



应用型本科规划教材

(第二版)

**ELECTRICAL MACHINERY
AND TOWAGE**

电机与拖动

◆ 主 编 邵世凡
副主编 陈祥华 王雪洁
孙冠群 杜鹏英



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

应用型本科规划教材

电机与拖动

(第二版)

主 编 邵世凡

副主编 陈祥华 王雪洁

孙冠群 杜鹏英



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 邵世凡主编. —2 版. —杭州: 浙江大学出版社,
2016. 3
ISBN 978-7-308-15483-3

I. ①电… II. ①邵… III. ①电机 ②电力传动 IV. ①TM3
②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 316923 号

内 容 简 介

本书是为应用型本科院校学生编写的一本深入浅出的教材, 内容包括直流电机及直流电机的电力拖动、交流电机、变压器、异步电动机及异步电动机的电力拖动等。书中力求遵循循序渐进的思想, 讲清楚每章内容的学习思路和学习要点, 教会学生如何掌握学习规律和方法。全书每章开始都给出内容提要 and 基本要求, 以便学生能够迅速了解和抓住学习的重点。书中提供了很多图示和曲线, 对问题给予了形象描述, 便于学生理解书中的内容。在每章结束后, 都留有思考题和练习题。

本书适合应用型本科院校自动化等相关专业的学生使用, 也可供相关技术人员学习参考。

电机与拖动

主 编 邵世凡

丛书策划 樊晓燕 王 波
责任编辑 王 波 (zjuwb@163.com)
责任校对 余梦洁 王文舟
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 18.25
字 数 440 千
版 次 2016 年 3 月第 2 版 2016 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-15483-3
定 价 36.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: (0571) 88925591, <http://zjdxcs.tmall.com>

应用型本科院校自动化专业规划教材

编 委 会

主 任 宋执环

委 员 (以姓氏笔画为序)

卫 东 马修水 王培良 石松泉

任国海 刘勤贤 那文波 肖 铎

邵世凡 庞文尧 胡即明

总 序

近年来我国高等教育事业得到了空前的发展,高等院校的招生规模有了很大的扩展,在全国范围内涌现了一大批以独立学院为代表的应用型本科院校,这对我国高等教育的全方位、持续、健康发展具有重大的意义。

应用型本科院校以着重培养应用型人才为目标,开设的大多是一些针对性较强、应用特色明确的本科专业,但目前所采用的教材大多是直接选用普通高校的那些适用于研究型人才培养的教材。这些教材往往过分强调系统性和完整性,偏重基础理论知识,而对应用知识的传授却不足,难以充分体现应用类本科人才的培养特点,无法直接有效地满足应用型本科院校的实际教学需要。

浙江大学出版社认识到,高校教育层次化与多样化的发展趋势对出版社提出了更高的要求,即无论在选题策划,还是在出版模式上都要进一步细化,以满足不同层次的高校的教学需求。应用型本科院校是介于研究型本科与高职之间的一个新兴办学群体,它有别于普通的本科教育,但又不能偏离本科生教学的基本要求,因此,教材编写必须围绕本科生所要掌握的基本知识与概念展开。但是,培养应用型与技术型人才又是应用型本科院校的教学宗旨,这就要求教材改革必须有利于进一步强化应用能力的培养。

在人类科技进步的历史进程中,自动化科学和技术的产生改变了人们的生产方式和工作方式,控制和反馈思想则一直影响着人们的思维方式。蒸汽机和电机的应用,延伸了人的体力劳动,推动了自动化技术的发展,催生了工业革命,使人类社会通过工业化从农业社会发展到工业社会。而现代信息技术的应用,则延伸了人的脑力劳动,引发了以数字化、自动化为主要特征的新的工业革命,使人类社会通过信息化从工业社会发展到信息社会。信息时代的自动化技术有了更加宽广的应用领域和难得的发展机遇。为了满足当今社会对自动化专业应用型人才的需要,国内百余所应用型本科院校都设置了自动化及相关专业。

针对这一情况,浙江大学出版社组织了十几所应用型本科院校自动化类专业的教师共同开展了“应用型本科自动化专业教材建设”项目的研究,共同研究

目前教材的不适应之处,并探讨如何编写能真正做到“因材施教”、适合应用型本科层次自动化类专业人才培养的系列教材。在此基础上,组建了编委会,确定共同编写“应用型本科院校自动化专业规划教材”系列。

