



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电机学

(第五版)

李发海 朱东起 编著



科学出版社

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电 机 学

(第五版)

李发海 朱东起 编著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在《电机学》(第四版)的基础上,根据新的教学大纲,适应科技发展的需要,集作者多年的教学经验,全面修订改写而成的。

全书共分六篇:变压器;直流电机;交流电机的绕组电动势和磁动势;同步电机;异步电机和特种电机。

本书以电机的三相、对称、稳态运行为主进行分析,重点阐述各类电机的基本概念、基本理论和基本分析方法,对电机的非正常运行只作物理概念介绍,不作详细定量分析,每章后附思考题和习题。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校电气工程及其自动化,以及其他强电类专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/李发海,朱东起编著.—5版.—北京:科学出版社,2013.6
(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)
ISBN 978-7-03-037715-9

I. ①电… II. ①李… ②朱… III. ①电机学-高等学校-教材
IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 120321 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:张凤琴
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1982年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年6月第 五 版 印张:24 1/2

2013年6月第23次印刷 字数:620 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第五版前言

依据“电机学”教学大纲的内容要求及使用教材单位的回馈意见，为了更好地适应教学需要，本书在第四版的基础上进行了部分章节的修改。改版的指导思想为：精简教材，突出重点内容；加强物理概念阐述，简化某些数学公式的推导及相、矢量图的表达；对原教材中较难理解的内容进行改写，力求做到简明易懂、便于教学；对于教材中的非重点内容，用“*”表示，并用小号字体编排。第五版保留了第四版中增加的可控电源供电电机的工作原理、运行特性等内容（交流电机矢量控制及转矩直接控制，第六篇特种电机），均用“*”表示。

本书由李发海、朱东起教授主编并审定。在第五版修订工作中，得到使用本教材的有关高等学校多位老师的大力支持，他们提供了宝贵的修改意见，在此深表谢意。本书配套有《电机学习题精解》（第三版）（2013年12月出版）。

本书蒙读者厚爱，第四版共印刷了八次，近四万册。由于作者水平有限，本书难免存在不足和疏漏，欢迎读者不吝指正。

编著者

2013年1月于清华园

第四版前言

本书第四版的修订工作，首先是适应“电气工程及其自动化”（或“电气工程与自动化”）专业教学大纲的要求，教材内容作相应的调整，精简了一些次要的内容。其次，考虑到科学技术的发展，特别是电力电子技术与微机技术、控制技术的飞速发展，供给电机的电源，不仅有常规的三相对称、工频、正弦波形的电源，还可以对电源电压（或电流）的幅值、频率、波形等进行灵活控制，从而使传统电机的性能更好满足不同负载的要求，并进一步发展成为多种新型电机。在现代社会中，它们正得到越来越广泛的应用。为此，在本书中也增加了这方面的内容。

根据上述思路，本版“电机学”教材中删去了“变压器的并联运行”、“直流电机的磁路和磁化特性”、“直流电机的换向”、“同步电机的派克方程”等四章，将其中有些内容简化后并入相关章节中。增加了三相移相变压器、异步电动机变频调速方面的内容，特别增设了第六篇“特种电机”，包括“自控式同步电动机”、“永磁电机”、“绕线型双馈异步电动机”、“开关磁阻电机调速系统”等四章，介绍这几种电机的工作原理、运行特性。全书共六篇二十七章。同时与本书配套出版了《电机学习题与题解》（第二版）。

本书由李发海、朱东起教授主编并审定。李发海编写了第一至五章、第十八至二十三章以及第二十六、二十七章，朱东起编写了绪论、第六至十七章以及第二十四、二十五章。

本书蒙读者厚爱，前三版已印刷了14次，累计印数近六万册。由于作者水平有限，本书难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编著者

