

DESIGN PRINCIPLE OF
ELECTROMAGNETIC DEVICE

电磁装置 设计原理

李朗如 陈乔夫 周理兵 编著

非外借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DESIGN PRINCIPLE OF
ELECTROMAGNETIC DEVICE

电磁装置 设计原理

李朗如 陈乔夫 周理兵 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是一本关于电磁装置设计基本原理的教材,属于“电气工程及其自动化”一级学科强电类、工学(工程学)门类中的专业课程范畴。本书主要介绍由电与磁及其相互作用而构成的电磁装置一般性问题的分析方法,在阐述电磁装置设计基本原理的基础上,选择几种典型的产品设计过程与方法为例做介绍,如变压器、电感器、感应电机、永磁电机及开关永磁操作机构等,给读者提供设计方法的基本知识。为了适应读者进行现代设计方法数值计算的需要,本书还介绍了磁场数值计算基本原理和软件使用方法与算例。

本书可作为高等学校电气工程类核心专业课程教材使用,也可作为本专业的研究生参考书,读者需具备电路理论、电磁场、电机学等学科基础理论知识。本书也可供从事电磁装置设计、运行和研究的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电磁装置设计原理 / 李朗如, 陈乔夫, 周理兵编著. —北京: 中国电力出版社, 2017.10
ISBN 978-7-5198-0852-5

I. ①电… II. ①李… ②陈… ③周… III. ①电磁感应-电气设备-设计 IV. ①O441.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 148127 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 周 娟 杨淑玲

责任校对: 李 楠

装帧设计: 王红柳

责任印制: 杨晓东

印 刷: 北京天宇星印刷厂

版 次: 2017 年 10 月第 1 版

印 次: 2017 年 10 月北京第 1 次印刷

开 本: 787mm×1092mm 16 开本

印 张: 18.75

字 数: 455 千字

定 价: 58.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

电气科学与工程学科是一门传统学科,属于强电类,传统上曾经内设多个二级学科,如电力系统及自动化、电机与电器、高电压工程、电力电子技术、电磁测量技术、理论电工等。随着我国的对外开放与教育的国际化,1997年教育部重新修订了我国普通高等学校的本科专业目录,取消了原来的二级学科设置,而按一级学科电气工程及其自动化招生与培养人才,即按宽口径“通才教育”模式培养,设置相应的课程,以适应社会经济发展对人才的需求。

电气工程及其自动化专业属于工学(工程学)门类中电气工程的强电类专业,专业基础知识除了电路理论、电磁场、电机学等必不可少的学科基础理论知识之外,各学校淡化了相应的有关二级学科的专业课程,原来二级学科的核心专业课程难以适应现在宽口径人才培养需要。然而,在电气工程领域的实际应用中,广泛存在着由电与磁及其相互作用的基本原理,为实际应用而构成的各种系统或装置(元件或器件),作为电气工程及其自动化专业的大学本科毕业生,应该具备对此类装置构成与设计原理的基本知识。为此,我们提出并设置了一门具有通用性的课程《电磁装置设计原理》,作为专业选修课程。并于2002年9月编写了讲义,在校内试用,至今已修订了五稿,选修的学生比较踊跃,这样可以扩大学生的专业知识面。

本书共分9章,第1章定义电磁装置,有广义的,也有狭义的,有传统的,也有现代的。第2章讨论电磁装置设计的一般问题,涉及机电系统的能量关系,电磁力的广义计算方法,如何决定装置的几何尺寸,与装置的内功率有什么关系等。第3章磁场、磁路及计算方法,是设计电磁相互作用构成装置的理论基础。第4章变压器设计计算,现代变压器品种较多,本章主要讨论中小功率干式变压器的设计计算方法。第5章电感器设计计算,主要讨论带铁心电感器的设计计算方法。第6章感应电动机的电磁设计,这是一种旋转电机,因为电机的类型很多,它的设计涉及内容面较宽,有电磁的、机械结构的、力学的、发热与散热的、流体的等,本章主要讨论感应电机的电磁设计计算方法,这也是设计各类电机的基础。第7章永磁同步电动机电磁设计,这也是一种旋转电机,由于其励磁源采用永久磁体材料,其计算方法有特殊性,学生学习与掌握了本章内容后,对于进一步了解与开展永磁励磁的其他装置的设计与运用,可以打下一个基础。第8章永磁操作机构及其特性计算,这是现代永磁材料用在开关操作机构的新发展,主要讨论有永磁和电励磁情况下,静态与动态磁路的计算方法。第9章电磁装置磁场数值计算的基本原理和方法。在电磁装置设计的历史进程中,有两种设计方法:一种是基于“路”理论的方法,这是现在仍然沿用的传统设计方法;另一种是基于“场”理论的方法,这是伴随着现代电子技术和数值计算技术的发展而出现的新设计方法,可以提高设计计算精度,而且现代电磁装置的设计已进入“全方位”设计,尤其对于大型的、系统中的关键装置,必须进行电磁的、热传导的、流体的(通风冷却)以及力学的(强度、刚度和振动问题)综合物理场的稳态和瞬态设计计算。现在的学生在学习和研究中,已广泛应用数值计算的商用软件,如果对软件依据的基本原理和处理方法没有一个基本认知,对计

