

普通高等教育“十三五”规划教材

电力传动与调速 控制系统及应用

Power Drive And Speed Control System With Application

王立乔 沈虹 吴俊娟 等编著



化学工业出版社

普通高

划教材

电力传动与调速 控制系统及应用

王立乔 沈虹 吴俊娟 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书将电力传动以及电机调速控制的相关知识有机融为一体,结合电机调速控制系统的应用和技术解决方案,全面、系统地介绍了电机传动以及调速的有关基础知识、先进技术和应用实践,主要包括电力传动及电力电子变换器基础,直流电机调速系统、交流电机调速系统等具体调速的原理、设计细节、实际应用等。附录中提供了关于直流调速系统的 CDIO 项目任务书,全书配套课件可在以下链接免费下载: <http://download.cip.com.cn/html/20170717/378135615.html>。

本书可供电气技术人员、电机修理人员以及相关电气自动化专业师生参考。

电力传动与调速控制系统及应用

王立乔 吴敬 项 杰 等 著

图书在版编目 (CIP) 数据

电力传动与调速控制系统及应用/王立乔等编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-122-29403-6

I. ①电… II. ①王… III. ①电力传动-控制系统 IV. ①TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 066685 号

责任编辑: 刘丽宏

文字编辑: 孙凤英 毛亚囡

责任校对: 王素芹

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 471 千字 2017 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

电力传动与控制是大学本科电气工程及自动化专业、自动化专业的必修内容。考虑到电力传动与控制技术具有非常强的综合性,想要很好地学习和理解这门技术,必须要有足够的专业基础知识,也就是需要掌握“电机学”“电力电子技术”“自动控制原理”“微机原理”以及“检测与转换技术”(或“电气测量”)等先修课程的基本内容。

电力传动与控制的核心就是电机调速。按电机的类型划分,电机调速可分为直流调速和交流调速两种。直流调速在相当长的时间内一直占据调速系统的主流地位,但随着现代电机制造技术和现代电力电子技术的快速发展,以及微处理器运算能力和运算速度的大幅度提高,近20年以来,交流调速取得了长足的进步。目前,在大多数应用场合,交流调速已经取代直流调速,占据了主导地位。

但作为教材,直流调速方面的内容仍然有充足的理由继续保留。主要原因有以下几条。首先,直流调速的闭环系统结构和控制算法,是交流调速的样本和基础;高性能的交流调速技术如矢量控制,正是利用坐标变换的手段,将交流电机模拟为直流电机,并按直流调速的闭环系统结构和控制算法进行控制。其次,相对于交流电机高阶、强耦合、非线性的特点,直流电机的数学模型非常简单,与“自动控制原理”课程的衔接非常容易,对初学者而言也更容易上手实践。再次,直流调速系统也并未完全退出市场,在某些功率比较大、精度要求比较高的场合如重型机械领域还有较多的应用。

综上所述,本书仍给予直流调速足够的篇幅,与交流调速基本相当。考虑到当前流行的先修课程教材《电机学》中有关传动基础的部分非常少,与本课程的衔接不好。为此本书特增加一篇的内容,作为两门课程的过渡内容。如果选用《电机与拖动基础》作为先修课程教材,这部分内容可以选讲或者不讲。当前流行的先修课程教材《电力电子技术》中有关调速用变换器及其控制的内容也比较少,同样与本课程的衔接不好。为此本书也增加了“电力传动中的电力电子技术”一章,作为衔接,也放在第1篇内。此外,转速检测是调速系统的基础构成成分,也写了一章,同样安排在第1篇。

为了配合当前本科教育中对工程实践和CDIO项目式教学的要求,本书提供了关于直流调速系统的CDIO项目任务书,作为附录。

本书配套课件资源请自行免费下载:<http://download.cip.com.cn/html/20170717/378135615.html>。

本书由燕山大学王立乔、沈虹、吴俊娟、肖莹和郭忠南共同编写。其中,绪

论由王立乔编写，第1章由郭忠南编写，第2章由沈虹编写，第3、第4章由王立乔编写，第5章由郭忠南、吴俊娟编写，第6、第7章由吴俊娟、王立乔编写，第8章由肖莹编写，第9、第10章由沈虹、肖莹编写，第11章由肖莹、王立乔编写。全书由王立乔统稿。

