

高等学校教学用书

电机学

(修订版)

冶金工业出版社

高等学校教学用书

电机学

(修订版)

东北工学院 刘宗富 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

电机学

(修订版)

东北工学院 刘宗富 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 19 字数 452 千字

1980年6月第一版

1986年10月第二版 1986年10月第三次印刷

印数45,001~53,800册

统一书号: 15062·4504 定价3.15元

前 言

《电机学》一书是根据冶金工业部高等院校教材会议制订的工业企业电气化自动化专业的教学计划编写的。初稿经过冶金工业部有关院校的初审和复审。原书定名为《电机拖动基础》，包括《电机学》和《电力拖动基础》两部分内容。目前，不少院校都希望将这门课程分开。我们征得参加审查教材会议的所有院校的同意，现将原书分为《电机学》和《电力拖动基础》两册出版，只是将教学大纲中的有关章节重新作了组合，内容并未变动。

《电机学》一书包括直流机、变压器、异步机、同步机和其他特殊电机及变压器。直流电机侧重于直流电机模型的建立，并用它来说明直流电动机的各种工作性能。变压器的重点是带铁心的静止电磁元件建立数学模型和等值电路。异步机中着重说明各种参数变化对异步机性能的影响，书中对异步机的磁势关系作了比较详细的分析。同步机一章中主要讲隐极同步电动机的工作特性，在说明起动和激磁自动调节时，编者使用了自己的研究成果。

工业企业电气化自动化专业教学内容更新很快，为了反映七十年代的科学技术水平和适应各院校的特殊需要，在特殊电机内容中引入了最新的资料。特殊直流机包括直流测速发电机和无刷直流电动机，特殊变压器包括直流互感器、脉冲变压器和可控整流用变压器，特殊交流机包括了主要的控制用交流微电机。关于步进电机的讲述，编者使用了近几年的科研成果，用转矩星这一理论来说明各种步进机的工作原理，其中包括编者提出的交流步进机。步进拖动系统是随着电子计算机发展起来的一种新型电力拖动系统，学习并掌握各种步进电机方面的知识对于从事电力拖动系统工作的人员说来，越来越显得十分必要了。

本书是根据多年的教学经验，结合工业企业电气化自动化专业的特点编写的，内容着重于基本理论和基本概念的阐述，关于电机结构和制造方面的知识涉及的比较少，主要是从电机和自动控制系统相互配合的角度，阐述各种电机的基本性能。

本书适用于工业企业电气化自动化专业，也可作其他使用电力拖动设备的专业、从事电气化和自动化工作的工程技术人员的参考。

本书一至四章由中南矿冶学院皮明同志编写，五及六章由西安冶金建筑学院谷予斌同志编写，七至十章由东北工学院刘宗富同志编写。全书由刘宗富同志主编。

限于我们的业务水平，加上编写时间紧迫，书中错误和缺点在所难免，希望同志们批评指正。

在编写过程中，兄弟院校的同志们提了许多宝贵的意见，我们在这里表示衷心的感谢。

编 者

1979年6月

再 版 前 言

本书的第一版是在1980年出版的,由于受到当时历史条件的限制,在内容的选择上和叙述的方法上都存在着较多的缺点。1982年,全国冶金高等院校在唐山召开了《电机学》和《电力拖动基础》教学大纲讨论会,指出了《电机学》在工业电气自动化专业中的重要作用,提出了适应培养目标要求的课程教学大纲,明确了大纲中的重点、难点和讲授各章节所需要的学时。1983年,全国冶金高等院校在沈阳召开了“电机拖动”学术交流会,对《电机学》课程在教学过程中存在的问题进行了讨论。我们根据几次会议的精神,结合这几年教学的实践,对初版教材进行了幅度较大的修改和补充,写出了修订稿。1985年5月,在沈阳召开了《电机学》教材修订稿的审稿会,代表们一致认为修订稿内容紧密结合专业需要,主干突出,内容精炼,质量有了较大的提高。同时也指出:1. 根据多数院校不讲特殊电机的实际情况,应删去直流特殊电机和交流特殊电机的大部分内容,2. 应根据专业实际需要,突出直流电动机,压缩直流发电机,直流电动机的人为机械特性及起动的定量分析应主要由《电力拖动基础》课去讲授,3. 在附录中增编磁路 and 对称分量法的内容。

经修改后《电机学》的内容包括:直流电机基础,直流电机,电力变压器,其他变压器,交流电机基础,异步电动机,同步电动机,交流机的暂态数学模型。总的说来,这一版的内容和第一版有较大差别,删减和合并了一些章节,增加了交流机的暂态数学模型和附录,使教材具有一定的先进性和实用性。东北工学院电机拖动教研室近几年在交流机变频调速方面所进行的科学研究,为编好本书提供了很好的条件。交流机的暂态数学模型一章是根据高宝贤老师的著作改编的。

本书力求使《电机学》的内容能够适应交流机矢量控制广泛应用后对《电机学》提出的要求,着重基本原理和物理概念的阐述,建立了交流机的数学模型。本书可作为工业电气自动化专业的教材,亦可供从事电气传动专业的工程技术人员参考。

本书由东北工学院刘宗富教授主编,第一章和第二章由中南矿冶学院皮明编写,第三章和第四章由西安冶金建筑学院谷予斌编写,第五章由东北工学院彭洪才编写,第六章由东北工学院韩安荣编写,附录中的磁路由东北工学院韩熊权老师编写,其余部分由刘宗富编写。