算结果的正确与否，可能会出现茫然无法判定。本章的目的在于给学生提供对数值计算基本原理的认识，提高其对运用计算软件和计算结果的判断能力。

由于电磁装置的应用范围宽广，种类繁多，特性要求各异，本书只是在阐述电磁装置设计基本原理的基础上，选择几种典型的产品设计过程与方法为例做介绍，给学生提供设计方法的基本入门知识，至于准备从事有关电磁装置设计与运用的专业工作者，则在此基础上需进一步参考有关专业书籍。

本书的编写分工为：第 1、第 2、第 7 和第 9 章由李朗如执笔，第 3、第 4 和第 5 章由陈乔夫完成，李朗如进行了部分修整，第 6、第 8 章由周理兵执笔，全书由李朗如统稿。

本书在编写过程中，王晋博士提供了第 9 章磁场数值计算的程序使用方法说明与算例。在本书前期讲义的使用过程中，孙建波博士和本校其他教师提出了许多宝贵意见。马志云教授对本书进行了详细校核。在此一并表示感谢，同时感谢电磁工程与新技术国家重点实验室对本书出版的支持。

由于我们水平有限，错误在所难免，希望读者不吝指正。

编 者

2017 年 9 月于喻家山

附注：

本书作者在此声明：本书在作为讲义教材使用过程中，部分章节被 2011 年 2 月由其他人编著的《变压器与电感器设计方法及应用实例》(ISBN9787115244772)一书抄袭侵权，双方通过法律诉讼，侵权方承认了侵权事实，并达成了停止其侵权行为、赔礼道歉、赔偿损失的和解协议。

目 录

前言

第1章 绪论	1	4.1.1 变压器的定额	43
1.1 课程设置的意义与电磁装置的定义	1	4.1.2 铁心结构型式	44
1.1.1 课程设置的意义	1	4.1.3 绕组型式	45
1.1.2 电磁装置的定义	1	4.2 变压器主要尺寸的基本关系式	47
1.2 装置与系统	2	4.3 主要尺寸的确定	49
1.3 电磁装置的设计计算方法	3	4.4 铁心设计	49
第2章 电磁装置设计的一般问题	5	4.5 绕组设计	50
2.1 概述	5	4.5.1 导线和电流密度选择	50
2.2 机电系统的能量关系	5	4.5.2 绕组并联根数的选择	52
2.3 耦合磁场中的储能和余能	9	4.5.3 绕组轴向、辐向尺寸计算	58
2.4 耦合系统中的广义电磁力	12	4.6 变压器的主绝缘和纵绝缘	62
2.5 电磁功率与有效部分几何尺寸之间的关系	16	4.7 变压器绝缘半径计算	63
2.6 能量转换中的损耗与效率	20	4.8 变压器漏电抗计算	64
2.6.1 基本铁损耗	20	4.8.1 同心式绕组的漏电抗计算	64
2.6.2 基本铜损耗	22	4.8.2 对称交错式绕组漏电抗计算	67
2.7 发热计算基础	22	4.8.3 多层绕组的漏抗	69
2.7.1 概述	22	4.8.4 磁场解析法推导罗果夫斯基系数	71
2.7.2 均质物体的发热过程	23	4.9 变压器的性能计算	74
2.7.3 等效热路法	24	4.9.1 铁心重量及空载损耗	74
第3章 磁场、磁路及计算方法	27	4.9.2 铁耗计算	74
3.1 磁场的基本概念和基本定律	27	4.9.3 空载电流计算	75
3.2 电磁装置的磁场与磁路	30	4.9.4 负载损耗	76
3.3 磁路基本定律	31	4.10 温升计算	77
3.4 气隙磁导计算	35	4.10.1 圆筒式绕组温升计算	78
3.4.1 单独磁体的磁导	35	4.10.2 饼式绕组温升计算	79
3.4.2 带气隙铁心柱间的气隙磁导	37	4.11 配电变压器设计实例	81
第4章 变压器设计计算	42	4.12 作业	84
4.1 变压器设计的一般问题	42	第5章 电感器设计计算	86
		5.1 概述	86
		5.2 铁心电感器的电感计算	87