由于学识有限，书中难免有不足之处，欢迎读者批评指正。

编著者

绪论 / 001

0.1 电力传动的发展概况	001
0.2 电力传动的分类和应用	002
0.2.1 直流传动系统的应用	002
0.2.2 交流传动系统的应用	003
0.3 本书的主要内容	003

第 1 篇 电力传动基础

第 1 章 直流电动机传动基础 / 005

1.1 电力传动系统的运动学基础	005
1.1.1 电力传动系统的运动方程	005
1.1.2 工作机构各物理量的折算	006
1.1.3 生产机械的负载转矩特性	008
1.2 他励直流电动机的机械特性	010
1.2.1 机械特性方程	011
1.2.2 固有机机械特性与人为机械特性	012
1.2.3 机械特性的绘制	014
1.2.4 电力传动系统稳定运行的要求	015
1.3 他励直流电动机的启动	017
1.3.1 启动方法	017
1.3.2 串电阻启动的各级电阻计算	018
1.3.3 造成他励直流电动机启动延缓的原因及应对措施	021
1.4 他励直流电动机的制动	022
1.4.1 能耗制动	022
1.4.2 反接制动	024
1.4.3 回馈制动	026
1.5 他励直流电动机的调速	027
1.5.1 调速指标	028
1.5.2 三种调速方式原理及技术分析	030
1.5.3 调速方法的转矩特性及其与负载的配合	033
习题	034

第 2 章 交流电动机传动基础 / 036

2.1 异步电动机的机械特性和稳态运行 036

2.1.1 异步电动机稳态数学模型 036

2.1.2 异步电动机的机械特性 037

2.1.3 异步电动机的功率关系 038

2.1.4 异步电动机的稳态运行 039

2.2 异步电动机的调速 042

2.2.1 异步电动机调压调速 043

2.2.2 绕线式异步电动机转子回路串电阻调速 044

2.2.3 笼式三相异步电动机变极对数调速 045

2.2.4 异步电动机转差离合器调速 046

2.3 同步电动机的稳态数学模型与传动基础 047

2.3.1 同步电动机的转矩角特性 047

2.3.2 同步电动机的稳态运行 049

2.3.3 同步电动机的启动 050

2.3.4 同步电动机的调速 050

习题..... 050

第 3 章 电力传动中的电力电子技术 / 051

3.1 晶闸管相控整流器 051

3.1.1 负载电流连续时 V-M 系统的机械特性 051

3.1.2 负载电流断续时 V-M 系统的机械特性 052

3.1.3 电流断续的不利影响及其抑制方法 053

3.1.4 V-M 系统的多象限运行 054

3.1.5 晶闸管触发和整流装置的放大系数和传递函数 055

3.2 直流 PWM 斩波器 057

3.2.1 两象限 PWM 斩波器 057

3.2.2 H 型四象限 PWM 斩波器 060

3.2.3 电能回馈与泵升电压的限制 063

3.2.4 直流脉宽调速系统的机械特性及多象限运行 064

3.2.5 直流 PWM 斩波器的数学模型 067

3.3 交流变频器的电路结构 067

3.3.1 交-直-交变频器 068

3.3.2 交-交变频器 071

3.4 交流变频器的脉宽调制技术 073

3.4.1 三相电压型逆变器的 PWM 技术 073

3.4.2 三相电流型逆变器的 PWM 技术 082

3.4.3 多电平逆变器的 PWM 技术 083

习题..... 085

第 4 章 转速测量基础 / 087

4.1 模拟测速	087
4.1.1 直流测速发电机	087
4.1.2 交流测速发电机	088
4.2 数字测速	089
4.2.1 数字转速传感器	090
4.2.2 数字测速方法	092
4.2.3 数字滤波	095
习题	096

