最早被人类认识和利用的现象之一。所谓磁性是指“能够激发磁场，并在磁场中受到作用力的性质”。自然界有些物质有磁性。中国的四大发明之一指南针即是利用物质磁性和地磁的一种发明。指南针是用天然磁体研磨而成。韩非子“有度篇”：“先王立司南以端朝夕”是公元前246年的记载。磁石招铁如慈母之召子，这也是对磁性最早的认识和描述。见公元前三世纪的“吕氏春秋”所说“磁石召铁，或引之也”。武经总要（成书于仁宗庆历四年即公元1044年）梦溪笔谈（成书于1095年前）两书中皆有指南针制法的说明。17世纪清初刘献延（1648～1695年）在“广阳杂志”中记写道“磁石见铁，何物以隔之？……推铁可以隔耳。”这就是磁屏蔽现象。

现代科学技术的发展证明，任何物质，小至分子、原子、原子核和基本粒子，大至地球太阳等各种天体，都具有或弱或强的磁性。这是因为，原子内绕原子核运动的电子具有轨道磁矩，物质的抗磁性就与这种轨道运动有关。此外，原子核以及电子、质子、中子等基本粒子还存在自旋，具有内禀磁矩。电子的内禀磁矩是物质的顺磁性和铁磁性的起源。在通常情况下，多数物质所以不具有磁性，是由于热运动使原子和电子的磁矩取向混乱所致。

近代科学技术发端之一是电磁现象。就磁性材料而言，由单

纯利用天然磁性材料（磁铁矿 Fe_3O_4 ）到制造永磁性材料，这是一磁性材料研制上的飞跃。

从20世纪初研制出钨钢，以后陆续研制出钴钢、铝镍钴磁体、铁氧体、铁钴微粉磁体、铂钴磁体、锰铋磁体、锰铝碳磁体、铁铬钴磁体、稀土钴磁体（其中又从稀土钴磁体发展到钕铁硼磁体，即第二代稀土磁体）。

不同的磁性材料，由于成分、晶体结构、工艺因素等方面的影响而具有不同的特性，性能上的千姿百态，决定了使用上的千变万化，用途上的多种多样。

对于磁路设计来说，就是在充分了解磁性材料性质的基础上，选择一种充分利用磁性材料能满足使用要求的最佳方案。

电磁感应现象使磁电现象不可分割，磁场能够穿透非超导态的一切物体。磁场对于磁矩作用可以不通过物体直接接触，磁场一经建立几乎不再消耗能源。磁场能使电子、光的偏振面发生偏转、使带电粒子聚焦……。磁场还有许多难以尽数的、发现的和尚未发现的特性使磁性材料具有广泛用途。正好地球是一个大磁场，人们无时无刻不生活在磁场之中，而人活动的各个领域，上穷碧落，遨游天空的卫星、飞船，下追黄泉，水下地心的潜艇、飞钻。都可以找出磁性材料使用的有力佐证。

1.1.2 磁的基本参量

具有外部磁场的物体（天然的或人工制造的）称磁体。一个磁场体的两端具有极性相反而强度相同的两个磁极（即N极、S极）。

在磁体的四周和磁体内部存在磁场。位于磁场中的磁体受磁力的作用。磁场的特征是对带电粒子具有作用力。

主要由磁性材料组成的介质组合，称为磁路，它形成一个磁通量能够闭合的回路。我们会发现，磁路的磁场方程与直流电路方程相似性而把磁路类比于电路。这里提到的磁通是指通过与磁场方向垂直的某一截面 S 的磁力线总数。

而磁路问题也是磁场问题，不过局限在一定范围之内。磁路的基本定律是从磁场的理论推演而来。

1.磁场的性能用磁场强度矢量 H 来描述 磁场也可以看成是一种特殊的物质，每一点都有一定强度和方向。

$$H = \frac{F}{q_m} \quad (1-1)$$

式中 F ——磁体在磁场中受的力。

q_m ——磁体所具有的磁荷。这里的磁荷是人们对磁性的最初认识，磁性是由于磁体存在磁荷的缘故。现在可用磁偶极子解释。

磁场方向是处在该点N极所受力的方向。磁场强度单位在SI制中是A/m、安/米。

可以想象，当磁体无限小时，就成为一个磁偶极子。它所产生的外磁场与在同一位置上的一个无限小面积的电流回路（电流元）产生的外磁场等效。这是磁场与电场的主要区别之一。磁极不能孤立存在，而电荷却可以。