5.2.1	磁路法计算主电抗·····	87	6.3.1	定子槽数及定、转子槽配合·····	136
5.2.2	轴对称磁场解析法计算主电抗·····	90	6.3.2	定子绕组设计·····	138
5.2.3	磁路法分析计算漏磁场漏电抗·····	95	6.4	定、转子铁心槽形及槽尺寸的确定·····	141
5.2.4	饱和时铁心电感器的电感计算·····	101	6.4.1	定子槽形及槽尺寸·····	141
5.3	铁心电感器的电磁力·····	104	6.4.2	转子槽形及槽尺寸·····	142
5.3.1	铁心电感器线圈上的作用力的方向·····	104	6.5	感应电动机磁路计算·····	144
5.3.2	铁心电感器线圈上作用力的计算·····	105	6.5.1	每极磁通·····	145
5.3.3	铁心电抗器的设计计算程序及算例·····	107	6.5.2	磁通密度和磁位降计算·····	145
5.4	空心电感器的设计与计算·····	116	6.5.3	励磁电流计算·····	149
5.4.1	空心电感器的自感计算·····	116	6.6	参数计算·····	149
5.4.2	空心电感器的自感计算·····	119	6.6.1	电阻计算·····	149
5.4.3	空心电感器的自感与互感计算·····	119	6.6.2	电抗计算·····	151
5.4.4	空心电感器线圈上作用力的方向·····	123	6.7	运行性能计算·····	161
5.4.5	空心电感器线圈上电磁力的计算·····	123	6.7.1	定、转子额定电流·····	161
5.4.6	空心电感器线圈的机械应力·····	125	6.7.2	额定功率因数·····	162
5.5	积分法计算空心线圈磁场·····	125	6.7.3	额定效率·····	163
第6章	感应电动机的电磁设计·····	130	6.7.4	额定转差率·····	163
6.1	概述·····	130	6.7.5	最大转矩·····	164
6.1.1	设计过程及内容·····	130	6.8	起动性能计算·····	164
6.1.2	我国感应电动机分类和主要系列·····	130	6.8.1	漏磁路饱和效应对漏抗的影响·····	164
6.1.3	感应电动机的主要性能指标和额定数据·····	132	6.8.2	挤流效应及其对转子参数的影响·····	167
6.2	主要尺寸和电磁负荷的选择·····	133	6.9	中小型三相感应电动机电磁设计程序及算例·····	168
6.2.1	主要尺寸及其基本关系·····	133	6.9.1	基本数据·····	168
6.2.2	电磁负荷的选择·····	133	6.9.2	磁路计算·····	171
6.2.3	主要尺寸比的选择·····	134	6.9.3	参数计算·····	172
6.2.4	主要尺寸的确定·····	135	6.9.4	运行性能计算·····	175
6.2.5	气隙长度的确定·····	136	6.9.5	起动计算·····	177
6.3	定、转子槽数选配与绕组设计·····	136	6.10	作业·····	179
			第7章	永磁同步电动机电磁设计·····	180
			7.1	概述·····	180
			7.2	永磁电机用永磁材料性能的基本要求·····	181
			7.3	永磁同步电动机的基本结构型式·····	185

7.4 永磁电机的主要尺寸确定	186
7.5 永磁电机的磁路计算	190
7.5.1 永磁体激励的主磁路计算 原理	190
7.5.2 混合励磁磁路的计算方法	194
7.5.3 漏磁导计算基本方法	198
7.6 永磁同步电动机的电磁设计计算 程序及其说明与算例	199
7.6.1 基本数据	200
7.6.2 空载磁路计算	203
7.6.3 负载运行行为计算	210
7.6.4 损耗与效率	215
7.6.5 电负荷及过载能力计算	218
7.6.6 有效材料计算	219
7.6.7 起动特性计算	219
7.7 作业	225
第 8 章 永磁操作机构及其特性计算	226
8.1 永磁机构的结构及工作原理	226
8.2 永磁机构的等效磁路及其计算	227
8.3 永磁机构的电磁力特性	229
8.4 永磁机构操作过程的动态特性	230
8.5 作业	232
第 9 章 电磁装置磁场数值计算的基本 原理和方法	233

9.1 概述	233
9.2 电磁场的基本方程	234
9.3 求解电磁场边值问题的有限元法	236
9.3.1 定解问题与相关泛函的极值 问题	238
9.3.2 求解域的单元剖分	238
9.3.3 单元内近似解的选取—— 构造单元的插值函数	239
9.3.4 变分问题的离散化处理—— 单元分析	241
9.3.5 总体合成	244
9.4 求解电磁场边值问题的其他数值 方法简介	246
9.5 有限元数值计算软件应用简介及 实例	249
9.5.1 建立模型	249
9.5.2 赋予材料属性	250
9.5.3 施加边界条件和励磁	250
9.5.4 设定参数与求解	251
9.5.5 后处理	252
9.5.6 永磁同步电机二维瞬态磁场 仿真实例	252
附录	268
参考文献	291

第1章 绪 论

1.1 课程设置的意義与电磁装置的定义

1.1.1 课程设置的意義

1. 教学改革专业调整后的结果

随着我国市场经济发展与对外开放,1997 年教育部重新修订了我国普通高等学校的本科专业目录,取消了原来的二级学科设置,而按一级学科电气工程及其自动化招生与培养人才,即按“通才教育”模式培养,以适应社会主义市场经济发展对人才的需求。只是在此大口径专业下,研究生的专业设置二级学科,即电机与电器、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电力电子与电力传动、电工理论与新技术、脉冲功率与等离子体、电气信息检测技术等。与此相应地调整了课程设置,取消了一些以前为适应二级学科需要的专业课程,而从现在我国国民经济结构与发展看,本专业的本科毕业学生掌握一些专业课程知识,对于适应今后的工作和就业方面均有所裨益,为此设置本课程以供学生选修。