第 2 篇 直流调速系统

第 5 章 闭环控制的直流调速系统 / 097

5.1 转速单闭环调速系统的分析与设计	097
5.1.1 开环调速系统存在的问题	098
5.1.2 闭环调速系统组成及其静特性	098
5.1.3 闭环静特性与开环机械特性的对比	100
5.1.4 转速单闭环调速系统的动态稳定性分析	102
5.1.5 转速负反馈单闭环调速系统的限流保护	107
5.2 反馈控制规律和无静差转速单闭环直流调速系统	109
5.2.1 反馈控制规律	109
5.2.2 积分控制规律	111
5.2.3 比例积分控制规律	113
5.2.4 无静差转速单闭环直流调速系统	115
5.3 转速电流双闭环直流调速系统的构成及稳态分析	117
5.3.1 转速电流双闭环调速系统的构成	117
5.3.2 转速电流双闭环调速系统的稳态分析	119
5.4 转速电流双闭环直流调速系统的动态特性分析	121
5.4.1 启动过程	121
5.4.2 抗扰性能的定性分析	124
5.4.3 转速调节器和电流调节器的作用	125
习题	125

第 6 章 调节器的工程设计法及其在直流调速系统中的应用 / 127

6.1 控制系统动态校正的基本要求和动态性能指标	127
6.1.1 控制系统动态校正的基本要求	127
6.1.2 控制系统的动态性能指标	128
6.2 调节器的工程设计法	130
6.2.1 工程设计法的基本流程	130

6.2.2 典型系统及其性能指标与参数的关系	131
6.2.3 非典型系统的典型化	140
6.3 工程设计法在转速电流双闭环直流调速系统中的应用	144
6.3.1 电流环设计	145
6.3.2 转速环设计	148
6.3.3 饱和非线性条件下转速超调量的计算	152
6.4 转速微分负反馈控制	155
6.4.1 带转速微分负反馈的双闭环调速系统的基本结构和工作原理	156
6.4.2 退饱和时间和退饱和转速	158
6.4.3 带转速微分负反馈的双闭环调速系统的动态抗扰性能	159
习题	160

第7章 可逆晶闸管-电动机直流调速系统 / 161

7.1 可逆晶闸管-电动机 (V-M) 直流调速系统组成及工作模式分析	161
7.1.1 可逆晶闸管-电动机直流调速系统的组成	161
7.1.2 可逆晶闸管-电动机直流调速系统的工作模式分析	162
7.2 可逆 V-M 直流调速系统的环流分析及有环流控制方式	163
7.2.1 环流的抑制原理	164
7.2.2 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统	166
7.3 可逆 V-M 直流调速系统的无环流控制方式	169
7.3.1 逻辑控制无环流可逆调速系统的基本结构	169
7.3.2 无环流逻辑控制环节	170
习题	171

第3篇 交流调速系统

第8章 标量控制的异步电动机变压变频调速系统 / 172

8.1 异步电动机电压-频率协调控制的基本原理	172
8.1.1 基频以下调速	173
8.1.2 基频以上调速	173
8.2 异步电动机电压-频率协调控制时的机械特性	173
8.2.1 基频以下电压-频率协调控制时的机械特性	174
8.2.2 基频以上电压-频率协调控制时的机械特性	176
8.3 异步电动机转速开环恒压频比控制的系统实现及调速性能分析	177
8.3.1 基于电压型变频器的系统实现	177
8.3.2 基于电流型变频器的系统实现	178
8.3.3 调速性能分析	179
8.4 转差频率控制的异步电动机变压变频调速系统	179
8.4.1 转差频率控制的基本原理	180
8.4.2 基于恒 E_g/ω_1 控制的转差频率控制系统	181

8.4.3	基于恒励磁电流控制的转差频率控制系统	182
8.4.4	转差频率控制系统的性能分析	184
8.4.5	最大转差频率的计算	185
8.4.6	转差频率控制的特点	186
习题		186