2007年1月于清华园

第一版前言

根据多年来清华大学电机教研组在教学方面的经验，并为适应目前科学技术的发展，编写了本书。

全书分上、下两册。上册包括变压器和直流电机，下册包括同步电机和异步电机。

本书可作为电机系各专业的电机学教材或参考书。书中主要阐述变压器、直流电机、同步电机和异步电机的运行原理、分析方法和运行特性。限于篇幅，对其他类型电机和一些非基本问题未加论述。在编写过程中力求做到循序渐进，由浅入深，物理概念清楚，对电机的基本原理及分析工具、分析方法作了详细的阐述。在交流电机部分，突出用时空向量图来进行分析，目的是使读者在概念上加深对电机内部的电磁规律的理解。此外还有一些较深入或生产发展提出来的新内容。

本书是由李发海、陈汤铭、郑逢时、张麟征、朱东起合编的。李发海同志负责全书内容与符号的统一，以及文字的修改和整理等工作。全书由高景德教授审阅。在编写过程中教研组的其他同志提供了许多宝贵意见，在此向他们深表谢意。

由于水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，希望读者批评指正。

编著者

1981年7月于清华园

目 录

第五版前言

第四版前言

第一版前言

绪论	1
0-1 电机在国民经济中的作用	1
0-2 电机的分类	2
0-3 电机学课程性质及学习方法	2
0-4 电机学中常用的电工定律	3

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构	6
1-1 变压器的用途与分类	6
1-2 电力变压器的主要结构部件	7
1-3 变压器的发热与温升	9
1-4 变压器的额定数据	9
思考题	10
习题	10
第二章 变压器的运行分析	11
2-1 变压器各电磁量正方向	11
2-2 变压器空载运行	12
2-3 变压器负载运行	19
2-4 标么值	28
2-5 变压器参数的测定	30
2-6 变压器的运行性能	34
思考题	37
习题	38
第三章 三相变压器	43
3-1 概述	43
3-2 三相变压器的磁路系统	43
3-3 变压器的联结组标号	44
* 3-4 三相变压器空载运行电动势波形	51
3-5 变压器的并联运行	54
* 3-6 三相移相变压器	57
思考题	62
习题	63

第四章 三绕组变压器和自耦变压器	65
4-1 概述	65
4-2 三绕组变压器	65
4-3 自耦变压器	68
思考题	73
习题	73
*第五章 变压器过渡过程中的过电流现象	76
5-1 概述	76
5-2 过电流现象	76
思考题	81
习题	81

第二篇 直流电机

第六章 直流电机的用途、基本工作原理与结构	82
6-1 直流电机及其用途	82
6-2 直流电机的基本工作原理	82
6-3 直流电机的主要结构	86
思考题	91
习题	91
第七章 直流电机的磁路和电枢绕组	92
7-1 概述	92
7-2 直流电机的磁路和磁化特性	92
7-3 电枢绕组的一般知识	93
7-4 单叠绕组	95
* 7-5 单波绕组	97
* 7-6 其他型式电枢绕组简介	99
7-7 直流电机电枢绕组的感应电动势	100
7-8 直流电机电枢绕组的电磁转矩	102
思考题	103
习题	104
第八章 直流发电机	105
8-1 概述	105
8-2 直流发电机的运行原理	106
8-3 直流发电机的电枢反应	108
8-4 直流发电机的运行特性	111
思考题	116
习题	116
第九章 直流电动机	118
9-1 概述	118
9-2 直流电动机的运行原理	118

9-3 直流电动机的工作特性和机械特性	120
9-4 直流电动机的启动	124
9-5 直流电动机的调速	125
9-6 直流电动机的电磁制动	128
思考题	131
习题	131

第三篇 交流电机的绕组电动势和磁动势

第十章 交流电机的绕组和电动势	135
10-1 交流电机的工作原理,对绕组的基本要求	135
10-2 三相单层集中整距绕组	139
10-3 绕组的分布和短距	147
10-4 三相双层分布短距绕组	151
10-5 齿谐波电动势、分数槽绕组简介	153
思考题	157
习题	158
第十一章 交流电枢绕组的磁动势	162
11-1 单层集中整距绕组的一相磁动势	162
11-2 单层集中整距绕组的三相磁动势	168
11-3 三相双层分布短距绕组的磁动势	173
* 11-4 椭圆形磁动势	176
思考题	177
习题	178

