



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13-5” GUIHUA JIAOCAI

电气传动控制系统

钱晓龙 闫士杰 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

电气传动控制系统

钱晓龙 闫士杰 主编

附录(CIP)目录附录A

北京 冶金工业出版社
2017

内 容 提 要

本书主要讲述电气传动控制系统。书中遵循理论和实际相结合的原则,针对不同的控制对象及要求,选择合适的控制规律、系统结构、单元部件和系统参数,使学生建立起系统的工程概念;同时,从理论联系实际的角度,阐述了电气传动系统控制的基本理论和相关技术;在强调闭环控制的前提下,介绍了系统的静态和动态性能、设计方法及系统的工程实现,并重点介绍了 PWM 控制技术,电压型逆变器,异步电动机和同步电动机矢量控制等传动系统的主流技术,尽量反映本学科最前沿的技术成果。

本书内容深入浅出、通俗易懂,可作为自动化和电气工程类专业本科生或研究生教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动控制系统/钱晓龙,闫士杰主编. —北京:冶金工业出版社,2017.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7406-5

I. ①电… II. ①钱… ②闫… III. ①电力传动系统—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 323483 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7406-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2017 年 1 月第 1 版,2017 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15 印张; 364 千字; 231 页

35.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着科技及工程应用的发展,特别是数字化技术的实现,原有《自动控制系统》(冶金工业出版社,2001年第2版)和《近代交流调速》(冶金工业出版社,1994年)教材中的大部分内容已和当今工业实际系统不能吻合,教学严重滞后于当前的实用技术。而交流调速系统借助计算机技术、功率电子技术及现代控制理论的飞速发展,在生产生活中的应用越来越广泛,已成为传动领域的主流,这就促使着高校在基础教学中必须做出相应的调整或者改革。而交流传动系统对专业知识的要求很高,它涉及的知识覆盖面广、理论基础性强、实践应用性强,且需要创新能力,因此对教材进行改革创新势在必行,而且迫在眉睫。正是在这样的背景下,我们开始编写此书。根据教学大纲的要求,在编写过程中,我们力图做到教材内容的精选和完整,分析论述的深入浅出与准确,理论上的严密与工程实践经验的融合。

本书以冶金企业的轧机传动系统为研究对象,对自动控制系统的概念、系统的工作原理及其分析方法、系统的工程设计方法等做了全面深入的介绍。

全书共分七章:第1章为电气传动系统的基础,梳理了一下将要用到的交直流电机的基本理论和分析方法;第2章以闭环控制直流调速系统为例,重点讲解了双闭环调速系统的工程设计方法;第3章为电压型变频器系统,详细讲述了PWM逆变器的工作原理,介绍了适用于大功率电动机的三电平逆变器及其空间矢量调制模式;第4章根据交流电动机的基本原理,通过引入空间矢量方法,经过坐标变换,仿照直流电动机调速系统,建立异步电动机矢量控制系统;第5章详细介绍了同步电动机矢量控制系统,主要分析了永磁同步电动机和励磁同步电动机的矢量控制方法,并按照典型系统的工程设计方法对控制器参数进行设计;第6章为伺服系统,首先介绍了伺服系统的构成以及性能指标,然后对由电流环、转速环和位置环构成的三环伺服控制系统进行设计;第

7章以三电平PWM整流器为典型控制系统,在本书前述控制系统的工程设计、PWM控制、坐标变换以及矢量控制的基础上,对三电平PWM整流系统进行控制器设计。

本书的第1章、第2章和第5章由东北大学钱晓龙教授编写,第3章和第4章由东北大学闫士杰副教授编写,第6章和第7章由山西大学高世红老师编写。

由于作者水平有限,不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2016年10月

目 录

1 电气传动系统的基础	1
1.1 电机基础	1
1.1.1 电机统一理论	1
1.1.2 电机的结构及基本工作原理	2
1.2 调速装置	7
1.2.1 直流调速装置	7
1.2.2 交流调速装置	9
1.2.3 调速的一般原则	18
1.3 电气传动控制系统的结构	20
1.3.1 开环控制结构	20
1.3.2 闭环控制结构	21
1.3.3 开环与闭环控制结构的对比	23
1.4 电气传动控制系统的调速指标	24
1.4.1 静态调速指标	24
1.4.2 动态调速指标	26
1.5 控制器的 PID 调节作用	28
1.5.1 PID 调节规律	28
1.5.2 数字式 PID 调节器	32
1.6 小结	34
习题与思考题	34
2 双闭环控制的直流调速系统	36
2.1 双闭环直流调速系统的组成	36
2.2 双闭环直流调速系统的稳态结构图与参数计算	37
2.2.1 稳态结构图和静特性	37
2.2.2 各变量的稳态工作点和稳态参数计算	39
2.3 双闭环直流调速系统的数学模型与动态过程	39
2.3.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型	39
2.3.2 双闭环直流调速系统的动态过程分析	43
2.4 双闭环直流调速系统的工程设计	46
2.4.1 调节器的工程设计方法	46
2.4.2 I 型典型系统	47

