



电气工程应用技术丛书

变压器与电感器 设计方法及应用实例

何此昂 周渡海 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

电气工程应用技术丛书

变压器与电感器设计方法及应用实例

何此昂 周渡海 编著

人民邮电出版社
北京

前 言

随着科技的发展,目前电磁装置小型化、集成化、贴片式的发展趋势日益明显,传统的手工计算和机械的半自动化生产最终会逐渐被电子自动化生产线所替代。以前对于变压器和电感器等电磁装置的设计,使用绕线设计方式的比较多,这种方式属于经典惯用的方式,然而这种方式有诸如绕线参数不能完全统一、不适合大规模的批量化生产等不可解决的问题。近年来研究新型电磁装置的厂家和科研院所越来越多,并已成功设计和小批量生产了各种电磁装置产品。

本书针对电磁装置技术的发展趋势,分为8章进行阐述,由基础理论到实际设计制作,理论结合实践,一步步引导读者由浅入深地全面掌握变压器与电感器设计及应用的方法。首先讲述电磁装置的基本概念和原理性参数,接着讲述变压器、电感器的设计参数计算方法,并给出实际设计制作方法及步骤,然后讲述最新的电子式PCB型电感器与变压器的设计与计算方法,最后结合前面的内容,给出典型的应用实例和综合应用设计实例。

本书第1章绪论,讲述电磁装置的概念和电磁装置通用的设计与计算方法。第2章电磁装置设计基础知识,讲述基本概念和基本定律。第3章变压器的铁芯与空载参数的计算,讲述变压器的标准,电压、电流、铁芯参数和空载损耗的计算。第4章变压器的绕组及负载损耗计算,讲述变压器绕组参数设计和变压器负载损耗计算相关的内容,以及配电变压器设计实例。第5章变压器设计制作,讲述功率变压器、开关电源变压器、高频特种变压器等典型常用的变压器的实际制作方法和要点。第6章电感器参数计算,讲述铁芯电感器和电抗器以及空心电抗器的计算方法,以及630kVA/10kV铁芯电抗器计算实例。第7章新型电磁装置的设计,讲述最新的模拟电感器、电源电感器、电子式电流变压器、无芯PCB型变压器设计,电子式电流互感器的原理性设计和计算以及实例。第8章电磁装置设计应用实例,讲述开关电源AC-DC、AC-AC设计实例。

本书适合于强电类专业、电气工程及自动化专业的学生作为教材使

用，从事电磁科研的研究院所以及从事变压器和电感器等电磁装置设计及生产制造的企业工程技术人员可以将其作为参考设计材料。

本书第 1~5 章由北京建筑工程学院的周渡海老师编写，其余章节由何此昂老师编写。在编写的过程中，作者得到了北京建筑工程学院信息工程学院的陈一民、樊青等人的帮助，以及武汉钢铁自动化公司的邓颖，武汉理工大学信息工程学院的硕士研究生熊莉，华中农业大学的徐源，武汉工业大学的邓超，西安培华外语学院的胡凡，浙江大学的王海燕、黄飞腾、王微、郑天民、童舟波、张锡琴、王一娇、陈子旭、沈利清、项招贵、周晓莉、陈冠兰、陈波、潘虹、黄琴飞、张慧芳等的大力协助，他们编写了部分章节，并做了校对、录入以及程序调试工作。

限于作者的水平，书中难免存在错误和不当之处，恳请读者批评指正。如有任何问题和疑问请发电子邮件至 nxp.arm@hotmail.com。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电磁装置的概念	2
1.2 电磁装置系统的构成	2
1.3 电磁装置的设计与计算方法	3
第2章 电磁装置设计基础知识	4
2.1 机电系统的能量关系	5
2.2 耦合磁场中的储能和余能	8
2.3 耦合系统中的广义电磁力	10
2.4 电磁功率与有效部分几何尺寸之间的关系	12
2.5 能量损耗与效率	15
2.5.1 铁损耗	15
2.5.2 铜损耗	16
2.6 发热计算基础	17
2.6.1 概述	17
2.6.2 均质物体的发热过程	17
2.6.3 等效热路法	18
2.7 磁场的基本概念和基本定律	19
2.7.1 磁场的基本概念	19
2.7.2 磁场的基本定律	20
2.8 电磁装置的磁场和磁路	21
2.8.1 概述	21
2.8.2 磁路的基本定律	22
2.9 气隙磁导的计算	24
2.9.1 单独磁体的磁导	24
2.9.2 带气隙的铁芯柱间的磁导	25