2. 专业知识结构之必需

电气工程及其自动化专业属于工学(工程学)门类中电气工程类的强电类专业,专业基础知识除了电路理论、电磁学是必不可少的基础理论知识之外,在电气工程领域,广泛存在由电与磁两方面的基本原理实际应用而构成的系统或装置(元件或器件),作为本专业的大学本科毕业生必须具备对此类装置构成与设计原理的基本知识,否则,学生对于实际物理装置的认识只是电路中的一个参数符号,这个参数与哪些因素(如几何尺寸、材料特性等)有关,对实体装置的认知、参数变化在系统运行中的影响,缺乏从理论上认识,在今后的工作与进一步学习中,有一定的局限性。

1.1.2 电磁装置的定义

广义而言,以电的、磁的或电磁的相互作用原理为工作基础的进行能量特性变换的器件或装置,统称为电磁装置。例如,静电式(静电发电机或电动机)、光电式(光电池)、热电式(温差电池)、压电式(超声波电机)、磁电式、电磁式(电气仪表、发电机、电动机、开关动作机构)等。本课程讨论的是以电磁相互作用为工作基础而构成的器件、装置或机器,统称为电磁装置(Electromagnetic Device)。也就是说,这样装置的基本工作原理是以电磁相互作用的基本定律为依据,所以,本课程讨论的仅限于电磁式的装置。其基本原理是以电磁学的两个基本定律为依据,即电磁感应定律(法拉第)——发电机定则,右手定律;电磁力

定律（安培）——电动机定则，左手定律。

电磁装置种类繁多，用途广泛。按发展趋势分有传统的和现代的。传统的电磁装置包括电磁机构、旋转电机、变压器、电感器、电磁铁等，现代的电磁装置包括各种加速器磁体、核磁共振装置磁体、惯性磁约束核聚变装置（Tokamak）磁体、电磁成形、电磁轨道炮（超高速发射技术）、电磁推进与弹射装置等。按功率或能量大小分有巨型的和微型的。巨型的电磁装置包括兆瓦级（MW）、兆焦耳级（MJ），微型的电磁装置包括毫瓦级（mW）、毫焦耳级（mJ）。按励磁方式分有电磁式和永磁式。电磁式装置的工作磁场必须通过线圈内的电流建立，永磁式电磁装置是通过永久磁体建立工作磁场。按电能特性变换形式分有能量型和信号型。能量型电磁装置是以能量形态变换为主，发电机、电动机等。信号型电磁装置是以信号变换为主，直线位移量 x 、转角量 θ 等。

本课程研究范畴是以传统为主，其分析方法适用于现代的发展。两种励磁方式和两种变换形式均研究。

1.2 装置与系统

这里所指的系统有两层意义：所研究的装置与其外部器件相连接所构成的关系成为一种系统，如图 1-1 所示。任何一种电磁装置不可能是孤立地与外部无联系，它一方面在电气上与外电路连接，提供电信号与能量，如电压、电流、电功率等；另一方面机械上与外部连接，提供机械信号，如机械力、转速、转矩等。电磁装置内部器件各部分的关系



图 1-1 电磁装置与外部系统构成关系

也构成一个系统，如图 1-2 所示。

电磁装置无论用作能量变换装置或是信号变换器件，它运行于系统之中，它一方面与外部系统联系，如电路系统、机械系统，其性能参数必须满足整体系统的要求；另一方面，从装置内部看，它是由多个子系统组成的，它本身即是由一个比较复杂系统而构成的装置。以旋转电机（发电机或是电动机）为例：

1. 磁场（路）系统

从路的观点看，建立能量变换所必需的耦合磁场工作区域，如电机内由气隙和铁心所构成的闭合磁路，也就是气隙和铁心内的磁场，这是电磁装置的核心部位。

2. 电路系统

感生电动势，连接外部电路，输入或输出电能的电枢。它是由若干导电煤质构成的线圈、绕组部分，一方面在交变的磁场中感应电动势，另一方面与外电路连接输入或输出电信号。电路和磁路这两部分组成电磁装置的中枢，通常一种电磁装置的设计均是从这两部分开始，称为电磁设计，它决定电磁装置中枢部分的几何尺寸大小和基本电磁性能，再由此进行其他系统的设计。这两部分的设计理论依据是电和磁

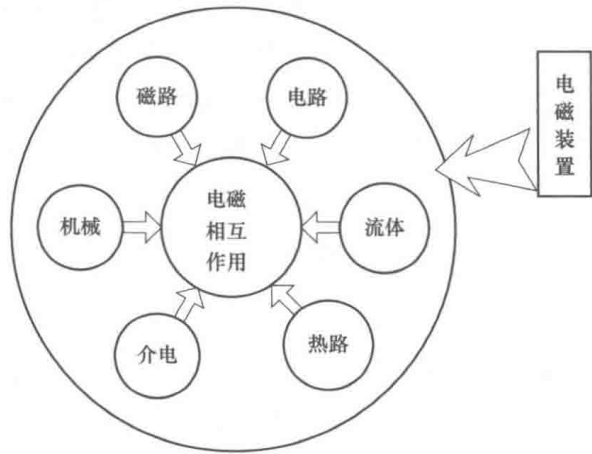


图 1-2 电磁装置内部系统构成关系

的基本定律和原理。

3. 机械系统

与外部机械连接、支撑,以及传递力、转矩所必需的构件。它包括电磁系统的静止和运动部分的机械支撑,必须承受着整个电磁装置的传递力、转矩的作用,同时还可能兼作其他用途,如散热、导流、封闭等。此部分的设计理论依据主要是力学的基本定律和原理,重要和关键的装置设计可能涉及高等力学原理,如高等材料力学、运动学和动力学。同时可能要考虑与其他系统用途的综合设计,如流体、热传导等。