IV	
2.4.3	II 型典型系统..... 52
2.4.4	工程设计中的近似处理..... 58
2.4.5	双闭环直流调速系统的控制器设计..... 62
2.5	直流调速系统的智能控制方法..... 70
2.5.1	常规 PID 控制直流调速系统存在的问题..... 70
2.5.2	智能控制在直流调速系统中的应用..... 71
2.6	小结..... 74
	习题与思考题..... 74
3	电压型变频器系统..... 77
3.1	电压型 PWM 逆变器的基本工作原理..... 77
3.1.1	单相电压型 PWM 逆变器及其控制方法..... 78
3.1.2	三相电压型 PWM 逆变器及其控制方法..... 80
3.2	脉冲宽度调制技术..... 82
3.2.1	SPWM 调制法..... 83
3.2.2	加入 3 次谐波的 HIPWM 调制法..... 86
3.2.3	规则采样法..... 87
3.2.4	谐波消除法..... 93
3.2.5	电流滞环跟踪法..... 94
3.2.6	电压空间矢量法..... 95
3.3	电压型变频调速系统..... 104
3.3.1	PWM 变频器控制系统硬件电路..... 104
3.3.2	SPWM 逆变器控制系统..... 108
3.3.3	SVPWM 逆变器控制系统..... 111
3.4	三电平逆变器..... 114
3.4.1	三电平逆变器主电路结构..... 114
3.4.2	三电平逆变器工作原理..... 116
3.4.3	三电平逆变器空间矢量调制..... 118
3.5	多电平逆变器..... 122
3.5.1	多电平逆变器主电路结构..... 122
3.5.2	多电平逆变器工作原理..... 125
3.5.3	多电平逆变器 PWM 调制..... 127
3.6	小结..... 128
	习题与思考题..... 129
4	异步电动机矢量控制系统..... 130
4.1	异步电动机在 ABC 坐标系下的动态数学模型..... 130
4.1.1	磁链方程式..... 131
4.1.2	电压方程式..... 134

4.1.3 转矩方程式	135
4.2 异步电动机空间矢量	137
4.2.1 空间矢量的定义	137
4.2.2 空间矢量的变换	139
4.2.3 异步电动机空间矢量方程式	140
4.3 异步电动机空间矢量坐标变换	142
4.3.1 坐标变换的意义	142
4.3.2 3相/2相坐标变换的一般公式	143
4.3.3 3相/2相之间的静止变换	145
4.3.4 2相/2相之间的旋转变换	146
4.3.5 3相/2相之间的旋转变换	147
4.3.6 直角坐标系与极坐标系之间的变换	148
4.4 异步电动机在两相坐标系上的数学模型	149
4.4.1 异步电动机在任意两相坐标系上的数学模型	149
4.4.2 异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型	151
4.4.3 异步电动机在转子两相旋转坐标系上的数学模型	151
4.4.4 异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	152
4.5 异步电动机的矢量控制	153
4.5.1 矢量控制的基本思想	153
4.5.2 异步电动机的矢量控制原理	155
4.5.3 转子磁链模型计算	158
4.5.4 异步电动机矢量控制系统	162
4.6 小结	166
习题与思考题	166
5 同步电动机矢量控制系统	168
5.1 引言	168
5.1.1 同步电动机概述	168
5.1.2 同步电动机的变频调速	169
5.2 永磁同步电动机矢量控制系统	170
5.2.1 正弦波永磁同步电动机矢量控制系统	170
5.2.2 梯形波永磁同步电动机(无刷直流电机)变频调速系统	174
5.3 励磁同步电动机矢量控制系统	179
5.3.1 按气隙磁链定向的励磁同步电动机矢量控制系统	179
5.3.2 按定子磁链定向的励磁同步电动机矢量控制系统	186
5.4 小结	194
习题与思考题	194
6 伺服系统	195
6.1 伺服系统的组成	195