第四篇 同步电机

第十二章 同步电机的基本类型与结构	180
12-1 同步电机的用途	180
12-2 同步电机的基本类型与结构	181
思考题	184
习题	184
第十三章 同步电机的基本电磁关系	185
13-1 同步发电机的空载运行	185
13-2 对称负载时的电枢反应	190
13-3 隐极同步发电机的电动势相量图	193
13-4 凸极同步发电机的双反应理论及电动势相量图	198
思考题	202
习题	202
第十四章 同步发电机的运行特性	206
14-1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定	206
14-2 同步发电机零功率因数负载特性及普梯尔电抗的测定	209

14-3	同步发电机的外特性和调整特性	211
* 14-4	转差法和取出转子法求参数	212
	思考题	214
	习题	214
第十五章	同步发电机的并联运行	217
15-1	概述	217
15-2	并联合闸的条件与方法	218
15-3	同步发电机并联运行的理论基础	222
15-4	有功功率的调节和静态稳定	225
15-5	并联运行时无功功率的调节——V形曲线	231
	思考题	233
	习题	233
第十六章	同步电动机	237
16-1	概述	237
16-2	同步电动机的运行原理	237
16-3	同步电动机的启动	243
	思考题	244
	习题	245
* 第十七章	同步电机的非正常运行	247
17-1	概述	247
17-2	不对称运行的相序方程和等效电路	248
17-3	几种不对称稳态短路的分析	251
17-4	负序和零序参数的测定	254
17-5	不对称运行对同步电机的影响	255
17-6	超导体闭合回路磁链守恒定则	256
17-7	同步发电机空载时三相突然短路的分析	257
17-8	突然短路与同步电机及电力系统的关系	265
	思考题	266
	习题	267

第五篇 异步电机

第十八章	三相异步电动机的结构和基本工作原理	269
18-1	异步电动机的用途与分类	269
18-2	三相异步电动机的结构	269
18-3	三相异步电动机的额定值	271
18-4	三相异步电动机的简单工作原理	271
	思考题	273
	习题	273
第十九章	三相异步电动机的运行原理	274
19-1	三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	274

19-2	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	279
19-3	三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	285
	思考题	291
	习题	292
第二十章	三相异步电动机的功率、转矩与运行性能	296
20-1	三相异步电动机的功率与转矩关系	296
20-2	三相异步电动机的机械特性	298
20-3	三相异步电动机的工作特性	304
20-4	三相异步电动机参数的测定	306
	思考题	308
	习题	309
第二十一章	三相异步电动机的启动	311
21-1	三相异步电动机直接启动	311
21-2	三相鼠笼型异步电动机降压启动	312
* 21-3	高启动转矩的三相鼠笼型异步电动机	315
21-4	三相绕线型异步电动机的启动	317
	思考题	318
	习题	319
第二十二章	三相异步电动机的调速	320
22-1	概述	320
22-2	三相鼠笼型异步电动机改变定子电压调速	320
22-3	转子回路串接电阻调速	321
22-4	变极调速	322
22-5	变频调速	323
* 22-6	交流电机矢量控制基本概念	325
* 22-7	鼠笼型异步电动机的转矩直接控制	329
	思考题	336
	习题	336
* 第二十三章	三相异步电机的其他运行方式	337
23-1	三相异步发电机	337
23-2	感应调压器	338
	思考题	340
	习题	340

* 第六篇 特种电机

第二十四章	自控式同步电动机	342
24-1	概述	342
24-2	交直交自控式同步电动机的工作原理	342
24-3	转子位置检测器	345
24-4	交直交自控式同步电动机的运行性能	346