本书的编写受到许多兄弟院校的关怀和帮助,他们除提出宝贵的意见外,还给予大力的支持和鼓励,我们在这里表示衷心的感谢。

我们希望本书能够满足工业电气自动化专业教学的需要,但是科学技术发展很快,我们的能力有限,因此本书的内容和编排方法可能还存在一些不足之处,希望同志们批评指正。

编 者

1985年9月

目 录

前言

再版前言

绪论	1
第一节 电机的发展简史	1
第二节 电机在国民经济中的作用	2
第三节 本课程的性质和主要任务	3
第四节 本课程的主要内容和讲授方法	4
第一章 直流电机基础	10
第一节 直流电机的用途和基本工作原理	10
第二节 直流电机的结构、额定值和型号	12
第三节 直流电机的空载磁场	16
第四节 直流电机的电枢绕组	19
第五节 直流电机的电枢反应	31
第六节 直流电机的电枢电势和电磁转矩	36
第七节 直流电机的换向	38
第二章 直流电机	51
第一节 直流发电机的运行原理	51
第二节 直流发电机的运行特性	54
第三节 直流电动机的运行原理	59
第四节 直流它激电动机的运行特性	61
第五节 直流它激电动机的人为机械特性	66
第六节 直流串激电动机的运行特性	71
第七节 直流复激电动机的运行特性	75
第八节 直流电机的可逆原理	76
第三章 电力变压器	81
第一节 概述	81
第二节 变压器的空载运行	86
第三节 变压器的负载运行	93
第四节 变压器参数的试验测定	101
第五节 变压器的标么值和百分值	105
第六节 变压器的运行特性	106
第七节 三相变压器	108
第八节 变压器空载合闸的过渡过程	116
第九节 变压器的并联运行	118
第四章 其他变压器	123
第一节 自耦变压器	123
第二节 整流变压器	125
第三节 脉冲变压器	129
第四节 交流互感器	133
第五节 电焊变压器	136

第五章 交流电机基础	140
第一节 交流电机的基本工作原理	140
第二节 导体的电势	142
第三节 匝电势、元件电势及短距系数	144
第四节 元件组电势及分布系数	148
第五节 三相单层对称绕组	150
第六节 三相双层对称绕组	156
第七节 单相绕组的脉振磁势	159
第八节 三相绕组的旋转磁势	163
第九节 磁势的空间向量表示法	165
第十节 椭圆形旋转磁势	169
第六章 异步电动机	173
第一节 异步机的简单工作原理	173
第二节 转子不转时的异步机	178
第三节 转子转动时的异步机	193
第四节 异步机的机械特性	206
第五节 电磁转矩和转子阻抗角 ψ_2 的关系	213
第六节 鼠笼异步机的起动	218
第七节 深槽和双鼠笼异步电动机	221
第八节 单相异步电动机	223
第七章 同步电动机	230
第一节 同步机的构造和磁势关系	230
第二节 隐极同步机的等值电路	233
第三节 隐极同步机的矩角特性	234
第四节 同步电动机的起动	238
第五节 隐极同步机的激磁调节	244
第六节 凸极同步机的电势方程式和转矩方程式	252
第八章 交流机的暂态数学模型	259
第一节 电阻和电感	259
第二节 气隙磁势	261
第三节 转矩方程	262
第四节 三相绕线式异步机的暂态数学模型	266
附录A 磁路	282
第一节 磁场	282
第二节 铁磁物质	283
第三节 磁路和磁路定律	285
第四节 无分支磁路的计算	287
第五节 有分支磁路的计算	289
第六节 交变磁通的铁心损耗	290
附录B 对称分量法	292
第一节 两相不对称电压的对称分量	292
第二节 三相不对称电流的对称分量	293
第三节 空间矢量的对称分量	293
参考文献	295

绪 论

第一节 电机的发展简史

这是一个很大的题目,涉及的范围很广。我们的目的是想通过简单的历史回顾,使读者粗略地知道一些电机的发展概况。电机是电工技术中最重要和最活跃的部门之一,时至今日它已发展成自动化的主要元件,发展成工业企业的主要动力设备。电机的发展遵循着一定的客观规律,认识和理解这种客观规律,可能会对读者的学习方法和研究方法起一些有益的作用。

1820年先是奥斯特发现了电流在磁场中受力的物理现象,其后安培对这种现象进行了总结,于是人们在实验室里制成了直流电动机的简单模型。1831年法拉第提出了电磁感应定律。1834年亚哥比根据电流在磁场中受力的理论设计出第一台可供实用的直接电动机,这台直流电动机直接产生旋转运动,摆脱了仿照蒸汽机由往复运动产生旋转运动的过程。1838年人们用亚哥比直流电动机试制出第一艘电动轮船,但当时还没有经济实用的直流电源,由化学电池构成的电源价格昂贵而且不够可靠。直到上世纪七十年代,直流电在工业中仍占着统治地位,当时已能应用直流发电机去代替价格昂贵和效率低的化学电池。人们对交流电的认识还很不够,交流电的应用受到激烈的反对,例如爱迪生就认为:沿着街道敷设交流电缆无异于敷设爆炸性的地雷。

1871年凡·麦尔准发明了交流发电机。1878年亚布洛契可夫完成了为他发明的灯泡供电的交流电源设备,他使用了交流发电机和变压器,并用他的装置证明交流电的实际应用是可能的。