第 3 章 变压器的铁芯与空载参数的计算	26
3.1 干式电力变压器的标准	27
3.2 变压器的电压、电流的计算	30
3.3 铁芯直径、磁通密度及匝数	30
3.3.1 铁芯直径的估算	31
3.3.2 磁通密度、匝电势、高低压绕组匝数	31
3.4 铁芯质量以及空载损耗	31
3.4.1 铁芯质量	31
3.4.2 铁芯损耗和空载电流计算	33
第 4 章 变压器的绕组及负载损耗计算	35
4.1 绕组的形式	36
4.1.1 层式绕组	36
4.1.2 连续式绕组的段数及每段匝数的确定	36
4.1.3 螺旋式绕组	37
4.2 电流密度、导线的选择	37
4.2.1 电流密度	37
4.2.2 导线选择	38
4.3 绕组并联根数的选择	39
4.3.1 多根并联层式绕组	39
4.3.2 多段层式绕组	40
4.3.3 多根并联连续式绕组	40
4.4 绕组辐向、轴向尺寸计算	41
4.4.1 圆筒式绕组辐向、轴向尺寸计算	41
4.4.2 螺旋式绕组轴向高度及辐向宽度	42
4.5 绕组的检测	44
4.6 变压器的主绝缘和纵绝缘	47
4.7 变压器绝缘半径计算	49
4.8 变压器的短路电抗等效漏电抗计算	50
4.8.1 同心式绕组的漏电抗计算	50
4.8.2 对称交错式绕组的漏电抗计算	52
4.8.3 多层绕组的漏抗	52
4.8.4 有载调压电力变压器的漏电抗	55
4.9 负载损耗	57
4.10 温升计算	57
4.10.1 层式绕组温升计算	57
4.10.2 饼式绕组温升计算	59
4.11 中高频变压器设计特点	61
4.11.1 铁芯材料选择	61
4.11.2 导线选择	61
4.11.3 等效磁感应强度	62
4.11.4 中高频变压器的等效电路	62
4.11.5 励磁电感计算	62

4.12	配电变压器 SG-100/10 设计实例	63
第 5 章	变压器设计制作	66
5.1	功率变压器设计	67
5.1.1	功率变压器设计的一般问题	67
5.1.2	变压器设计制作	79
5.2	开关电源变压器设计	83
5.2.1	功率变压器的基本理论	83
5.2.2	开关电源变压器设计的一般理论	84
5.2.3	设计实例	87
5.3	高频开关电源变压器设计	88
5.3.1	高频开关电源变压器设计要点	88
5.3.2	高频开关电源变压器设计原理与实例	90
第 6 章	电感器参数计算	93
6.1	铁芯电感器的电感计算	94
6.1.1	主电抗计算	94
6.1.2	漏电抗的计算	99
6.1.3	漏磁场分析与漏电抗计算(平面磁场法)	103
6.2	铁芯电抗器的电动力	107
6.2.1	铁芯电抗器线圈上的作用力的方向	107
6.2.2	铁芯电抗器线圈上作用力的计算	108
6.2.3	铁芯电抗器线圈的机械应力计算	110
6.3	限流铁芯电抗器的设计与计算	119
6.4	空心电抗器的设计与计算	119
6.4.1	空心电抗器的自感计算(平均电流密度法)	119
6.4.2	空心电抗器的自感计算(曲线图查表法)	122
6.4.3	空心电抗器的自感计算(积分法)	131
6.4.4	空心电抗器线圈上作用力的计算	134
6.4.5	空心电抗器线圈的机械应力	135
6.5	积分法磁场计算	136
6.5.1	单元载流圆环的磁场计算	136
6.5.2	无限薄空心圆柱线圈的磁场计算	136
6.5.3	有厚度空心圆柱线圈的磁场计算	138
6.6	630kVA/10kV 铁芯电抗器计算实例	138
6.6.1	设计说明	138
6.6.2	设计过程	138
6.7	小电感器设计实例	143
6.7.1	设计要求	143
6.7.2	设计过程	144
6.7.3	设计总结	145
第 7 章	新型电磁装置的设计	146
7.1	模拟电感器设计与计算	147
7.1.1	用运算放大器实现模拟电感的典型电路	147

