



普通高等教育 电气工程  
自动化 系列规划教材

Motion Control Systems Using  
Electric Motor

# 电机运动 控制系统

© 洪乃刚 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育 **电气工程** 系列规划教材  
自动化

# 电机运动控制系统

洪乃刚 编著



机械工业出版社

本书主要介绍电力拖动系统、位置伺服系统、风力发电系统中的电机控制。交、直流调速内容包括直流电机的转速电流控制和交流电机的VVVF控制、矢量控制、直接转矩控制、SVPWM控制等。位置伺服系统包括位置开环和闭环控制。风力发电是电机在可再生能源中的新应用，本书对风力发电机的控制作了初步介绍。本书吸取了《电力拖动自动控制系统》等相关教材的优点，也融入了笔者多年的教学经验，特点如下：精选教学内容，改进教学方法，如分两步建立异步电动机等效数学模型等；力求原理清楚，结合应用；对典型的调速系统使用了仿真分析。

本书可供自动化、电气工程及其自动化等专业作为本科教材使用，也可供研究生和工程技术人员参考。

本书提供电子课件和系统的仿真模型，需要者请到 <http://www.cmpedu.com> 本书相关页面上下载。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电机运动控制系统/洪乃刚编著. —北京: 机械工业出版社, 2015. 2  
普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材  
ISBN 978-7-111-48427-1

I. ①电… II. ①洪… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 253085 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 王雅新

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 潘蕊

封面设计: 张静 责任印制: 李洋

北京华正印刷有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 332 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-48427-1

定价: 29.80 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

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-88379469

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

## 前 言

电能是现代最清洁、使用最方便的能源。电机具有体积小、重量轻、成本低、使用方便等优点,无论是工业、农业、交通运输、军事,还是家电、办公设备、现代机械,都离不开电机。电机控制的品质决定着机械和设备的性能、产品质量、生产效率,对环保和节能这些当今电机和电能应用的重要指标也有重要的影响。

自1820年奥斯特和安培发现了电流在磁场中的力作用、电动机的雏形开始出现之后,在不到200年的时间里,电机已形成了一个庞大的家族,当今,直流电机、交流电机、永磁电机等,已经是动力的主要来源。电机的作用是将电能转变为机械能(电动状态),或是将机械能转变为电能(发电状态)。虽然电机控制系统主要工作在电机的电动状态,但是从节能要求出发,同样要重视电机的发电状态,系统在制动时将机械动能转化为电能储存或回输电源往往是节能的重要措施。

有关电机控制的教材很多,如《自动控制系统》、《电力拖动自动控制系统》、《运动控制系统》、《交直流调速系统》等,其中陈伯时教授的《电力拖动自动控制系统》使用最多、影响最广。就电机控制课程的教学内容而言,在20世纪70年代主要讲授直流电机控制,80年代后随交流调速的发展,交流调速逐渐取代直流调速成为现代调速的主流,也成为该课程讲授的重点。进入21世纪后,各种新型电机(永磁电机、磁阻电机、直线电机等)的应用越来越多,对于电机控制课程,已不仅是电力拖动的速度控制、位置控制这些内容需要掌握,风力发电作为新能源的重要内容之一也需要关注。

在近50年中,电力电子变流技术的发展和微机控制,使电机控制技术发生了巨大的变化,从稳态到动态,发展出矢量控制、直接转矩控制、空间电压矢量控制(SVPWM)等新型控制方法,电机控制已成为集电机、变流技术、微机应用和控制理论知识的综合课程,备受各电类专业的重视。笔者从多年教学经验体会到,学习电机控制最重要的是掌握原理,无论是从事技术管理、产品研发,还是进行设备调试运行和维护,都考验对系统原理的深入理解和运用能力,因此讲清原理,结合应用,注意解决应用中易遇到的实际问题是本书的特点。

本书包括直流调速、交流调速以及位置伺服控制和风力发电三部分,内容以直流调速和交流调速为主,其中直流调速部分有所压缩。直流调速部分共两章,第1章为直流电动机调速系统,包括单闭环和双闭环控制,第2章为直流电动机可逆调速系统和弱磁控制;交流调速部分共四章,第3章为异步电动机的稳态数学模型及调速控制系统包括笼型异步电动机调速控制和绕线转子异步电动机双馈调速控制,第4章为异步电动机的动态数学模型及矢量控制系统,第5章为异步电动机直接转矩控制系统及SVPWM控制系统,第6章为同步电动机调速控制,包括永磁电动机;第三部分共两章,第7章为位置伺服控制系统,第8章为风力发电控制系统。带\*号的内容供选讲。

第1章中,直流调速系统篇幅较大,但是其中两节,即“直流电机的原理和开环调

速系统”及“电压负反馈电流正反馈补偿控制的直流调速系统”可选讲。转速单闭环控制系统用对数频率特性校正比较复杂，学生一般难以掌握，许多教材已不再安排这部分内容，但是由于系统校正和调节器的设计很重要，因此本书对转速单闭环调节器采用了与双闭环系统一致的工程设计方法，并且介绍了用 MATLAB 软件画伯德图和求系统阶跃响应的方法，通过伯德图和阶跃响应分析验证系统校正和设计的结果，加强了控制理论与调速系统设计的关系。

第 2 章中，直流可逆调速系统一般教材都以  $\alpha = \beta$  配合工作制分析制动过程，而因为有环流系统实际上已很少使用，再以有环流系统分析并不合适，所以，本书精简了有环流系统，先介绍制动的物理过程，然后在逻辑无环流系统和斩波可逆中再介绍制动过程和控制的实现。

第 3 章中，异步电动机的稳态模型控制包括了笼型异步电动机和绕线转子异步电动机，绕线转子异步电动机不再单设一章。串级调速已应用很少，故本章进行了大幅度压缩，而对双馈电机加强了五种工作状态的关系和转换过程的分析，突出了电机工作状态连续平滑的调节过程，以便将工作状态变化和控制联系起来。

