



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Fundamentals of
motors and their drives

电机与 拖动基础

© 王丁 沈永良 姜志成 庄培栋 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电机与拖动基础

王 丁 沈永良 姜志成 庄培栋 编著
汤天浩 主审

机械工业出版社

本书的编写以体现综合性、先进性和简洁性为宗旨,强化应用知识讲解和应用能力培养;把原来分别讲解的各种电机内容改为综合讲解,重点讲解其中的一般规律和各自特点,以提高讲解内容的规律性和逻辑性,取得可读性好和可教性好的效果;选择和增加了现在正在应用的技术和研究中引用的知识点进行讲解,尽量介绍先进的内容。对传统变压器的内容进行了删除,对内部物理性能的内容进行了简化,特别讲解了数学模型在电机拖动技术中的作用,强调了控制方法在电机拖动技术中的应用。本书首先介绍了电机与拖动技术概述、典型电机的结构特点、典型电机的物理特征和数学模型,而后重点讲解了典型电机的起动技术、调速技术和制动技术,并对电机应用中的有关问题进行了概括。

本书具有内容先进、重点突出和叙述简明的特点,便于在实际工作中应用。本书既可供自动化专业、电气工程及其自动化专业和机电一体化等相关专业使用,还可作为工程技术人员快速掌握现代电机拖动技术的读本。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/王丁等编著. —北京:机械工业出版社, 2011.8
普通高等教育电气工程及其自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34268-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电机—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第149420号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 关晓飞 贡克勤
版式设计:霍永明 责任校对:申春香
封面设计:张静 责任印制:乔宇
北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2011年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·318千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34268-7

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

电机拖动通常被称为自动化类专业的技术基础课之一，这是电机拖动技术在自动化系统中的底层属性所决定的。由于电机拖动技术是自动化系统中硬件组成部分的一个主要的对象性的技术，故成为自动化系统中的主要应用技术之一。对于那些以后专门从事电机相关工作的学生来说，电机拖动技术就具有相对的专业性和实用性。由于电机在国民经济中的广泛应用，使得电机拖动技术成为最为重要的电气技术之一。因此，学习和掌握电机拖动技术是十分重要的。要想学好这样一个复杂的应用技术，首先要有一本思路清晰、技术先进和便于应用的教材。

本书的编写内容以体现综合性、先进性和简洁性为宗旨，强化应用知识讲解和应用能力培养；把原来分别讲解的各种电机内容改为综合讲解，重点讲解其中的一般规律和各自特点，以提高讲解内容的规律性和逻辑性，取得可读性好和可教性好的效果；选择和增加了现在正在应用的技术和研究中引用的知识点进行讲解，尽量介绍先进的内容。在电机拖动技术中，变压器内容其实是求解电机模型的一个初级方法的一部分，因而对传统的变压器内容进行了删除。从电机拖动的意义来说，侧重于电机的基于输入-输出关系的外部特性的利用，也为了避免烦琐的分析，对内部物理性能的内容进行了简化；为了能够接近现在电机拖动技术研究的情况，还讲解了数学模型在电机拖动技术中的作用。基于电机拖动应用中对高性能拖动技术有越来越多的需求，强调了有助于提高性能的控制方法在电机拖动技术中的应用。

在本书的编写中，侧重讲解电机与拖动技术的应用内容。应用技术的教学法有许多典型的流派，如一体化教学和以能力为主的教学。这些教学法有不同的侧重点。一体化教学以教学内容的理论形式与实际形态的结合讲解见长，受限于要有适当的内容、必要的教学条件。以能力为主的教学把应用能力分解加以专门的训练，只是单纯地进行技术训练。其实，技术的应用形态体现了技术的应用特征和直接价值。电机与拖动技术的应用形态有这样的特点：拖动技术以整机形式存在，使用者主要关注如何使用和维护；由于生产的需求，先进方法和技术很快就在实际整机系统中应用。本书以电机与拖动技术的应用形态为内容取舍的主要标准，介绍了电机的维护技术，在附录中通过电动机安装的介绍，说明了电动机实际应用场合的情况；简要说明了实际应用中也会遇到的新的调速方法，如磁场定向控制和直接转矩控制，也提到了智能控制。虽然这些新的调速控制方法涉及专门的内容，多在调速系统技术中讲解，但是其基本的对电动机进行控制的思想却是属于电机拖动技术的，因为这取决于电动机本身和对电动机的分析。据此，本书也对变频器的使用做了简要的介绍。

本书共分为7章：第1章绪论，首先介绍了最早的原型电机和一个同步电机的实例，分析了电机所拖动的负载的基本情况，得出电机系统是一个由电气、磁路和包含负载影响的机械部分共同组成的一个系统。因此，在负载变化条件下和其他干扰条件下，