本套规划教材具有以下特色:

在编写的指导思想上,以“应用型本科”学生为主要授课对象,以培养应用型人才为基本目的,以“实用、适用、够用”为基本原则。“实用”是对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法要讲全、讲透,概念准确清晰。“适用”是适用于授课对象,即应用型本科层次的学生。“够用”就是以就业为导向,以应用型人才为培养目的,讲透关键知识点,达到理论够用,不追求理论深度和内容的广度。突出实用性、基础性、先进性,强调基本知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

在教材的编写上重在基本概念、基本方法的表述。编写内容在保证教材结构体系完整的前提下,注重基本概念,追求过程简明、清晰和准确,重在原理,压缩繁琐的理论推导。做到重点突出、叙述简洁、易教易学。还注意掌握教材的体系和篇幅能符合各学院的计划要求。

在作者的遴选上强调作者应具有丰富的应用型本科教学经验,有较高的学术水平并具有教材编写经验。为了既实现“因材施教”的目的,又保证教材的编写质量,我们组织了两支队伍,一支是了解应用型本科层次的教学特点、就业方向的一线教师队伍,由他们通过研讨决定教材的整体框架、内容选取与案例设计,并完成编写;另一支是由本专业的资深教授组成的专家队伍,负责教材的审稿和把关,以确保教材质量。相信这套精心策划、认真组织、精心编写和出版的系列教材会得到广大院校的认可,对于应用型本科院校自动化工程类专业的教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会主任

宋执环

2008年12月

前 言

电机与电力拖动基础这门课程是工业企业电气自动化专业(一度简称为“工企专业”)、电气工程自动化专业和自动化专业的必修课,是学习电力拖动控制系统、自动控制原理、计算机控制系统、运动控制系统等后续课程的基础。该课程是将原来的电机学与电力拖动系统两门课程合并为一门课程,因此,学时较多,且由于该课程教学的内容涉及高等数学、电路分析、磁路和机械原理等多方面的知识,要求学生有一定的基础和学习能力,所以学生学习的难度较大,同时,对讲授该门课程的老师也有一定的要求。

本书作为应用型本科规划教材之一,是专门针对以独立学院为代表的应用型本科院校自动化类专业开设的电机与电力拖动这门课程编写的。

本书的宗旨是,力求将复杂的问题讲得简单化一点,繁杂的问题讲得条理化一点,抽象的问题讲得形象化一点。书中力求遵循循序渐进的思想,讲清楚每章内容的学习思路和学习要点,教会学生掌握学习规律和方法,以及理论联系实际、解决实际问题的能力。

本书的特点是每章开始都给出内容提要 and 基本要求,以便学生能够迅速了解和抓住学习的重点。书中增加了很多图示和曲线,目的是对问题给予形象描述,便于学生理解书中的内容。在每章结束后,都留有思考题和练习题。

编写本教材的主要目的是为应用型本科学子编一本深入浅出的好教材。教材注重对学生思维能力的培养,使学生掌握正确的分析问题的方法,而不是掌握一些“死”知识。这是因为,当今时代,无论知识内容还是知识结构都在迅速地发生着变化。因此,正确的思维方式和分析问题的能力的培养就变得尤为重要。

本书由浙江科技学院的邵世凡和张震宇、浙江工业大学之江学院的陈祥华、浙江大学城市学院王雪洁和杜鹏英、中国计量学院的孙冠群、浙江海洋学院

的计青山、浙江大学宁波理工学院的李英道共同编写。

教材共 10 章。邵世凡负责编写第 5 章和第 7 章；张震宇负责编写第 3 章；陈祥华负责编写第 6 章；王雪洁负责编写第 1 章和第 2 章；孙冠群负责编写第 9 章和第 10 章；杜鹏英负责编写第 4 章；计青山负责编写第 8 章；李英道负责编写电机实验部分。

全书由邵世凡担任主编，陈祥华、王雪洁、孙冠群和杜鹏英担任副主编。浙江大学林瑞光教授审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。因时间仓促，本书若有不足之处，敬请读者批评指正。