7.1.2	用有源器件实现模拟电感的设计	149
7.1.3	新型模拟电感器的实现	153
7.1.4	功率电感器的发展趋势	155
7.2	电源电感器设计原则、原理与方法	157
7.2.1	设计要求与设计原则	157
7.2.2	设计方法与基本原理	157
7.2.3	电感器设计基本步骤	161
7.3	电子式变压器设计	164
7.3.1	原理分析	164
7.3.2	系统改进设计	164
7.3.3	仿真以及数据分析	167
7.4	电子变压器设计——36V/400W 卤钨灯	168
7.4.1	TDA4918 控制 IC 性能特点	168
7.4.2	36V/400W 卤钨灯控制与驱动电路	169
7.5	无芯 PCB 变压器设计与计算	170
7.5.1	无芯 PCB 变压器的结构及等效电路模型	170
7.5.2	无芯 PCB 变压器的特性与电磁场及 EMI 问题	173
7.5.3	PCB 型变压器设计与计算	175
7.6	Rogowski 线圈电子式电流互感器设计与计算 (PCB 电流互感器)	177
7.6.1	Rogowski 线圈电子式电流互感器原理	177
7.6.2	钳形 PCB Rogowski 线圈制作与误差仿真	184
第 8 章	电磁装置设计应用实例	197
8.1	综合设计实例——开关电源 AC-DC 设计实例	198
8.1.1	设计要求	198
8.1.2	主电路原理	198
8.1.3	主电路参数设计	199
8.1.4	控制保护	210
8.1.5	ZVZCS PWM AC-DC 变换器的实现	214
8.2	综合设计实例——开关电源 AC-AC 设计实例	216
8.2.1	设计说明	216
8.2.2	主电路原理图及主要参数设计	217
8.2.3	控制电路和保护电路框图及原理说明和主电路框图	224
参考文献		228

第 1 章

绪论

- 电磁装置的概念
- 电磁装置系统的构成
- 电磁装置的设计与计算方法

Chapter 1

1.1 电磁装置的概念

什么是电磁装置？广而言之，以电的、磁的或电磁的作用原理为工作基础进行电能特性变换的器件或装置，统称为电磁装置（electromagnetic device）。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（电表、发电机、电动机、开关动作机构）装置等。这些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的，所以本书讨论的仅限于电磁式的装置。

电磁装置按发展趋势分，有传统和现代两种。传统的电磁装置有电磁机构、旋转电机、变压器、电感器、电磁铁等。现代的电磁装置有各种加速器磁体、核磁共振仪磁体、惯性磁约束聚变装置（tokamak）磁体、电磁成形机、电磁轨道炮（超高速发射技术）。电磁装置按功率或能量大小分，有巨型的，如兆瓦（MW）级、兆焦耳（MJ）级；有微型的，如有毫瓦（mW）级、毫焦耳（mJ）级。电磁装置按励磁方式分，有电磁式（必须通过电流的线圈建立磁场）和永磁式（通过永久磁体建立磁场）。按电能特性变换形式分，有能量型的，即以能量形态变换为主，包括发电机和电动机；有信号型的，即以信号变换为主，包括直线位移量 x 和转角量 θ 等参数。本书以传统的电磁装置为主，分析方法符合现代科技的发展现状。

1.2 电磁装置系统的构成

这里的系统有两层意义，所研究的装置与其外部连接器件所构成的关系如图 1.1 所示，装置内部的构成关系如图 1.2 所示。



图 1.1 电磁装置与外部系统的关系

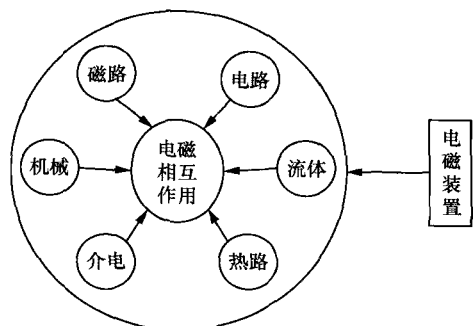


图 1.2 电磁装置内部构成关系

电磁装置无论用作能量转换装置，还是信号变换器件，它都运行于系统之中，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，它本身即是由一个比较复杂的系统构成的装置。以旋转电机（发电机或电动机）为例，组成如下。

① 磁场（路）系统——建立能量变换耦合场的工作区域。

- ② 电路系统——感生电势、连接外部电路、输入或输出电路的电枢。
- ③ 机械系统——与外部机械连接、支撑构件、传递力矩。
- ④ 热路系统——由损耗引起发热、传热与散热。
- ⑤ 流体系统——带走电机内部热量以保证电机正常运行的冷却系统。
- ⑥ 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。

上述各子系统构成的电磁装置如图 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的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，必须了解并掌握它们的计算原理与方法。至于装置中哪个系统是主要的，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。