4. 介电系统

带电部分与非带电部分之间的隔离系统,即由绝缘结构形成的隔离系统。这是电磁装置中特有的部分,尤其对于高电压装置特别重要。此部分的设计理论依据主要是静电学、材料学等。

5. 热路系统

由装置内部损耗引起的发热、传热与散热所必需的热交换系统。由装置内的电路、磁路产生的损耗,运动部件摩擦产生的损耗,均会转变为热能,必须考虑热的传递路径以及其散热问题,否则会引起装置内部温度升高,破坏绝缘,导致装置损坏。此部分的设计依据是传热学、材料学。

6. 流体路径系统

带走电磁装置内部热量以保证电机正常运行的冷却系统。此部分设计是与以上各部分的设计综合进行。如电路与磁路的设计必须考虑冷却方式,比如是内冷还是外冷,用什么冷却介质,介质通道如何设计使冷却效率最好,设计的理论依据是流体力学。

上述各子系统构成电磁装置的示意如图 1-2 所示。

因此,要很好地进行电磁装置设计以满足大系统对装置性能参数指标的要求,必须充分考虑装置内各个子系统的内在联系以及它们之间的相互影响,必须了解与掌握它们的计算原理与方法。至于装置中哪一个系统是主要的取决于该装置的工作状态与环境,以及该装置在大系统中的作用。当然,由于本书集中研究以电磁相互作用为工作基础的装置(设备),电磁装置的关键(或核心)设计工作主要集中在电磁计算方面,即电路系统与磁路系统的设计计算原理与方法的研究。同时将概要地涉及其他系统设计的基本知识。

1.3 电磁装置的设计计算方法

电磁装置的设计计算方法可分为传统的和现代的。

传统的设计计算方法是基于等效“路”的计算方法,这是一种平均意义上的分段计算方法,或称为集中参数法。采用的原理就是广义欧姆定律。

(1) 电路。等效电路,用电阻、电感和电容即 R 、 L 、 C 集中参数描述装置中的电路参数,这些参数是通过装置的结构参数与材料性能参数计算获得的。

(2) 磁路。等效磁路,分段处理装置内磁场的分布不均匀性问题,将每段内的磁场视为均匀分布。

(3) 热路。等效热路,应用广义欧姆定律处理装置内的温升、热流与热阻之间的关系。

(4) 风(流体)路。等效风路,应用广义欧姆定律处理装置内的风压、流量与风阻之间的关系。

这种路的分析计算方法直观、普遍，但是一种近似处理方法，在一定条件下能满足工程设计要求，对设计工作者的专业技术水平要求不高。此种方法在现代设计计算方法出现与发展以前，在工程设计应用中发挥了重要作用，即使在现代设计手段非常先进的今天，基于等效“路”的计算方法在装置的初步设计和方案的优化选择仍然被采用，不失为一种很好的手段。

现代的设计方法是基于“场”的数值计算方法，由于计算机和计算技术的迅速发展，以前用等效路的计算方法无法解决或解决得不是很好的问题，现在可以用场的数值解法予以解决。这给电磁装置设计计算提供了一种新的手段与方法，它有较高的计算精度，可以从细微的角度考察与分析电磁物理量在所设计装置内的分布情况。但要将这种方法掌握得运用自如，要求设计工作者具有较高的专业知识、理论水平和技术水平。涉及装置内部各个子系统用“场”的方法设计计算时，用到以下各种数值计算方法：

（1）电磁场数值方法。取代等效磁路法，解决磁路法所无法解决的或解决得不好的问题，如三维问题和漏磁系数计算不准的问题。

（2）计算传热学方法。取代等效热路图方法，因为温度分布、热传导问题实质上是场的问题。

（3）计算流体学的方法。取代等效风路图方法，流体（空气、液体）在电机内的流动实质上也是场的问题。

（4）力学有限元法。取代经典的解析公式计算法，可得出机械构件在静态与动态情况下的力学参量的分布和模式。

“场一路”耦合计算方法：通常人们对带电磁装置（电机）的系统进行运行行为仿真时，将装置（电机）表示为一个电路元件，用集中参数代替，采用路的方法进行计算。而在装置（电机）中存在非线性、非正弦和涡流等现象时，系统的动态运行行为难以准确计算，尤其对于现代电子器件装置直接与电磁装置（电机）相连进行控制的系统，如机电一体化系统，如果将电路分析与电磁装置内的电磁场部分用数值分析结合起来，用耦合方法进行计算，将为该问题的解决提供了一条有效途径，这就是出现的一种新的计算方法——“场一路”耦合方法。现在的商用数值计算软件中，已逐步融入了多物理场的耦合计算方法。