如何控制电机的输入来完成调速和稳速功能成为电机使用也就是电机拖动的主要问题。围绕这个中心问题，随之也有如何从静止到要求的运行速度的电机起动问题，还有如何从运行速度减速（或归于静止）的电机制动问题。第2章讲解了电机的物理结构。为了说明各种电机的工作原理，在通常的电机的定子转子结构的基础上，首先概括出常用电机的电磁作用类型为同步型、异步型和排斥型。以3种电磁类型为框架，讲解了常用电机的定子磁场和转子磁场的相互作用形式，对常用电机的结构情况进行了简要说明。在传统的直流电动机、三相异步笼型交流电动机、三相异步绕线转子交流电动机和同步交流电动机之外，对应用日益广泛的永磁同步电动机、无刷直流电动机、步进电动机和开关磁阻电动机给予了足够的关注。第3章的内容主要涉及电机的模型表示。电机是一种常用的电磁设备，它具有明显的动态特性，尤其是交流电机。我们往往从动态特性和稳态特性两个角度对电机的性能加以研究，所采用的研究方法有等效电路、数学模型和特性曲线。这一章中，重点分析了具有代表性的直流电动机、三相异步电动机和三相同步电动机的模型表示，其他电机的性能与它们类似，可参照掌握。在第4章中，讲解了电机的起动技术。电机的起动技术是电机拖动技术的主要组成部分。起动是指电机从静止状态进行到正常运行状态之间的过渡过程。本章对直流电机、异步电机和同步电机的起动技术均进行了介绍。第5章讲解的电机调速技术是电机拖动技术中最重要的技术。为了使电机的输出量（如转速或转矩）能够有较好的运行性能，电机调速往往采用闭环形式。这样，电机居于闭环系统前向通道的后端，其性能对闭环控制有决定性的影响。直流电机通常有三种调速方法，即串电阻、调压和弱磁。在实际应用中，直流电机主要采用调压和弱磁合在一起的典型方案。与直流电机相比，交流电机因其参数的时变、系统非线性和耦合而难于控制。交流异步电动机最直接的控制方法是标量控制，为提高控制性能又有了具有转矩和磁链解耦特点的矢量控制，还有直接进行转矩-砰控制的直接转矩控制。其实对交流异步电动机来说，可以通过控制器的智能功能来减少其难控因素，这就是交流异步电动机的智能控制方法。交流同步电动机可以采用与交流异步电动机类似的矢量控制方法和智能控制方法。第6章介绍了电机的制动技术。电机有能耗制动、反接制动和回馈制动三种方式，其共同特点是电磁转矩与转速方向相反。第7章介绍了电动机应用的主要问题，包括电动机的系列情况、确定具体参数时所用到的电动机的有关规定及电动机类型选择的问题，尤其是额定参数的计算；最后介绍电动机维护的有关技术。

在本书编写过程中，阅读和参考了许多技术文献。在本书参考文献中列出了引用的相关文献，如有疏漏，请予指正。

本书由黑龙江大学王丁老师、沈永良老师，黑龙江科技学院姜志成老师和黑龙江大学庄培栋老师编著；王丁制订编写大纲和统稿。第1章、第2章、第3章、第5章和附录由王丁编著，第4章由沈永良编著，第6章由姜志成编著，第7章由庄培栋编著。

本书由汤天浩教授主审，提出了许多宝贵意见和建议。他的精湛的专业见解和严谨的审稿作风使本教材获益颇多，在此表示衷心的感谢。

感谢黑龙江大学邓自立教授在本书编写中的精辟指教和对作者工作的关注。

本书编写得到黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室（DZZD20100036）和黑

龙江大学自动控制重点实验室支持。同时，还要感谢黑龙江大学周世超、唐荣华、张雷、韩露、牛慕玉、曾晨、刘婷、许天敏、宋建勋、郑庆伟、张振涛、方圆、齐凤华和张媛同学在本书编写过程中所做的工作。

由于编者水平所限，书中不妥和错误之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

- 1.1 电机的起源 1
- 1.2 一个电机实例：永磁同步电动机 2
- 1.3 电机的负载 4
 - 1.3.1 负载的运动形式 4
 - 1.3.2 负载的机械特性 5
- 1.4 电机拖动系统的基本情况 7
 - 1.4.1 电机拖动系统的组成 7
 - 1.4.2 电机拖动系统机械部分的表达式 7
 - 1.4.3 电机拖动系统的状态 8
 - 1.4.4 电机与负载之间的传动装置 8
 - 1.4.5 电机拖动系统的关键技术问题 10

本章小结 12

习题 12

第2章 电机的物理特征 13

- 2.1 电机基本原理 13
 - 2.1.1 转动的条件 13
 - 2.1.2 各种旋转磁场 13
 - 2.1.3 电磁配合类型与电机主要类型 14
- 2.2 三相定子旋转磁场分析 18
 - 2.2.1 定子的结构 18
 - 2.2.2 单相定子绕组的磁动势 18
 - 2.2.3 三相电枢绕组的磁动势 20
- 2.3 直流电机的结构与原理 21
 - 2.3.1 概述 21
 - 2.3.2 直流电机的基本结构 22
 - 2.3.3 各种直流电机类型 23
 - 2.3.4 直流电机运行原理 23
- 2.4 各种异步电机 24
 - 2.4.1 三相异步电机 24
 - 2.4.2 单相异步电机 26
- 2.5 同步电机 28
 - 2.5.1 同步电机的基本结构 28
 - 2.5.2 永磁同步电动机 28
 - 2.5.3 无刷直流电动机 29
 - 2.5.4 步进电动机 33

