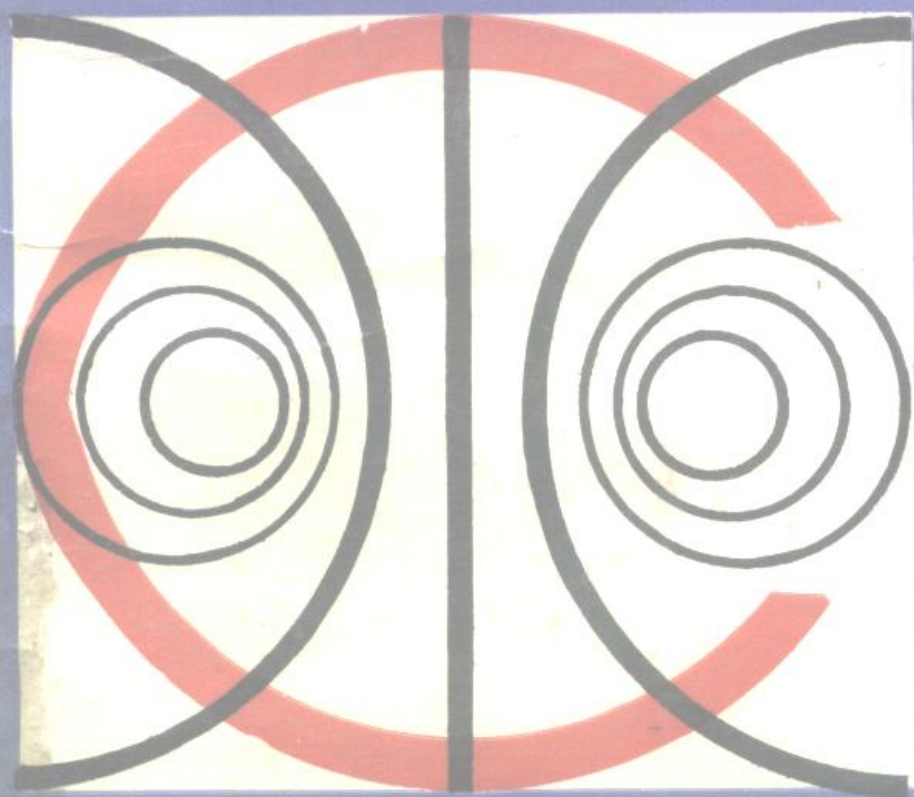


磁路设计原理

林其壬 赵佑民 编著



机械工业出版社

73.175

磁路设计原理

林其壬 赵佑民 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了与磁路设计有关的磁性、磁场的基本知识及在磁路设计中常用的磁性材料及其使用问题。详细地讨论了永磁路、空心电磁路和带铁心电磁路的设计和计算方法,并以实例加以说明。

本书可供从事磁性材料、仪器仪表、电机电器等研究、生产和设计方面的工程技术人员参考,亦可作为高等院校有关专业的参考书或选修课教材。

磁路设计原理

林其壬 赵佑民 编著

责任编辑:高金生

封面设计:刘 代

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)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 19 $\frac{3}{8}$ ·字数 428 千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数 0,001—27 00·定价:4.75 元

统一书号:15033·6839

前 言

磁系然是仪器仪表、电机、电器、无线电以及许多装置的重要组成部分。磁路参数和性能的好坏不仅决定了器件的体积、重量，而且直接影响器件的性能。为了得到较好的磁路参数，则需要通过磁路的设计和计算。因此，磁路设计和计算的知识不仅是从事器件研究、设计和生产的工程技术人员所必需的，而且对从事磁性材料研究和生产的人员来说也是相当重要的。为此，我们编写了这本《磁路设计原理》一书，以满足有关人员的需要。

全书共分六章：第一、二、三章论述有关磁场和磁性的基本概念、基本理论、磁路定律以及磁路设计中所涉及的磁性材料知识，它是磁路设计与计算的基础；第四、五、六章分别讨论永磁磁路、空心电磁路和带铁心电磁路，着重论述它们的设计与计算原理，并以实例加以说明。