第 2 章 电磁装置设计的一般问题

2.1 概述

电磁装置无论用作能量转换或是信号变换，均与系统能量相关联。电磁装置的设计必须从物理本质理解其中各种参数与能量之间的关系，比如电感参数、电磁力、装置的几何尺寸等。由于电磁装置与电气系统相关联，又有机械运动，必然与机械系统相关联，必须深入理解机械与电气两种不同系统之间如何发生联系的，以及指导它们的理论基础与分析方法是什么。本章从一般意义上用端点系统关系，阐明系统的能量关系，以及能量与各种参数的关系，如电气参数与能量的关系、电磁力与能量的关系；并阐明了设计装置从何处入手，推导出装置有效部分的几何尺寸与装置在能量变换中的电磁功率的关系式，仔细分析各种相互影响的电磁参量之间关系得出的结论，对设计装置有普遍指导意义。本章讨论了装置运行中的基本能量损耗，分析了电气损耗中的基本铁心损耗与基本铜耗，至于机械损耗的分析与计算涉及因数较多，比较复杂，通常在工程设计中采用半经验公式计算，对一定型式装置，待制成装置后进行试验确定。本章从一般物理概念上讨论了装置的发热规律，并用路的观念计算发热问题简易算法——等效热路法。

2.2 机电系统的能量关系

实际应用中的电磁装置，无论是用作能量转装置如电动机、发电机等，或是信号变换装置如电磁脱扣器、电磁阀门操作器、电磁测量器具等，这些装置一方面与外电路相连构成电路系统，另一方面又与机械系统相连，而电路与机械两系统之间则是通过电磁装置内存在电场或磁场耦合作用相联系，这样构成了带电磁耦合作用的机电系统，其中电磁场的耦合起到了关键性的核心作用，图 2-1 为电磁装置与外界系统联系的示意图。在分析与计算这种系统的运行行为时，电路系统用电路参数、变量以及电路方程描述，指导电路系统分析与计算的理论与方法是电路理论。描述机械系统的是力学参数、变量以及机械运动方程，其理论指导则是牛顿力学。而对机电耦合系统的描述则用到电磁场参数、变量和电磁场方程，处理的方法则用电磁场理论。当然，对场方程进行积分处理也可以将系统描述为集总参数的电路方程，采用能量法研究耦合过程则是简便而有效的方法。



图 2-1 电磁装置与电路及机械系统的联系

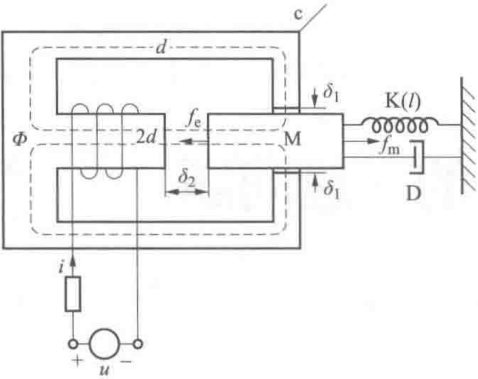


图 2-2 开关脱扣器用的电磁装置

图 2-2 为开关脱扣的电磁操作机构，在固定铁心上绕有 W 匝线圈，可动铁心 M 经弹簧 K 与开关的脱扣机构相连，当开关正常工作时，线圈内无电流，而当线圈加上电压信号有电流 i 流通后，由励磁磁动势 Wi 建立的磁通 Φ ，经由铁心和两个气隙 δ_1 与 δ_2 的路径闭合，在气隙 δ_2 中的磁场，将使可动铁心 M 受到电磁力 f_e 的作用，使之向 δ_2 减小的方向运动，从而拉伸弹簧 K ，脱扣机构动作，使开关断路（off）或合闸（on）。该装置的线圈与外电路相连构成电路系统，相应的电路系统的参数与变量为电压 u 、电流 i 和磁链 ψ 。其可动铁心与外面的弹簧和脱扣机构相连构成机械系统，系统参数与变量为位移 x 和力 f_m ，在装置内通过磁场（通电流后）耦合把两者联系起来，达到将电信号变换为机械位移量。这是一种简单的做直线运动的由电能变换为机械能的磁场耦合机电系统。

为了分析计算此种机电系统的运行行为、特性以及各参数之间的相互关系，必须用数学形式描述系统的物理特性。描述的方法可采用电磁场理论也可采用电路理论。尽管场的描述方式可以反映系统的本质，但在似稳状态条件下，人们已普遍适应于用集总参数的电路理论与方法分析问题。所以，这里仍沿用了电路理论的一般方法。线圈的电阻用一个纯电路元件 r 表示，该线圈的电感 L 仅与线圈单位电流所交链的磁链数大小和导磁介质特性有关。由于这是带可动铁心的线圈，如果不计铁心的饱和影响，其电感值为一线性函数，它是一个无损耗的磁场储能元件。