第 4 章中，由于过多的数学变换容易淡化变换的物理意义，因此矢量控制的讲授采取以电压方程为主的方法，减少了矩阵运算。由于二相交流电动机即普通的单相交流电动机是大家熟悉的，因此在三相/二相变换基础上，本章首先建立三相异步电动机与二相交流电动机模型和参数的关系，然后再通过旋转变换建立二相交流电动机与直流电动机的关系，这样分两步变换，不但变换的物理意义比较清楚，而且在矢量定向原理中还同时指出了定向与电流相位控制的关系。电和磁的相互作用是交流电机与直流电机的共同点，电流控制和磁场控制是调速系统控制的两个关键问题，从此出发就不难理解矢量控制的意义和要解决的问题的关键所在。

第 5 章中，直接转矩控制是交流电动机动态控制方法之一，由于其与矢量控制的思路不同，因此单列一章介绍。本章从逆变器开关状态到空间电压矢量、磁链轨迹和转矩控制，归纳了空间电压矢量选择的方法，并且以圆形磁链控制为主，在讲授思路上有较大改进。由于在空间电压矢量的基础上讲解逆变器的 SVPWM 控制比较方便，因此本章在直接转矩控制之后介绍 SVPWM 控制异步电动机的方法。

第 6 章中，同步电动机变频调速应用越来越多，但是学生对同步电动机失步和功率因数控制等问题往往知其然而难知其所以然，因此本章对这些问题进行了扼要介绍。同步电动机的 VVVF 控制和矢量控制是本章重点，永磁电动机控制也在这章中作了介绍。

第 7 章中，位置控制是数控机床、机器人、航空器姿态等控制的重要技术。位置伺服控制系统方案多、控制复杂、精度要求高，电机控制是其中关键一环。本章通过位置伺服系统与转速控制系统的比较，从位置伺服控制系统的结构特点入手，介绍了位置闭环控制和设计，以较小的篇幅介绍了位置伺服控制系统，对步进电动机位置开环控制和主要的位置检测方法也作了一定介绍。

第 8 章中，风力发电是新能源技术之一，有巨大开发潜力，也是电机的重要应用领域之一。矢量控制是风力发电系统的重要控制方法，本章介绍的风力发电系统对深入理解矢量控制、拓宽学生思路将有所帮助。

计算机仿真是学习、研究和设计电机控制系统的重要工具，本书在调速系统中介绍了仿真分析的方法，通过仿真可以使读者对各种调速方法有直观、形象的比较和认知。由于电机数字控制在“微机原理”、“单片机”、“计算机控制”等课程中都有一定介绍，而且数字调节器、数字测速的软件程序已经模块化，因此本书不再赘述。