作者在第一版基础上对全书进行了部分修改。浙江大学出版社为本书提供了“立方书”功能，具体请参考本书末的立方书宣传页或咨询出版社。教师可以使用立方书平台功能开课，或扫描右侧的“参考资料”二维码获取本书的课程教学大纲、每章思考题与习题的参考答案等资源。



编 者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电机的分类与应用	1
1.2 电力拖动系统	2
1.3 电机中使用的材料和磁性材料的特性	3
1.4 常用的几个基本定律	4
1.5 课程的性质及任务	7
小结	7
思考题	7
习题	8
第 2 章 直流电机	10
2.1 直流电机的工作原理	10
2.2 直流电机的结构和额定值	13
2.3 直流电机电枢绕组	16
2.4 直流电机的磁场	28
2.5 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	34
2.6 直流电动机的运行原理	36
2.7 直流发电机的运行原理	41
2.8 直流电机的换向	45
小结	47
思考题	48
习题	49

第3章 直流电动机的电力拖动	51
3.1 电力拖动系统的运动学方程式	51
3.2 工作机构的转矩、飞轮矩和质量的折算	52
3.3 负载的机械特性	57
3.4 他励直流电动机机械特性和稳定运行条件	58
3.5 他励直流电动机的启动	63
3.6 他励直流电动机的调速	65
3.7 他励直流电动机的制动	71
3.8 他励直流电动机的过渡过程	78
小结	86
思考题	87
习题	88
第4章 变压器	91
4.1 变压器的用途、结构及额定数据	91
4.2 变压器的工作原理	94
4.3 变压器的空载运行	97
4.4 变压器的负载运行	102
4.5 变压器的标么值	109
4.6 变压器的参数测定	109
4.7 三相变压器	113
4.8 变压器的运行特性	117
4.9 自耦变压器和仪用互感器	121
小结	123
思考题	124
习题	124
第5章 交流电机的绕组、磁动势和电动势	127
5.1 交流电机的主要类型	127
5.2 交流电机的绕组	127
5.3 交流绕组的磁动势	133
5.4 交流绕组的电动势	148

小结.....	152
思考题.....	153
习题.....	153
第 6 章 异步电动机	155
6.1 三相异步电动机的结构及额定值	155
6.2 异步电机的基本工作原理及转差率	159
6.3 三相异步电动机的主磁通和漏磁通	163
6.4 三相异步电动机转子静止时的电磁关系	165
6.5 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	168
6.6 三相异步电动机功率和转矩	171
6.7 三相异步电动机的工作特性和参数测定	174
小结.....	177
思考题.....	177
习题.....	178
第 7 章 三相异步电动机的电力拖动	180
7.1 关于三相异步电动机的自然机械特性	180
7.2 三相鼠笼式异步电动机的启动	185
7.3 三相绕线式异步电动机的启动方法	191
7.4 三相异步电动机的调速方法	196
7.5 三相异步电动机的制动方法	206
小结.....	210
思考题.....	211
习题.....	211
第 8 章 单相异步电动机	213
8.1 单相异步电动机	213
8.2 单相异步电动机的机械特性	215
8.3 不同启动方式的电动机	217
小结.....	221
思考题.....	222
习题.....	222

第 9 章 微控电机	223
9.1 无刷直流电动机	223
9.2 伺服电动机	232
9.3 步进电动机	235
* 9.4 其他各种微控电动机	240
小结	244
思考题	245
习题	246
第 10 章 电动机的容量选择	247
10.1 电力拖动系统电动机的一般选择	247
10.2 电动机的额定功率	249
10.3 电动机额定功率的选择	253
小结	255
思考题	255
附录 电机实验	256
参考文献	279

第 1 章 绪 论

内容提要:本章主要介绍了电机及电力拖动系统的概念,按照功能用途概括了电机的分类,给出了电力拖动系统的基本运动方程,明确了该课程的性质和任务。为了进行后续章节电机原理及电力拖动知识的展开和学习,本章最后给出了整本教材所必需的电磁学的基本知识和几个基本定律。