2.5.5 开关磁阻电动机 38

2.6 电机的电磁转矩 39

- 2.6.1 电磁转矩的一般形式 40
- 2.6.2 模型电机的感应电动势与电磁转矩 41
- 2.6.3 具体转矩计算 44

本章小结 46

习题 47

第3章 电机的模型表示 48

3.1 电机性能的分析方法 48

- 3.1.1 动态特性与稳态特性 48
- 3.1.2 各种分析方法 49

3.2 直流电机的等效电路与特性 50

3.2.1 直流电机的等效电路和微分方程 50

3.2.2 直流电机的机械特性 50

3.2.3 直流电机的人为机械特性 51

3.3 三相交流电机的稳态等效电路 53

3.3.1 三相交流异步电动机的稳态电压方程 54

3.3.2 三相异步电动机的等效电路 55

3.3.3 隐极同步电动机的等效电路 58

3.4 三相坐标系中异步电机的动态方程 58

3.4.1 电压方程 59

3.4.2 磁链方程 59

3.4.3 转矩方程和机械运动方程 61

3.4.4 三相坐标系中异步电机的动态数学模型 62

3.5 交流电机的坐标系变换 63

3.5.1 线性变换与功率不变约束 63

3.5.2 坐标变换与电机绕组等效 64

3.5.3 坐标变换 65

3.6 两相坐标系中异步电机的动态数学模型 67

3.6.1 两相静止坐标系上的动态数学模型 67

3.6.2 两相同步旋转坐标系上的动态数学

模型	68	5.1.3 调速方式与负载类型	99
3.6.3 两相坐标系上的状态方程	69	5.2 他励直流电动机的调速方法	100
3.7 交流电机的特性曲线	71	5.2.1 串电阻调速	100
3.7.1 三相异步电动机的固有机械特性	71	5.2.2 调压调速	101
3.7.2 三相异步电动机的人为机械特性	72	5.2.3 弱磁调速	101
3.7.3 同步电机的功角和矩角特性	73	5.2.4 三种调速方法比较	102
本章小结	73	5.2.5 直流电动机的典型调速方案	103
习题	74	5.3 三相交流异步电动机的调速方法	103
第4章 电机起动技术	75	5.3.1 概述	104
4.1 电机起动中的主要问题	75	5.3.2 标量控制调速方法	104
4.1.1 起动电流与起动转矩	75	5.3.3 磁场定向控制的调速方法	108
4.1.2 与起动相关的三个特别因素	75	5.3.4 直接转矩控制的调速方法	110
4.1.3 直接起动与软起动	75	5.4 变频控制有关应用问题	111
4.2 交流异步电动机的起动方法	78	5.4.1 变频器的常用功能	111
4.2.1 三相交流异步电机的Y- Δ 起动方法	79	5.4.2 电动机特性的控制方式	112
4.2.2 自耦变压器起动方法	80	5.4.3 变频调速电压频率特性曲线及其选择	113
4.2.3 转子串频敏变阻器起动方法	81	5.4.4 变频器的节能原理	115
4.2.4 数字式软起动器的工作原理及特点	83	5.5 单相异步电动机的调速控制	116
4.2.5 基于磁阀式可控电抗器的磁控软起动方法	85	5.5.1 调压调速	116
4.2.6 孤立电网下大电动机的软起动实例	86	5.5.2 变极调速	117
4.2.7 单台变频器起动多台设备的实例	87	5.5.3 变频调速	117
4.2.8 笼型变频电动机起动时出现跳闸现象的原因分析	88	5.6 同步电动机的变频调速	118
4.3 同步电机的起动方法	89	5.6.1 他控式同步电动机的变频调速系统	118
4.3.1 同步电机变频起动策略研究	89	5.6.2 自控式同步电动机的变频调速系统	118
4.3.2 无位置传感器无刷直流电机起动方法	92	本章小结	119
4.3.3 步进电动机起动过程设计	95	习题	119
4.3.4 开关磁阻电动机起动技术	96	第6章 电机制动技术	120
本章小结	96	6.1 电机的电动与制动运行状态	120
习题	97	6.1.1 电动机的电动运行状态	120
第5章 电机调速技术	98	6.1.2 电动机的制动运行状态	121
5.1 电机调速的基本情况	98	6.2 能耗制动	122
5.1.1 电机调速技术的应用与发展情况	98	6.2.1 他励直流电动机的能耗制动	122
5.1.2 调速指标	99	6.2.2 异步电动机的能耗制动	125
		6.3 回馈制动	130
		6.3.1 他励直流电动机回馈制动的原理	130
		6.3.2 他励直流电动机回馈制动的实现方法	130
		6.3.3 异步电动机回馈制动的原理	132
		6.3.4 异步电动机回馈制动的实现	