最后，笔者希望近40年的教学和研究心得能对自动化专业的教改和建设有所贡献。

1	计算机仿真	1	1.1.1 计算机仿真的意义
2	调速系统的组成	2	1.1.2 调速系统的组成
3	调速系统的性能指标	3	1.1.3 调速系统的性能指标
4	调速系统的数学模型	4	1.1.4 调速系统的数学模型
5	调速系统的仿真	5	1.1.5 调速系统的仿真
6	调速系统的仿真软件	6	1.1.6 调速系统的仿真软件
7	调速系统的仿真应用	7	1.1.7 调速系统的仿真应用
8	调速系统的仿真实验	8	1.1.8 调速系统的仿真实验
9	调速系统的仿真小结	9	1.1.9 调速系统的仿真小结
10	调速系统的仿真展望	10	1.1.10 调速系统的仿真展望
11	调速系统的仿真参考文献	11	1.1.11 调速系统的仿真参考文献
12	调速系统的仿真附录	12	1.1.12 调速系统的仿真附录
13	调速系统的仿真参考文献	13	1.1.13 调速系统的仿真参考文献
14	调速系统的仿真附录	14	1.1.14 调速系统的仿真附录
15	调速系统的仿真参考文献	15	1.1.15 调速系统的仿真参考文献
16	调速系统的仿真附录	16	1.1.16 调速系统的仿真附录
17	调速系统的仿真参考文献	17	1.1.17 调速系统的仿真参考文献
18	调速系统的仿真附录	18	1.1.18 调速系统的仿真附录
19	调速系统的仿真参考文献	19	1.1.19 调速系统的仿真参考文献
20	调速系统的仿真附录	20	1.1.20 调速系统的仿真附录
21	调速系统的仿真参考文献	21	1.1.21 调速系统的仿真参考文献
22	调速系统的仿真附录	22	1.1.22 调速系统的仿真附录
23	调速系统的仿真参考文献	23	1.1.23 调速系统的仿真参考文献
24	调速系统的仿真附录	24	1.1.24 调速系统的仿真附录
25	调速系统的仿真参考文献	25	1.1.25 调速系统的仿真参考文献
26	调速系统的仿真附录	26	1.1.26 调速系统的仿真附录
27	调速系统的仿真参考文献	27	1.1.27 调速系统的仿真参考文献
28	调速系统的仿真附录	28	1.1.28 调速系统的仿真附录
29	调速系统的仿真参考文献	29	1.1.29 调速系统的仿真参考文献
30	调速系统的仿真附录	30	1.1.30 调速系统的仿真附录
31	调速系统的仿真参考文献	31	1.1.31 调速系统的仿真参考文献
32	调速系统的仿真附录	32	1.1.32 调速系统的仿真附录
33	调速系统的仿真参考文献	33	1.1.33 调速系统的仿真参考文献
34	调速系统的仿真附录	34	1.1.34 调速系统的仿真附录
35	调速系统的仿真参考文献	35	1.1.35 调速系统的仿真参考文献
36	调速系统的仿真附录	36	1.1.36 调速系统的仿真附录
37	调速系统的仿真参考文献	37	1.1.37 调速系统的仿真参考文献
38	调速系统的仿真附录	38	1.1.38 调速系统的仿真附录
39	调速系统的仿真参考文献	39	1.1.39 调速系统的仿真参考文献
40	调速系统的仿真附录	40	1.1.40 调速系统的仿真附录
41	调速系统的仿真参考文献	41	1.1.41 调速系统的仿真参考文献
42	调速系统的仿真附录	42	1.1.42 调速系统的仿真附录
43	调速系统的仿真参考文献	43	1.1.43 调速系统的仿真参考文献
44	调速系统的仿真附录	44	1.1.44 调速系统的仿真附录
45	调速系统的仿真参考文献	45	1.1.45 调速系统的仿真参考文献
46	调速系统的仿真附录	46	1.1.46 调速系统的仿真附录
47	调速系统的仿真参考文献	47	1.1.47 调速系统的仿真参考文献
48	调速系统的仿真附录	48	1.1.48 调速系统的仿真附录
49	调速系统的仿真参考文献	49	1.1.49 调速系统的仿真参考文献
50	调速系统的仿真附录	50	1.1.50 调速系统的仿真附录
51	调速系统的仿真参考文献	51	1.1.51 调速系统的仿真参考文献
52	调速系统的仿真附录	52	1.1.52 调速系统的仿真附录
53	调速系统的仿真参考文献	53	1.1.53 调速系统的仿真参考文献
54	调速系统的仿真附录	54	1.1.54 调速系统的仿真附录
55	调速系统的仿真参考文献	55	1.1.55 调速系统的仿真参考文献
56	调速系统的仿真附录	56	1.1.56 调速系统的仿真附录
57	调速系统的仿真参考文献	57	1.1.57 调速系统的仿真参考文献
58	调速系统的仿真附录	58	1.1.58 调速系统的仿真附录
59	调速系统的仿真参考文献	59	1.1.59 调速系统的仿真参考文献
60	调速系统的仿真附录	60	1.1.60 调速系统的仿真附录
61	调速系统的仿真参考文献	61	1.1.61 调速系统的仿真参考文献
62	调速系统的仿真附录	62	1.1.62 调速系统的仿真附录
63	调速系统的仿真参考文献	63	1.1.63 调速系统的仿真参考文献
64	调速系统的仿真附录	64	1.1.64 调速系统的仿真附录
65	调速系统的仿真参考文献	65	1.1.65 调速系统的仿真参考文献
66	调速系统的仿真附录	66	1.1.66 调速系统的仿真附录
67	调速系统的仿真参考文献	67	1.1.67 调速系统的仿真参考文献
68	调速系统的仿真附录	68	1.1.68 调速系统的仿真附录
69	调速系统的仿真参考文献	69	1.1.69 调速系统的仿真参考文献
70	调速系统的仿真附录	70	1.1.70 调速系统的仿真附录
71	调速系统的仿真参考文献	71	1.1.71 调速系统的仿真参考文献
72	调速系统的仿真附录	72	1.1.72 调速系统的仿真附录
73	调速系统的仿真参考文献	73	1.1.73 调速系统的仿真参考文献
74	调速系统的仿真附录	74	1.1.74 调速系统的仿真附录
75	调速系统的仿真参考文献	75	1.1.75 调速系统的仿真参考文献
76	调速系统的仿真附录	76	1.1.76 调速系统的仿真附录
77	调速系统的仿真参考文献	77	1.1.77 调速系统的仿真参考文献
78	调速系统的仿真附录	78	1.1.78 调速系统的仿真附录
79	调速系统的仿真参考文献	79	1.1.79 调速系统的仿真参考文献
80	调速系统的仿真附录	80	1.1.80 调速系统的仿真附录
81	调速系统的仿真参考文献	81	1.1.81 调速系统的仿真参考文献
82	调速系统的仿真附录	82	1.1.82 调速系统的仿真附录
83	调速系统的仿真参考文献	83	1.1.83 调速系统的仿真参考文献
84	调速系统的仿真附录	84	1.1.84 调速系统的仿真附录
85	调速系统的仿真参考文献	85	1.1.85 调速系统的仿真参考文献
86	调速系统的仿真附录	86	1.1.86 调速系统的仿真附录
87	调速系统的仿真参考文献	87	1.1.87 调速系统的仿真参考文献
88	调速系统的仿真附录	88	1.1.88 调速系统的仿真附录
89	调速系统的仿真参考文献	89	1.1.89 调速系统的仿真参考文献
90	调速系统的仿真附录	90	1.1.90 调速系统的仿真附录
91	调速系统的仿真参考文献	91	1.1.91 调速系统的仿真参考文献
92	调速系统的仿真附录	92	1.1.92 调速系统的仿真附录
93	调速系统的仿真参考文献	93	1.1.93 调速系统的仿真参考文献
94	调速系统的仿真附录	94	1.1.94 调速系统的仿真附录
95	调速系统的仿真参考文献	95	1.1.95 调速系统的仿真参考文献
96	调速系统的仿真附录	96	1.1.96 调速系统的仿真附录
97	调速系统的仿真参考文献	97	1.1.97 调速系统的仿真参考文献
98	调速系统的仿真附录	98	1.1.98 调速系统的仿真附录
99	调速系统的仿真参考文献	99	1.1.99 调速系统的仿真参考文献
100	调速系统的仿真附录	100	1.1.100 调速系统的仿真附录