6.2 伺服系统的性能指标	196
6.3 伺服控制系统的设计	196
6.4 小结	198
习题与思考题	199
7 典型控制系统设计——PWM 整流系统	200
7.1 PWM 整流器及其控制方法	200
7.1.1 单相桥式 PWM 整流器及其控制方法	200
7.1.2 三相桥式 PWM 整流器及其控制方法	205
7.2 三电平 PWM 整流器控制系统的设计	209
7.2.1 拓扑电路分析	209
7.2.2 数学模型的建立	211
7.2.3 控制器的设计	220
7.3 小结	230
习题与思考题	230
参考文献	231

1

电气传动系统的基础

【内容提要】 本章在介绍电机分类、结构及基本工作原理的基础上，分别阐述交、直流电机的调速方式和常用的调速装置。详细讲解电气传动控制系统的开环控制结构和闭环控制结构，并将这两种系统结构进行对比，同时给出具体的调速指标。最后重点讲述控制器的 PID 控制策略，以及 PID 参数对控制效果的影响。

电气传动系统一般由控制器、调速装置和电机组成，如图 1-1 所示。本章将分别描述各个组成部分，首先介绍被控对象电机。

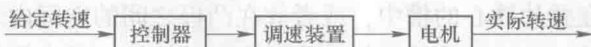


图 1-1 电气传动系统的组成

1.1 电机基础

1.1.1 电机统一理论

各种类型的旋转电机具有许多共同的特点。图 1-2 所示的典型结构有一个固定部件和一个旋转部件。固定部件在外面；旋转部件在里面，并由固定部件上的轴承支撑。两个部件都有圆柱形铁心，中间由空气隙隔开。主磁通 Φ 从一个铁心出来，经过空气隙通向另一

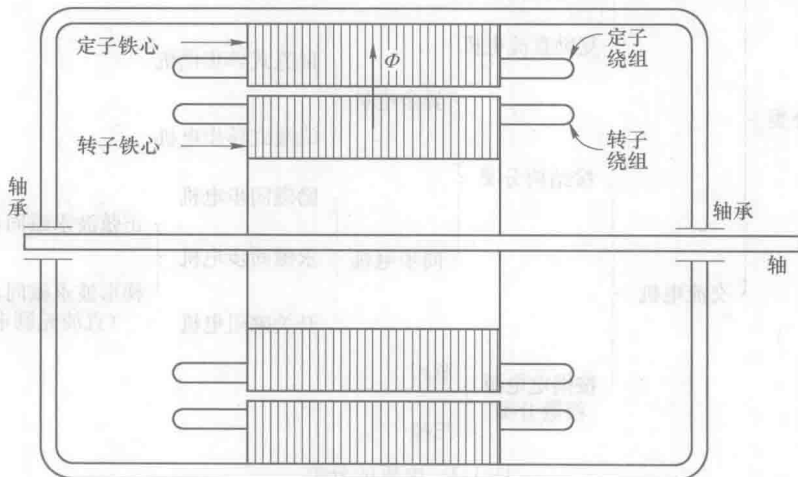


图 1-2 表示所有电机共同特点的结构示意图

个铁心,构成闭合磁路。有时,可以是里面的部件固定而外面的部件旋转。在特殊的情况下,两个部件都可以旋转。两个相距很近的圆柱形铁心表面进行相对运动是所有旋转电机的重要特点。任一部分的圆柱形表面有两种类型:有的仅为沿圆周均匀分布的小槽口所割开,分析时可以假想它是连续的;有的则分成偶数个凸极,极与极之间存在一定的空间。

在每个部件靠近表面的地方,沿着和圆柱体轴线平行的方向,安放有载流的导体。导体借助于在铁心外面的端部连接形成线圈,而线圈连接起来形成电机的绕组。任一部件的绕组都包含有少数几个独立的电路。电机的运行首先取决于环绕铁心表面的电流分布情况。所以,对绕组的分析只涉及这个分布情况,而端部连接的细节是次要的。因此,各种类型电机的一般布置是相同的,不同类型电机之间的基本区别仅在于绕组导体的分布情况不同和部件的表面情况不同(连续的或是具有凸极)。任何特定电机的运行还取决于接到绕组的外部电源电压的性质。

