

高等学校轻工专业试用教材

# 电机与电力拖动

冯晚芝 主编

轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

# 电机与电力拖动

冯晓芝 主编

轻工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍各种交、直流电机的基本原理及交、直流电力拖动的基础知识。全书共分十一章，第一章介绍磁路及其计算方法，第二、三、四章为直流电机原理及其电力拖动，第五章为变压器，第六、七、八章为交流异步电机原理及其电力拖动，第九、十章为单相异步电机、同步电动机、控制电机，第十一章为电力拖动系统中电动机的选择。并附有各类电机的主要技术数据及性能指标。

本书为高等学校电气技术类与自动化类专业开设“电机与电力拖动”课程的教材，也可供有关技术人员参考。

高等学校轻工专业试用教材

电机与电力拖动

冯 翊 芝 主 编

\*

轻工业出版社出版

(北京安外黄寺大街甲3号)

河北省新城县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

\*

787×1092毫米1/16印张：31.75字数：789千字

1991年4月 第一版第一次印刷

印数：1—4,300 定价：8.45元

ISBN 7-5019-0946-6/TH·028

## 前 言

受轻工自动化类教材委员会委托，根据高校轻工自动化及电气技术专业对《电机与电力拖动》课程的要求，我们编写了这本专业基础课教材。本书可作为轻工及其他工科院校工业电气自动化专业及电气技术专业的教材，也可供有关专业的技术人员参考。

全书共分十一章。主要内容有：磁路、直流电机、电力拖动系统动力学、直流电机的电力拖动、变压器、交流电机基础、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、其他交流电动机、控制电机、电动机的选择等，并附有思考题与习题。本书编写时注意了轻工业的特点，增加了永磁材料的磁路计算，并适当增强了异步电动机电力拖动及部分控制电机的内容。编写时着重基本原理及工程计算方法的阐述和运用，力求内容精练、概念清楚。

本书由冯毓芝主编。由天津轻工业学院孙振寰编写第二、三、四章，张凤珊编写第一、五章；由北京轻工业学院冯毓芝编写第六、七、九、十章，陈维治编写第八章，郭兴朴编写第十一章。

本书由天津大学吉崇庆教授主审，苏茂贤参加了审稿，他们对书稿提出了许多宝贵的意见，我们特此表示衷心的感谢。

编 者

# 目 录

<b>第一章 磁 路</b> .....	1
<b>第一节 磁路和磁路基本定律</b> .....	1
一、磁场和安培环路定律.....	1
二、磁路和磁路欧姆定律.....	2
三、简单的串联磁路.....	4
四、简单的并联磁路.....	6
<b>第二节 铁磁材料及其磁化特性</b> .....	8
一、磁化曲线.....	9
二、磁性材料.....	11
三、永久磁铁磁路的设计计算.....	11
<b>第三节 交流磁路和铁心线圈</b> .....	13
一、铁心线圈内的感应电势和电感.....	14
二、铁心线圈交变磁化时吸收的能量.....	15
三、磁滞损耗和涡流损耗.....	16
四、交流铁心磁路的磁化功率和励磁电流.....	17
<b>思考题与习题</b> .....	19
<b>第二章 直流电机</b> .....	21
<b>第一节 直流电机的用途和基本工作原理</b> .....	21
一、直流电机的用途.....	21
二、直流电机的基本工作原理.....	21
<b>第二节 直流电机的结构和产品系列</b> .....	23
一、直流电机的主要结构部件.....	23
二、直流电机的铭牌数据和额定值.....	26
三、国产直流电机的主要系列.....	27
<b>第三节 直流电机的电枢绕组</b> .....	31
一、单叠绕组.....	32
二、单波绕组.....	35
<b>第四节 直流电机的磁势和磁场</b> .....	37
一、直流电机的励磁方式.....	37
二、直流电机空载时的磁场和磁化特性曲线.....	38
三、直流电机负载时的磁场及电枢反应.....	40
<b>第五节 电枢电势、电磁转矩和电磁功率</b> .....	43
一、电枢电势.....	43