1.3 电磁装置的设计与计算方法

电磁装置的设计与计算方法分为传统的与现代的。传统的设计与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。电路的等效电路，用 R、L、C 集中参数描述装置中的电路参数；磁路的等效磁路，分段处理装置内磁场的分布不均匀性问题；热路的等效热路，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；风（流体）路的等效风路，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。这种方法直观、普遍，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。

现代的设计与计算方法是基于“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好的问题，可以用场的数值解法予以解决，这给电磁装置的设计提供了一种新的手段和方法，它有较高的计算精度，要求设计工作者具有较高的专业知识和技术水平。

电磁场数值方法——取代等效磁路法解决其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。

计算传热学方法——取代等效热路法，因为温度分布、热传导问题实质是场的问题。

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

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量的分布和模式。

“场-路”耦合计算方法：通常，人们对带电磁装置（电机）的系统进行行为仿真时，将装置（电机）表示为一个元路原件，用集中参数代替，采用路的方法进行计算；而在电机中存在非线性、非正旋和涡流等现象时，系统的动态行为是难以准确计算的，尤其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，如果将电路分析与电磁装置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一条有效途径，这就是在现代出现的新的计算方法——“场-路”耦合法。

第2章

电磁装置设计基础知识

- 机电系统的能量关系
- 耦合磁场中的储能和余能
- 耦合系统中的广义电磁力
- 电磁功率与有效部分几何尺寸之间的关系
- 能量损耗与效率
- 发热计算基础
- 磁场的基本概念和基本定律
- 电磁装置的磁场和磁路
- 气隙磁导的计算

2.1 机电系统的能量关系

实际应用中的电磁装置，无论是用作能量转换器（如电动机、发电机等），还是信号变换器（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接构成电路系统，另一方面与机械系统相连，而电路与机械两系统之间则是通过电磁装置内存在的电场或磁场耦合作用相联系，这样就构成了带电磁耦合作用的机电系统。图 2.1 是电磁装置与外界系统联系的示意图。电磁装置在整个机电系统中无论是作为哪一种变换器应用，其中电磁场的耦合都起到了核心作用。在分析与计算这种系统的运行时，电路系统用电路参数、变量及电路方程描述，指导电路系统分析与计算的理论和方法是电路理论；机械系统用力学参数、变量及机械运动方程描述，其理论指导是牛顿力学；而机电耦合系统则是用电磁场参数、变量及电磁场方程描述，理论指导是电磁场理论。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。

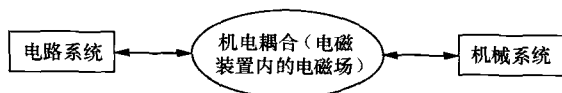


图 2.1 电磁装置与电路及机械系统的联系

图 2.2 所示为用于开关脱扣的电磁操作机构，在固定铁芯上绕有 w 匝线圈，可动铁芯 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，当线圈加上电压信号而有电流 i 流过后，由励磁磁势 i_w 建立的磁通 Φ ，经由铁芯和两个气隙 δ_1 与 δ_2 的路径闭合，在气隙 δ_2 中的磁场，将使可动铁芯 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接构成电路系统，相应的系统参数与变量为 u 、 i 、 Φ 。可动铁芯与外面的弹簧和脱扣机构相连构成机械系统，相应的系统参数与变量为 x 、 f ，在装置内通过磁场（通电流后）耦合把两者联系起来，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、由电能转换为机械能的磁场耦合机电系统。

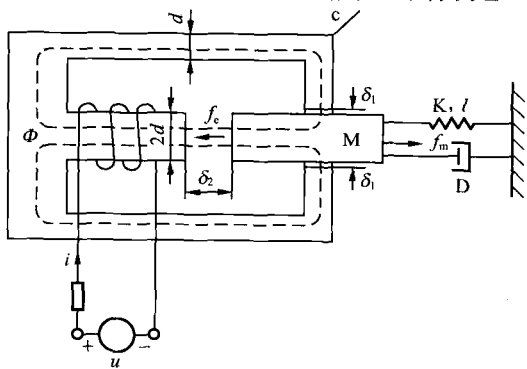


图 2.2 开关脱扣用的电磁装置

为分析和计算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，但在似稳态条件下，人们已普遍习惯了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 大小仅与线圈单位电流所铰链的磁链数大小和导磁媒质特性有关。由于