为了用路的方法分析问题，图 2-3 用端点特性表示图 2-2 装置的机电耦合系统，它具有一个电端口和一个机械端口，将损耗元件置于耦合系统之外（线圈电阻 r 和机械摩擦移在端点之外）。这样，磁场耦合系统成为无损耗系统，又称为保守系统。由于系统内无损耗，所以保守系统任何时候都满足能量守恒定律。于是系统的能量关系有

输入系统的电能+输入系统的机械能=磁场储能增量 (2-1)

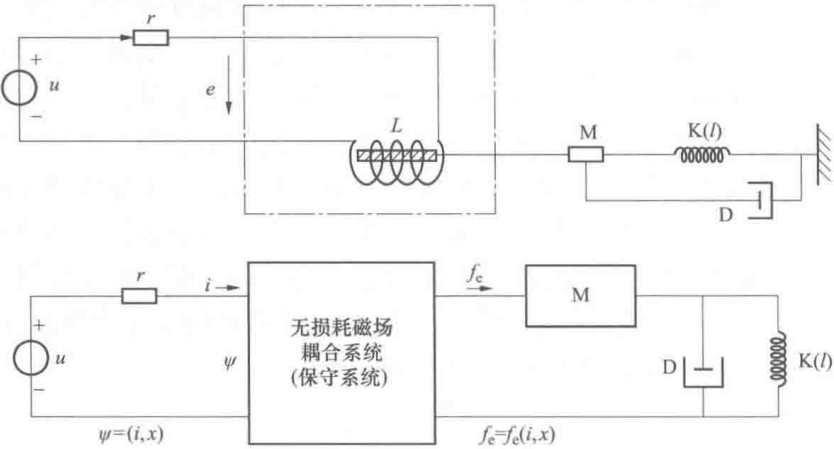


图 2-3 图 2-2 机电系统的端点系统表示

当电源电压为 u 时，在时间 dt 内，电源输入给系统的总电能为 $uidt$ ，消耗在电阻上的电能为 $i^2 r dt$ 。于是在 dt 时间内输入给磁场耦合系统的电能应为

$$dW_e = uidt - i^2 r dt = (u - ir)idt$$

由电路输入耦合场电能的同时, 磁场将发生变化, 则在线圈的两端, 也就是电路参数 L 的两端, 将产生感应电动势 e

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2-2)$$

式中, ψ 为线圈交链的磁链, $\psi = L(i, x)i$, 由基尔霍夫第二定律, 电端口的电路电压方程为

$$u = ir - e = ir + \frac{d\psi}{dt} \quad (2-3)$$

于是, 可得在 dt 时间内输入耦合场的电能为

$$dW_e = -eidt = id\psi \quad (2-4)$$

设在 dt 时间内, 由磁场产生的力 f_e 使可动铁心移动 dx 距离, 所做的功为输入的机械能, 有

$$dW_{mac} = -f_e dx \quad (2-5)$$

于是, 耦合场的储能增量

$$dW_m = dW_e + dW_{mac} = id\psi - f_e dx \quad (2-6)$$

设装置的可动部分固定, 无机械运动, 则输入给系统的电能全部转变为磁场的储能, 于是

$$dW_m = id\psi$$

式 (2-6) 表明, 系统内的磁链数 ψ 与 x 为独立变量, 当 ψ 和 x 变化到一定值时, 对式 (2-6) 进行积分, 即可计算总储能的变化量。于是, 有

$$W_m = \int id\psi - \int f_e dx \quad (2-7)$$

与此相应的电端点关系为

$$i = i(\psi, x) \quad (2-8)$$

机械端点关系为

$$f_e = f_e(\psi, x) \quad (2-9)$$

事实上, 耦合系统的自变量还可以有另一种选择, 即以 i, x 为独立变量, 这种选择更为方便, i, x 均为可测的实在量, 则此时电端点与机械端点关系分别表示为 $\psi = \psi(i, x)$, $f_e = f_e(i, x)$ 。式 (2-6) 所表达的能量守恒关系仍然成立, 即

$$dW_m = id\psi - f_e dx$$

由

$$d(\psi i) = id\psi + \psi di$$

即

$$id\psi = d(\psi i) - \psi di \quad (2-10)$$

于是有

$$dW_m = d(\psi i) - \psi di - f_e dx$$

即

$$d(\psi i) - dW_m = \psi di + f_e dx$$

令

$$dW'_m = d(\psi i) - dW_m \tag{2-11}$$

即

$$W'_m = \psi i - W_m \tag{2-12}$$

所以有

$$dW'_m = \psi di + f_c dx \tag{2-13}$$

$$W' = \int \psi di + \int f_c dx$$

式(2-13)是系统能量守恒的另一种表示方式，它是以 $\psi(i,x)$ 和 $W_m(i,x)$ 关系由式(2-12)定义的。函数 $W'_m(i,x)$ 称为余能 (Co-energy)。