# 目 录

## 前言

## 第 1 章 直流调速系统 ..... 1

### \* 1.1 直流电机的原理和开环调速系统 ..... 1

#### 1.1.1 直流电机的原理 ..... 1

#### 1.1.2 直流电机的模型和基本方程 ..... 2

#### 1.1.3 直流电机的传递函数 ..... 3

#### 1.1.4 直流电动机的调速方法 ..... 4

#### 1.1.5 直流电动机开环调速系统 ..... 5

#### 1.1.6 电力电子变流器及其传递函数 ..... 5

#### 1.1.7 调速系统的调速指标 ..... 7

### 1.2 有静差转速闭环控制直流调速系统 ..... 9

#### 1.2.1 转速闭环控制直流调速系统的组成 ..... 9

#### 1.2.2 有静差转速闭环控制直流调速系统的稳态性能分析 ..... 9

#### 1.2.3 有静差控制直流调速系统的动态性能分析 ..... 12

#### 1.2.4 有静差控制直流调速系统的稳定性分析 ..... 15

### 1.3 无静差转速闭环控制直流调速系统 ..... 16

#### 1.3.1 积分调节器和比例积分调节器 ..... 16

#### 1.3.2 无静差控制直流调速系统的原理 ..... 17

#### 1.3.3 无静差控制直流调速系统的静特性 ..... 18

#### 1.3.4 无静差控制直流调速系统的动态性能分析 ..... 18

#### 1.3.5 转速单闭环控制系统转速调节器设计 ..... 19

#### 1.3.6 转速闭环控制直流调速系统应用举例 ..... 21

### \* 1.4 电压负反馈电流正反馈补偿控制的直流调速系统 ..... 26

#### 1.4.1 系统的稳态结构图和静特性 ..... 27

#### 1.4.2 电流补偿控制 ..... 28

### 1.5 转速电流双闭环控制直流调速系统 ..... 29

#### 1.5.1 双闭环控制直流调速系统的组成和工作原理 ..... 29

#### 1.5.2 双闭环控制直流调速系统的稳态

#### 参数和特性 ..... 32

#### 1.5.3 双闭环控制直流调速系统的动态

#### 性能 ..... 33

#### 1.5.4 控制系统调节器的工程设计

#### 方法 ..... 34

#### 1.5.5 双闭环控制直流调速系统调节器的

#### 工程设计 ..... 40

### 1.6 直流调速系统仿真 ..... 48

#### 1.6.1 直流调速系统主电路仿真 ..... 48

#### 1.6.2 双闭环控制直流调速系统仿真 ..... 53

### 本章小结 ..... 55

### 习题与思考题 ..... 55

## 第 2 章 直流电动机可逆调速系统和

## 弱磁控制 ..... 58

### 2.1 晶闸管直流可逆调速系统 ..... 58

#### 2.1.1 直流可逆调速系统的主电路 ..... 58

#### 2.1.2 反并联可逆调速系统的环流 ..... 60

#### 2.1.3 直流可逆调速系统的控制模式 ..... 61

#### 2.1.4 直流可逆调速系统的制动过程 ..... 62

#### 2.1.5 逻辑无环流可逆调速系统 ..... 64

#### 2.1.6 逻辑无环流系统仿真 ..... 68

### 2.2 直流 PWM 可逆调速系统 ..... 70

#### 2.2.1 直流 PWM 可逆调速系统的组成 ..... 70

#### 2.2.2 直流 PWM 可逆调速系统的正、反转工作状态 ..... 71

#### 2.2.3 直流 PWM 可逆调速系统的制动工作状态 ..... 71

#### \* 2.2.4 直流 PWM 可逆调速系统仿真 ..... 72

### 2.3 直流调速系统的弱磁控制 ..... 75

#### 2.3.1 自动弱磁控制方法 ..... 75

#### 2.3.2 自动弱磁控制直流调速系统 ..... 75

#### 2.3.3 弱磁控制调节器设计 ..... 76

### 本章小结 ..... 77

### 习题与思考题 ..... 77

<b>第3章 异步电动机的稳态数学模型及调速控制系统</b> .....	79
3.1 异步电动机的稳态数学模型和调速方法 .....	79
3.1.1 异步电动机的稳态数学模型 .....	79
3.1.2 异步电动机的稳态基本方程 .....	81
3.1.3 异步电动机的电磁转矩 .....	81
3.1.4 异步电动机的功率 .....	82
3.1.5 异步电动机的调速方法 .....	82
3.2 异步电动机的调压调速 .....	83
3.2.1 异步电动机调压调速时的机械特性 .....	83
3.2.2 异步电动机调压调速的转速闭环控制系统 .....	84
3.3 异步电动机的变压变频调速 .....	85
3.3.1 变频调速的基本控制方式 .....	85
3.3.2 异步电动机电压频率协调控制时的机械特性 .....	86
3.4 转速开环恒压频比控制变频调速系统 .....	89
3.4.1 恒压频比控制变频调速系统 .....	89
3.4.2 恒压频比VVVF调速系统仿真 .....	91
3.5 转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统 .....	95
3.5.1 转速闭环转差频率控制 .....	95
3.5.2 保持气隙磁通 $\Phi_m$ 不变的电流控制 .....	96
3.5.3 转速闭环转差频率控制的变频调速系统 .....	96
3.5.4 转差频率控制系统仿真 .....	99
3.6 绕线转子异步电动机双馈调速系统 .....	101
3.6.1 双馈电机的工作原理 .....	102
3.6.2 双馈电机的工作模式 .....	103
3.6.3 双馈电机的转子电源和控制 .....	105
3.6.4 绕线转子异步电动机串级调速系统 .....	106
本章小结 .....	108
习题与思考题 .....	109
<b>第4章 异步电动机的动态数学模型及矢量控制系统</b> .....	110
4.1 三相异步电动机的数学模型 .....	110
4.1.1 三相异步电动机的磁链 .....	110
4.1.2 三相异步电动机的电压方程 .....	112
4.1.3 三相异步电动机的电磁转矩 .....	112
4.1.4 三相异步电动机的运动方程 .....	113
4.2 坐标变换 .....	113
4.2.1 三相静止坐标系和二相静止坐标系的变换(3s/2s变换) .....	114
4.2.2 二相静止坐标系和二相旋转坐标系的变换(2s/2r变换) .....	115
4.3 建立在二相坐标系上的异步电动机数学模型 .....	117
4.3.1 二相交流电动机的模型和参数 .....	117
4.3.2 异步电动机在一个二相任意旋转坐标系上的模型(dq0模型) .....	120
4.3.3 异步电动机在一个二相静止坐标系上的模型( $\alpha\beta$ 模型) .....	122
4.3.4 异步电动机在一个二相同步旋转坐标系上的模型 .....	123
4.3.5 异步电动机在一个二相同步旋转坐标系上按转子磁场定向的模型(mt模型) .....	123
4.4 转子磁链观测 .....	125
4.4.1 转子磁链观测的电流模型法 .....	126
4.4.2 转子磁链观测的电压模型法 .....	127
4.5 三相异步电动机矢量控制系统 .....	128
4.5.1 矢量控制的基本思路 .....	128
4.5.2 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统 .....	128
4.5.3 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真 .....	130
4.5.4 磁链开环转差型矢量控制系统 .....	133
4.5.5 磁链开环转差型矢量控制系统仿真 .....	134
4.5.6 无转速传感器的矢量控制系统 .....	137
本章小结 .....	138
习题与思考题 .....	139
<b>第5章 异步电动机直接转矩控制系统及SVPWM控制系统</b> .....	140
5.1 逆变器开关状态和电压空间矢量 .....	140
5.1.1 逆变器开关状态 .....	140
5.1.2 电压空间矢量 .....	140
5.1.3 磁链轨迹和控制策略 .....	142
5.2 异步电动机的定子磁链和转矩观测 .....	144
5.2.1 定子磁链观测 .....	144