二、电磁转矩	44
三、电磁功率	45
第六节 直流电机的换向	46
一、换向的电磁理论	47
二、改善换向的方法	49
三、补偿绕组	50
第七节 直流发电机	50
一、直流发电机稳态运行时的基本方程和功率关系	50
二、直流发电机的运行特性	52
第八节 直流电动机	56
一、直流电动机稳态运行时的基本方程和功率关系	57
二、他励直流电动机的运行特性	58
三、并励、串励和复励电动机的运行特性	60
思考题与习题	64
第三章 电力拖动系统动力学	67
第一节 单轴旋转系统的运动方程式	67
第二节 多轴电力拖动系统的折算	69
一、多轴旋转系统的折算	69
二、直线运动系统的折算	71
三、提升或下放位能性负载时的传动效率	75
第三节 生产机械的机械特性	76
一、恒转矩类机械特性	77
二、变转矩类机械特性	77
第四节 电力拖动系统稳定运行的条件	78
一、稳定运行的概念	79
二、电力拖动系统稳定运行的条件	80
附录 旋转物体的转动惯量和飞轮矩	81
思考题与习题	83
第四章 直流电机的电力拖动	86
第一节 他励直流电动机的机械特性	86
一、固有机械特性	87
二、人为机械特性	87
三、机械特性的工程计算方法	89
第二节 他励直流电动机的起动和反转	92
一、直接起动	92
二、电枢回路串电阻起动	93
三、降压起动	95
四、他励直流电动机的反转	95
第三节 他励直流电动机的调速	96

一、他励直流电动机的调速方法	96
二、调速指标	98
三、电动机调速时的容许输出	100
第四节 他励直流电动机的制动	102
一、能耗制动	102
二、反接制动	104
三、回馈制动	107
第五节 简单直流调速系统	110
一、直流发电机-直流电动机系统(F-D系统)	111
二、晶闸管变流装置-直流电动机系统(KZ-D系统)	113
第六节 电力拖动系统的过渡过程	115
一、机械过渡过程的一般规律	116
二、他励直流电动机的过渡过程分析	118
三、同时考虑电磁惯性与机械惯性的过渡过程	125
四、减小过渡过程中能量损耗的方法	127
五、缩短过渡过程时间的途径	129
思考题与习题	129
第五章 变压器	134
第一节 变压器的基本工作原理	134
一、变压器的用途	134
二、变压器的基本工作原理	134
第二节 变压器的结构和额定值	136
一、变压器的基本结构	136
二、变压器的额定值	140
三、国产电力变压器的主要产品系列	140
第三节 变压器的空载运行	141
一、电压与主磁通的关系	146
二、空载电流	147
三、原线圈的漏阻抗	148
四、空载运行时的向量图	149
五、变压器空载时等值电路	149
第四节 变压器的负载运行	150
一、磁势平衡及电流关系	150
二、电压方程式	151
三、变压器的折算法	152
四、等值电路	153
五、相量图	155
第五节 变压器参数的测定	158
一、空载试验	158

二、短路试验 .....	159
三、阻抗电压 .....	159
第六节 标么值 .....	161
第七节 变压器的运行特性 .....	162
一、电压变动率和外特性 .....	162
二、变压器的效率 .....	163
第八节 三相变压器的线圈连接组 .....	164
一、三相线圈的连接法 .....	164
二、线圈连接组的表示方法 .....	166
三、线圈连接组的判定 .....	167
第九节 三相变压器的磁路系统和空载电势波形 .....	171
一、三相变压器的磁路系统 .....	171
二、三相变压器空载运行时的电势波形 .....	172
第十节 变压器的并联运行 .....	174
一、并联运行条件 .....	174
二、并联变压器间的空载环流 .....	174
三、变压器并联运行时的负载分配 .....	175
第十一节 自耦变压器 .....	176
一、自耦变压器的基本电磁关系 .....	176
二、自耦变压器的特点及应用 .....	178
第十二节 电压互感器和电流互感器 .....	178
一、电压互感器 .....	178
二、电流互感器 .....	179
第十三节 整流变压器 .....	181
一、电流波形和剩余磁势 .....	181
二、整流变压器的容量 .....	183
三、多相整流电路的变压器 .....	183
第十四节 脉冲变压器 .....	184
一、脉冲变压器的基本工作原理 .....	184
二、脉冲变压器的参数对输出脉冲波形的影响 .....	186
第十五节 小型单相变压器的设计 .....	187
第十六节 变压器的过渡过程 .....	190
一、空载合闸时的过渡过程 .....	191
二、副边突然短路时的过渡过程 .....	192
思考题与习题 .....	193
第六章 交流电机基础 .....	196
第一节 交流电机的主要型式 .....	196
第二节 交流电机的电枢绕组和感应电势 .....	196
一、绕组的基波电势 .....	197