方法	133	7.6.2 直流电动机的常见故障分析	171
6.4 反接制动	135	7.6.3 三相交流电动机的常见故障及其 处理	174
6.4.1 他励直流电动机反接制动的原理 与特点	135	7.6.4 变频器常见问题	176
6.4.2 异步电动机反接制动的原理	140	7.6.5 变频器与电动机的距离对系统的 影响及防止措施	177
6.4.3 三相异步电动机运行状态小结	145	7.6.6 同步电动机常见故障的分析及解决 方法	178
本章小结	147	7.6.7 伺服电动机使用中的常见 问题	179
习题	148	7.6.8 步进电动机的常见问题及其解决 办法	181
第7章 电机拖动应用问题	151	本章小结	183
7.1 概述	151	习题	183
7.2 电动机应用中的有关指标	151	附录	184
7.2.1 电动机的描述指标	151	附录 A 电磁学的基本概念与定律	184
7.2.2 电动机的工作制分类	154	A.1 磁场	184
7.3 电动机产品系列	155	A.2 磁路定律	185
7.3.1 直流电动机产品系列	155	A.3 电磁感应定律	187
7.3.2 三相异步电动机的分类	156	A.4 电磁力与电磁转矩	188
7.3.3 同步电动机的型号	159	A.5 圆柱面磁场间的力矩	188
7.4 电动机类型的选择	159	附录 B 电动机及其附属设备安装工艺 标准	189
7.4.1 一般选择标准	159	附录 C 直线永磁同步电动机	195
7.4.2 交流电动机的选择	160	C.1 概述	195
7.4.3 普通异步电动机与变频电动机的 区别	161	C.2 直线永磁同步电动机的基本 结构	195
7.4.4 两种永磁同步电动机的比较	163	C.3 直线永磁同步电动机的基本工作 原理	196
7.4.5 步进电动机和交流伺服电动机 性能比较	163	参考文献	197
7.5 电动机额定数据的选择	164		
7.5.1 电动机额定电压的选择	165		
7.5.2 电动机额定转速的选择	165		
7.5.3 电动机额定功率的选择	165		
7.6 电动机的使用与检修	171		
7.6.1 电动机的例行检查与维护	171		

第 1 章 绪 论

电机是电动机 (electrical motors) 和发电机 (electrical generators) 的总称。顾名思义, 电动机是通电可以转动的设备, 发电机是使其转动就可以产生电能的设备, 因此它们可以被称为机电能量转换设备。这样, 电机就把电气技术和机械运动联系起来。电气技术是一种已十分完善的、可以实现自动控制和便于人操作的主流工业技术, 而机械运动是各种工业应用中的普遍应用形式, 因此使电机成为最为广泛应用的工业设备之一。在电力工业中, 产生电能的发电机和对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在工业企业中, 人们利用电动机把电能转换为机械能去拖动各种生产机械, 从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中, 需要大量的牵引电动机。在电力排灌、播种、收割等农用机械中, 都需要规格不同的电动机。在品种繁多的家用电器中, 也离不开功能各异的小功率电动机。对电动机的使用, 也就是对其进行电气控制, 通常被称为电机拖动 (motor drive)。因此电机拖动技术就成为最重要、应用最广泛的电气技术。

本书中主要讲述电动机, 故下文都以电机简称, 除说明是发电机外, 其余皆指电动机。

1.1 电机的起源

电磁力 (electromagnetism) 的发现是电机被发明和被应用的基础。在 1820 年 4 月, 丹麦化学家和物理学家奥斯特 (Hans Christian Oersted) 发现电流可以产生磁场 (magnetic field): 通过接通和关断一根导线的电源, 可以发现靠近通电导线的指南针的指针改变方向。几个月后, 法国数学家和物理学家安培 (Andre-Marie Ampere) 发表了关于磁力和电流之间的数学关系的论文。

在 1821 年, 英国化学家和物理学家法拉第 (Michael Faraday) 揭示了所有电机中内在的机电转换的一般原理。因此, 大多数资料认为法拉第是电机的第一个发明者。他的经典的、构思巧妙的实验如图 1-1 所示。有 A 和 B 两个装满水银的杯子。杯子 A 中有一条形磁铁, 其底端采用点固定的方式定位在杯子中, 但磁铁可以此固定端为轴运动。杯子 A 的底部有一导体连接到外部, 导体内部与水银接触, 形成电连接。杯子 B 中也有一条形磁铁, 但其底端是完全固定的, 这样磁铁不能运动。杯子 B 的底部也有一导体连接到外部, 导体内部与水银接触, 形成电连接。一根导线固定在两个杯子中间的支架上, 这根导线的固定端 A 垂直放入 A 杯并与水银接触, 其另一个活动端也垂直放入 B 杯。在杯子 B 里, 磁铁固定不动, 导线端子可以自由地围绕磁铁转动; 在杯子 A 里, 导线固定不动, 磁铁可以围绕导线转动。因此, 两个杯子底部的导体、杯子里的水银和导线形成了一个导电支路。当在两个杯子的底部导体之间加上一个外部直流电源时, 上述导电支路就会有电流流过, 加到支架上导线上的电流产生磁场, 使杯子 A 中的可活动磁铁和杯子 B 中吊放的可活动导线转动。由此证明, 一个电磁铁物体和一个永磁体物体可以产生相互力的作用, 产生转动力, 使电能转换成旋转运动, 即机械能。