第9章 高动态性能的异步电动机变压变频调速系统 / 188

9.1	异步电动机的三相动态数学模型及其性质	188
9.1.1	异步电动机三相动态数学模型	188
9.1.2	异步电动机数学模型的性质	192
9.2	坐标变换	193
9.2.1	三相坐标系到两相坐标系的变换 ($3/2$)	193
9.2.2	两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换 ($2s/2r$)	196
9.2.3	三相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换 ($3s/2r$)	197
9.2.4	直角坐标-极坐标变换 (K/P 变换)	198
9.3	三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型	198
9.3.1	异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型	198
9.3.2	异步电动机在两相旋转坐标系上的数学模型	200
9.3.3	异步电动机在两相坐标系上的状态方程	201
9.4	异步电动机磁链与转速的估计	205
9.4.1	磁链的估计	205
9.4.2	转速的估计	207
9.5	按转子磁链定向的矢量控制系统	209
9.5.1	按转子磁链定向的异步电动机数学模型	209
9.5.2	矢量控制基本原理	210
9.5.3	电流跟踪控制的实现方法	211
9.5.4	磁链闭环的直接矢量控制	212
9.5.5	磁链开环的间接矢量控制	214
9.5.6	电流型变频器的矢量控制	215
9.5.7	矢量控制系统的性能分析	216
9.6	按定子磁链控制的直接转矩控制系统	216
9.6.1	直接转矩控制的基本原理	216
9.6.2	定子电压空间矢量的控制作用	217
9.6.3	基于定子磁链控制的直接转矩控制系统	218
9.6.4	直接转矩控制系统的性能分析	220
习题		221

第10章 绕线异步电动机转差功率回馈型调速系统 / 222

10.1	串级调速系统的基本原理	222
10.1.1	绕线异步电动机转子附加电动势的作用	222
10.1.2	电气串级调速系统的工作原理	223

10.1.3 串级调速系统的启动和停车	225
10.2 串级调速系统的机械特性及其双闭环控制原理	226
10.2.1 异步电动机串级调速时的转子整流电路	226
10.2.2 串级调速系统的转速特性	227
10.2.3 串级调速系统的电磁转矩	229
10.3 串级调速系统的技术经济指标及工程设计	231
10.3.1 串级调速系统的效率	231
10.3.2 串级调速系统的功率因数	233
10.3.3 串级调速系统的工程设计	233
10.4 双馈调速系统的基本结构和工作原理	235
10.4.1 双馈调速系统的基本结构	235
10.4.2 双馈调速系统的运行模式分析	236
10.5 双馈调速系统的矢量控制	239
10.5.1 同步旋转坐标系下双馈调速系统的功率关系	239
10.5.2 定子磁链定向下的矢量控制	240
10.5.3 双馈调速系统转子侧变流器的控制结构图	241
10.5.4 双馈调速系统网侧变流器的控制结构图	242
10.5.5 双馈电机在风力发电中的应用	243
习题	245

第 11 章 同步电动机变压变频调速系统 / 246

11.1 同步电动机的调速方法	246
11.1.1 他控变频调速系统	246
11.1.2 自控变频调速系统	247
11.2 电励磁同步电动机的自控变频调速系统	248
11.2.1 电励磁同步电动机变频器的结构及基本工作原理	248
11.2.2 电励磁同步电动机变频器的动态数学模型	251
11.2.3 电励磁同步电动机变频器的矢量控制系统	254
11.3 永磁同步电动机的自控变频调速系统	258
11.3.1 无刷直流电动机的自控变频调速系统	259
11.3.2 正弦波永磁同步电动机的自控变频调速系统	264
习题	267

附录 直流脉宽调速系统的 CDIO 三级项目教学培养方案 / 268

参考文献 / 272

绪 论

0.1 电力传动的发展概况

传动是指机械之间的动力传递，将机械动力通过中间媒介传递给生产机械产生运动，从而完成一定的生产任务。以电动机作为原动机带动机械设备运动的传动方式称为电力传动 (Power Drive)，或称电力拖动 (Power Traction)。

一般情况下，电力传动装置可分为电动机、工作机构、控制设备及电源四个组成部分，如图 0-1 所示。电动机把电能转换成机械动力，用以带动生产机械的某一工作机构。工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分。控制设备是由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成的，用以控制电动机的运动，从而对工作机构的运动实现自动控制。为了向电动机及一些电气控制设备供电，在电力传动系统中必须设有电源。需要指出的是，在许多情况下，电动机与工作机构并不同轴，而是在二者之间有传动机构，它把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后再传给生产机械的工作机构。



图 0-1 电力传动的基本原理框图

广义而言，电力传动的发端可追溯到电动机的发明，但真正意义上的电力传动则是在 19 世纪末电力系统正式商用化之后才逐步建立的。当时鉴于直流传动具有优越的调速性能，高性能可调速传动都采用直流电动机，而约占电力传动总容量 80% 以上的不变速传动系统则采用交流电动机，这种分工在一段时期内为公认的格局。