二、三相单层绕组的安排 .....	202
三、三相对称双层绕组 .....	207
四、交流绕组的谐波电势 .....	210
第三节 交流电机电枢绕组的磁势 .....	212
一、单相绕组的磁势 .....	212
二、三相绕组的磁势 .....	216
思考题与习题 .....	219
<b>第七章 三相异步电动机</b> .....	221
第一节 三相异步电动机的结构与用途 .....	221
一、异步电动机的用途 .....	221
二、三相异步电动机的简单工作原理 .....	221
三、转差率 .....	222
四、三相异步电机的结构 .....	222
五、异步电动机的铭牌和额定值 .....	225
第二节 转子不转时( $n=0$ )的异步电机 .....	228
一、定子绕组接三相对称电源, 转子绕组开路 .....	228
二、转子堵转时的异步电机 .....	232
三、移相器和感应调压器 .....	237
第三节 转子旋转时的异步电机 .....	238
一、定、转子的磁势关系 .....	238
二、转子电路频率的折算 .....	239
三、基本方程式、等值电路和向量图 .....	241
四、功率平衡和转矩平衡关系 .....	242
五、简化等值电路 .....	245
六、异步电动机的参数测定 .....	245
七、鼠笼转子的相数、极数和参数的折算 .....	247
第四节 三相异步电机的转矩和机械特性 .....	249
一、机械特性的参数表达式 $M=f(s)$ .....	249
二、机械特性和稳定运行区域 .....	251
三、电磁转矩的实用公式 .....	252
四、人为机械特性 .....	254
五、电磁转矩的物理表达式 .....	255
第五节 根据异步电动机的技术数据计算异步电动机的参数 .....	256
一、可查到的数据 .....	256
二、工程计算法计算异步机参数 .....	256
思考题与习题 .....	258
<b>第八章 异步电动机的电力拖动</b> .....	261
第一节 三相异步电动机的起动 .....	261
一、三相异步电动机起动问题及起动方法 .....	261

二、鼠笼型异步电动机的降压起动 .....	263
三、高起动转矩的鼠笼型异步电动机 .....	270
四、起动时间的计算 .....	273
五、绕线型异步电动机的起动 .....	275
第二节 三相异步电动机的调速 .....	284
一、概 述 .....	284
二、改变转差率调速 .....	285
三、变极调速 .....	308
四、变频调速 .....	307
第三节 三相异步电动机的各种运行状态 .....	317
一、概 述 .....	317
二、电动运行状态 .....	317
三、三相异步电动机的回馈制动 .....	318
四、反接制动 .....	320
五、能耗制动 .....	325
六、制动时间的计算 .....	333
第四节 三相异步电动机过渡过程的能量损耗 .....	335
一、三相异步电动机过渡过程能量损耗的一般表达式 .....	335
二、各种过渡状态的能量损耗 .....	336
三、降低过渡过程能量损耗的方法 .....	338
思考题与习题 .....	340
第九章 其他交流电动机 .....	344
第一节 单相异步电动机 .....	344
一、单相电机中绕组的磁势 .....	344
二、单相异步电动机的机械特性 .....	346
三、各种类型的单相异步电机 .....	347
第二节 同步电动机 .....	351
一、同步电动机的基本结构 .....	352
二、同步电动机的基本运行原理 .....	353
三、同步电动机的电势平衡方程式及向量图 .....	354
四、同步电动机的功角特性 .....	359
五、同步电动机的功率因数调节和V形曲线 .....	364
六、同步电动机的起动 .....	368
思考题与习题 .....	370
第十章 控制电机 .....	372
第一节 伺服电动机 .....	372
一、直流伺服电动机 .....	372
二、交流伺服电动机 .....	380
第二节 测速发电机 .....	394