到上世纪八十年代,由于用电量的大幅度增加,人们开始认识到交流电在长距离输送中的优点,但全面利用交流电仍存在着技术上的困难,当时还没有适用的交流电动机。1885年费拉里斯发现了二相电流可以构成旋转磁场,他根据这个原理试制成二相异步电动机的模型,用来进行原理演示。1888年多里沃·多布罗勿斯基提出了三相制和三相异步电动机,他证明三相电流和两相电流一样可以构成旋转磁场,他研制成鼠笼式异步机和绕线式异步机。

上世纪九十年代,三相制和三相异步电动机在工业中得到广泛应用。从此工业上的动力很快都向三相交流电的方向发展。直到1918年前后,资本主义的工业有了很大的发展,交流电网的功率因数由于大量使用三相异步电动机而普遍偏低。为了改善功率因数,同步电动机开始得到发展。十九世纪末到二十世纪初,人们已经掌握了电机的基本理论,完成了一整套设计计算方法,各种主要类型的电机当时都已设计制造成功。

二十世纪后,随着工业的不断发展,人们希望电机能有较低的成本,较小的尺寸,较大的单机容量和较好的性能。为了达到这些目的,人们进行了大量科学研究工作,既研究电机里发生的电磁过程,也研究它的发热和冷却过程。随着绝缘材料、导电材料和导磁材料的更新换代,随着人们对电机的结构和制造工艺的改进,虽然近几十年电机的原理和设计计算方法并没有多大改变,但现代电机和十九世纪的电机有显著的差别,例如发电机的重量以1900年的产品为100%计,到1920年时减小为56%,同一期间电动机的重量减小为原来

的41%。从单机容量看,以前采用空气冷却时能够制造的汽轮发电机只能达到数万千瓦,而今天很多有名的制造厂家都能生产100万千瓦以上的超大型汽轮发电机。

1945年以前,电力拖动系统只使用简单的接触器和继电器,没有任何中间放大环节。这种拖动系统适应不了工业发展对电气化和自动化提出的日趋严格的要求。1955年前后出现了交磁放大机,其后磁放大器,水银整流器,闸流管相继出现,它们作为功率放大环节使电力拖动的性能有了明显的提高。1967年以前,由电动机发电机组供电的它激直流电动机系统标志着电力拖动系统的最高水平,后来由于功率半导体器件的出现,直流发电机逐渐被淘汰,时至今日可以肯定地说直流发电机的用途已经十分有限了。

直流电机是最早出现的电机,自从三相交流电在工业中应用后,直流电机的用途就大为减少。本世纪三十年代,人们曾对三相异步机的调速方法进行了持久而详细的研究,希望能够找到一种有效的方法去取代复杂而昂贵的直流拖动系统,但是一直没有取得太大的进展。今天,功率半导体已经取代了直流发电机,由整流器供电的直流拖动系统,也因异步机矢量控制系统和同步机矢量控制系统的兴起而受到严重的冲击。持续了数十年的由交流拖动系统去取代直流拖动系统的想法有可能即将成为现实。电子计算机和大规模集成电路的迅猛发展,使步进电机应运而生。步进电机的工作原理属于同步电动机的范畴,以前人们认为同步电动机只能用在不调速的地方,它起动困难,容易产生振荡,从来没有想到可以用它来取代直流电机去构成高定位精度和快速响应的伺服拖动系统。今天,在数控技术已经相当成熟,单板机已经用于交流拖动系统,静止变频器已经相当可靠而且价格已经合理的情况下,许多制造厂家已经生产出很有竞争能力的由同步电动机拖动的矿井提升设备。近几年,连工艺要求复杂原来采用直流拖动系统都感到困难的大型连轧机也开始采用同步电动机拖动。

电机是电力拖动系统中的一个主要元件,在自动化高度发展的今天,电力拖动仍然是一种主要的拖动手段。为了适应工农业自动化发展的需要,近几年大家都在研究“新的电力拖动系统”,新的拖动系统不断更新它的元器件和控制方法,这就不能不反过来对作为核心的元件——电机提出各种各样的要求。因此今天的电机从电机应用的角度看不再是标准化的电机,而应当是放在整个拖动系统中从自动控制的需要进行仔细分析的一个执行元件。为了和整个自动控制系统协调一致,电机的参数和性能必须按系统的需要进行合理的设计。所以从工业电气自动化专业的需要出发,电机不单纯是标准化的电机,更主要的是电力拖动系统中的一个核心元件。直线电机,电子电机,无换向器电机,步进电机,开关磁阻电动机和额定频率为8周的低频同步电动机等正是这种和系统密切结合的电机,我们必须将它们和整个电力拖动系统合起来一起进行考查。应当说这是电机发展在今天的主要趋势之一,我们也正是从这个角度上来编写这本电机学的。

第二节 电机在国民经济中的作用

电机是电气化的核心设备,从国民经济的整个范畴讲,电机工业的任务是为工农业提供各种各样的发电设备,输配电设备,拖动各种生产机械的通用电动机和专用电动机,以及形形色色的控制用微电机。

随着国民经济的高速度发展,工农业用电量愈来愈大。我国1980年的年发电量是3006亿度,而1985年的年发电量增加为3620亿度。即使这样高的增长速度,但仍赶不上工农业发展的需要,很多地区仍严重缺电。现在,全世界的发电量绝大部分是由汽轮发电机和水轮