以上研究的是以平移运动电磁装置为例，仅有一个电端口和一个机械端口的最简单系统，其结果可以推广到旋转运动和具有任意数目的电端与机械端口的系统。

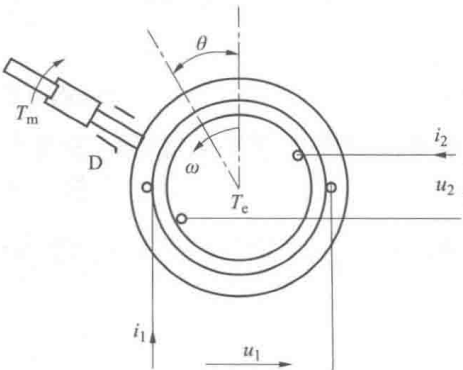


图 2-4 隐极电机模型

图 2-4 为一台隐极电机模型，根据电机的可逆原理，它既可以用作发电机也可以用作电动机。定子、转子均用高导磁材料制成，定子上有一套绕组，转子上也装有一套绕组（均用一个线圈表示），转子做旋转运动，工作时两套绕组内有电流流过，共同在定、转子之间的气隙中建立磁场。定子与转子绕组的磁通链和气隙磁场的储能随转子旋转位置的不同而变化，从而对转子产生旋转转矩，此转矩称为电磁转矩，以实现电能与机械能之间的转换。

当电机作电动机运行时，电能由两套绕组中的一套输入，一般由定子绕组输入，而另一套绕组（转子绕组）供给励磁，此时，电磁转矩为传动转矩，它克服转轴上的阻转矩而输出机械功。当电机作发电机运行时，能量流程则反向转换。

图 2-4 的电机模型可表示为机电耦合端点系统，如图 2-5 所示，它有两个电端口和一个机械端口，电端口和机械端口的损耗元件均置于系统之外。机械端口则认为旋转轴是理想刚性的，即弹簧系数为 $K=0$ ，定子与转子绕组轴线之间位移角 θ 替代平移运动的位移 x ，转矩 T_c 替换 f_c ，用定轴旋转的惯性矩 J 替代质量 M 。于是当选择 ψ 、 θ 为独立变量时，则有

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_1(\psi_1, \psi_2, \theta) \\ i_2 &= i_2(\psi_1, \psi_2, \theta) \end{aligned} \right\} \tag{2-14}$$

$$T_c = T_c(\psi_1, \psi_2, \theta) \tag{2-15}$$



图 2-5 图 2-4 机电耦合系统的端点表示

或选择 i 、 θ 为独立变量时，则有

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \psi_1(i_1, i_2, \theta) \\ \psi_2 &= \psi_2(i_1, i_2, \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

$$T_e = T_e(i_1, i_2, \theta) \quad (2-17)$$

仿照式(2-6), 耦合场的储能增量为

$$dW_m = dW_e - T_e d\theta$$

而 dt 时间输入耦合场的电能增量

$$dW_e = i_1 d\psi_1 + i_2 d\psi_2$$

于是

$$W_m = \int i_1 d\psi_1 + \int i_2 d\psi_2 - \int T_e d\theta \quad (2-18)$$

以上结果可以推广到 n 个电端口、 m 个机械端口时的情况, 如下

$$dW_m = \sum_{j=1}^n i_j d\psi_j - \sum_{j=1}^m T_{e_j} d\theta_j \quad (2-19)$$

当选择 i, θ 为独立变量时, 仿式(2-13), 有

$$dW'_m = \psi_1 di_1 + \psi_2 di_2 + T_e d\theta \quad (2-20)$$

$$W'_m = \int \psi_1 di_1 + \int \psi_2 di_2 + \int T_e d\theta \quad (2-21)$$

推广到任意数目电端口和机械端口系统有

$$dW'_m = \sum_{j=1}^n \psi_j di_j + \sum_{j=1}^m T_{e_j} d\theta_j \quad (2-22)$$

2.3 耦合磁场中的储能和余能

如前节所述, 由于机电系统中损耗元件已移至耦合系统之外, 这样, 耦合系统为保守系统, 保守系统是一种能量守恒系统, 其基本性质是: 系统储能仅是决定该系统独立变量的状态函数, 而与系统的历史以及各变量采取什么路径达到其最终值无关。如果我们讨论的电磁装置主要集中在以磁场为媒介的变换器, 该系统即为磁场耦合系统, 能量的传递与变换均通过磁场进行。我们可以利用式(2-7)和式(2-13)分别计算耦合系统的储能和余能, 对于两个电端口和一个机械端口则可以利用式(2-18)和式(2-21)计算。

由于守恒系统的储能与积分路径无关, 设装置的可动部分不运动, 即 $dx=0$, 由式(2-6)可知, 耦合系统的储能完全由输入的电能变换而来。

$$W_m = \int i d\psi \quad (2-23)$$

式(2-23)表明, 磁场储能仅与 i, ψ 的某一即时值有关, 因此, 它是一个状态函数。虽然, 该式是在衔铁固定的条件下推导出来的, 但是它仍然适用于衔铁运动时的状况。若系统为线性, 即有 $\psi = Li$, 则上式积分可得到

$$W_m = \frac{1}{2} i \psi = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2-24)$$