一、直流测速发电机 .....	395
二、异步测速发电机 .....	398
三、产品的选择和使用 .....	404
<b>第三节 小功率同步电动机</b> .....	407
一、永磁式微型同步电动机 .....	408
二、反应式微型同步电动机 .....	409
三、磁滞式同步电动机 .....	410
四、产品的选择和使用 .....	413
五、部分产品的主要技术数据 .....	414
<b>第四节 步进电动机</b> .....	415
一、反应式步进电动机工作原理和基本特点 .....	415
二、反应式步进电动机的运行特性 .....	420
三、性能指标 .....	427
四、驱动电源 .....	428
五、其它类型的步进电动机 .....	430
六、产品的选择和使用 .....	433
<b>第五节 自整角机</b> .....	433
一、结构特点 .....	434
二、力矩式自整角机系统 .....	434
三、控制式自整角机 .....	439
四、差动自整角机 .....	442
五、自整角机的应用 .....	445
六、自整角机技术数据和使用 .....	447
<b>第六节 旋转变压器</b> .....	452
一、正弦、余弦旋转变压器 .....	452
二、线性旋转变压器 .....	456
三、旋转变压器的主要技术指标 .....	458
<b>思考题与习题</b> .....	461
<b>第十一章 电力拖动系统电动机的选择</b> .....	463
<b>第一节 概述</b> .....	463
<b>第二节 电动机种类、型式、额定转速、额定电压的选择</b> .....	463
一、电动机种类的选择 .....	463
二、电动机结构型式的选择 .....	464
三、电动机额定转速的选择 .....	464
四、电动机额定电压的选择 .....	464
<b>第三节 决定电动机容量的主要因素</b> .....	465
<b>第四节 电机的发热和冷却过程</b> .....	467
一、电机的温升过程 .....	467
二、电机的冷却过程 .....	468

第五节 电机的工作方式 .....	469
第六节 连续工作制电动机的容量选择 .....	473
一、连续常值负载电动机的容量选择 .....	474
二、连续周期性变化负载电动机的容量选择 .....	476
第七节 短时工作制电动机的容量选择 .....	484
第八节 断续周期工作制电动机的容量选择 .....	487
第九节 电动机容量选择的工程方法 .....	489
一、用统计分析法选择电动机容量 .....	489
二、用类比法确定电动机容量 .....	490
思考题与习题 .....	490
参考文献 .....	493

# 第一章 磁 路

电机是以磁场为媒介、利用电磁感应和电磁作用实现机械能与电能相互转换的电磁设备。一般说来，每台电机都必须具有电路和磁路这两个基本部分。电路是电流之路，用引导电流产生感应电势；磁路是主磁通之路，用于引导主磁通，在其限定的范围内形成较强的工作磁场。二者相互配合，实现机-电能量的传递和转换。因此，研究电机中的电路、磁路及其所遵循的基本规律是分析电机问题的理论基础。本章着重说明电机中常见的磁路及其分析计算方法。

## 第一节 磁路和磁路基本定律

### 一、磁场和安培环路定律

#### 1. 描述磁场的基本物理量

从物理学中我们已经知道，在磁体和电流(有规则地运动着的电荷)的周围存在着磁场，磁场是物质存在的一种特殊形式，它具有物质的属性：它能对在磁场中运动的电荷或载流导体产生作用力，磁场本身也具有能量。