考虑到电力系统已经普遍采用交流发电和输配电，为了给直流电机提供可用的直流电源，出现了 Ward-Leonard 系统，其结构如图 0-2 所示。在 Ward-Leonard 系统中，交流电动机和直流发电机的作用是将电网获得的交流电变为直流电动机所需的直流电，这实际上完成了电能从交流到直流的变换，因此也被称为旋转变流机组。

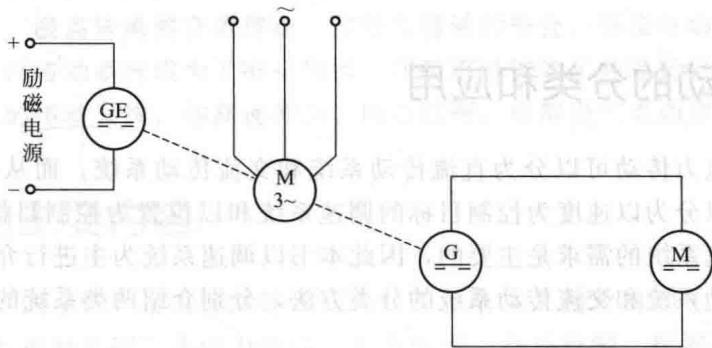


图 0-2 Ward-Leonard 系统原理图

20 世纪 30 年代出现了汞弧整流器，从而使变流技术从旋转阶段开始向静止阶段发展。但

旋转变流机组遇到的真正挑战则是 1957 年以晶闸管诞生为标志的电力电子技术。可以说,此后电力传动的每一次重大突破都与电力电子技术的先行发展密切相关,没有电力电子技术的突飞猛进就没有电力传动现在的格局和未来的蓝图。也正因为如此,在 20 世纪末,我国在制订新的高等学校本科和研究生专业学科目录的时候,把电力传动和电力电子合并为了一个专业,即电力电子与电力传动专业。

1958 年晶闸管正式投入商用以后,迅速在整流领域取代旋转变流机组和汞弧整流器,开始了晶闸管整流器时代。而电力传动系统也从旋转变流机组发展到了晶闸管-直流电动机系统,也称静止 Ward-Leonard 系统。事实上,在 20 世纪 60 年代,直流斩波器诞生之后,利用直流斩波器实现直流调速的思想就已经开始出现。而直流脉宽调速技术真正获得迅速发展则是以 GTO、GTR 为代表的全控型器件的出现以及 PWM 技术的推广应用。

而全控型器件和 PWM 技术的发展,也为交流调速系统提供了强有力的支撑。早在 20 世纪 70 年代, PWM 技术,特别是 SPWM 技术的基本概念和理论就已经成形。1975 年英国的 S. R. Bowes 博士在 IEE 会刊上发表的关于 SPWM 数学模型的论文已经从数学角度定量地给出了 SPWM 技术的谐波分布规律。人们已经清楚地知道要想获得优质的正弦波逆变器,必须采用高频 SPWM 技术,但当时半控型的晶闸管是难以实现高频 SPWM 的。与此同时,德国科学家也提出了矢量控制的基本思想,使得交流电动机获得与直流电动机相媲美的调速性能成为可能。但同样限于晶闸管的开关频率,以及微处理器的运算速度,矢量控制技术也未得到真正应用。

但交流传动在当时也并非毫无进展。由晶闸管构成的交交直接变换器,也就是周波变换器,在大容量交流电动机调速中开始推广应用。交流传动方面另一个重要的进展是静止 Scherbius 系统的出现,我国通常将之称为“串级调速”系统。虽然串级调速系统的调速范围有限,但其在大型风机、水泵等原来不调速的系统中的应用还是能带来可观的节能效果。

随着 20 世纪 70 年代末全控型器件 GTO、GTR 以及电力 MOSFET 的相继出现,特别是 20 世纪 80 年代中后期 IGBT 的问世,电力电子技术进入到了高频时代。电力传动领域首先在直流脉宽调速系统中取得进展,而后交流传动系统则以后发制人的姿态全面挺进,直至现在交流传动系统已经成为电力传动领域中的主导者。这种转变主要是因为交流异步电动机的制造成本和维护费用远低于同等容量的直流电动机,换向能力也限制了直流电动机的容量和速度。而矢量控制技术和 1990 年前后出现的直接转矩控制技术的工业化实现使交流传动系统获得了与直流传动系统相媲美的良好性能。以现代变频调速技术为核心的交流传动系统迅速普及,全面进入到生产生活的各个领域。相比于交流传动系统的迅猛发展,直流传动系统的市场份额则日益萎缩,但在某些场合,如重型机械领域,直流传动系统仍然占有一席之地。