1.1 电机的分类与应用

1. 电机的概念

电机是利用电磁感应原理设计的、用于实现能量(信号)传递和转换的电磁机械的统称。电机包括电动机、发电机和变压器。其中,发电机是将非电能形式的机械能转换为电能的装置,而电动机则是将电能转换为机械能的装置,变压器是将一种电能形式如电压、电流的幅值、频率、相位等替换成另一种电能形式的装置。电机与电力拖动基础这门课程主要包括电机学和电力拖动基础两方面的内容,电力拖动系统是以电动机为原动机,带动生产机械按人们规定的规律运动的系统。本章首先讨论电机的分类与应用。

2. 电机的分类

由于电机是驱动机械装置运动的主要动力源,它应用广泛、种类繁多、性能各异,分类方法也很多。电机可以根据不同的分类原则或方法进行分类,如图 1-1 所示。

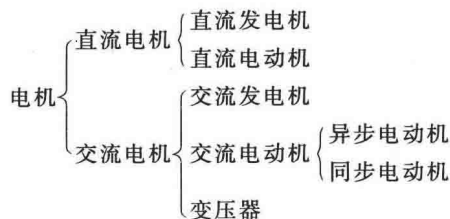


图 1-1 电机的分类

下面对上述分类作一归纳。

按输入或输出的电压、电流的特点来分,可分为直流电机和交流电机。

按能量转换的方向来分,可分为发电机和电动机。因此,也就有了直流发电机和直流电动机、交流发电机和交流电动机。

按工作方式来分,交流电动机又可分为异步电动机和同步电动机。

3. 电机的应用

根据电磁感应原理制成的发电机为人们提供了一种清洁能源,为人们的现代生活带来了光明和便利。电动机作为驱动机械装置运动的主要动力源,已经被广泛应用到人们生活的方方面面。特别是近年来随着家用电器走入人们的生活,如洗衣机、电冰箱、空调机、吹风机等,它们改变了人们的生活。

在工业生产中,电动机作为拖动各种生产机械的动力,是国民经济各部门应用最多的动力机械,也是最主要的用电设备。

在电力的传输过程中,变压器作为一种重要的能量转换的电磁装置被广泛地应用。由于其工作原理与交流电机相同,因此,人们也将其视为电机。其作用是将一种电压等级的电能转为另一种电压等级的电能。

总之,电机已经成为现代人们生活不可缺少的一个重要组成部分。

1.2 电力拖动系统

1. 电力拖动系统

电力拖动系统是指以电动机为原动机的机械拖动系统。电动机将电能转换为机械能,并以旋转或直线的工作方式输出能量,带动各种机械负载。

2. 电力拖动系统的组成

电力拖动系统主要由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源等几个部分组成。其系统结构如图 1-2 所示。

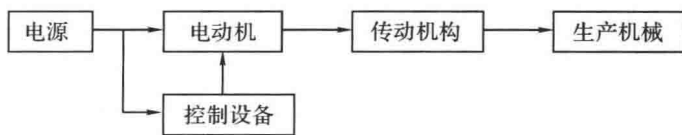


图 1-2 电力拖动系统结构

在电力拖动系统中,电源主要是向电动机以及控制设备提供电能;电动机的作用是将电能转换为机械能,通过传动机构变速或变换运动方式后,拖动生产机械工作;控制设备由各种控制电路、驱动电路以及控制计算机等组成,其作用是控制电动机的运行状态,以实现生产机械运动的自动控制;传动机构是将高速运转的电动机轴与工作较慢的生产机械相连接并使两者能够很好地配合的必不可少的变速机械;生产机械是执行某一生产任务的机械设备,是电动机拖动的对象。

由于电力拖动系统具有控制简单、调节性能好、损耗小、污染少、电能可以远距离传送和自动控制等一系列优点,因此,大多数生产机械均采用电力拖动。

通过对生产过程的分析,在电力拖动系统的运行过程中,电机主要工作在以下几种状态下:静止工作状态、加速(启动)工作状态、匀速工作状态、减速(制动)工作状态以及调速过程中的过渡状态(见图 1-3)。