5.2.2 转矩观测 .....	146	6.6 永磁同步电动机调速控制系统 .....	168
5.3 异步电动机直接转矩控制系统 .....	147	6.6.1 永磁同步电动机的动态数学模型 .....	169
5.3.1 直接转矩控制系统的基本组成 .....	147	6.6.2 永磁同步电动机按转子位置定向的矢量控制系统 .....	169
5.3.2 磁链控制器 .....	147	6.6.3 永磁同步电动机按转子位置定向的矢量控制系统仿真 .....	170
5.3.3 转矩控制器 .....	148	6.6.4 无刷直流电动机调速系统 .....	172
5.3.4 逆变器开关状态的选择 .....	148	6.6.5 无刷直流电动机调速系统仿真 .....	173
5.3.5 直接转矩控制系统的工作过程 .....	149	本章小结 .....	175
5.3.6 直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较 .....	150	习题与思考题 .....	176
5.4 SVPWM 调制原理及变压变频调速系统 .....	151	<b>第7章 位置伺服控制系统</b> .....	177
5.4.1 SVPWM 调制原理 .....	151	7.1 位置伺服控制系统的组成和控制的基本要求 .....	177
5.4.2 SVPWM 变压变频调速系统 .....	153	7.1.1 位置伺服控制系统的组成 .....	177
本章小结 .....	154	7.1.2 位置伺服控制的基本要求 .....	178
习题与思考题 .....	154	7.2 步进电动机位置开环伺服控制系统 .....	179
<b>第6章 同步电动机调速系统</b> .....	155	7.2.1 步进电动机的原理 .....	179
6.1 同步电机控制基础 .....	155	7.2.2 步进电动机的参数和特性 .....	180
6.1.1 同步电机的原理和分类 .....	155	7.2.3 步进电动机的选用 .....	181
6.1.2 同步电机的基本方程 .....	157	7.2.4 步进电动机的驱动 .....	182
6.1.3 同步电机的特殊问题——失步和功率因数控制 .....	158	7.2.5 步距细分技术 .....	184
6.1.4 同步电机与直流电机、异步电机的比较 .....	159	7.3 位置闭环伺服控制系统 .....	185
6.2 同步电动机变频调速系统的分类和稳态控制 .....	160	7.3.1 位置闭环伺服控制系统的组成 .....	185
6.2.1 同步电动机变频调速系统的稳态控制 .....	160	7.3.2 位置伺服控制系统的数学模型 .....	186
6.2.2 同步电动机变频调速系统的分类 .....	161	7.3.3 位置伺服控制系统的稳态性能 .....	186
6.3 可控励磁同步电动机的数学模型 .....	162	7.4 位置检测 .....	188
6.3.1 同步电动机的磁链方程 .....	162	7.4.1 光电编码器 .....	188
6.3.2 同步电动机在二相旋转坐标系上的电压方程 .....	163	7.4.2 光栅检测 .....	190
6.3.3 同步电动机的转矩方程 .....	164	本章小结 .....	190
6.4 可控励磁同步电动机按气隙磁场定向的矢量控制系统 .....	164	习题与思考题 .....	191
6.4.1 气隙磁场定向和转矩控制 .....	164	<b>第8章 风力发电控制系统</b> .....	192
6.4.2 按气隙磁场定向的可控励磁同步电动机矢量控制系统 .....	165	8.1 风力发电系统的组成和分类 .....	192
6.5 自控式无换向器电动机变频调速系统 .....	166	8.1.1 风力机 .....	192
6.5.1 无换向器电动机的原理 .....	166	8.1.2 风力发电机组的组成 .....	193
6.5.2 晶闸管逆变器的换流方式 .....	167	8.1.3 风力发电机的功率调节 .....	196
6.5.3 无换向器电动机调速系统 .....	168	8.1.4 风力发电机的工作模式 .....	198
		8.2 同步发电机风力发电系统控制 .....	199
		8.2.1 带全功率变流器的同步发电机风力发电系统 .....	199
		8.2.2 直流斩波控制 .....	200
		8.2.3 逆变器控制 .....	201

---

8.3 双馈发电机风力发电系统控制 .....	201	8.3.4 网侧变流器按电压定向的矢量 控制系统 .....	207
8.3.1 双馈发电机的数学模型和定向 控制 .....	202	8.3.5 网侧变流器按虚拟电网磁链 定向的矢量控制系统 .....	210
8.3.2 转子侧变流器按定子磁链定向的 矢量控制系统 .....	204	本章小结 .....	211
8.3.3 双馈发电机转子网侧 PWM 变流器 的数学模型 .....	206	习题与思考题 .....	212
		<b>参考文献</b> .....	<b>213</b>