0.2 电力传动的分类和应用

如以上所述,电力传动可以分为直流传动系统和交流传动系统。而从控制目标的角度来说,电力传动又可以分为以速度为控制目标的调速系统和以位置为控制目标的位置随动系统。在工业实际中,调速系统的需求是主要的,因此本书以调速系统为主进行介绍。

下面按直流传动系统和交流传动系统的分类方法,分别介绍两类系统的应用情况。

0.2.1 直流传动系统的应用

在以矢量控制和直接转矩控制为代表的高性能交流调速技术广泛应用之前,直流传动系统

在电力传动领域曾经独领风骚。但时过境迁,直流传动系统在很多应用场合已经被现代交流传动系统取代。但在某些领域,直流传动系统仍然得到相当多的应用。这是因为直流电动机具有调速范围广,易于平滑调速,启动、制动和过载转矩大,易于控制,可靠性高等优点,尤其是在转速低、力矩大的应用场合,直流传动系统仍有一定优势。当然由于换相问题,直流电动机的极限容量受到限制,维护成本较高。尽管如此,由于运行特性良好以及运行经验丰富,因而在精度要求比较高的轧钢、锻压等重型机械领域,直流传动系统仍然是合适的选择。此外在数控机床、低压伺服系统、汽车电子等领域,直流传动系统也占有一定份额。

0.2.2 交流传动系统的应用

相比于直流传动系统,交流传动系统的应用要广泛得多。具体而言,有以下几个方面:

(1) 一般工业应用 一般工业中很多生产设备需要调速,比如起重机、传送机以及机械加工设备等,在这些场合交流变频调速系统已经基本取代直流传动系统。除此之外,风机与水泵是交流传动系统的主要应用对象。风机和水泵的用量很大,总用电量约占全国用电量的 $1/3$ 。风机和水泵的传动控制主要是改变电机的速度以节约电能。在传统上,串级调速系统曾经在风机和水泵类调速系统中占据大量份额,但目前已经基本被变频调速系统所取代。实际上,采用背靠背双 PWM 变流器的双馈调速系统在性能上不次于变频调速系统,且其电力电子变换器的容量只占系统总容量的 $1/3$,因而在风机和水泵类负载应用中有重要的潜在优势。

(2) 交通运输 轨道交通目前几乎全部使用交流传动系统。在牵引传动方面,除了制造和维护成本以外,与直流传动系统相比,交流传动系统还有以下优点:在转向架有限空间内可以设置更大功率的电机,以适应高速和重载的需要;电动机能在静止状态下任意的时间有高的启动力,以利于复杂条件的重载启动;可以在 3 倍左右的宽速度范围内实现恒功率输出,以适应多种运输要求;黏着系数比直流传动高 10 倍以上,容易控制列车发挥更大的牵引力。轨道交通中,几乎都采用异步电动机。在现代城市轨道交通中,直线电机交流传动也得到了广泛关注,如北京地铁机场线、广州地铁 4 号线等,还有上海磁悬浮线路也是直线电机的交流传动。

(3) 民用设施和家用电器 在民用设施中,交流传动系统也得到了广泛应用,其中最常见的就是电梯。电梯需要适应频繁启动和制动的要求,且要求噪声小、过载能力强。对电梯的控制要求是安全可靠、平稳舒适、平层准确,另外希望效率高、经济实用、调度运行合理。除电梯外,恒压供水设备也是民用设施中重要的交流传动系统应用场合。

在家用电器中,由于对节能和高效率的要求,交流变频调速系统越来越受到重视,变频空调、变频冰箱、变频洗衣机的市场占有率越来越高。此外,在录像机、DVD 机,以及计算机中 CPU 风扇和各种磁盘、光盘驱动器,大多采用永磁同步电动机传动系统。