本书是在1982年上海市计量测试学会举办的《磁路设计基础》学习班和1983年中国仪器仪表学会仪表材料学会举办的《磁路设计原理》学习班的讲义基础上改编而成的。在整个的编写过程中，曾得到许多同志，特别是曾训一、周世昌、梅文余、汪恩豹、金浩、王兴斌、张德武、仇仪俊等同志的鼓励、支持和帮助。书稿完成后，由华中工学院何华辉副教授和大连工学院齐凤春副教授分别给予全面、认真和细致的审定。在此，谨向他们致以衷心的感谢。

本书的第一、三、四、五章由林其壬编写，第二、六章由赵佑民编写。由于我们的水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

林其壬、赵佑民

1983年12月

目 录

绪论	1
第一章 磁场和磁性	6
第一节 恒定电流的磁场	6
一、磁场	6
二、恒定电流所产生的磁场	9
三、电流在磁场中所受的力	16
四、恒定电流磁场的一般性质	20
第二节 载流线圈和磁偶极子的等效性	25
一、载流线圈在远源区所产生的磁场	25
二、磁偶极子及其在远源区产生的磁场	30
三、磁偶极子和载流线圈比较	34
第三节 磁性介质存在时的磁场	36
一、介质的磁化和对磁场的影响	36
二、磁化强度	38
三、磁性介质中的宏观场	41
四、介质中的磁场强度	48
第四节 物质的磁性	55
一、原子的磁性	55
二、物质按磁性分类	58
三、强磁体内的磁畴	63
四、磁化曲线	66
五、磁滞回线	70
第五节 自身退磁效应	72
一、关于退磁场	72
二、退磁场的大小	78

三、自身退磁现象的普遍性	84
第二章 磁路结构和磁导	85
第一节 磁路和磁路定律	85
一、磁路欧姆定律	87
二、磁路的串联和并联	88
三、磁路中的基尔霍夫定律	91
四、交流磁路	92
第二节 磁系统结构	94
一、永磁磁路	95
二、电磁磁路	100
第三节 气隙磁导的计算	103
一、解析法确定磁导	105
二、查曲线法	117
三、经验公式法	119
四、分割磁场法	123
五、磁通作图法	130
第四节 柱形磁体及磁导	133
一、单独磁体的磁导	134
二、几种形状磁体的磁导系数	136
第五节 气隙磁通的分布	146
第三章 磁性材料	154
第一节 磁性材料分类	154
第二节 永磁材料的应用及其特性参数	156
一、永磁材料的应用	156
二、永磁材料的特性参数	158
三、退磁曲线的近似计算	166
四、回复特性曲线的近似计算	174
第三节 永磁材料系列	178
一、马氏体永磁	178
二、脱溶硬化型永磁	179

三、可加工永磁	184
四、稀土永磁	185
五、铁氧体永磁材料	189
六、单畴微粉永磁	191
七、复合永磁体	195
第四节 永磁体的充磁和退磁	198
一、永磁体的充磁	198
二、永磁体的退磁	213
第五节 永磁体的稳定性	223
一、组织变化	224
二、磁后效	226
三、温度的影响	228
四、外磁场的影响	238
五、磁阻的影响	241
六、与强磁性物质接触的影响	244
七、机械作用	247
第六节 软磁材料的应用及其特性参数	247
一、软磁材料的应用	247
二、软磁材料的特性参数	248
三、磁化曲线的近似表达式	256
第七节 软磁材料系列	262
一、纯铁	263
二、铁硅合金	267
三、铁镍系合金	274
四、铁铝系合金	282
五、铁钴系合金	288
六、磁温度补偿合金	288
七、非晶磁性材料	291
八、软磁铁氧体	294
第四章 永磁磁路的设计与计算	299

第一节 永磁磁路的分类及其设计基础	299
第二节 利用磁路定律设计磁路	307
一、无漏磁情况下的磁路设计与计算	307
二、有漏磁情况下的磁路设计与计算	311
三、实例	314
第三节 利用漏磁系数概念设计磁路	319
一、磁导法	323
二、经验公式法	333
三、查阅曲线法	347
第四节 磁路工作点及其坐标比的计算	361
一、磁路工作点坐标比 K	361
二、磁路工作点坐标比计算的几种方法	376
第五节 利用自退磁效应设计磁路	384
一、工作气隙磁感应强度的计算	385
二、静态永磁路设计的一般步骤	396
第六节 具有变化间隙磁路的设计	408
一、有用回复能	409
二、具有变化间隙磁路的设计	421
第七节 在电动条件下工作的磁路设计	435
一、永磁电机的磁路结构	435
二、磁路的一般工作状态	439
第五章 空心电磁路的设计与计算	467
第一节 等值退磁曲线	467
一、永磁磁路和电磁磁路的区别与相似	467
二、关于等值退磁曲线	468
三、空心线圈的等值退磁曲线及其应用	474
四、带铁心电磁磁路的等值退磁曲线	476
第二节 空心直流电磁路的设计与计算	479
一、空心单独电磁路内磁感应强度的计算	480
二、空心单独电磁路的设计过程及基本式	483