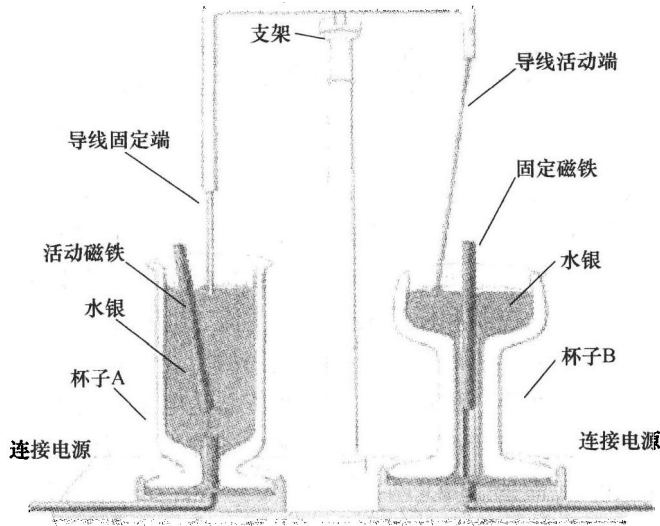


图 1-1 电磁力与磁力作用产生转动实验

法拉第在 1831 年建立了电磁感应定律：闭合电路的电动力正比于磁通量变化的速度。然而，第一个能够带动机械的直流电机（directcurrent motor）是 1832 年由英国物理学家斯特金（William Sturgeon）发明的，电机的连续运转通过换向器（commutator）实现。1837 年，美国人达文波特（Blacksmith Thomas Davenport）发明了能以 600r/min 运行的电机，随后用于电动印刷机（printing press）、木加工车床（wood lathe）和钻床（drill）。他的设计采用了包含相对的 U 形磁铁的定子-转子方案（stator-rotor concept）。

1885 年，意大利物理学家费拉里斯（Ferraris）发现了两相电流可以产生旋转磁场（rotating field）。一年以后，费拉里斯和在美国的特斯拉（Nikola Tesla）几乎同时制成了两相感应电机的模型。1888 年，多里沃多勃罗沃尔斯基（Dolivo-Dobrowolski）提出了三相制，并制成了三相感应电机（three phase induction motor），奠定了三相电路和三相电机的基础。此后，三相交流电迅速地发展起来，到 20 世纪初，各种三相交流电机均已设计制造成功。进入 21 世纪以后，人们在降低电机成本、减小电机尺寸、提高电机性能、选用新型电磁材料、改进电机生产工艺等方面进行了大量工作，使现代电机与 20 世纪初的电机相比有了很大改进。

1.2 一个电机实例：永磁同步电动机

为说明电机原理与拖动的一般问题，首先在这里介绍一种结构相对简单的永磁同步电动机（permanent magnet synchro motor）的基本结构和原理。

图 1-1 中的电磁力和磁力的相互作用实验说明，通电导线产生的电磁力与永磁铁的磁力作用可以产生一定的转动。分析其中的要点：有两个部分：一个是固定部分；另一个是活动部分。每个部分有一个永磁铁或电磁铁；两部分中的电磁力作用而使活动部分运动；但是不能连续转动。按照这个原理，再解决了连续转动的问题，就可以设计一种简单的电机了。

为使两部分有连续的相对运动，采用直线运动显然是不可取的，因为这样需要有允许直线运动的广大空间。所以运动部分采用转动方式，设计为中间有轴的圆柱体，可称为转子 (rotor)，再将固定部分设计为围绕在转子外圈的圆环柱体，可称为定子 (stator)。转子上装有永磁铁，安装方式有两种：一种是安放在转子表面，称为表面安装 (surface mounted)，如图 1-2a 所示；另一种是埋在转子铁心中，称为埋藏式 (buried)，如图 1-2b 所示。由上述两种基本安装方式，可以进行多种组合。其中的两种组合安装方式如图 1-2c 和图 1-2d 所示。定子由围绕着转子的导磁体组成，在定子导磁体上嵌有均布的 A-X、B-Y 和 C-Z 三组线圈，对应三相交流电源，被称为定子三相绕组。当在定子三相绕组通以三相交流电时，会在定子和转子间的空气隙中产生旋转磁场 (rotating field) (注：这是电机拖动技术的重要知识点，后面会进一步讲解)。在图 1-3 中，分别给出了 4 个时间的转子绕组的磁动势情况，它们是依次有规律地变化的。可以推理出，随着时间的变化，转子绕组的磁动势呈旋转式分布。因此，定子旋转磁场因磁力吸引会带动转子旋转，如图 1-4 所示。

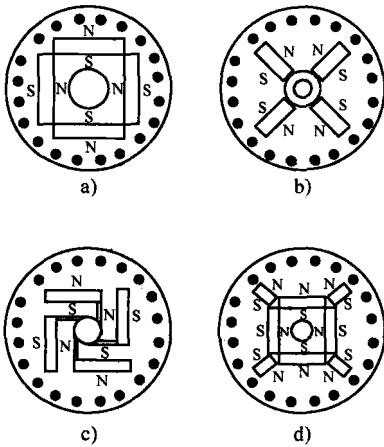


图 1-2 永磁同步电动机转子的安装方式
a) 表面安装方式 b) 埋藏式安装方式
c) 并联式组合安装方式 d) 混合式组合安装方式

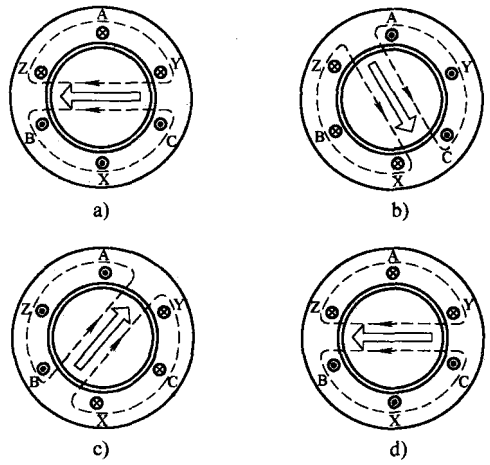


图 1-3 三相电枢绕组的旋转磁场
a) $\omega_e t = 0$ b) $\omega_e t = 2\pi/3$
c) $\omega_e t = 4\pi/3$ d) $\omega_e t = 2\pi$