# 第1章 直流调速系统

直流调速系统是用于直流电动机的转速控制系统，是最早开发应用的电力拖动控制系统，即使在交流调速迅速发展的今天，直流调速系统仍在广泛使用。直流电动机有良好的启动和制动性能，调速范围宽，控制技术成熟，其转速和电流的闭环控制方法也是交流调速控制的重要基础。本章主要介绍在转向和励磁不变情况下的直流电动机转速控制，转向不变的调速系统也称不可逆调速系统。本章 1.1 节主要归纳了直流调速的相关知识，包括直流电机的原理和调速方法、调速指标，直流电机和整流器、斩波器的传递函数等，这些知识在“电机和拖动”、“自动控制原理”和“电力电子技术”等课程中已经讲授，这里仅是择要复习，可以选讲。1.2 节和 1.3 节主要介绍转速闭环控制的直流电动机调速系统，建立反馈控制的概念，其中，调节器在有静差和无静差调速系统中的作用是重点。1.4 节电压负反馈电流正反馈补偿控制的直流调速系统可以选讲。1.5 节介绍转速电流双闭环控制直流调速系统，以及调节器的参数设计等问题。1.6 节介绍直流调速系统仿真。本章按系统组成、工作原理，以及稳态（静态）和动态几个方面对直流调速系统进行分析。

## \* 1.1 直流电机的原理和开环调速系统

### 1.1.1 直流电机的原理

直流电机主要由磁极（定子励磁绕组）、电枢（转子绕组）和换向器组成。直流电机的励磁有多种方式，在现代直流调速系统中主要采用他励和永磁方式。直流电机有发电和电动两种工作状态。

1) 发电工作状态。当电机转子由原动力（油机、汽机和风力等）带动旋转时（见图 1.1a），转子绕组切割定子磁极的磁力线产生电动势（右手定则），电机工作在发电状态。当转子绕组的一条边从一个磁极转到另一个磁极下时，绕组该条边的电动势方向改变，因此旋转中的电枢绕组产生的电动势是交流的，其频率正比于电机转速。在发电工作状态，换向器将转子的交流电变换为直流电输出，起整流作用。

2) 电动工作状态。当电机转子绕组外接直流电源时（见图 1.1b），直流电源经换向器在转子绕组中产生电流，绕组电流在定子磁极磁场的作用下产生力（左手定则），作用在转子半径上的力产生转矩（电磁转矩）使转子转动，从而带动与电机轴相连接的机械负载运转，这时电机工作在电动状态。在电动工作状态，

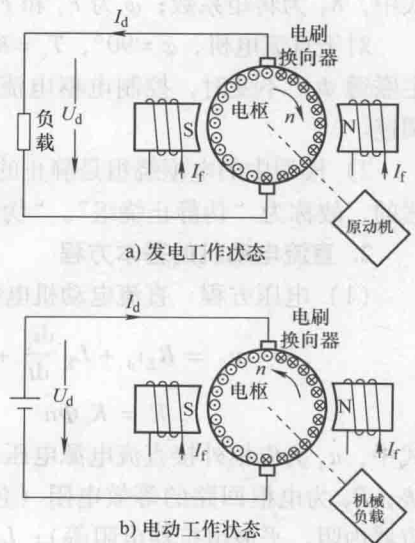


图 1.1 直流电机工作状态

换向器将电源的直流电变换为转子需要的交流电，起逆变器的作用。

从直流电机工作原理可以看到，直流电机工作于电动状态还是发电状态取决于外部条件，当电枢由外部电源供电时，它工作于电动状态；当电枢由外部动力带动时，它工作于发电状态。当工作在电动状态的直流电机制动时，由于电枢的惯性，电机不会立刻停止，还会继续旋转，这时电枢绕组切割定子磁场产生电动势，将电动机的惯性储能转变为电能回送到电源，实现回馈发电制动。回馈发电制动是电动机节能运行的重要措施。

## 1.1.2 直流电机的模型和基本方程

### 1. 直流电机的模型

直流电机模型如图 1.2 所示。励磁绕组在定子上，定子绕组通以励磁电流  $I_f$  产生定子励磁磁动势  $F_s$ ，励磁磁动势  $F_s$  产生主磁通  $\Phi$ 。直流电机转子绕组是旋转的，但是换向器电刷将电枢分成左、右两部分（见图 1.1），这两部分绕组的电流方向相反，使旋转的电枢绕组相当于一个沿电刷轴线方向的位置固定静止不动的线圈（图 1.2 中的转子绕组）。也就是说，旋转转子绕组产生的磁动势  $F_r$  方向是固定的，并且与定子励磁磁动势  $F_s$  方向垂直。如果将励磁磁动势  $F_s$  定位在横坐标上，称直轴或 d 轴（direct axis），则与之垂直的转子磁动势  $F_r$  位于纵坐标上，称交轴或 q 轴（quadrature axis）。直流电机模型就是由两个互相垂直的线圈组成的。

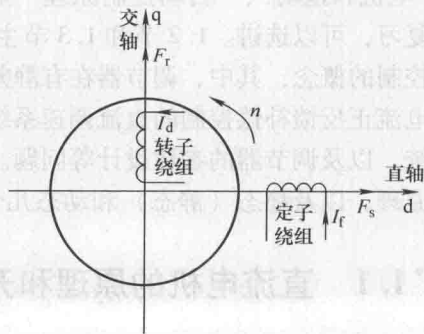


图 1.2 直流电机模型

直流电机模型的特点如下：

1) 定子励磁磁动势  $F_s$  与转子磁动势  $F_r$  互相垂直（正交），从控制意义上而言，定子励磁磁动势  $F_s$  和转子磁动势  $F_r$  互相独立，可以分别控制。电机转矩

$$T_e = K_T F_s F_r \sin\varphi$$

式中， $K_T$  为转矩系数； $\varphi$  为  $F_s$  和  $F_r$  的夹角。

对于直流电机， $\varphi = 90^\circ$ ， $T_e = K_T F_s F_r$ ，说明若控制励磁电流  $I_f$  保持励磁磁动势  $F_s$ （即主磁通  $\Phi$ ）不变时，控制电枢电流  $I_d$  就可以控制转子磁动势  $F_r$ ，进而控制电机转矩进行调速。