三、空心组合电磁路的设计及其基本式	492
第三节 空心交流电磁路的设计与计算	504
一、交流电路的特点	504
二、交流电磁路的特点	506
三、空心交流电磁路的设计与计算步骤	507
第四节 空心电磁路的其他设计方法	511
一、磁场线圈的设计	511
二、直流线圈的简捷计算法	514
第六章 带铁心电磁路的设计与计算	520
第一节 磁路类型及磁路关系式	520
一、带铁心电磁路的类型	520
二、磁路和磁场的关系式	525
第二节 利用磁势方程计算电磁路	530
一、已知气隙磁通求磁势	531
二、已知磁势求磁通	536
第三节 利用漏磁系数法设计电磁路	549
第四节 利用自退磁效应设计电磁路	555
一、磁路尺寸比例系数 A 的计算	555
二、求磁通利用系数 ϵ	557
三、电磁磁路中的吸力计算	560
四、电磁铁磁路的设计过程	562
第五节 变压器磁路设计	583
第六节 相似法计算磁路	594
附录	602
附录 I 常用磁学物理量的名称、符号、 单位及其换算关系	602
附录 II 电磁学重要基本定律在四种单位制中的表示形式	604
附录 III 磁学基本公式在不同单位制中的表示形式	605
参考文献	605

绪 论

一组闭合的磁力线所经过的全部路径，叫做磁路。磁路是仪器仪表、电机、电器，以及许多电子装置等的重要组成部分。磁路参数和性能的好坏，不仅决定了器件的体积、重量，而且严重地影响了器件的性能，同时也反映了磁性材料的性能是否被合理地利用。而要想得到好的磁路参数，就要通过磁路的设计和计算。因此，磁路设计和计算在国民经济各个部门中起着十分重要的作用。

磁路这个词原是对应于电路而来的。但这种对应与其说是属于物理本质的，倒不如说是数学上的比拟。虽然磁路和电路在形式上类似，但两者之间有着很大的差异。例如，电路中实际上有电流通过，而在磁路中，却是没有磁通流动。而且磁阻以及磁导并不象在电路中的电阻那样会产生能量损耗。此外，电流在电路中流动的范围，由于导体电阻与导体周围空间电阻之差极大，所以仅限于导体之内。而在磁路中，磁性材料的磁导率与其周围空间的磁导率之差同电路的电阻差相比就小得多了，因此会显露出漏磁的问题。再者，导体的电阻率本质上是常数，而磁性材料的磁导率则是磁场的函数，因而是不能简单地加以描述的。但是，把磁路和电路之间引以数学形式上的相似关系，就能给人们进行磁路的定量计算带来很大的方便。例如，在设计磁体时，把变量转化为电量，无论哪个工作点的磁通密度和能量变化，都能够很简单地通过仪表来读取，并且能够通过改变外部负载磁导

来调整磁体的尺寸，以便实现最佳动作。这对于静态条件和动态条件都是有效的，此外还能够求得外部供电所产生的退磁或磁化的能量变化。

一种新的磁性材料研制出来以后，如何设计出一种新的磁路来充分发挥该种材料的性能；一项新的器件提出来后，如何设计出一种新的磁路来满足新器件性能的要求，这不仅是设计工作者的问题，而且也是用户、材料研制、生产工作者所关心的问题。例如，某种磁电式仪表的磁路结构形式为外磁式的，磁钢的重量为175g，经过磁路改进，做成内磁式结构，则磁体的重量减轻到13g。如果进一步改进磁体的尺寸使之更加合理化，则磁体的重量仅只有9g，这样既减轻了重量，也节约了材料。由此可见，不同的材料必须选用不同的磁路结构形式，如果磁路结构选择得不当，则会妨碍材料性能的发挥，反过来，不同的磁路结构要求挑选合适的材料，如果材料选择得不当，也仍然达不到最佳设计的目的。