表征磁场特性的基本物理量是磁感应强度，它是一个向量，用符号 $B$ 表示。通常用磁力线(磁感应向量线)来形象地描述空间磁场的强弱和方向，磁力线上任一点的切线方向就是该点磁场的方向，磁力线的疏密程度反映磁场的强弱。磁力线是环绕着产生它的电流的一系列闭合回线，其方向与电流的方向符合右螺旋关系。

穿过某一截面 $S$ 的磁感应强度 $B$ 的通量称为磁通量，简称磁通，以符号 $\Phi$ 表示

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

即磁感应强度在某截面上的面积分就是通过该截面的磁通量。电机的每极磁通，即穿过每个磁极横截面的全部磁通量，是设计、计算电机的重要基础数据。

在均匀磁场中，若磁感应强度 $B$ 与截面 $S$ 垂直，则式(1-1)可简化为

$$\Phi = B \cdot S$$

或

$$B = \Phi / S$$

因此，磁感应强度 $B$ 又称为磁通密度。

表征磁场特性的另一个重要物理量是磁场强度向量 $H$ ，它与磁感应强度向量 $B$ 之间的关系是

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

式中  $\mu$ ——磁场中导磁物质的磁导率

磁导率 $\mu$ 是表征物质导磁性能的物理量，真空、空气和一般非磁性物质，例如木材、铜、橡胶等的磁导率均为恒定的常数 $\mu_0$ ，铁磁物质的导磁性能比非磁性物质强得多，其磁导率 $\mu$ 比

$\mu_0$ 大数十倍到数千倍，且不是常数。

以国际单位制(SI)为基础的我国法定计量单位规定，磁通量 $\Phi$ 的单位是Wb，磁感应强度 $B$ 的单位是T，

$$1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$$

磁场强度 $H$ 的单位是A/m，磁导率 $\mu$ 的单位是H/m。采用法定计量单位时，真空的磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H}/\text{m}$$

## 2. 安培环路定律

现代科学已经确认了磁现象的电本质：无论是磁体的磁场，还是电流的磁场，都是起源于电荷的运动。电机中采用的磁场，较多的是由电流建立的电磁场。安培环路定律确定了磁场与产生磁场的电流之间的关系，因而是一条极为重要的磁场定律。

实验证明：在磁场中，沿任意闭合路径 $l$ ，磁场强度向量的线积分恒等于被该闭合路径所包围的导体中电流的代数和(简称为全电流)，即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum i$$

式中  $H$ ——磁场强度，单位为A/m

$l$ ——积分路径，单位为m

$i$ ——全电流，单位为A

这一规律就称为安培环路定律或称为全电流定律。式中，当电流的参考方向与闭合路径的方向符合右螺旋关系时，电流前取正号，反之则取负号，如图1-1所示。

在工程中，由于实际磁场的情况极为复杂，直接利用上式进行计算常常是很困难的。这时就需要忽略一些次要因素，将漫布在整个空间的磁场简化为一定范围内的磁场，即将磁场问题简化为磁路问题来解决。

## 二、磁路和磁路欧姆定律

从广义的概念来讲，凡磁通穿过的路径都称为磁路。在机电装置内，为了得到较强的磁场，常把导线绕成线圈。再把线圈套装或置放在铁心上。这样，当线圈内通有电流时，由于铁心的导磁性能较好，铁心与铁心之间的工作气隙内就可以得到较强的磁场；另一方面，大部份磁通将被约束在铁心内部，并按照一定的路径形成闭合回路。工程上把这种主要由铁磁物质所组成的，能使磁力线集中通过的整体称为磁路。