发电机发出来的,已制成的最大汽轮发电机的单机容量达到130万千瓦,水轮发电机的容量达到70万千瓦。电力工业对变压器也有很高的要求,容量要与发电机组相适应。

在机械制造业中,各种工作母机都广泛采用电力拖动,目前应用得最多的是鼠笼式异步电动机。要求较高的机床,例如龙门刨床和龙门铣床,则使用它激直流电动机。风机、水泵、压缩机和皮带运输机等通用机械,在允许直接起动的地方多半采用鼠笼式异步电动机,当起动电流受到限制时常采用绕线式异步电动机,当起动次数很少又希望能产生一定的无功功率用来提高电网的功率因数时可以采用同步电动机。大型矿井卷扬设备,高炉卷扬,电铲和轧钢机,有的采用绕线式异步电动机,有的采用它激直流电动机。纺织机械,印染机械和造纸机械除采用直流拖动系统外,还广泛采用交流整流子机。

随着农业机械的发展,电机在农业中的应用也日趋广泛。排灌机械,打稻机,碾米机,榨油机,饲料粉碎机和各种食品加工机械都广泛采用鼠笼式异步电动机。

在交通运输业中,需要大量的具有优良起动性能和调速性能的牵引电动机,以前主要是直流电动机,近几年开始采用由静止变频器供电的鼠笼式异步电动机。

由于在现代的工农业生产中,机械化和电气自动化的水平不断提高,不但高精度的转速控制和位置控制需要使用各种专用电机去满足极不相同的特殊需要,而且信号检测、放大和转换,甚至数学解算也都使用特殊电机。例如在计算机控制和遥控系统中,常常需要监视和控制远处的工作设备,因而一方面需要了解远处工作设备的运行情况,另一方面控制中心还要连续发送控制指令,以便对工作设备进行操纵。力矩式自整角机、差动自整角机、自整角变压器就是将输入的机械角转换成电信号传送到远方去的特种电机。测速电机是一种常用的测量转速的检测元件,它的输出电压和转速成正比。测速机的种类繁多,计有电磁式和永磁式直流测速发电机;永磁式、感应子式和脉冲式同步测速发电机;鼠笼转子和杯形转子异步测速发电机。伺服电动机又称执行电动机,在自动控制系统中作为执行元件使用,当电气讯号输入时电机立即旋转,当电气讯号消失时电机立即停止。这种小型伺服电机有直流的也有交流的,直流伺服电机为电磁式或永磁式直流电动机,交流伺服电机为两相鼠笼异步电动机。在数字控制系统和计算机的外围设备中,作为执行元件的主要是步进电动机。机械手和机器人的发展要求性能优良和价格低廉的执行元件,步进电动机正在迅猛发展。反应式同步电动机,磁滞同步电动机,减速同步电动机和他激减速同步电动机都可以在静止变频器的供电下完成步进电动机的功能。旋转变压器是一种输入转角信号输出电压信号的转换装置,通常用它来将输入角 θ 转换成正弦电压、余弦电压或者线性电压,它是一种解算装置,在同步电动机的矢量控制中可以用它来提供负载角的正弦和余弦。另一种高精度的角位或位移检测元件叫感应同步器。感应同步器是利用多极旋转变压器的原理设计成功的,主要用于精密和大型机械的数字显示系统和位置闭环控制系统中,有圆盘式和直线式两种。

由于功率半导体的兴起,作为功率放大环节的直流发电机,交磁放大机,磁放大器,饱和电抗器等正在日渐减少。但是在一些老设备中这些装置还是比较普遍的。

第三节 本课程的性质和主要任务

在工业电气自动化专业中,电力拖动系统是一个重要的领域。对于一些大型设备,例如矿井卷扬,高炉卷扬,主轧机等等,电力拖动系统的好坏直接影响产量和质量。一个高

度电气化和自动化的现代工业,没有性能优良的电力拖动系统是很难想象的。在电力拖动系统中,电机是被控制的对象,当电机容量较大时,整个控制系统都需要围绕着电机这个核心而进行设计。不了解这个对象,对你需要服务的核心心中无数,要想设计出一个理想的电力拖动系统只能是一句空话。电机学是技术基础课,它不同于电工基础和物理,更不同于数学。因为电机是具体的工业装置,它受到许多具体条件的制约,必须具体问题具体分析,或者说在学习电机学时需要培养同学们具有工程观点,也就是按工程的具体条件提出假定和进行修正的观点。工程上要求合理的近似,要求在条件不允许的时候退而求其次。本门课程的重要任务之一就是通过对具体电机的分析,向大家展示一些基本的在电力拖动系统中比较通用的工程分析方法。