两个部件之间的狭窄的环形空间,通称为空气隙,这是电机的关键部位。电机统一理论主要研究空气隙中或其近旁的情况。实际上,磁通遍布于整个铁心,分布的方式很复杂。但因为铁的磁导率高,因此,可以只研究空气隙中或其近旁的磁通分布情况,而使理论得到合理的简化和准确的结果。导体实际上并没有放在空气隙中,而是放在靠近空气隙的地方,它们或者放在叠片铁心的槽中,或者放在凸极之间的空间内。尽管如此,研究统一理论时还是用放在铁心表面的等效导体来代替实际的导体。通常假定等效导体的尺寸很小,它们或者位于槽中心处的铁心表面上,或者位于凸极的边缘处。需要注意的是,上述假定中未涉及到漏磁。由于空气隙的径向长度很小,故对于任意的角位置来说,都可以举出其气隙磁通密度的确定的数值。

1.1.2 电机的结构及基本工作原理

电机的分类如图 1-3 所示,下面分别介绍不同类型电机的结构及基本工作原理。

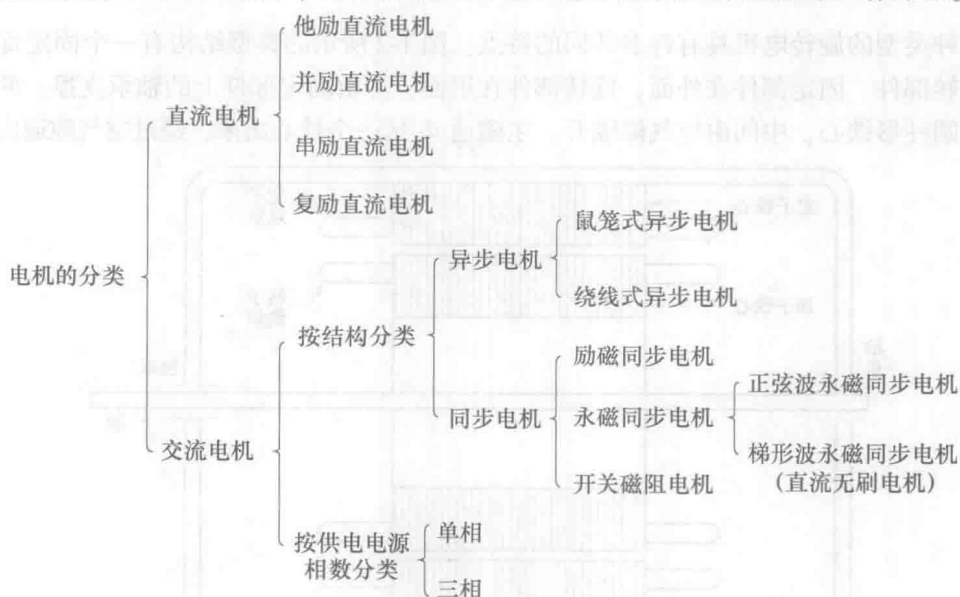


图 1-3 电机的分类

1.1.2.1 直流电机的结构及基本工作原理

直流电机由定子、转子以及对转子起支撑作用的端盖组成，其间有一定的气隙。直流电机的结构如图 1-4 所示。

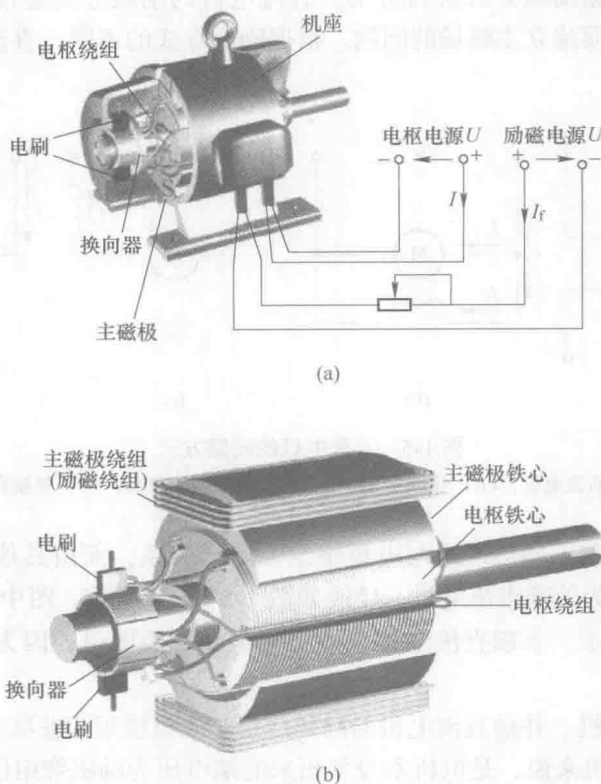


图 1-4 直流电机的结构

(a) 直流电机结构简图；(b) 直流电机主要结构部件图

定子主要由机座和固定在机座内圆表面的主磁极两部分组成，其中，主磁极是产生直流电机气隙磁场的主要部件，由永磁体或带有直流励磁绕组的叠片铁心构成。绝大部分直流电机都是由励磁绕组通过直流电流来建立主磁场的，通常，只有小功率直流电机的主磁极才用永久磁铁，称为永磁直流电机。