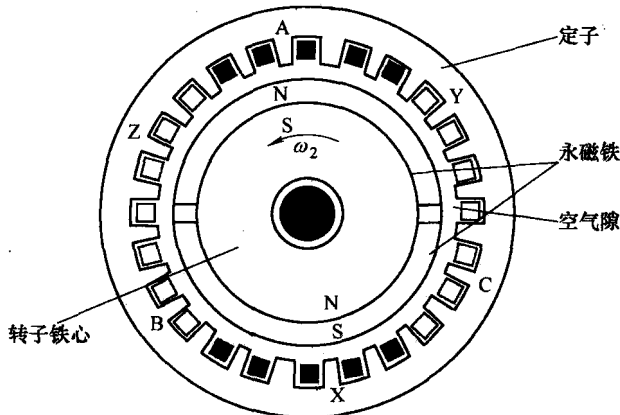


图 1-4 永磁同步电动机运行原理示意图

1.3 电机的负载

电机正常运行的标志是转动，可用电磁转矩 T_e 来描述。电机正常运行应该带负载 (load)，如图 1-5 所示。为了进一步分析负载的性质，对负载进行分类。通常有两种分类方法：一种是按运动形式来分，另一种是按负载的性质来分。

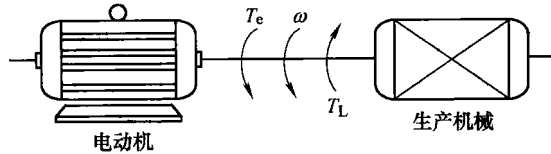


图 1-5 电力拖动系统示意图

1.3.1 负载的运动形式

从负载的运动形式角度来看，有两种基本的运动形式：平移运动和升降运动。平移运动指的是水平方向的运动，其实例如图 1-6 所示。图中，电机 M 通过减速传动组合 1-8 带动工作台 G_1 以速度 v 向前运动，工作台 G_1 上的工件 G_2 随之产生同样速度、同样方向的运动，使工件与切削刀具持续交错运动，使刀具对工件进行切割。升降运动指的是垂直方向的运动，其实例如图 1-7 所示。图中，电动机拖动两组齿轮转动，与滚筒同轴相连的齿轮带动滚筒转动，滚筒卷放吊绳使所吊重物进行垂直方向的上下运动。其他形式的运动，也就是一般运动，都可以看成是这两种运动形式的组合。例如上坡运动，就可以看成是水平运动和上升运动的合成运动。

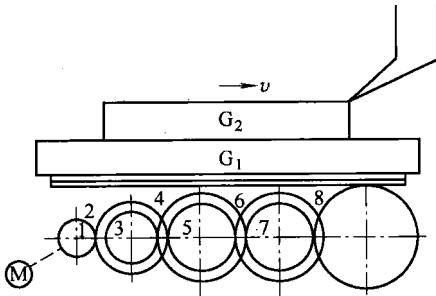


图 1-6 平移运动示意图

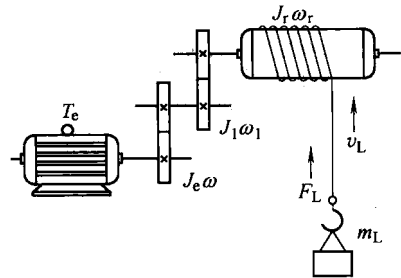


图 1-7 升降运动示意图

电动机所拖动的各种运动机构，就是电动机的负载，都对电机有必然的影响。如何分析和看待这个影响是电机使用中的一个重要关联问题。由于电机是一种转动设备，负载的电机侧和电机同轴连接，组成一个转动系统。这样，负载对电机的影响就体现为施加在电机轴上的一个转矩，被称为负载转矩。从电机角度看，无论何种负载，都可等效为一个转动负荷。这一点，可以参见图 1-5 中的 T_L 。

电动机所拖动的一般运动形式的工作机构对电动机的负载转矩影响可以这样获得：首先把一般运动分解为基本运动分量，再把这些基本运动分量产生的转矩分别等效为电动机轴端

(单轴旋转系统)的等效转矩,最后将这些等效转矩分量叠加,求得总的负载转矩。等效方法可参见有关文献。

因此,在电机拖动系统的分析中,各种各样的运动形式的负载都可等效为电动机轴端的单一的负载转矩。

1.3.2 负载的机械特性

反映到电动机轴端的负载转矩在工作中往往是随转速变化的,因而产生两个问题:第一个是对电机拖动系统的稳定运行会产生重要影响,这一点会在以后进一步分析;第二个问题是如何描述这个变化,通常采用机械特性来描述。

负载转矩 T_L 与转速 n 的关系为 $T_L = f(n)$, 也称为生产机械的机械特性。负载转矩 T_L 的大小与多种因素有关。以车床主轴为例,当车床切削工件时,主轴转矩和切削速度、切削量、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。大多数生产机械的机械特性可归纳为下列三种类型。