用磁矩 m 来表征磁偶极子的磁性强弱和方向。

$$m = q_m L \quad (1-2)$$

式中 q_m ——磁荷。

L ——方向从负磁荷 $-q_m$ 到正磁荷 $+q_m$ 的长度矢量。

磁场的分布可以用

磁力线(H 线)来描述。

磁力线是有方向的曲线族，曲线上每一点的切线方向既表示该点的磁场强度方向。如图1-1所示。

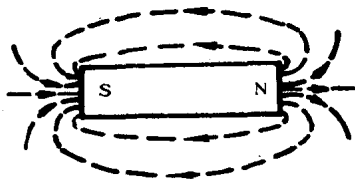


图1-1 条形磁体外部磁力线的分布

一切物质在磁场中不同程度被磁化。其磁化程度和方向用磁化强度来表示。

$$M = \frac{\sum m}{V} \quad (1-3)$$

式中 m —— 磁矩。

V —— 体积。

M —— 的方向，是从磁化部分的S极指向N极。

2. 工程上用磁感应强度 B 描述物质的磁化程度 磁感应强度是一个矢量，一个点函数。它反映了法拉第定律即运动电荷通过磁场要受到磁场力的作用。如有电荷 q ，在磁场中以速度 U 运动，则它受到磁场作用力。

$$f = q [U \times B] \quad (1-4)$$

式中 B —— 运动电荷所在处的磁感应强度。

若载流 I 的导体在磁场中受到的磁场作用力 f 。

$$f = L [B \times I] \quad (1-5)$$

式中 L —— 导线长度。

磁感应强度的单位在国际单位制 (SI) 中是 T (特斯拉)。

在磁场作用下，物质的磁感应强度 B 由两部分组成，既磁场强度 H 和磁化强度 M 。

$$B = H + 4\pi M = H + B_i$$

式中 B_i —— 内禀磁感应强度。

3. 和磁力线相同，用磁感应线 (B 线) 来描述物质在磁场作用下的磁化强度，用磁通量 ϕ 来表示 磁通量是磁感应强度的通量，简称磁通。

$$\phi = \int_s B_d S \quad (1-6)$$

式中 S —— 为场中某一面积。

磁通量是磁感应强度对某一面积的积分值，不是向量，但有正负。

在磁通均匀分布的平面。

$$\phi = BS \quad (1-7)$$

式中 ϕ —— 磁通量，Wb。

B ——磁感应强度, T。

S ——面积, m^2 。

磁通可以看成是单位面积磁力线的数目。

磁通单位在SI制中是Wb (韦伯)。

磁感应强度可以看成通过与该点磁力线垂直的小面积内单位面积的磁通量。所以磁感应强度又称为磁通密度, 而这个名词更为人们所熟知。

从工程使用角度, 以及目前通用的SI制, 都视 B 为一个基本量。取代以前传统的 H 为基本量。从运动学角度看, B 意味着磁感应, 从空间看, 意味着磁通密度。

4. 物质在磁场中被磁化的程度与该物质性质有关, 同时与磁场强弱有关 物质磁化程度用磁化率 K 和磁导率 μ 表示

$$M = KH \quad (1-8)$$

$$B = \mu H \quad (1-9)$$

$B = \mu H$ 称磁介质性能方程。

此式是由更一般的磁介质性能方程推导而来。

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 H + \mu_0 M \\ B &= \mu_0 (1 + K) H \end{aligned} \quad (1-10)$$

$$\begin{aligned} \mu_r &= 1 + K \\ B &= \mu_0 \mu_r H \end{aligned} \quad (1-11)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

式中 μ_r ——相对磁导率, 真空中 $\mu_r = 1$ 。 $\mu = \mu_0$ 。

μ ——绝对磁导率, $H/m = \mu$ 。

μ_0 ——真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7}$ μ_0 亦称磁性常数。

H 取决于“磁荷”和产生磁场的电流, 而与介质无关, B 则受介质影响。不同物质在磁场中的磁化程度不一样, 可根据 μ 、 K 数值不同将物质分成三大类:

(1) $K \gg 0$, $\mu \gg 1$, 铁磁性物质。

(2) $K > 0$, $\mu > 1$, 顺磁性物质。