转子由电枢、换向器（又称整流子）和转轴等部件构成。其中电枢由电枢铁心和电枢绕组两部分组成。电枢铁心由硅钢片叠成，在其外圆处均匀分布着齿槽，电枢绕组则嵌置于这些槽中。换向器是一种机械整流部件。由换向片叠成圆筒形后，以金属夹件或塑料成型为一个整体。各换向片间互相绝缘。

直流电机是根据通电导体在磁场中会受力的原理来工作的，其中，受力方向由左手定则确定。电机的转子上绕有线圈，通入电流；定子作为磁场线圈也通入电流（永磁直流电机除外），产生定子磁场。通电流的转子线圈在定子磁场中，就会产生电动力，推动转子旋转。转子电流是通过换向器（整流子）上的碳刷连接到直流电源产生的。

直流电机的可逆工作原理如下：当原动机驱动电枢绕组在主磁极 N、S 之间旋转时，电枢绕组上感生出电动势，经电刷、换向器装置整流为直流后，引向外部负载（或电

网), 对外供电, 此时电机作直流发电机运行。如用外部直流电源, 经电刷换向器装置将直流电流引向电枢绕组, 与主磁极 N、S 产生的磁场相互作用, 产生转矩, 驱动转子与连接于其上的机械负载工作, 此时电机作直流电动机运行。

直流电机通常根据励磁方式进行分类。直流电机的励磁方式是指对励磁绕组如何供电、产生励磁磁通势而建立主磁场的问题。根据励磁方式的不同, 直流电机可分为四种类型, 如图 1-5 所示。

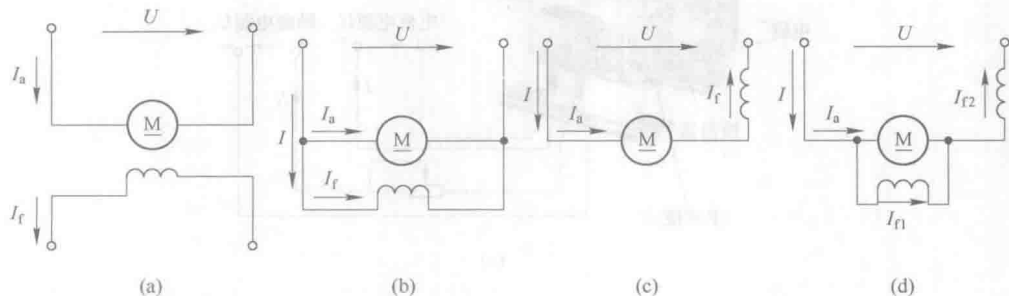


图 1-5 直流电机的励磁方式

(a) 他励直流电机; (b) 并励直流电机; (c) 串励直流电机; (d) 复励直流电机

(1) 他励直流电机。励磁绕组与电枢绕组无联接关系, 而由其他直流电源对励磁绕组供电的直流电机称为他励直流电机, 接线如图 1-5 (a) 所示。图中 M 表示电动机, 若为发电机, 则用 G 表示。永磁直流电机也可看作他励直流电机, 因为其主磁场与电枢电流无关。

(2) 并励直流电机。并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组相并联, 接线如图 1-5 (b) 所示。对于并励发电机来说, 是电机本身发出来的端电压为励磁绕组供电; 对于并励电动机来说, 励磁绕组与电枢共用同一电源, 从性能上讲与他励直流电机相同。

(3) 串励直流电机。串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联后, 再接于直流电源, 接线如图 1-5 (c) 所示。这种直流电机的励磁电流就是电枢电流。

(4) 复励直流电机。复励直流电机有并励和串励两个励磁绕组, 接线如图 1-5 (d) 所示。若串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同称为积复励; 若两个磁通势方向相反, 则称为差复励。

不同励磁方式的直流电机有着不同的特性。一般情况下, 直流电机的主要励磁方式是并励式、串励式和复励式, 直流发电机的主要励磁方式是他励式、并励式和复励式。

1.1.2.2 交流电机的结构及基本工作原理

交流电机按能量转换方向的不同, 可以分为发电机和电动机两大类, 本书重点介绍交流电动机。广泛使用的交流电机又可以分为同步电机与异步电机两大类。各发电厂所用发电机都是同步电机, 而在工、农业生产及居民生活中所用电动机, 大部分是异步电动机。近年来, 同步电动机尤其是永磁同步电动机的使用, 正在逐步增加。