(4) 特大容量、极高转速的交流传动 在特大容量的场合,直流电动机由于换相问题限制了应用,交流电动机传动系统成为了唯一选择,在矿山机械如矿井卷扬机、球磨机等场合更是如此。而转速极高的传动系统,如高速磨头、离心机等,也都以交流调速为宜。

0.3 本书的主要内容

“电力传动与控制系统”是普通高等学校本科专业电气工程及自动化、自动化的专业必修课程。“电力传动与控制系统”集电力传动、电力电子、自动控制、检测技术以及计算机控制等相关专业知识于一身,是高等学校本科“强电”专业中最具综合性的一门课程。为了适应现代高等教育的特点,特别是从加强对学生工程实践能力的培养这一角度出发,编者在多年教学

和科研的基础上完成了这本教材的写作。

本书共分为3篇,分别是电力传动基础、直流调速系统和交流调速系统,下面进行简要介绍。

电力传动基础篇是本课程与先行课程的接口。考虑到《电机学》和《电力电子技术》的现行教材中,有关传动的内容比较少;直接教授控制系统相关内容,学生在理解方面存在一定难度。因此从多年教学实践的感受出发,特意编写本篇。在选用“电机与拖动基础”课程的学校,这部分内容可以选讲或略讲。本篇的主要内容包括直流电动机的传动基础、交流电动机的传动基础和电力传动中的电力电子变换器。在电力电子变换器中,对H桥可逆PWM电路进行了较为详细的分析,特别是对其四象限运行能力进行了讨论;对于晶闸管相控整流器,则着重对其带电动机负载时的机械特性以及整流装置的动态数学模型进行了讨论,对其四象限运行的情况则放到第七章进行讨论。对于逆变器调制技术特别是空间矢量调制技术,本书是按照电压型逆变器的常规调制技术进行讲授的,这在恒压频比控制和矢量控制的交流变频器中是适用的,但在直接转矩控制中则有不同需要。为此本书将直接转矩控制中有关矢量的优化安排的内容放在第3篇对应章节中。调速是电力传动系统的主要目标,转速的检测是调速系统中重要的环节,本书特别列出一章讲述相关的内容,也放在第1篇。

第2篇是直流调速系统。如前所述,直流调速系统到目前为止在一些领域还在应用,特别是其中关于闭环系统的相关分析和工程设计法不但是调速系统而且也是其他工程控制系统设计的基础,具有普遍性和一般性的价值;因而仍然自成一篇。该篇的主要内容包括单闭环控制的直流调速系统、双闭环控制的直流调速系统、工程设计法以及可逆直流调速系统等。

第3篇是交流调速系统。本篇首先讲述的是标量控制的交流变频调速系统,其次是高性能的交流变频调速系统,包括矢量控制和直接转矩控制。虽然绕线电机的串级调速系统目前应用已经较少,但作为交流调速系统中一种经典的方案,特别是其升级版“双馈调速系统”在节能效果上不次于变频调速系统且在风力发电领域有重要应用,本书仍然将其作为一章列入。此外,交流同步电动机,特别是永磁交流同步电动机的工业应用越来越广泛,本书对同步电动机的调速单独作为一章进行讲述。

为了培养学生的工程实践能力,本课程的讲授可以采用CDIO项目式教学法。作为范例,本书在附录中给出了直流脉宽调速系统的CDIO三级项目教学培养方案,希望对读者有所帮助。

本书可作为统一设置的《电力传动与控制系统》课程教材,也可以作为独立设置的《直流调速系统》和《交流调速系统》课程教材;使用者可根据具体情况选讲。

第1章 直流电动机传动基础

本章首先介绍电力传动系统的运动学基础，包括运动方程、工作机构物理量折算和生产机械的负载转矩特性等。这些内容不但适用于直流电机，也同样适用于交流电机。

直流电机的基本结构和工作原理在“电机学”中已经讲过，因此本书直接从他励直流电动机的机械特性讲起。结合电动机的机械特性、负载的转矩特性和电力传动系统的运动方程，本章介绍了电力传动系统稳定运行的条件。在此基础上，对他励直流电动机的启动和制动两个基本过渡过程进行了分析和讨论。本章最后介绍了直流电动机调速的基础知识，包括调速的相关指标和调速方法等。必须指出，本章所讲内容虽然由直流电动机所引发，但很多内容是电力传动系统中的共性问题；很多基本概念和基本方法已延伸至交流传动系统之中。