对电动机的工作过程的分析也将围绕着这几个状态进行。

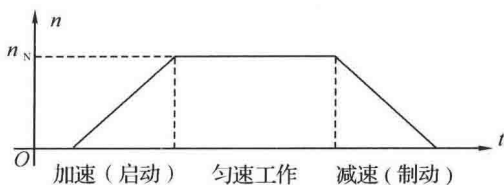


图 1-3 实际生产过程中的电动机工作过程及状态

1.3 电机中使用的材料和磁性材料的特性

1.3.1 电机中使用的材料

电机中使用的各种材料主要可分为以下几种。

1. 导电材料

导电材料主要是铜和铝。由于它们具有良好的导电特性,所以在电机中主要用于缠绕电机的绕组。

2. 导磁材料

导磁材料通常是指磁导率较高的铁磁材料,目的是通过使用这些材料,减少磁能在经过这些材料时的损耗,增加磁通量,提高磁场能量的传递效率。目前,电机中的定子和转子铁芯都是用高导磁材料制成的。

3. 绝缘材料

在电机中,绝缘材料是指涂抹在导体表面的绝缘漆或起隔离作用的绝缘材料。绝缘材料的质量高低、高温下的绝缘能力和耐压能力都决定了电机的等级和档次。绝缘材料是衡量电机好坏的一项重要指标。

1.3.2 铁磁材料的导磁性

铁磁材料具有高磁导率,主要有铁、钴、镍以及它们的合金。它们的磁导率都很高。所有非导磁性材料的磁导率都接近于真空条件下的磁导率 μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$),而铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 要比真空条件下的磁导率大几百甚至几千倍。对电机中所使用的铁磁材料而言,其磁导率 μ_{Fe} 为 μ_0 的 2000~6000 倍。

1.3.3 铁磁材料的磁滞性

铁磁材料的高磁导率,即磁阻小,使得大多数磁力线都被吸收并集中在导磁材料中,减少了在空气中的磁力线(漏磁通)。磁场强度或磁感应强度越强,导磁材料中的磁力线就越多、也就越密集,最终出现饱和。因此,我们有必要研究一下磁性材料中的磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系。

从量上分析,其关系表达式为

$$B = \mu H \quad \text{或} \quad H = \frac{B}{\mu} \quad (1-1)$$

式中: μ 为磁导率。

磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系曲线如图 1-4 所示, 此关系曲线又称为磁滞回线。当磁场强度 H 为 0 时, 磁感应强度 B 并不为 0, 在磁性材料中出现剩磁现象, 很难去掉。只有在改变电流的方向, 使磁场强度 H 反向, 且大小为 H_c 时, 才能够抵消掉剩磁。因此, 人们又称在磁性材料中出现的剩磁为顽磁。使顽磁为 0 的 H 值被称为校顽磁力。

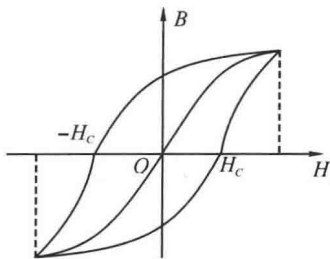


图 1-4 磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系曲线

从使用角度看, 希望磁滞曲线越窄越好, 即剩磁越少越好。这也就是为什么制造电机时, 选择硅钢或铸钢等材料的原因, 因为它们的磁滞回线长而窄, 磁导率高。

1.3.4 铁磁材料的损耗

电机中的损耗主要有由电流在导电材料中引起的损耗(铜损)和磁场变化在铁磁材料中引起的损耗(铁损), 同时还包括从空气中走的那部分磁力线, 即漏磁。

铁磁材料中的损耗主要包括磁滞损耗与涡流损耗。

磁滞损耗主要是由于磁场的交替变化引起的。在磁场反复变化的过程中, 铁磁材料反复地沿不同方向被磁化, 而每次变化都要先校正或克服上一次磁化的剩磁, 因此引起了不必要的损耗。

涡流损耗是指在磁场的交替变化过程中围绕着磁力线产生的涡流引起铁磁材料发热而散发掉的损耗。

显然, 磁滞损耗的大小与磁场交替变化的频率 f 和磁通密度有关。而涡流损耗则与钢片的厚度 d 的平方成正比, 与涡流回路的电阻成反比。这也是通常硅钢片做得非常薄、钢片表面适当地多掺些硅的原因。因为薄能减少涡流形成的截面, 多掺些硅可以增加磁阻, 从而达到抑制涡流产生的目的。