(1) 同步电机的主要结构部件。一台三相同步电机的模型拆分图如图 1-6 所示。在定子铁心内圆开了槽, 在槽内放上导体, 这些导体按一定的规律连接起来, 称为定子绕组, 亦称为电枢绕组。转子上装有磁极, 磁极上套励磁绕组。励磁绕组中通入直流电流。

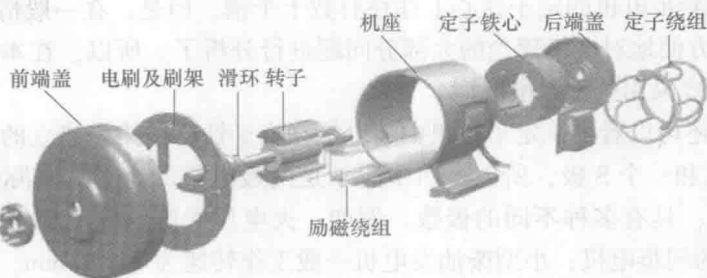


图 1-6 同步电机主要部件

(2) 异步电机的主要结构部件。一台三相鼠笼式异步电机的模型拆分图如图 1-7 所示。



图 1-7 鼠笼式异步电机主要结构部件

图中的异步电机和同步电机一样也主要由固定不动的定子和可自由旋转的转子两大部件组成；为保证电机正常运转，定、转子之间还留有均匀气隙，小型异步电机的气隙一般在 $0.2 \sim 1\text{mm}$ 之间。

定子部分主要包括定子铁心、定子绕组和机座等。异步电机的定子铁心和绕组的原理性结构和同步电机完全相同，所不同的只是其转子部分。转子部分主要包括转子铁心、转子绕组和转轴。

(3) 同步电机和异步电机的主要结构部件的对比。交流电机中对能量转换起主要作用的部件是定子铁心、定子绕组和转子。为进一步将两种交流电机的结构进行对比，在图 1-8 和图 1-9 中给出了其较为详细的定、转子结构图。

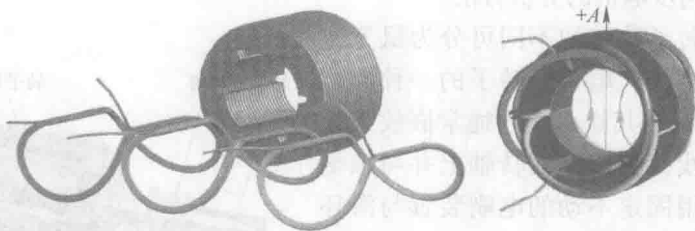


图 1-8 三相交流电机的定子铁心和定子绕组

图 1-8 是同步电机和异步电机的定子铁心和定子绕组的简化结构图。可以看出，其定子上只有 6 个槽，槽内只有 3 个线圈。实际的三相同步电机定子铁心上往往有数十个甚至

数百个槽，三相异步电机的定子铁心上往往有数十个槽。但是，在一般情况下，采用图中6槽模型就可以方便地对电机理论的大部分问题进行分析了。所以，在本书中分析交流电机的原理时，主要采用这种6槽模型。

从图1-8中还可以看出，定子绕组中的电流在定子铁心磁路中建立的磁场在定子内圆形成了一个N极和一个S极，所以，图中所示是两极电机的定子。实际的交流电机根据工作转速的不同，具有多种不同的极数。例如，火电厂的汽轮发电机工作转速为3000r/min，采用两极的同步电机；小型柴油发电机一般工作转速为1500r/min，采用4极的同步电机；而常用的异步电机和同步电机多为2极、4极、6极、8极。本书中分析交流电机的原理时，主要采用两极的模型。

图1-9是同步电机和异步电机的转子铁心和转子绕组的简化结构图。其中图1-9(a)是同步电机的转子；图1-9(b)是异步电机的转子，其转子铁心带有材料为铝制的鼠笼；图1-9(c)是设想从转子铁心中取出的鼠笼。