作为技术基础课的另一个重要任务就是为后续课程建立必要的基础。电力拖动系统中的电机,一般地说是控制的对象,是主体,而不是一个简单的执行元件。当然从工业电气自动化的总体上看,从生产过程控制的角度看,而不是从电力拖动系统的角度看,电机只是一个自动化元件。不管是作为被控制的对象看,还是作为自动化的元件看,我们都是从使用电机的角度去分析研究它,而不是从设计、制造和修理的角度去研究它。在本门课中,为了考查电机的各种特性,以便在电力拖动系统中更合理更有效地对它进行控制,必须寻求电机的实用数学模型,具体地说就是那些静态电势平衡方程式,转矩平衡方程式和磁势平衡方程式,以及更深入一步的所谓暂态数学方程。一般地说,我们不去研究电机的设计和制造工艺,但为了掌握各种电机的运行特性,对于各种电机的结构还必须有一定深度的了解。例如我们分析直流电机的绕组,目的是让直流电机模型建立在物理概念之上,这样在使用这个重要物理模型时能够得心应手,不犯原则性的错误。所以本课程的第二个任务就是为后续课程提供必要的技术基础,即电机作为工业自动化元件所需要的基础,而不是设计、制造和修理电机所需要的基础。

由于本课程是将电机作为一种机电能量转换设备来进行研究的,目的是建立各种电机的实用数学模型,所以如何将各种电磁现象书写成数学方程,或者说电机数学模型的建立过程是本课程的重点,也是本课程的难点。电机的种类繁多,需要建立的针对各种具体问题的数学公式也不胜枚举,这里只能通过几个典型例子,介绍一些比较常用的和实用价值较大的为电磁机械建立数学模型的工程方法。掌握这种工程建立数学模型方法,达到举一反三,可能需要较长的时间,但理解这种工程建立数学模型方法,从物理概念上把握这些数学方程,而不是完全抽象地理解这些数学方程却是十分必要的,否则你将无法深入地研究电力拖动系统。

由于本课程将电机作为电气自动化系统中的一个元件来进行考查,因此必须理解电机在各方面的受限条件,例如电流上限,温度上限,电压上限,转速上限等等。我们的责任是根据给定的工程条件,最充分地使用各种电机,因此我们必须熟知各种参数变化对电机性能的影响。我们要起动、制动和调速,常常在偏离额定工作状态下使用电机。如何才能将电机运用自如,又要不超出电机的允许极限,这也是本课程想要达到的另一个重要目的,当然这要和后续课一同来完成。

第四节 本课程的主要内容和讲授方法

直流电机是交流电机加上机械换向器,今天的无刷直流电动机就是交流电机加上电子

换向装置。虽然从发展史上看首先出现的是直流电动机,但从工作原理上看直流电动机是机械换向器加上交流电动机。如果不受课程衔接的限制,本课程的讲授顺序可以首先讲授变压器。作为一种静止的电磁机械,变压器的磁路和电路都比较简单,不涉及复杂的机械结构,只有简单的集中绕组,和电工基础联系密切,同学比较容易接受。在单相变压器中主要讲授T形等值电路的建立过程,说明各个参数的物理意义和折算方法。单相变压器的电势平衡方程式,磁势平衡方程式和阻抗参数的物理含义是交流电机的基础,要将这些数学方程和它们描述的具体物理现象紧密地联系起来,这里不再是交流电路的简单重复,而是应用从交流电路取得的知识,有效地解决具体工程问题。方程式,等值电路和向量图是分析交流电路时经常使用的三种工具,必须让同学熟练地掌握它们。要知道交流电路曾经是电工基础的主要组成部分,想学好交流电机没有较好的交流电路基础是不行的。在可控硅整流和逆变系统中三相变压器的联接组是一个十分实际的问题,要让同学熟练掌握判别联接组的方法,三相变六相或十二相的方法。这里的理论基础仍然是交流电路,涉及正方向的假定,方程式的建立,根据方程式绘制向量图等一系列根本问题。正方向和惯例是一个道理不多但令初学者十分头痛的问题,我们认为这和单位制一样是一个细致而繁琐的问题,不宜多讲。我们认为按端子字母的顺序规定正方向是一种比较实用的方法,例如 $\dot{E}_{AB}$ 代表正方向的规定为从A到B, $\dot{E}_{BA}$ 代表正方向的规定为从B到A。同学们只要熟练地掌握一种方法,将来遇到其它惯例是能够掌握的。标么值作为一种工程方法是应当让同学掌握的,但基值的选取也只能硬性规定,应当说这里只是把标么值作为一种工程方法展示给学生,同学们知道什么是标么值也就可以了。

从分析问题的方法看,变压器是交流电机的基础,使用的主要理论是交流电路。作为技术基础课的内容,变压器是工业供电的基础,应尽可能为工业供电提供足够的基础。

在电气自动化系统中,变压器是用途广泛的电磁元件,很多特殊变压器从工作原理上看具有典型性,例如电压互感器是恒压源的典型,电流互感器是恒流源的典型,电焊变压器是利用回路电感改变变压器外特性的另一种典型。自耦变压器,整流变压器,脉冲变压器都是本专业学生经常遇到的设备。这些特殊变压器都是因其特殊用途而突出了某一个重要物理概念,通过这些特殊变压器的讲授,有利于同学对物理概念的深入理解,有利于同学灵活运用所学知识。

交流电机基础主要是建立时间向量和空间向量的物理概念和时空关系。我们的目的不是想学会修理交流绕组,对具体交流绕组的结构和制造工艺并不想深入分析,但我们研究交流机必须知道绕组的空间位置和电势的相位有什么关系,换句话说,必须让同学熟练掌握电势星这个理论工具。使用电势星去分析时间上的正弦量,这是基本理论,也是基本方法。要知道这里的根本问题也是时间向量的灵活运用,也是正方向的假定,方程式的书写和向量图的绘制。我们认为这是基本功,是必须让同学反复锻炼才能逐渐掌握的基本功。我们希望同学们通过电势星的反复运用,获得分析具体电机绕组产生的电势是否对称的能力。