24-5 交交变频同步电动机的工作原理	349
思考题	351
第二十五章 永磁电机	353
25-1 概述	353
25-2 永磁磁路的磁化特性	353
25-3 永磁磁路中电枢反应的影响	356
25-4 永磁材料和永磁电机结构简介	357
25-5 永磁无刷直流电动机	358
思考题	362
第二十六章 绕线型双馈异步电动机	363
26-1 双馈电动机的特点	363
26-2 双馈电机转子电流及功率	366
26-3 双馈电机在各种运行状态的功率流动关系	366
26-4 双馈异步电动机调速系统的组成	369
思考题	370
第二十七章 开关磁阻电机调速系统	371
27-1 开关磁阻电机基本运行原理	371
27-2 开关磁阻电机的电磁转矩	372
27-3 开关磁阻电机调速系统	374
思考题	376
参考文献	377

绪 论

0-1 电机在国民经济中的作用

现代社会中，电能是使用最广泛的一种能源。在电能的生产、输送和使用等方面，电机起着重要的作用。

电机主要包括发电机、变压器和电动机等类型。发电机可把机械能转换为电能，主要用于生产电能的发电厂。在火电厂、水电厂和核电厂中，水轮机、汽轮机带动发电机，把燃料烧的热能、水流的机械能或原子核裂变的原子能都转变为电能。发电机发出的电压一般为10.5~20kV，为了减少远距离输电中的能量损失，应采用高压输电，输电电压为110kV、220kV、330kV、500kV或更高。把发电机发出的电压升高到输电电压是由变压器完成的。高压输电线将电能输送到各个用电区，由于各种用电设备如电动机、电炉、电灯等需要不同的低电压，例如6kV、1kV、380V、220V，因此再由变压器把高电压降为所需的低电压。

各种用电设备统称为负载。在电能的生产、输送、分配、消费中的发电机、变压器、电力线路、负载等联在一起构成统一的整体，这就是电力系统。电力系统中接有很多发电厂的发电机，每个发电机都向系统提供电能；电力系统中接有大量的、各式各样的负载，每个负载都从系统中取用电能。电力系统是一个十分庞大又十分复杂的系统，发电机与变压器则是电力系统中最重要设备。

电动机将电能转换为机械能，用来驱动各种用途的生产机械。机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻纺工业、化学工业及其他各工矿企业中，广泛地应用各种电动机。例如用电动机拖动各种机床、轧钢机、电铲、卷扬机、纺织机、造纸机、搅拌机、压缩机、鼓风机等生产机械。

在交通运输中，铁道机车和城市电车是由牵引电机拖动的；在航运和航空中，使用船舶电机和航空电机。

在农业生产方面，电力排灌设备、打谷机、碾米机、榨油机、饲料粉碎机等都由电动机拖动。

在国防、文教、医疗及日常生活中，也广泛应用各种小功率电机和微型电机。随着国民经济的发展，工业生产自动化水平不断提高，各种高科技领域如计算机、通信、人造卫星等行业也广泛地应用各种控制电机。

20世纪七八十年代以来，由于大功率电力电子器件以及微电子技术、微型计算机技术的一系列进展促进了交流调速技术的发展，已经生产出多种电机交流调速系统，不仅提高了生产机械的性能，而且节省了大量电能。

随着现代社会的发展，电力和电机工业在国民经济中仍将起着重要作用，并将得到更大的发展。

0-2 电机的分类

电机在各个领域内都得到广泛的应用，种类繁多，性能各异，分类方法也很多。主要有两种常用的分类方法。

从能量传递、转换的功能及用途来分，电机有下列几类：

- (1) 变压器。主要是改变交流电的电压，也有改变相数、阻抗及相位的。
- (2) 发电机。把机械能转换为电能。
- (3) 电动机。把电能转换为机械能。
- (4) 控制电机。作为自动控制系统的控制元件。

这一种分类方法中，电动机与发电机的功能不同，用途也不一样，但从运行原理上看，电动机运行和发电机运行不过是电机的两种运行状态，它们之间可逆，而且电机还可以运行于其他的状态。