1. 恒转矩机械特性

所谓恒转矩机械特性,就是指负载转矩 T_L 与转速 n 无关的特性,即当转速变化时,负载转矩 T_L 保持常值。恒转矩机械特性又可分为反抗性恒转矩机械特性和位能性恒转矩机械特性两种。

(1) 反抗性恒转矩机械特性

反抗性恒转矩机械特性的特点是,等效到电机轴端的恒值转矩 T_L 总是反对电机运动的方向。正如式(1-4)所示的那样,电磁转矩和负载转矩的差值决定了电机拖动系统运动部分的速度变化。在这种表述下,由于负载转矩和电磁转矩的相反性已经通过负号表示,所以负载转矩和电磁转矩应取同样的符号。当电机正转时,转矩 T_L 为反向,应取正号,即为 $+T_L$; 而电机反转时,转矩 T_L 为正向,应变为 $-T_L$, 如图1-8所示。显然,反抗性恒转矩机械特性应画在第一与第三象限内,属于这类特性的负载有金属的压延机构、机床的平移机构等。

(2) 位能性恒转矩机械特性

位能性恒转矩机械特性则与反抗性的特性不同,其特点是转矩 T_L 具有固定的方向,不随转速方向改变而改变。不论重物提升(n 为正)或下放(n 为负),负载转矩始终为反方向,即 T_L 始终为正,特性画在第一与第四象限内,表示恒值特性的直线是连续的。由图1-9可见,提升时转矩 T_L 反对提升,下放时 T_L 却帮助下放,这是位能性负载的特点。

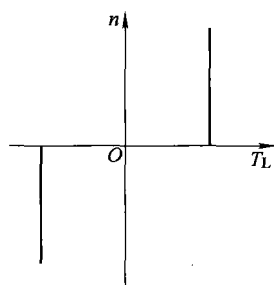


图 1-8 反抗性恒转矩机械特性

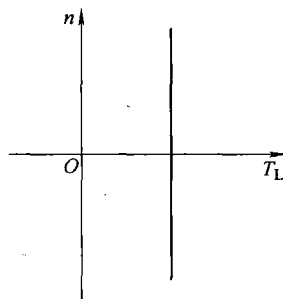


图 1-9 位能性恒转矩机械特性

2. 通风机、泵类机械特性

通风机、泵类负载的转矩与转速大小有关，基本上与转速的二次方成正比，即

$$T_L = kn^2 \tag{1-1}$$

通风机、泵类机械特性如图 1-10 所示，图中只在第一象限画了转速正向时的特性，鉴于通风机、泵类负载是反抗性的，当转速反向 (n 为负) 时， T_L 是负值，第三象限中应有与第一象限特性对称的曲线。

3. 恒功率机械特性

有些生产机械，比如车床，在粗加工时，切削量大，切削阻力大，此时开低速；在精加工时，切削量小，切削阻力小，往往开高速。因此，在不同转速下，负载转矩基本上与转速成反比，即

$$T_L = \frac{k}{n} \tag{1-2}$$

由于负载功率 $P_L = T_L \omega$ ， $\omega = 2\pi n/60$ ，即 $P_L = T_L(2\pi n/60) = T_L n/9.55$ ，再把式 (1-2) 代入，可得 $P_L = k/9.55$ ，为常数，表示在不同转速下，电力拖动系统的功率保持不变，负载转矩 T_L 与 n 的特性曲线呈现恒功率的性质，如图 1-11 所示。

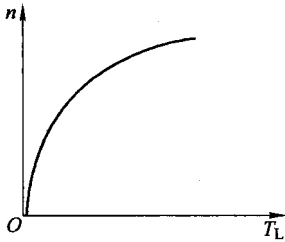


图 1-10 通风机、泵类机械特性

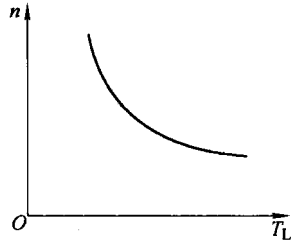


图 1-11 恒功率机械特性

实际生产机械的机械特性可能是以上几种典型特性的综合。例如，实际通风机除了主要是通风机机械特性外，由于其轴承上还有一定的摩擦转矩 T_f ，因而实际通风机机械特性应为

$$T_L = T_f + kn^2 \tag{1-3}$$

其特性曲线如图 1-12 所示。实际的起重机机械特性如图 1-13 所示，除了位能机械特性外，还应考虑起重机传动机构等部件的摩擦转矩。

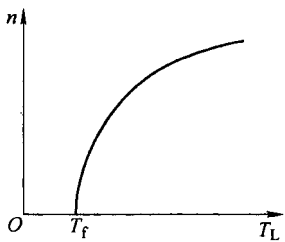


图 1-12 实际的通风机机械特性

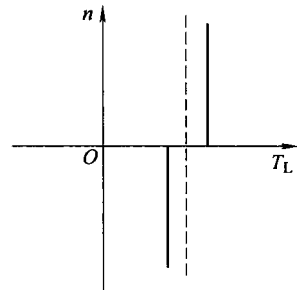


图 1-13 实际的起重机机械特性

1.4 电机拖动系统的基本情况

随着各种电机的不断发明和应用,电机的使用和控制技术有了完整全面的发展。在电机的基本原理基础上的电机拖动技术成为使用电机的最关键的技术。为此本节介绍电机拖动系统的基本情况,首先关注电机本身的情况,再考虑与电机直接连接的前级控制情况和后级负载情况。