2) 模型中的电枢绕组是静止的，实际上电枢绕组随转子转动，因此电枢绕组的静止是假的，故称为“伪静止绕组”。“伪静止绕组”的旋转作用表现为转子的反电动势  $E$ 。

### 2. 直流电动机的基本方程

(1) 电压方程 直流电动机电枢等效电路如图 1.3 所示，电枢回路电压方程为

$$u_d = R_\Sigma i_d + L_\Sigma \frac{di_d}{dt} + E \quad (1.1)$$

$$E = K_e \Phi n \quad (1.2)$$

式中， $u_d$  为电枢外接直流电源电压； $E$  为电枢反电动势； $R_\Sigma$  为电枢回路的等效电阻（包括电枢电阻、变流器内阻、平波电抗器电阻等）； $L_\Sigma$  为电枢回路的等效电感（包括电枢电感、变压器漏感、平波电抗器

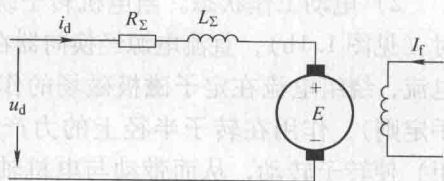


图 1.3 直流电动机电枢等效电路

电感等);  $K_e$  为电机电动势常数,  $K_e = \frac{pN}{60a}$ ;  $p$  为磁极对数,  $N$  为电枢导体总数,  $a$  为电枢导体并联支路数;  $\Phi$  为每极下磁通量 (Wb);  $n$  为转速 (r/min)。

在电动机稳态时, 电动机转速保持不变, 电压和电流也稳定不变, 这时电感电动势  $L_\Sigma \frac{di_d}{dt} = 0$ , 将电压和电流以平均值  $U_d$ 、 $I_d$  表示, 稳态时电枢回路的电压方程为

$$U_d = R_\Sigma I_d + E \quad (1.3)$$

(2) 电动机的电磁转矩 电磁转矩方程式为

$$T_e = K_m \Phi I_d \quad (1.4)$$

式中,  $K_m$  为电动机转矩常数,  $K_m = \frac{pN}{2\pi a} = \frac{60}{2\pi} K_e = 9.55 K_e$ 。

(3) 电动机的运动方程 电动机带动机械负载转动, 设负载的转矩为  $T_L$ , 电动机带动负载的运动方程式为

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad \text{或} \quad T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.5)$$

若将机械负载转矩  $T_L$  折算为负载电流  $I_{dl}$ , 则

$$K_m \Phi I_d - K_m \Phi I_{dl} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad \text{或} \quad I_d - I_{dl} = \frac{GD^2}{375 K_m \Phi} \frac{dn}{dt} \quad (1.6)$$

式中,  $J$  为转子转动惯量;  $n_p$  为极对数;  $\omega$  为转子转动角速度 (rad/s);  $GD^2$  为电动机飞轮力矩 ( $\text{kg} \cdot \text{m}$ )。

当  $T_e > T_L$  ( $I_d > I_{dl}$ ) 时,  $\frac{dn}{dt} > 0$ , 电动机作加速运动, 转速上升; 当  $T_e < T_L$  ( $I_d < I_{dl}$ ) 时,  $\frac{dn}{dt} < 0$ , 电动机作减速运动, 转速下降; 当  $T_e = T_L$  ( $I_d = I_{dl}$ ) 时,  $\frac{dn}{dt} = 0$ , 电动机保持转速不变。

### 1.1.3 直流电机的传递函数

(1) 电枢回路电流与电压间的传递函数 对电枢电压方程 [见式 (1.1)] 作拉普拉斯变换, 整理得电流与电压间的传递函数

$$\frac{I_d(S)}{U_d(S) - E(S)} = \frac{1/R_\Sigma}{T_l S + 1} \quad (1.7)$$

式中,  $T_l$  为电枢回路等效电磁时间常数,  $T_l = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}$ 。

(2) 电枢电流与反电动势之间的传递函数 将式 (1.2) 代入式 (1.7), 得

$$I_d - I_{dl} = \frac{GD^2}{375 K_m \Phi} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375 K_m \Phi} \frac{R_\Sigma}{K_e \Phi} \frac{dE}{dt} = \frac{T_m}{R_\Sigma} \frac{dE}{dt}$$

式中,  $T_m$  为电动机等效机电时间常数

$$T_m = \frac{GD^2 R_\Sigma}{375 K_e K_m \Phi^2}$$

经拉普拉斯变换后可得反电动势  $E$  与电流之间的传递函数

$$\frac{E(S)}{I_d(S) - I_{dl}(S)} = \frac{R_\Sigma}{T_m S} \quad (1.8)$$

根据式 (1.7)、式 (1.8) 和式 (1.2)，可画出直流电动机的动态结构图，如图 1.4 所示。结构图中包含了电动势  $E(S)$  的单位反馈和负载折算的电流  $I_{dl}(S)$ ，如果将电流节点前移，可写出电动势闭环的传递函数为

$$W_{Ecl}(S) = \frac{1}{\frac{(T_l S + 1) T_m S}{1} + 1} = \frac{1}{T_m T_l S^2 + T_m S + 1} \quad (1.9)$$

电动机的动态结构图变为图 1.5 所示，从图 1.5 和式 (1.9) 可见，直流电动机是一个二阶振荡环节。

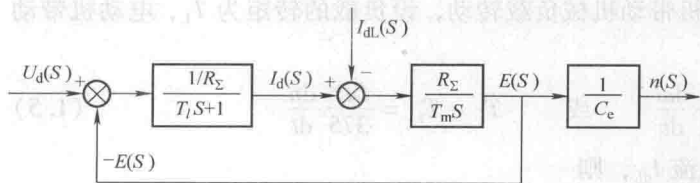


图 1.4 直流电动机动态结构图

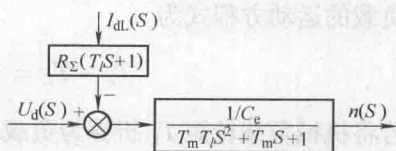


图 1.5 变换后的直流电动机动态结构图

### 1.1.4 直流电动机的调速方法

将式 (1.2) 代入稳态电压方程式 (1.3) 可得电动机转速为

$$n = \frac{U_d}{K_e \Phi} - \frac{R_\Sigma}{K_e \Phi} I_d = n_0 - \Delta n \quad (1.10)$$