另一种分类方法是按照电机的结构特点及电源性质分类，电机主要有以下几类：

- (1) 变压器。属于静止的不旋转设备。
- (2) 旋转电机。包括直流电机和交流电机，交流电机中因结构不同又分为同步电机和异步电机。

直流电机——电源为直流电的电机。

交流同步电机——交流电机的一种，运行中转速恒为同步转速。电力系统中的发电机都是同步电机。

交流异步电机——也是一种交流电机，运行中转速不为同步转速。异步电机主要用于电动机。

还有其他分类方法，但不论哪种方法都不是绝对的。

本教材按照变压器、直流电机、同步电机、异步电机的顺序分别进行阐述。从具体电机入手，分析其主要原理，使初学者易于掌握。

0-3 电机学课程性质及学习方法

电机学是电气工程及其自动化等专业的主要技术基础理论课，电机学将系统地阐述变压器、直流电机、同步电机和异步电机的基本电磁关系、分析方法、运行性能、各种运行方式等内容，为进一步学习以上各有关专业的专业课程打下坚实的理论基础。本课程的先修课程有高等数学、物理、电路及磁路等。

电机学与物理、电路及磁路等课程的性质有很多不同之处。

(1) 电机学是基础理论课，又带有专业性。电机学具体分析各种类型电机，比较实际，不像电路及磁路课中分析的电阻、电感、电容电路不代表具体的电器设备。

(2) 电机学通过对具体电机的分析阐述基本电磁规律，具有复杂性和综合性的特点。在电机中，各种电、磁、力、热等方面的物理定律同时在一台电机上起作用，相互制约，必须综合考虑。

根据电机学课程的性质，在学习方法上要掌握以下几点：

- (1) 理论联系实际。首先学好电机的基本理论，掌握电磁规律，加深对物理概念的理

解. 对具体电机结构也要有一定了解, 否则不可能深入掌握理论.

(2) 重视学习能力的培养. 从具体电机入手掌握分析电机理论的工具, 学习分析电机理论问题的方法并能灵活应用. 重视数学计算, 提高定量计算的能力.

(3) 抓主要矛盾, 培养工程观点. 在分析复杂的实际问题中, 常常需要忽略一些次要因素, 抓主要矛盾加以解决, 这样所得的结果在工程应用上已经足够正确. 在某种条件下的次要因素, 在另一条件下又可能成为有决定影响的主要因素, 要根据研究的问题及条件而变.

(4) 重视试验, 培养动手能力. 通过电机学实验, 打好强电实验的基本功, 为专业课程的实验打好基础.

0-4 电机学中常用的电工定律

1. 电路定律

1) 基尔霍夫电流定律

在电路任意一个节点处, 电流的代数和恒等于零.

$$\sum i = 0$$

对于正弦交流电路, 则有

$$\sum I = 0$$

本定律也可表达为流出节点的电流等于流入该节点的电流, 这就是电流的连续性.

2) 基尔霍夫电压定律

电路中任一回路内各段电压的代数和恒等于零.

$$\sum u = 0$$

对于正弦交流电路, 则有

$$\sum \dot{U} = 0$$

亦可表达为任一电回路电压降的代数和等于电动势的代数和.

$$\sum u = \sum e$$

对于正弦交流电路, 则有

$$\sum \dot{U} = \sum \dot{E}$$

如图 0-1 电路, 可选定一个环绕回路的方向, 电压降或电动势如果与环绕方向一致时取正号, 相反时取负号. 按照上述方程式电压降之和等于电动势之和, 对图 0-1 电路可列出如下电路方程:

$$U - IR = E$$

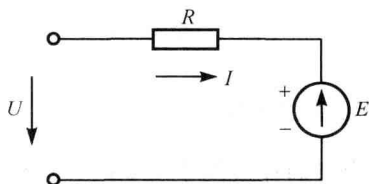


图 0-1 基本霍夫电压定律

2. 磁路定律

1) 磁路的欧姆定律

磁路中通过的磁通等于磁路的磁动势除以磁路的磁阻。即

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

F 是作用在磁路上的磁动势。若磁路上有多个线圈共同产生磁动势，则磁动势为

$$F = \sum N \cdot i$$

其中，磁路磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ ，亦即磁阻与磁路长度 l 成正比，与磁路的磁导率 μ 及磁路截面积 S 成反比。电路的串并联规律同样可以应用。若磁路由 n 段磁路串联构成，则总的磁路磁阻 $R_m = R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mn}$ 。