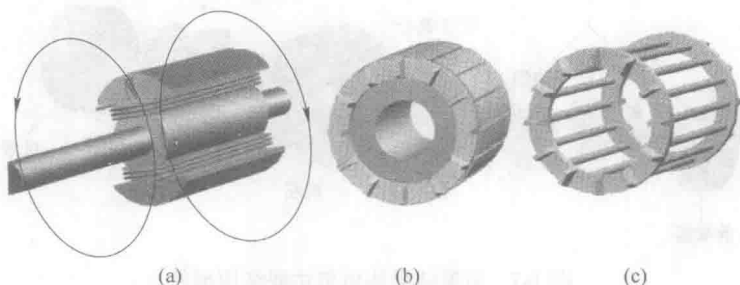


图1-9 同步电机和鼠笼式异步电机的转子

(a) 同步电机的转子；(b) 异步电机的转子；(c) 鼠笼

从外形可以看出图1-9(a)所示同步电机的转子有两个突起的磁极。这种结构的转子称为凸极转子。图中所示即为两极的凸极转子。显然，将凸极转子装入定子内圆后，定、转子之间会形成非均匀的气隙——在凸极的极靴区域（即图中表示出N、S的区域）形成最小的气隙。除了非均匀气隙的同步电机之外，均匀气隙的同步电机也广泛采用。后者的转子上看不出突出的磁极，常称为隐极转子，相应的同步电机称为隐极同步电机。火电厂的汽轮发电机，几乎都是两极的隐极同步电机；而水电厂的大型水轮发电机都是多极的凸极同步电机。小型同步电机则两种结构都有。在本章同步电机分析部分将会介绍分别适合凸极和隐极同步电机的分析方法。

异步电机的转子按结构不同可分为鼠笼式和绕线式两种。绕线式电机的一种典型结构如图1-10所示。其铁心槽内通常嵌放三相绕组。绕组引出线接到固定在转轴上并与轴绝缘的滑环上，利用固定不动的电刷装置与滑环的滑动接触使绕组与外部电路相连接，这样可以在外部电路中根据需要三相绕组直接短接或各相串电阻后再短接。串电阻后短接用于调速或改善其启动性能。



图1-10 异步电机的绕线式转子

1.2 调速装置

1.2.1 直流调速装置

1.2.1.1 直流调速的理论依据

对于图 1-11 所示的晶闸管直流调速系统（简称 V-M 直流调速系统），晶闸管可控整流装置 V 可以是单相、三相或多相整流电路。系统的工作原理是：由转速给定电位器取出转速给定信号（控制信号） U_n^* ，控制触发器输出脉冲的相位，从而改变晶闸管整流装置输出电压 U_d 的大小，实现直流电机的平滑无级调速。

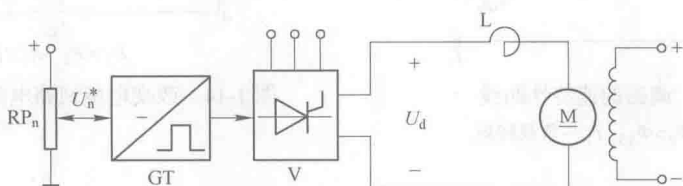


图 1-11 晶闸管-直流电动机调速系统原理图

RP_n—转速给定电位计；GT—触发器；V—晶闸管整流器； U_n^* —转速给定电压；L—平波电抗器

在电枢电流连续的情况下，当系统处于稳态运行时，其主电路电压平衡方程为

$$U_{d0} = E + I_d R_\Sigma \quad (1-1)$$

式中， U_{d0} 为晶闸管变流装置空载输出电压； E 为电动机反电动势， $E = C_e \Phi n$ ； I_d 为电动机电枢电流； R_Σ 为电枢回路总电阻（包括电动机电枢电阻、平波电抗器电阻、整流变压器绕组折合到副边的等效电阻及其漏抗引起的换向压降所对应的等效电阻）； C_e 为由电动机结构决定的电动势常数； Φ 为电动机励磁磁通； n 为电动机转速。

将 $E = C_e \Phi n$ 代入式 (1-1)，经整理可得电动机转速表达式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \frac{R_\Sigma}{C_T C_e \Phi^2} T_e \quad (1-2)$$