这是带可动铁芯的线圈，如果不计铁芯的饱和影响，其电感值为一线性函数，它是一个无损耗的磁场储能元件。

图 2.3 用端点特性表示图 2.2 所示装置的机电耦合系统，它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，磁场耦合系统为无损耗系统，又称保守系统。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，系统的能量关系为：

$$\text{输入系统的电能} + \text{输入系统的机械能} = \text{磁场储能增量} \quad (2-1)$$

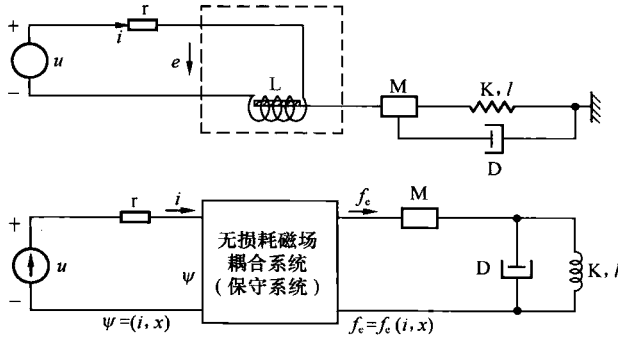


图 2.3 图 2.2 对应的机电系统表示

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 $i^2r dt$ 。于是输入给磁场耦合系统的电能应为：

$$dw_e = uidt - i^2r dt = (u - ir)idt \quad (2-2)$$

当电路输入耦合场电能时，磁场将发生变化，则在线圈的两端（也就是图 2.3 中 L 的两端）将产生感应电动势 e ， e 可以用公式表示为： $e = -\frac{d\psi}{dt}$ ，式中， ψ 为线圈绕组的磁链，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 使可动铁芯移动 dx 距离，所做的功为输入的机械能，有：

$$dw_{max} = -f_e dx \quad (2-5)$$

于是，耦合场的储能增量为：

$$dw_m = dw_e + dw_{max} = id\psi - f_e dx \quad (2-6)$$

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，系统的磁链数 ψ 与 x 为独立变量，当 ψ 和 x 变化到一定数值时，对式 (2-6) 进行积分，即可计算出总储能的变化量。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有另一种选择,即以 i 、 x 为独立变量,这样选择更为方便, i 、 x 均为可测得的实际量,此时电端点关系与机械端点关系分别表示为 $\psi = \psi(i, x)$, $f_e = f_e(i, x)$, 这样式 (2-6) 所表达的能量守恒关系仍然成立,由 $d(\psi i) = id\psi + \psi di$, 即:

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

$$\text{于是有 } dw_m = d(\psi i) - \psi di - f_e dx, \text{ 即 } d(\psi i) - dw_m = \psi di + f_e dx \quad (2-11)$$

$$\text{令: } dw'_m = d(\psi i) - dw_m$$

即:

$$w'_m = \psi i - w_m \quad (2-12)$$

所以有:

$$dw'_m = \psi di + f_e dx, w'_m = \int \psi di + \int f_e dx \quad (2-13)$$

式 (2-13) 是系统能量守恒的另一种表达方式,它是以 $\psi(i, x)$ 和 $w_m(i, x)$ 的关系由式 (2-12) 定义的。函数 $w'_m(i, x)$ 称为余能 (co-energy)。

以上是以平移运动电磁装置为例进行研究的,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电端口与机械端口的系统。

图 2.4 所示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,转子上也有一套绕组,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。

当电机作为电动机运行时,电能由两套绕组中的一套输入,一般由定子绕组输入,而另外一套绕组(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。当电机作为发电机运行时,能量流程则反向转换。

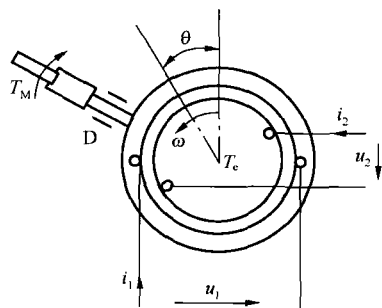


图 2.4 隐极电机模型

图 2.4 所示的模型可表示为机电耦合系统,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。机械端口方面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的位移角 θ 替代平移运动的位移 x ,转矩 T_e 替代 f_e ,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:

$$i_1 = i_1(\psi_1, \psi_2, \theta), i_2 = i_2(\psi_1, \psi_2, \theta), T_e = T_e(\psi_1, \psi_2, \theta) \quad (2-14)$$