交流电机的磁势是另一个重要概念,空间向量和时间向量一样是基本理论,也是基本方法。空间向量和时间向量的表达形式一样,运算方法一样,但物理概念却大不相同。复数运算是处理正弦量的一种有效手段,用来研究绕组中的电流和电势等时间正弦量称为时间向量,这一部分内容是交流电路的继续,同学们是比较熟悉的。用来研究绕组在气隙中

产生的磁势和磁密等空间正弦分布的时空函数称为空间向量或旋转向量，这是同学们新接触的内容，应当让同学们弄清楚空间向量所代表的物理含义，学会用空间向量去描述各种交流电机的磁势。旋转磁势是交流电机的基础，对交流绕组怎样才能产生圆旋转磁势应当有一个深刻的理解，因为交流机的矢量控制就是从这个圆旋转磁势出发并加以发挥的。

三相异步机是交流电动机中的典型设备，为三相异步机建立数学模型的逻辑思维方法，工程假定和数学运算方法一方面是变压器的延伸，最后得出的T形等值电路和变压器的T形等值电路形式上基本相同，可以说变压器是三相异步机的基础。另一方面，异步机是旋转电机，气隙旋转磁场是分析问题的根据，这和静止的变压器有很大的不同。在旋转电机中，三相异步机是基础，连单相异步机的理论也是从三相异步机延伸出去的。因此从使用电动机的角度看，一个十分重要的任务就是对电机的气隙磁场有一个清晰的概念。

现代电机都可以归结为两个磁势在相互作用，为了获得稳定而且是最大的电磁转矩，第一，定转子磁势必须相对静止。第二，定转子磁势彼此在电机气隙中互相垂直。三相异步机的定子绕组可以在气隙中产生一个圆旋转磁势，分析就从这个圆旋转磁势出发。为了便于理解，先分析转子不转时的异步机。在变压器中磁势和磁通都是时间向量，只使用绕组交链磁通的概念；而在异步机中气隙磁势是圆旋转磁势，磁势的幅值是恒定的，只有使用空间向量的概念，旋转磁场交链各相绕组的概念，才能将时间向量和空间向量统一起来。在变压器中磁势平衡指的是原副两个绕组之间的磁势平衡关系，是纯粹的时间关系。而在异步机中，由于定子磁势是定子三相绕组的合成磁势，转子磁势是转子多相绕组的合成磁势，所以引入了两绕组模型的概念。从空间看气隙磁势是定子磁势和转子磁势这两个圆旋转磁势在电机的气隙中相互作用，磁势平衡是指两个相对静止的圆旋转磁势之间的相互关系，既是时间的函数，又是空间的函数。在三相异步机中各相绕组产生的是脉振磁势，而磁势平衡中的定子磁势是定子三相绕组联合产生的圆旋转磁场，这两者有联系，可以选取一个代表相的电流时间向量去代换定子磁势这个空间向量，但它们之间有质的区别，在物理概念上绝不许混为一谈。

抛开物理概念上的巨大差别单从数学表达形式上看，三相异步机在转子不转时的电势平衡方程式和磁势平衡方程式和三相变压器完全相同。为了加深同学们对三相异步机磁势的空间性质的理解，可以讲授感应调压器和移相器等特殊用途的三相绕线式异步机，以便通过对比弄清三相异步机和变压器之间的异同。

当讲授转子转动时还必须紧紧抓住定转子圆旋转磁势相对静止，定转子磁势间的空间相位差和转子阻抗有关这一条主线。只要保持定转子间的磁势关系不变，电机透过气隙传输的功率或者说电磁转矩就是唯一的。基于这一点才允许从转到不转的折算。

由于我们希望同学们能够熟练掌握复数运算，因为这是对交流机进行矢量控制所必须的，所以我们用复数运算去证明定子电流轨迹，同学们对复数运算比较陌生，只有多用才能够使他们逐渐熟悉起来。

为了满足教学实验使用直流机作负载的需要，可以在异步机之后讲授直流机。一般地说在这里讲授直流机同学们是比较容易接受的。讲授直流机绕组的目的是为了让学生们能够对机械换向器的作用有一个比较清晰的概念，能够深信不疑电枢反应磁势在空间是静止不动的，电刷的位置决定电枢反应磁势在空间的作用方向，从而在使用直流电机模型时真

正能够心中有数。

应当说直流机中电枢反应的概念是十分重要的，因为这直接影响到直流电动机的转矩在激磁电流恒定时是否能和电枢电流成正比的问题，这个问题已发展成对交流机进行矢量控制时能否接近它激直流电动机的性能指标的唯一标准。直流机的电枢反应讲的也是定子磁势和转子磁势在气隙中的互相作用关系。当定子磁势和转子磁势相对静止且正交时，当转子磁势变化不影响气隙磁通时，从转矩的大小和响应速度看都是最佳的，带补偿绕组的它激直流电动机在刷位正常时是达到这种最佳状态的。对电枢反应进行定量计算是不必要的，关键是物理概念。

换向对直流机是一个重大问题，但对工业电气自动化专业来说，我们只能遵守制造厂家的规定，我们应当理解这些规定，在使用直流电机时不因对换向无知而违反这些规定。应当强调，制造厂家对换向的规定是严格的，违反这些规定后果是严重的。