1.1 电力传动系统的运动学基础

1.1.1 电力传动系统的运动方程

(1) 运动方程式 电动机从运动方式上可分直线电动机和旋转电动机。顾名思义，直线电动机做直线运动，旋转电动机做旋转运动。当前实际应用中的电动机绝大多数是旋转电动机，因此本书只对旋转电动机的运动学方程进行讨论。

由力学的基本定律可知，旋转运动的方程式为：

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中， T 为电动机产生的传动转矩， $N \cdot m$ ； T_L 为阻转矩（或称负载转矩）， $N \cdot m$ ； $J(d\Omega/dt)$ 为惯性转矩（或称加速转矩）。

转动惯量 J 可用下式表示：

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

式中, m 与 G 为旋转部分的质量 (kg) 与重量 (N); r 与 D 为惯性半径与惯性直径, m; g 为重力加速度, $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

这样, 由式(1-2) 可见, 转动惯量 J 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

运动方程式(1-1) 的形式不够实用, 在实际计算中常把它变换为另一种形式。

在式(1-1) 中, 如将角速度 $\Omega(\text{rad/s})$ 变成用每分钟转数 $n(\text{r/min})$ 表示的形式, 即 $\Omega = 2\pi n/60$, 并把式(1-2) 代入, 可得到旋转运动方程的实用形式:

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

式中, GD^2 为旋转部分的飞轮惯量。

必须指出, 式(1-3) 中的数字 375 是具有加速度量纲的, 式(1-3) 中各物理量在前述的指定单位时此式才成立。

电动机电枢 (或转子) 及其他转动部分的飞轮惯量 GD^2 的数值可在相应的产品目录中查到, 但是其单位目前有时仍然用 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 表示。为了转化成国际单位制, 可将查到的数据乘以 9.81, 就可换算成 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 的单位。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来。分析式(1-3) 可知:

① 当 $T = T_L$, $\frac{dn}{dt} = 0$ 时, $n = 0$ 或 $n = \text{常值}$, 即电动机静止或等速旋转, 电力传动系统处于稳定运转状态下。

② 当 $T > T_L$, $\frac{dn}{dt} > 0$ 时, 电力传动系统处于加速状态, 即处于过渡过程中。

③ 当 $T < T_L$, $\frac{dn}{dt} < 0$ 时, 电力传动系统处于减速状态, 也是处于过渡过程中。

(2) 运动方程式中转矩的正负符号分析 应用运动方程式, 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机类型及运转状态的不同, 以及生产机械负载类型的不同, 电动机轴上的传动转矩 T 及阻转矩 T_L 不仅大小不同, 方向也是变化的。因此, 运动方程式可写成下列一般形式:

$$\pm T - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式(1-4) 中转矩 T 与 T_L 前均带有正负符号, 一般可作如下规定: 如果预先规定某一旋转方向 (如顺时针方向) 为正方向, 则转矩 T 的方向如果与所规定的正方向相同, 式(1-4) 中 T 前带正号, 相反时带负号。阻转矩 T_L 在式(1-4) 中已带有总的负号, 因此其正负号的规定恰恰与转矩 T 的规定相反, 即阻转矩 T_L 的方向如果与所规定的旋转正方向相同时, T_L 前取负号, 相反时则取正号。而在反转方向 (如逆时针方向), 则转矩 T 如果与反转的方向相同时取负号, 相反时则取正号; 阻转矩 T_L 如果与反转的方向相同时取正号, 相反时则取负号。

上面的规定也可归纳为: 转矩 T 正向取正, 反向取负; 阻转矩 T_L 正向取负, 反向取正。

加速转矩 $\frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt}$ 的大小及正负符号由转矩 T 及阻转矩 T_L 的代数和决定。

1.1.2 工作机构各物理量的折算

实际传动系统的轴常常不止一根, 如图 1-1(a) 所示, 图中采用 4 根轴, 将电动机角速度 Ω 变成符合工作机构需要的角速度 Ω_z 。在不同的轴上各有其本身的转动惯量及转速; 也有相应的反映电动机传动的转矩及反映工作机构工作的阻转矩。这种系统显然比一根轴的系统要复杂, 计算起来也较为困难。