式中， n_0 为理想空载转速； C_T 为电机转矩常数； T_e 为电磁转矩。

由式 (1-2) 可知，V-M 系统的调速方式有以下三种：

(1) 保持电动机磁场为额定值，改变电动机电枢两端电压，实现电动机在一定转速范围的平滑调速，如图 1-12 所示。

(2) 电动机电枢两端电压保持额定值不变，减弱电动机磁场（即减弱励磁磁通 Φ ），实现在电动机基速（额定转速）以上范围的调速，如图 1-13 所示。

(3) 改变电枢回路总电阻 R_Σ ，实现电动机的有级调速，如图 1-14 所示。

在这几种调速方式中，第一种方式最为常见，调

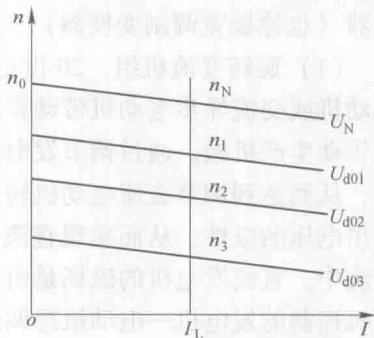


图 1-12 调压调速特性曲线

$U_N > U_{d01} > U_{d02} > U_{d03}$ ；

U_N —额定电压； n_N —额定转速

速范围也大；第二种调速方式虽然也能平滑调速，但调速范围不大，而且不能单独作为一种调速方式来使用，需要与第一种调速方式配合使用；第三种调速方式由于电阻本身消耗电能，而且只能实现有级调速，所以一般很少使用。

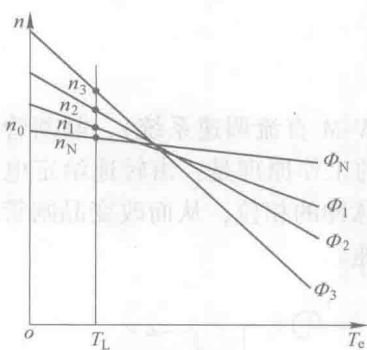


图 1-13 调磁调速特性曲线
 $\Phi_N > \Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$; T_L —负载转矩

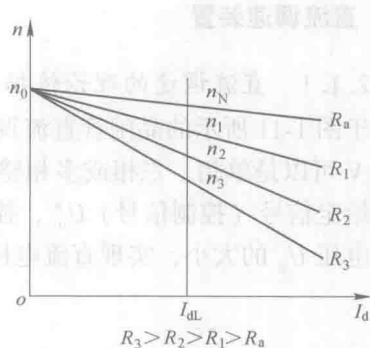


图 1-14 改变电枢回路电阻调速特性曲线
 $R_3 > R_2 > R_1 > R_a$

由式 (1-2) 可推导出开环 V-M 系统的机械特性如下：

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n_{op} \quad (1-3)$$

式中， Δn_{op} 为 V-M 系统的开环转速降，

$$\Delta n_{op} = \frac{I_d R_\Sigma}{C_e \Phi}。$$

开环 V-M 系统的机械特性如图 1-15 所示。

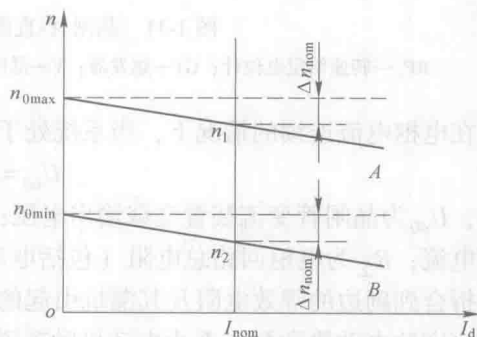


图 1-15 开环 V-M 系统的机械特性

I_{nom} —电动机额定电流； n_{0max} —最高理想空载转速；
 n_{0min} —最低理想空载转速； Δn_{nom} —额定静态转速降

1.2.1.2 常用的直流调速装置

随着电力电子技术的发展，直流调速系统的调速装置（也称可控直流电源）在不断地更新换代，常用的可控直流电源主要包括旋转变流机组、晶闸管变流装置、直流斩波器（也称脉宽调制变换器）三类。

(1) 旋转变流机组。20 世纪 40 年代的可控直流电源是旋转变流机组。它由交流同步电动机或交流异步电动机带动直流发电机，直流发电机直接为直流电动机供电，直流电动机带动生产机械。通过调节发电机励磁电流的大小，可以方便的改变直流发电机的输出电压，从而达到调节直流电动机转速的目的。改变发电机励磁电流的方向，可以改变发电机输出电压的极性，从而实现直流电动机的可逆运行。这种系统简称为 G-M 系统。在 G-M 系统中，直流发电机的磁场是由作为功率放大器的交磁放大机直接供电的，所以称之为放大机控制的发电机—电动机调速系统。由于在这种可控直流电源中旋转设备多，所以简称为旋转变流机组。

旋转变流机组在 20 世纪 40~60 年代得到广泛的应用，在一些不发达的国家或地区，目前仍有这样的调速系统在运行，但肯定要被淘汰。这种调速系统包含与调速直流电机容