直流发电机的用途已经不多，但作为一种运转状态还是重要的，讲授的重点应当是空载特性和能量流传关系，因为这对加深理解直流电动机是十分有用的。

直流电动机的数学模型比较简明易懂，为了和后续课合理分工，这里只限于讨论各种参数变化对电机特性曲线的影响，主要讲清电机的内部规律，对外部条件一般是定义式的，不展开分析，不要求同学们深入理解。也就是说虽然这里也是把直流电动机作为自动控制系统中的一个元件来处理，但我们侧重于讲授直流电动机本身的规律，而且主要是电动状态下的规律。

同步电动机是另一个典型机械，过去由于用途不广而不被重视。进入二十世纪八十年代后，人们发现同步电动机和数控技术配合得特别默契，同步电动机的用途愈来愈广。我们认为必须立即对同步电动机的工作原理重视起来，否则我们就很难驾驭新一代的电力拖动系统。隐极同步电动机从定转子磁势的相互关系看，是双馈电动机的一种特殊情况。从工业电气自动化专业的工作需要出发，应当牢牢抓住定转子磁势间的相互关系这条主线始终不放。由于受到时间的限制，我们不可能讲授各种电机，而且从教育学的观点看也只需要讲授那些具有典型性的设备。首先讲授隐极同步电动机可以和三相异步机有机地联系起来，利用定转子旋转磁势必须相对静止这个贯穿始终的普遍规律反复强调旋转磁势、定转子磁势间的相互关系、如何控制定转子磁势间的相角关系等主要内容，这些内容是研究交流电动机的基本理论，主要概念。除分析给出的几种电动机需要使用这些概念外，用它来分析其他类型的电动机也是有效的。总之，我们把分析电动机的气隙磁势作为一条主线，贯彻始终，希望同学们能够学会这种分析方法，并有推广到双馈电动机中去的能力。

同步机的激磁调节是一个有实用价值的内容，基于基本理论和基本方法贯彻始终的原则，这里也和异步机中一样，用复数运算分析隐极同步机的电流轨迹。凸极同步电动机是比较常用的同步电动机，它的转子结构上的特点使它的分析方法不同于其他交流电动机。这里的重点是介绍双反应定理，亦即利用可以当常数处理的顺轴同步电抗和交轴同步电抗去取代随电枢反应磁势作用方向不断变化的电枢反应电抗。虽然凸极同步电动机的分析方法是复杂的，理解起来比较困难，但除了双反应定理外，这里并没有引入多少新的东西。

由于受到时间的限制，而且具有典型性的电动机都已涉及，故不再涉及其他特殊电动机，将余下的时间集中起来研究交流机的暂态数学模型。从发展的角度看，工业电气自动

化专业不掌握交流机暂态分析的基本方法和基本概念,对正在迅猛发展的交流机矢量控制就很难适应。

在交流机的暂态分析中,电感是一个决定性的参数,它名目繁多,容易混淆和概念不清。为了从根本上解决问题,我们以三相反应式同步电动机为例,详细论述了几种主要电感的物理实质和表达方式。这里的基本假定仍然是允许采用叠加原理,磁势、磁通等空间矢量都不考虑高次谐波。当同学们掌握了这部分内容后,一般地说对电感这个至关重要的参数可以心中有数了。

转矩方程是暂态分析中另一个重要内容,为了和稳态分析尽可能保持一致,我们不引入磁共能的概念,而是直接从能量流传关系推导出电磁转矩的一般表达式。

我们从矢量控制的特殊需要出发,把三相绕线式异步机的暂态数学模型建立在气隙旋转磁势上。或者说沿袭在稳态分析中反复强调而的确威力巨大的空间矢量的概念,认为暂态分析的出发点仍然是定子旋转磁势和转子旋转磁势相对静止,唯一的发展就是不再把定子磁势看成幅值和角频率都恒定的圆旋转磁势,而是从矢量控制的理想要求出发,认为定子磁势的幅值和角频率都是可以根据控制需要进行调节的。也就是说我们把定子磁势看成主导因数,它的变化规律是暂态分析的主要任务,至于定子绕组是两相、三相还是更多的相,定子各相电流按什么波形变化,那是另一个问题,应结合具体控制线路去分析。这种概念上的重点转移,虽然对方程式的书写没有产生任何作用,但把着重点放在气隙旋转磁场上比把着重点放在各相电流上有着意想不到的优点,它使暂态分析和我们熟知的稳态分析从基本理论、基本概念和基本方法上统一起来,不但使数学运算大为简化,而且概念清晰,便于理解和接受。

不管是稳态分析还是暂态分析,我们选取了一个公共的出发点,那就是存在于一切旋转电机中的定子磁势和转子磁势的相互作用。一百多年的经验积累,已经使我们能够为这些磁势设计理想的变化规律,例如尽可能不包括高次谐波,基波磁势中最好没有负序和零序分量等。我们从圆旋转磁势出发去分析交流机的稳定状态,取得了明显的效果,现在我们又从幅值和角频率都可以调节的旋转磁势出发去分析交流机的过渡过程,看来这种分析方法也具有显著的优点,近几年正在受到大多数学者的重视。