图1-2表示两种常见的磁路，其中图(a)为变压器的磁路，图(b)为二极直流电机的磁路。

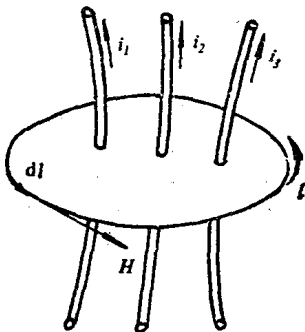


图1-1 安培环路定律

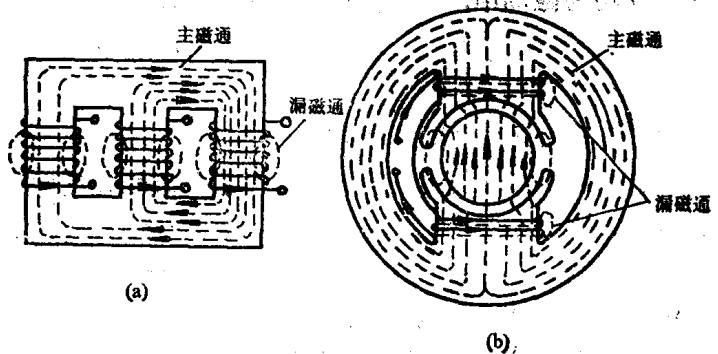


图1-2 常见的两种磁路

(a)变压器的磁路 (b)二极直流电机的磁路

载流线圈中通过的用以产生(激励)磁路中磁通的电流,通常称为励磁电流。若励磁电流为直流,则磁路中的磁通也为恒定而不随时间变化,这种磁路称为直流磁路或恒定磁通磁路;直流电机的磁路就属于这类。若励磁电流为交流,则磁路内的磁通也将随时间而交变,这种磁路称为交流磁路;交流铁心线圈,变压器和交流电机的磁路都属于交流磁路。因为直流磁路中的物理情况较为简单,所以下面先研究直流磁路的分析计算方法。

当线圈中通有励磁电流时,铁心磁路(包括工作气隙)中将产生一定的磁感应强度并通过较多的磁通,但也有少量磁力线穿出铁心磁路经周围介质闭合,形成漏磁。我们把全都在磁路中闭合的磁通称为主磁通,或称为工作磁通。把部分经过磁路,部分经过磁路周围介质而闭合的磁通以及全部不经过磁路而闭合的磁通都称为漏磁通。实际漏磁通的分布是相当复杂的,需用专门的方法进行计算。考虑正常工作情况下漏磁通比主磁通小得多,所以在下面的分析中将漏磁通忽略不计。在这种情况下,铁磁物质的形状往往就决定了磁路的形状,研究电流所产生的磁场的问题便简化为磁路的分析和计算问题。

对磁路进行分析和计算要用到一些磁路定律,其中最基本的是磁路欧姆定律,它是根据描述磁场性质的磁通连续性原理和安培环路定律导出的。

以图1-3所示的无分支磁路为例,设磁路是由同一种铁磁物质构成,其截面积为 $S$ ,平均长度为 $l$ 。由于磁通的连续性,通过磁路各处的磁通 $\Phi$ 相等。一般情况下,磁路长度远大于横截面的线性尺寸,可以认为磁通在横截面上是均匀分布的,因而磁路中的磁通密度,也就是磁感应强度,应为

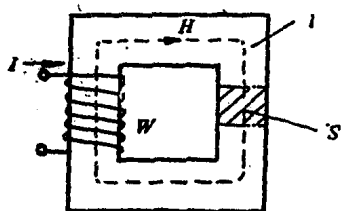


图1-3 无分支铁心磁路

$$B = \Phi / S$$

式中  $S$ ——磁路横截面积,单位为 $m^2$

将安培环路定律应用于图1-3所示的磁路,若取磁路中心线为积分路径,因中心线上各点的磁场强度向量的大小均相同,其方向又处处与 $dl$ 的方向一致,故

$$\oint H \cdot dl = Hl = WI \quad (1-3)$$

式中  $W$ ——励磁线圈的匝数

$I$ ——励磁电流, A

考虑到 $H = B/\mu$ 及 $B = \Phi/S$ ,上式可写成

$$WI = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-4)$$

上式在形式上与有源电阻电路的欧姆定律 $E = IR$ 相似。磁路中的磁通对应于电路中的电流 $I$ ;磁路中的 $WI$ 对应于电路中的电动势 $E$ ,因而将励磁安匝数 $WI$ 称为磁路的磁动势,简称磁势,用 $F$ 表示;磁路中的 $\frac{l}{\mu S}$ 对应于电路中的电阻 $R = \frac{l}{\gamma S}$ , (式中 $\gamma$ 为电导率),因而 $\frac{l}{\mu S}$ 也称为磁阻 $R_m$ 。这样,式(1-4)可进一步写成

$$F = \Phi R_m \text{ 或 } \Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-5)$$