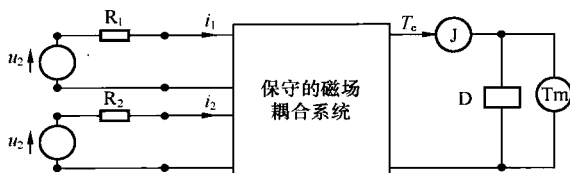


图 2.5 图 2.4 的机电耦合系统表示

$$T_e = T_e(\psi_1, \psi_2, \theta) \quad (2-15)$$

$$\psi_1 = \psi_1(i_1, i_2, \theta), \psi_2 = \psi_2(i_1, i_2, \theta) \quad (2-16)$$

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

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为 $dw_e = i_1 d\psi_1 - i_2 d\psi_2$, 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 个机械端口的情况, 即:

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

当选择为独立变量时, 仿照式 (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:

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

2.2 耦合磁场中的储能和余能

如前节所述, 由于机电系统中的损耗元件已移至耦合系统之外, 这样耦合系统为一保守系统。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, 而与系统及各变量采取什么路径达到最终值无关。如果讨论的电磁装置主要集中在以磁场为媒介的转换器, 该系统即为磁场耦合系统, 能量的传递与转换均通过磁场进行。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, 假设装置的 movable 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转换而来, 即:

$$w_m = \int id\psi \quad (2-23)$$

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。虽然式(2-23)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态。若系统为线性 $\psi = Li$, 则上式积分可得到:

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

当自变量改为 i 、 x , 则由式(2-13)可得到:

$$w'_m = \int \psi di + \int f_c dx \quad (2-25)$$

设衔铁的可动部分不运动, 即 $dx = 0$, 则:

$$w'_m = \int \psi di \quad (2-26)$$

如前所述, w 定义为余能, 当以磁场为耦合场时, 则称为磁余能, 显然对线性情况有 $w'_m = i\psi - w'_m = \frac{1}{2} i\psi = \frac{1}{2} Li^2$, $w_m = w'_m = \frac{1}{2} i\psi = \frac{1}{2} Li^2$ 。

图 2.6 表示储能和余能的关系。对于线性系统, 耦合场的磁场能量与余能是相等的, 而非线性系统两者不相等。余能是由于采用不同独立变量而得到的能量的另一种表达方式, 并无特定的物理意义, 仅仅是为了计算方便, 以下在计算电磁力时将会看到。

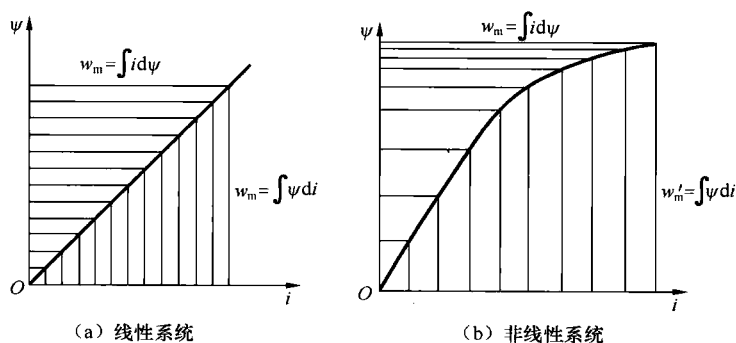


图 2.6 储能与余能的关系

对于既有铁芯又有气隙的电磁装置, 如图 2.2 与图 2.4 所示, 而且其工作磁场主要是气隙磁场, 磁场储能分布在整个磁场所处的空间。磁能密度 $w_m = \int H dB$, 式中, H 为磁场所处空间内的磁场强度, B 为磁感应强度, 则电磁装置的总储能为 $w_m = V_1 \int H dB$, 式中, V_1 为磁场所处空间的体积。当不计铁芯以外的漏磁场内的储能时, 则 $w_m = V_{Fe} \int H_{Fe} dB_{Fe} + V_g \int H_g dB_g$ 。

下标 Fe 和 g 分别表示铁芯和气隙。对于铁芯内某一定值 B , $B_{Fe} = \mu_{Fe} H_{Fe}$ 。对气隙, 则有 $B_g = \mu_0 H_g$, 磁能密度为 $w_m = \int H dB = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu}$ 。通常 μ_{Fe} 比 μ_0 大 1000 倍以上。因此, 决定电磁装置的运行行为, 例如电磁力, 主要是气隙磁场内的储能。

对于有两个电端口和一个机械端口的耦合系统, 如图 2.4 所示的隐极电机模型, 其储能由式(2-18)决定。同样, 假设转子固定, 则由电源输入的电能全部变为耦合磁场内的储