2) 磁路的节点定律

磁路的节点上，磁通的代数和等于零，即

$$\sum \Phi = 0$$

这是由磁通的连续性原理得出的。若 Φ 按正弦变化，则有

$$\sum \dot{\Phi} = 0$$

3) 全电流定律（安培环路定律）

磁场中沿任意一个闭合环路磁场强度的线积分等于穿过这个环路所有电流的代数和。即

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = \sum N \cdot i$$

这一定律运用到电机、变压器中，如磁路不是同一种材料构成时，可以将磁回路按材料及截面不同分成 n 个磁路段，全电流定律写成

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot l_k = \sum I = \sum N \cdot i$$

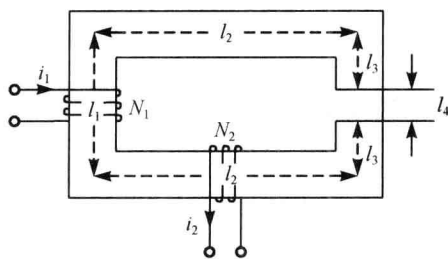


图 0-2 全电流定律

图 0-2 中磁路上绕了两个线圈，其匝数分别为 N_1 和 N_2 ，通过电流分别为 i_1 和 i_2 ，磁路则由五段铁心和一段气隙组成。按全电流定律，沿铁心磁路（如果设定磁路积分方向为顺时针方向）作磁场强度的闭合积分。可列出公式

$$H_1 l_1 + 2H_2 l_2 + 2H_3 l_3 + H_4 l_4 = N_1 i_1 - N_2 i_2$$

3. 电磁感应定律

当磁通在线圈中交变时，产生变压器电动势，如图 0-3 所示，如规定电动势正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则，用公式

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

当磁通与导体有相对运动而产生切割电动势时，用公式

$$e = Blv$$

切割电动势的方向用右手定则确定，如图 0-4 所示。

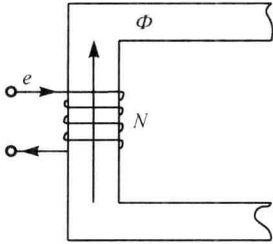


图 0-3 电磁感应定律

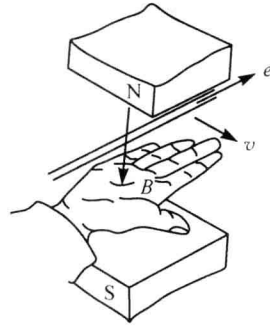


图 0-4 确定切割电动势方向的右手定则

4. 电磁力定律

载流导体在磁场中受力，用公式

$$f = Blv$$

导体受电磁力的方向用左手定则确定，如图 0-5 所示。

5. 能量守恒定律

电机、变压器在能量传递、转换过程中，应符合能量守恒定律：

$$\text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{内部损耗}$$

磁路和电路有一定的相似性，为了更好地理解，表 0-1 列出了对应的物理量和有关定律。

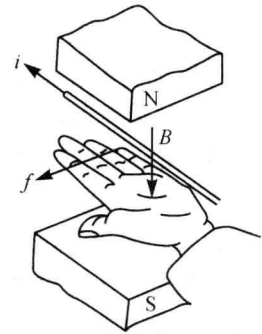


图 0-5 确定载流导体受力方向的左手定则

表 0-1 磁路和电路的比较

电 路	磁 路
电流 I [A]	磁通 Φ [Wb]
电流密度 J [A/m^2]	磁通密度 B [$T=Wb/m^2$]
电动势 E [V]	磁动势 F [A]
电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$ [Ω]	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ [$1/H$]
电导 $G = \frac{l}{R}$ [S]	磁导 $\Delta_m = \frac{1}{R_m}$ [H]
基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$	磁路节点定律 $\sum \Phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum u = \sum e$	全电流定律 $\sum H \cdot l = \sum N \cdot i$
电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{F}{R_m}$