1.4.1 电机拖动系统的组成

分析图 1-5 中电动机拖动负载的情况可以知道,正常运转的电动机与负载和供电电源是直接结合在一起的。这样,电机拖动系统可以概括成三个部分(见图 1-14),即由供电电源和其所连接的电机绕组形成的电气部分,电磁力相互作用或电磁力与磁力相互作用的电磁部分,电机转子和同轴连接的机械负载形成的机械部分。通过简单的思考可以得知:产生电磁转矩的电磁部分可以有多种不同的形式,对应着已发明的不同种类的电机,不同电机的电磁部分需要有不同的电气部分,但不同的电机的机械部分却有着相同的规律。电机拖动系统的电磁部分会在以后的电机的物理特征中加以讲解,机械部分在下一小节中讲解,对电气部分的控制构成了以后的起动、调速和制动技术。电机的起动、调速和制动技术分别在第 4 章、第 5 章和第 6 章重点介绍。



图 1-14 电机拖动系统的三个组成部分

1.4.2 电机拖动系统机械部分的表达式

电力拖动系统经过简化,都可转为图 1-5 所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统。根据牛顿力学定律,该系统的运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-4)$$

在工程计算中,通常用转速 n [单位为转/分(r/min)]代替角速度 ω ;用飞轮惯量(或称飞轮转矩) GD^2 代替转动惯量 J 。由于 n 与 ω 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{60}n \quad (1-5)$$

J 与 GD^2 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-6)$$

式中, g 为重力加速度,可取 $g = 9.81\text{m/s}^2$ 。

电力拖动运动方程的实用形式为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

式中, $375 = 4g \times 60 / (2\pi)$,是具有加速度量纲的系数。

1.4.3 电机拖动系统的状态

式 (1-7) 表明, 电力拖动系统的转速变化 dn/dt (即加速度) 由电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的负载转矩 T_L 的关系决定。具体分以下几种情况讨论。

1) 当 $T_e = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 表示电动机以恒定转速旋转或静止不动, 电力拖动系统的这种运动状态被称为静态或稳态。

2) 若 $T_e > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统处于加速状态。

3) 若 $T_e < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统处于减速状态。

也就是一旦 $dn/dt \neq T_L$, 则转速将发生变化, 这种运动状态称为动态或过渡状态。

终端负载通过转矩的方式反映到电机系统中, 因而电机拖动系统中既包含了电磁转矩的影响, 也包含了终端负载的影响, 形成了一个整体。在稳态情况下, 电机稳速运行, 则有电磁转矩等于负载转矩。在这种情况下, 电磁转矩往往被认为是电机的被控制量。

1.4.4 电机与负载之间的传动装置

1. 传动装置与传动比

(1) 传动装置

在大多数电力拖动系统中, 电机与负载 (生产机械) 之间是通过传动机构 (多数情况是减速机构) 相连接的。常见的传动机构有联轴器、传动带、齿轮等, 如图 1-15 所示。

(2) 传动比

电机侧的转速 n 与负载侧的速度 n_L 之比, 称为传动机构的传动比, 用 j 表示, 即

$$j = \frac{n}{n_L} \tag{1-8}$$

经过传动机构后, 负载侧的转速变为

$$n_L = \frac{n}{j} \tag{1-9}$$

忽略传动机构中的功率损失, 则传动机构输入侧 (电机侧) 和输出侧 (负载侧) 的机械功率应该相等, 即

$$P = \frac{Tn}{9550} \approx \frac{T_L n_L}{9550} = P_L \tag{1-10}$$

所以, 传动机构两侧的转矩是与转速成反比的, 即

$$\frac{T}{T_L} = \frac{n_L}{n} = \frac{1}{j} \tag{1-11}$$

或者说, 经过传动机构减速后, 负载侧的转矩为

$$T_L = jT \tag{1-12}$$

由此可知, 如果负载侧所得到的转速减小为电机侧转速的 $1/j$, 则负载侧所得到的转矩比电机侧增大了 j 倍。

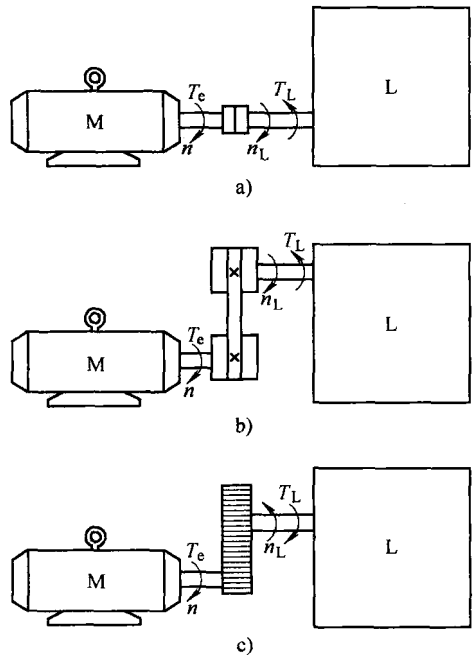


图 1-15 常见的传动机构
a) 联轴器传动 b) 带传动 c) 齿轮传动