磁路设计和计算的主要任务在于建立最佳的（按外形尺寸、重量、稳定性、价格等等）保证在工作间隙中，具有指定的磁场强度或一定的吸引力的结构。把它归结起来，主要是三个方面的问题：

1. 已知磁路的结构形式，磁路各部分的尺寸及组成磁路材料的性质，求出工作间隙内所产生的磁通或吸引力。

2. 已知工作间隙的尺寸及要求达到的场强，所选用磁性材料的性能，确定磁路各部分的尺寸及符合要求的激磁线圈（对于电磁路）。

3. 已知磁路各部分的尺寸及所要求达到的工作气隙磁场，选择最合适的磁性材料。

随着具体应用场合的不同，磁路的形式和种类有许多，

但它们的基本组成和工作原理都是相似的。磁路可按其激磁方式分为永磁磁路和电磁路；按其结构可分为开路磁路和闭路磁路；按其衔铁的运动方式分为直动式和旋转式；按其动作速度分为快速、正常和延缓；按其工作性质分为保持式和吸引式等等。我们拟按激磁方式来加以分类。

永磁磁路是靠能够长时期地保持很强磁性的永磁材料来作其磁场能源，并在一定的工作间隙内提供所需要的恒定磁场。由于永磁磁路不需要激磁线圈和供电系统，所以它的结构比较简单，也不耗电。永磁磁路有气隙固定的静态磁路和氣隙变化的以及在电动条件下工作的动态磁路两种。根据应用场合的不同，每一种里面又可分为若干类型。

电磁磁路是靠通电激磁线圈来作其磁场能源的。它也能对外提供磁场，只是在建立磁场时，需要外界提供一个激磁电流。电磁磁路包括空心电磁路和带铁心电磁路两种，而每一种按其所通的激磁电流不同又有直流和交流电磁路之分。另外根据应用场合不同，每种又可分成若干类型。

磁路设计应该说是一门古老而又年轻的学科。自从人类发现、制造和应用磁性材料开始，就碰到了磁路的问题。磁路设计和计算，从原则上讲，根据麦克斯韦方程组，应该说就可以解决了。然而，要严格地解析、求解这一问题将遇到许多数学上的困难。首先，这是由于磁路本身的非线性特点，且磁路参数与铁磁体的形状、尺寸和性能有着复杂而不明确的关系，这些都给电磁场方程式在许多场合带来了复杂性，甚至于达到无法求解的地步。引进了磁路概念，在作了某些可允许的简化后，借助于“路”的概念和算法使得磁路设计和计算成为可能，甚至可以得到较为满意的解答。然而借助于“路”的概念及其算法解决问题的简便性和可能性

并不是任何场合都存在的，而只有在电流和铁磁材料的分布具有较简单的几何结构，并且可以认为在磁路各处的磁感应强度除以磁场强度是一个标量时，才可以用磁路算法去解决问题。根据磁路和电路的相似性，似乎磁路问题的求解可以直接由磁动势、磁通和磁阻之间的欧姆定律关系得到。但是，实际上解决磁路问题要比解决相应的电路问题困难得多。困难的主要根源在于客观上并不存在磁绝缘材料，因而在磁路问题中常常需要估计漏磁效应；其次一个原因是磁路中的磁阻通常是非线性的，因此在解决问题时，必须运用材料的磁特性曲线。正因为这样，磁路设计与计算至今尚是不成熟的。虽然如此，但人们通过实践，依靠经验公式、经验图表、电路网络模拟等等，也找到了许多磁路设计和计算的方法。例如，退磁因子法、比例法、电类比法、连续积分法、解析法、相似法、模型法等等。近年来也利用电子计算机来进行磁路的设计与计算。

利用电子计算机求解磁路问题是以麦克斯韦尔方程或最小能量作用原理为其理论基础进行计算的。用电子计算机进行磁路计算不仅速度快，也提高了计算结果的可靠性和准确性；然而，它需要的预备知识很多，手续也多，更主要的是需要条件。