定子磁势(从而也是定子电流)和定子磁链是空间旋转矢量,这是有丰富的物理事实作为基础的,概念清楚,比较容易理解。但定子电压作为空间旋转矢量是没有事实根据的,于是我们再一次借鉴稳态分析时使用的方法,定义所谓的等值绕组或代表相,从抽象的电势平衡的定义,依靠数学上的严格性纯数学地求出定子代表相的外加电压来,这个抽象的定子电压是纯真的空间旋转矢量,完全不同于以前的时间向量。当我们真正抓住磁势、磁链、电流和电压等空间旋转矢量的含义后,定子坐标系、转子坐标系和同步坐标系的互相转换就变得条理清晰,便于掌握了。

从交流机矢量控制的需要看,磁场定向的转矩方程具有重要作用,为此需要推导用空间矢量表示的转矩方程。从这一部分重要内容看,同学们学好复数运算是完全必要的。如果回顾一下交流机的全部内容,同学们一定能深刻理解到复数运算是一种最基本最有效的数学工具。我们并不曾涉及复杂的复数运算,往往停留在给各个以向量形式出现的物理量赋予合适的内涵上。在交流电机中,大部分物理量都是正弦函数,凡是正弦量都可以用向量表示。为交流机建立数学模型的过程,首先是将这些物理量以特定向量表示的过程,真

正困难在于对这些特定向量的物理概念的深刻理解，复数运算本身是第二位的，一般地说是最基本的，是比较容易掌握的。复数运算属于交流电路的内容，这里只是应用，为各种电机建立数学模型的过程才是本书的主要内容。

目前，在自然科学的各个学科领域中，为了建立本学科通用的数学模型，都形成了一套完整的相当规范化和程序化的理论模式，这种理论模式是以大量观察和实验为基础的，用它来研究本学科中许多问题是比较有效的。电机的统一理论应当说是人们在电机学这一学科中寻求的这种理论模式。但这种理论模式对工业电气自动化专业来说，过于抽象和复杂，它抛开了气隙旋转磁势，直接从各相绕组的电流和电压等时变函数出发，因此和原来的稳态数学模型的理论体系严重脱节。本书改从空间旋转矢量出发，让稳态数学模型和暂态数学模型从理论体系上统一起来，看来从交流机矢量控制的需要出发，这样作是有利的。因此从整个理论体系说，变压器处理的时变量，是理论准备，而异步机的磁势平衡才涉及到空间矢量，才是理论体系的真正开始。

第一章 直流电机基础

第一节 直流电机的用途和基本工作原理

直流电机的基本功能是实现直流电能和机械能的相互转换，它分为直流发电机和直流电动机，其用途如下：

一、直流电机的用途

直流电动机具有良好的调速性能，能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度，还具有良好的起动性能，因此在高级电力拖动系统中获得了广泛的应用。例如各种机床、轧钢机、电力机车、无轨电车、起重设备等都采用直流电动机。目前，虽然由交流电机构成的高级电力拖动系统也正在发展，在某些领域中已取代了直流拖动系统，但是直流电动机的应用仍占较大的比重。电子技术和现代控制理论的发展，使直流拖动系统更能适应近代生产过程中不断提出的高指标的要求。

在现代工业中，广泛地应用三相交流电源，但是，在某些部门，例如化工、冶炼、采矿、交通运输等，过去常用直流发电机作为电源设备，也常用直流发电机作为独立的电源，向拖动生产机械的直流电动机供电，构成所谓的“发电机——电动机组”，简称 $F-D$ 系统。随着半导体技术的发展，可控硅及二极管整流装置的大量使用，直流发电机已很少使用。但从电源质量和可靠性说来，直流发电机仍有它的长处，因此直流发电机仍有它的应用范围。此外，小容量特种类型的直流发电机，仍有较广的用途。

二、直流电机的基本工作原理

1. 直流发电机的基本工作原理 图1-1 (a) 为一最简单的直流发电机模型。它包括两个在空间固定的永久磁铁，一个为 N 极，另一个为 S 极，在磁极的中间，有一个铁制圆柱体，称为电枢铁心。电枢铁心与磁极之间的空气间隙称为空气隙。图中有两根导体 a b 和 c d 安放在电枢铁心表面上，由导体 a b 和 c d 组成的线圈称为电枢绕组，它的首末两

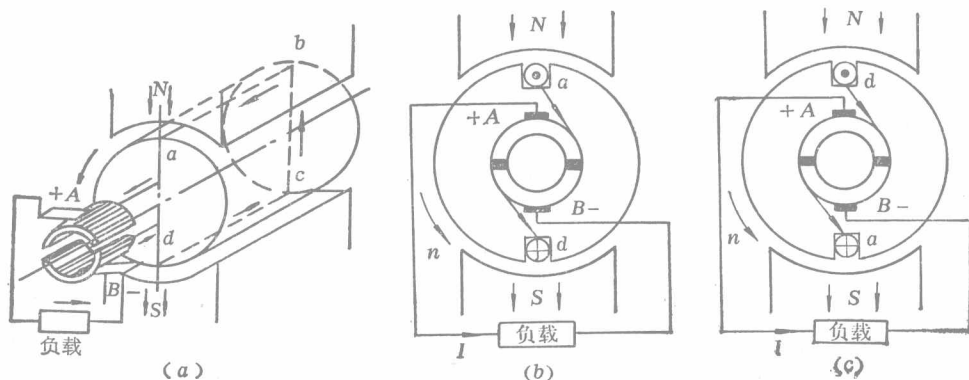


图 1-1 直流发电机的基本工作原理