上式表明,磁路中的磁通等于作用在磁路上的磁动势除以磁路的磁阻,这就是磁路的欧姆定律。

由于磁势 $F = WI$ ,所以线圈匝数越多,励磁电流越大,磁势就越大。磁势的单位是A

匝。由于磁阻  $R_m = l/(\mu S)$ ，所以磁路的磁阻主要取决于磁路的尺寸和所用材料的磁导率。材料的磁导率越大，磁阻就越小，磁路的平均长度越长，截面积越小，磁阻就越大。磁阻的法定计量单位是  $H^{-1}$ 。

**例1-1** 有一闭合铁心磁路，铁心的有效截面积为  $3 \times 3 = 9\text{cm}^2$ ，磁路的平均长度  $l = 30\text{cm}$ ，铁心的磁导率  $\mu \approx 5000\mu_0$ ，励磁绕组为500匝；试求在铁心中产生1T的磁感强度时所需的励磁电流。

**解** 本题可用磁路的欧姆定律或安培环路定律求解。计算时采用法定计量单位。

(1) 用磁路的欧姆定律

$$\text{铁心截面积 } S = 9\text{cm}^2 = 9 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

$$\text{磁通量 } \Phi = B \cdot S = 1 \times 9 \times 10^{-4} = 9 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\text{磁阻 } R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{0.3}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7} \cdot 9 \times 10^{-4}} = 5.3 \times 10^4\text{H}^{-1}$$

$$\text{磁势 } F = \Phi R_m = 9 \times 10^{-4} \times 5.3 \times 10^4 = 47.7\text{A匝}$$

$$\text{励磁电流 } I = \frac{F}{W} = \frac{47.7}{500} = 0.096\text{A}$$

(2) 用安培环路定律

$$\text{磁场强度 } H = \frac{B}{\mu} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 5000} = 159\text{A/m}$$

$$\text{磁势 } F = H \cdot l = 159 \times 0.3 = 47.7\text{A匝}$$

$$\text{励磁电流 } I = 0.096\text{A}$$

### 三、简单的串联磁路

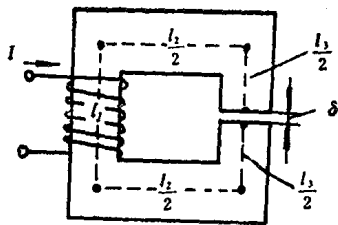


图1-4 简单串联磁路

实际磁路的几何形状和构成材料都是比较复杂的，例如，直流电机的磁路通常由数段不同截面积的铁心组成，磁路中还有空气隙。在计算这类磁路时，须将磁路分成若干段，凡是材料及截面积均相同，其中磁通数值亦相同的作为一段，在这一段中，各点的磁场强度是相等的。以图1-4所示的无分支磁路为例，该磁路可分为左柱，上下轭，右柱和气隙四段，其平均长度分别为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  和  $\delta$ ，有效截面分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_\delta$ ，每段中的磁场强度分别为  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  和  $H_\delta$ ，若沿中心线取磁场强度向量的线积分，根据安培环路定律可得

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_\delta \delta = WI \quad (1-6)$$

从磁路与电路对偶的角度看，上式中左边各项与串联电阻电路中各电阻上的电压降  $U$  相对应，故也将  $H_1 l_1$ 、 $H_2 l_2$ ……称为磁路各段上的磁压降。考虑更一般的情况，磁路上可能有几个励磁线圈，即作用在磁路上的磁势有多个，将式(1-6)改写成更普遍的形式

$$\Sigma(Hl) = \Sigma(WI) \quad (1-7)$$

式中的  $H$ 、 $l$  和  $I$  都是有方向的量，在串联无分支磁路中，我们总是取  $l$  与  $H$  方向一致。若电流  $I$  的方向与闭合回线的指向符合右螺旋关系，则  $WI$  前面取正号，否则取负号。