比例法可用来计算带有磁附件的磁路；电类比法适用于求解带有一个以上分支的磁路；退磁因子法是以自身退磁效应为基础的计算方法，它可用于许多永磁磁路和电磁路。各种方法各有它的优点和缺点，所适用的范围也各有不同。可以这样地说，在磁路计算和设计中，至今还没有一种完全通用而理想的方法。

为了设计具有某种性能的磁路，通常是根据试验及误差

要求，首先对一些因素作些假定，接着进行估算，以获得结果对其假定进行修正，最终寻求出一个能够满足实际需要的结果。一般都要通过若干次复算才能得到比较满意的结果。考虑到磁性材料参数有5%的误差，加上所采用的计算方法中又有一系列的假定，磁路设计和计算的精度在10%以内就被认为是满意的了。

我们拟用磁势方程、退磁系数概念和漏磁系数概念等来讨论磁路设计和计算的基本原理。

随着科学技术的不断发展，磁路设计和计算的理论和方法将会不断地向前发展。

第一章 磁场和磁性

第一节 恒定电流的磁场

一、磁场

(一) 磁的基本知识

我国是世界上最早发现磁现象和应用磁性材料的国家。早在公元前四世纪，我们的祖先就发现了天然磁石——磁铁矿吸铁的现象；公元前三世纪，就利用磁石能够指南北的特性制成了司南（指南针）。

随着生产的不断发展，人们又陆续地发现了更多的磁现象。磁铁不仅能吸铁，还能够吸引镍、钴以及它们的合金。磁铁的这种特性叫做磁性。通常把具有磁性的物体叫做磁体。如果用已被磁化了的条形磁体来吸引铁屑，则磁体的两端吸引得最多，这说明磁铁两端的磁性最强，磁性最强的两端叫做磁极。如果使磁铁或磁针自由旋转时，磁铁或磁针的两个磁极总是一个朝南，一个朝北；指北的磁极叫做北极（N极），指南的磁极叫做南极（S极）。如果把磁铁分割成若干小段，则分开后的每一小段的两端仍然有N极和S极。两个磁针的磁极之间也有相互作用，异性磁极相互吸引，同性磁极相互排斥。两个磁极之间的相互作用力称为磁力。

在十九世纪初，人们又发现了电流磁效应，在载有电流的导体附近能使磁针取向。螺线管形状的线圈在通以电流时，它的性质和棒形磁铁非常相似，即对铁屑也有吸引力，如在水平面内可自由转动时，也是一端朝南，一端朝北；当

两个通电螺线管形线圈靠近时，也有同性相斥，异性相吸的相互作用；此外通有电流的导线处于磁铁附近时，就会受到磁铁对它的作用力等等。

实践证明，磁铁不但能够把与其接触的铁屑或其他铁磁物质吸引住，而且在磁铁周围的空间也会受到它的影响。也就是说，在磁铁或通电导体周围一定的空间范围内，所有铁磁物质都要受到磁铁或通电导体的磁力影响。为什么铁磁物质在磁铁或通电导体附近会受到作用力呢？人们认为在磁铁和电流周围存在着磁场。磁场是自然界中一种特殊形式的物质。磁铁和磁铁的相互作用、磁铁与电流的相互作用以及电流与电流的相互作用都是通过磁场来传递的。

(二) 磁场的性质和磁感应矢量

把磁针（或载流线圈）放在磁场中不同的地方，一般来说，磁针（或载流线圈）所受到的作用力矩大小不同；平衡时所处的方位也各不相同。这说明磁场各处的强弱不同，而且磁场是具有方向性的，因此需要用一个矢量来描述磁场。

在电学中，曾利用试验电荷在电场中所受到的力来决定电场中各处的电场强度 E 。与此相似，我们可以利用磁场对载流小线圈的作用来决定磁场的大小和方向。为此，采用一个很小的单面试验线圈，它的线度很小，在它的整个范围内，磁场可以认为是均匀的。

设线圈的面积为 S ，当其中的电流强度为 I 时，我们定义它的磁矩 $\vec{P}_m$ 为

$$\vec{P}_m = \frac{1}{c} IS \vec{n} \quad (1-1)$$

式中 c ——常数，等于真空中的光速（近似地等于 3×10^8 m/s）；