1.4 常用的几个基本定律

1.4.1 电生磁的基本定律——安培环路定律

当导体中有电流流过时, 就会在导体或电流的周围产生磁场。磁场计算的依据是安培环路定律。安培环路定律可描述为: 沿任意一条闭合磁路, 对磁场强度向量进行线积分, 结果等于该闭合路径所包围导体电流的代数和。用数学表达可描述为如下形式:

$$\oint_l H \cdot dl = \sum_{j=1}^N i_j \quad (1-2)$$

式中: l 为与电流垂直平面中的任意闭合路径; $i_1, i_2, i_3, \dots$ 为被闭合路径所包围的 N 根导体中的电流, 其正负值代表不同的电流方向。

安培环路定律又称为全电流定律, 是研究电生磁的基本定律, 电流的正方向和所产生磁

场的正方向符合右手螺旋关系。

如果闭合磁力线是由 N 匝线圈中的电流 i 产生,且沿闭合磁力线 L 上的磁场强度 H 处处相等,则上式变为

$$HL = Ni \quad (1-3)$$

式中: Ni 称为安匝数,又称为磁路中的磁动势,用 F 表示,即 $F = Ni$,单位为 A(安匝)。

1. 磁路

电流在它周围的空间建立磁场,磁场的分布常用一些闭合线(磁力线)来描述,磁力线所经的路径称为磁路。磁动势可以看作是磁路中的电动势,磁力线可视为是由磁动势产生的。

2. 磁路的欧姆定律

将全电流定律的思想应用到闭合磁路上,则有

$$\oint_l H \cdot dl = Hl = Ni \quad (1-4)$$

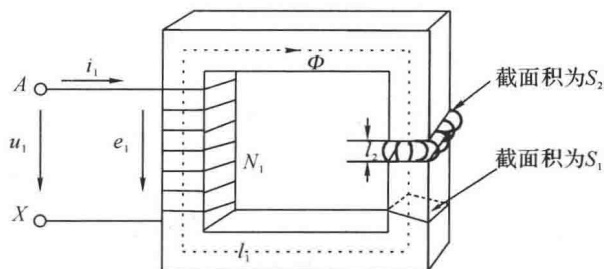


图 1-5 磁通与其感应电动势的正方向假定

假设在图 1-5 所示的铁磁回路中,铁芯的磁导率为 μ_{Fe} ,铁芯的截面积为 S_1 ,磁路的平均长度为 l_1 ;而气隙的长度为 l_2 ,气隙横截面面积要比铁芯的截面积大,为 S_2 ,磁导率为 μ_0 。则由于磁势 $F = Ni$,且 $H = B/\mu = \Phi/\mu S$,代入式(1-4)可得

$$F = Ni = Hl_1 + Hl_2 = \frac{Bl_1}{\mu_{Fe}} + \frac{Bl_2}{\mu_0} = \Phi \frac{l_1}{\mu_{Fe} S_1} + \Phi \frac{l_2}{\mu_0 S_2} = \Phi R_{m1} + \Phi R_{m2} \quad (1-5)$$

为了反映磁路的导磁能力,不妨定义 $R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_{Fe} S_1}$ 为铁芯磁阻, $R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_0 S_2}$ 为气隙中的空气磁阻。

显然,磁阻的大小与磁路的结构尺寸以及所采用的磁性材料密切相关。磁路中的磁阻与铁芯的间隙的距离大小成正比,与铁芯的截面面积和磁导率成反比。由于 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$,所以,可以认为磁路中的磁动势几乎完全都降落在间隙两端了,磁路中总的磁阻几乎就等于间隙处的磁阻,是磁路中的最大损耗。因此,变压器铁芯安装时必须减少磁路中的缝隙。但也应看到其磁导率为 μ_0 ,它也将提高电流与磁通之间的线性度,降低磁饱和程度。工程中,人们也通常取 $S_1 = S_2$ 。

如果将磁动势 F 比作电路中的电动势,磁通 Φ 比作电路中的电流,磁阻比作电路中的电阻,则不难看出,磁路中的磁动势 F 、磁通 Φ 和磁阻的关系与电路中的电压、电流和电阻的关系相似。因此,通常将式(1-5)看作是磁路中的欧姆定律。其等效图如图1-6所示。