式(1-7)表明：作用在磁路上的总磁势恒等于闭合磁路内各段磁压降之和。该式是计算串



联磁路的基本公式。

在图1-4的磁路中，如果已知各段磁路的磁导率 $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ 和 $\mu_0$ ，考虑 $H=B/\mu$ ，和 $\Phi=B/S$ 的关系，式(1-6)也可写成磁路欧姆定律的形式

$$\begin{aligned} WI &= \Phi \left( \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3} + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \right) \\ &= \Phi (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m\delta}) \\ &= \Phi \Sigma R_m \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中  $\Sigma R_m = (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m\delta})$ ——闭合磁路的总磁阻

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \quad R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}, \quad R_{m3} = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}, \quad R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}$$

分别为各段磁路的磁阻

可见，对于串联磁路，总磁阻等于各段磁路磁阻之和。

将式(1-8)写成更普遍的形式为

$$\Sigma WI = \Phi \Sigma R_m \quad (1-9)$$

上式就是一般串联磁路的磁路欧姆定律，可见串联磁路与串联电路之间存在着对偶关系。

在含有空气隙的串联磁路中，由于铁心的导磁率 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ ，所以即使铁心部分的磁路长度比气隙长得多，但气隙的磁阻仍比铁心段的磁阻大得多。换言之，当铁心磁路中开有气隙时，总磁阻主要取决于气隙的磁阻，磁路上的总磁势大部分都消耗在气隙的磁压降上。

如果已知磁路各段的磁阻或磁导率，利用式(1-9)计算磁路将是很方便的。但是，由于铁磁物质的磁导率随着磁场强度的大小而改变，它不是一个常数，也就是说，铁心磁路的磁阻是非线性的，所以式(1-9)所示的磁路欧姆定律只是在对磁路进行定性分析时比较有用，在对磁路进行定量计算时更多地是利用式(1-7)。铁磁材料的 $B$ 和 $H$ 的关系很难用准确的数学式来表达，因此用实验方式测得的 $B-H$ 曲线(或称磁化曲线)是进行磁路计算不可缺少的资料，各种铁磁材料的磁化曲线将在下节介绍。

通常在计算电机或电器的磁路时，总是预先给定磁通(或磁感应强度)，然后按磁路材料和几何尺寸求解所需的磁势或励磁电流。在忽略漏磁通时，无分支串联磁路可按以下步骤计算：

- (1) 根据磁路各部分的材料和截面积进行分段，使每一段磁路都是均匀的。
- (2) 计算各段磁路的平均长度和有效截面积。在计算由硅钢片叠成的铁心的截面积时，须除去片间绝缘膜的厚度；一般可按下列式计算

$$\text{有效截面积} = \text{几何面积} \times k$$

式中  $k$ ——铁心迭片系数， $k < 1$ ，其值随硅钢片厚度及平整程度而定，一般厚度为0.5mm的硅钢片， $k$ 约为0.92左右；厚度为0.35mm的硅钢片， $k$ 约为0.9左右。

在计算空气隙的有效截面积时，应考虑在气隙中磁力线会失去铁磁物质的约束而向外部扩张，相当于增大了空气隙的有效面积。当气隙长度 $\delta$ 很短时，其有效截面积 $S_\delta$ 可按下面的近似公式计算：

对于截面积为矩形的铁心，若其边长为 $a$ 和 $b$ ，则空气隙的有效截面积

$$S_\delta = (a + \delta)(b + \delta) \approx ab + (a + b)\delta \quad (1-10)$$

对于截面积为圆形的铁心，若其半径为 $r$ ，则

$$S_\delta = \pi \left( r + \frac{\delta}{2} \right)^2 \approx \pi r^2 + \pi r \delta \quad (1-11)$$