式中， $n_0$  为理想空载转速， $n_0 = \frac{U_d}{K_e \Phi}$ ； $\Delta n$  为电动机带负载时的转速降， $\Delta n = \frac{R_\Sigma}{K_e \Phi} I_d$ 。

由式 (1.10)，直流电动机静特性如图 1.6 所示。该特性也称机械特性，两者的区别是静特性横坐标以电流  $I_d$  表示，机械特性横坐标以转矩  $T_e$  表示，因为直流电动机转矩正比于电流 [见式 (1.4)]，所以两种特性在图形上相同。从式 (1.10) 可看出，他励直流电动机的调速方法有以下两种：

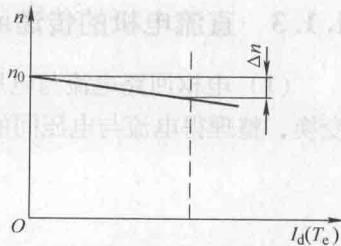


图 1.6 直流电动机静特性

#### 1. 调压调速

调压调速是通过改变电枢电压  $U_d$ ，进而改变电动机理想空载转速  $n_0$  来调节转速的方法，这是直流电动机常用的调速方法。调压调速时电动机的电压不能超过额定电压  $U_{dN}$ ，因此电压调节的范围为  $0 \sim U_{dN}$ ，相应电动机转速调节范围为  $0 \sim n_N$ 。

#### 2. 调磁调速 (弱磁调速)

调磁调速是以改变磁极磁通  $\Phi$  来调节转速的方法。一般电动机都要求运行在额定励磁  $\Phi_N$  状态 (即最大磁通  $\Phi_m$ )，这样电动机能以较小的电枢电流得到较大的转矩 [见式 (1.4)]，如果减小励磁，即  $\Phi < \Phi_N$ ，在相同电流情况下，电动机能提供的转矩将减小，



也就是说减小励磁调速时，电动机的负载能力下降了。如果  $\Phi > \Phi_N$ ，电动机磁路进入饱和状态，励磁电流将急剧增加，电动机将发生过热现象。因此调磁调速一般只是从额定励磁向下调节（称为弱磁）。由式（1.10）， $\Phi$  减小时相应的转速将增加，故称为弱磁升速。由式（1.4），弱磁时相同电流产生的电磁转矩下降，因此弱磁调速一般仅作为需要扩大电动机调速范围时的补充。

虽然改变回路电阻  $R_z$  和电枢电流  $I_d$  都能使电动机转速降  $\Delta n$  变化，从而影响转速  $n$ ，但是由于在电枢回路串联额外的调速电阻增加了回路的电阻损耗，增加了电能损耗，因此改变回路电阻的调速方式现在已经基本淘汰不用。当电动机稳态时，电流  $I_d$  取决于机械负载， $I_d$  随负载变化，这种电流变化引起的转速变化不属于调速方法，是对转速的一种扰动。

### 1.1.5 直流电动机开环调速系统

改变电枢电压可以改变直流电动机转速，而电枢电压调节在 20 世纪 60 年代以前主要依靠直流发电机，由交流电动机  $M_1$  带动直流发电机  $G$ ，通过调节直流发电机励磁，调节发电机输出电压  $U_d$ ，从而为直流电动机提供可调压的电源，这样的系统简称 G-M 系统（见图 1.7a）。电力电子技术发展后，直流发电机被电力电子变流器（晶闸管整流器或直流斩波器）取代（见图 1.7b），现代电力电子变流器能以小信号  $U_c$  控制电动机的大电流，为现代控制理论和微机控制的应用创造了条件，促进了现代调速技术的发展。

图 1.7 所示的直流电动机调压调速系统没有转速检测和转速反馈控制等环节，因此称为转速开环控制系统。

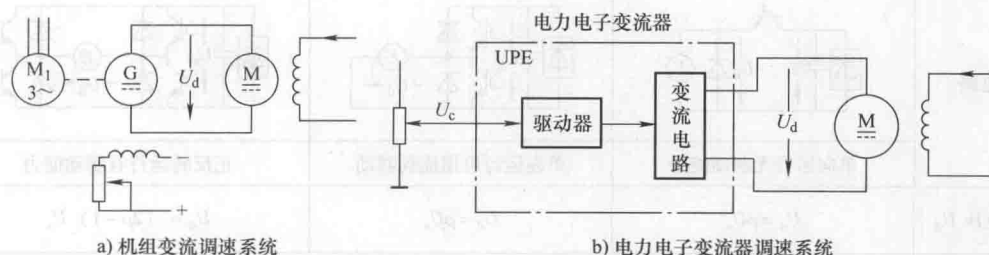


图 1.7 直流电动机开环调速系统

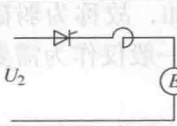
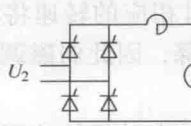
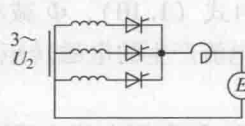
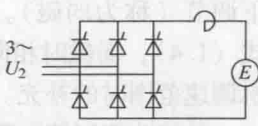
### 1.1.6 电力电子变流器及其传递函数

#### 1. 电力电子变流器

电力电子变流器是调速系统重要的装置，直流调速系统的变流器主要有 AC/DC 整流器和 DC/DC 斩波器，前者在小功率大功率系统中都有应用，后者目前主要使用在中小功率调速系统中。

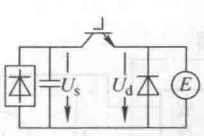
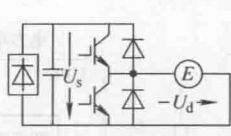
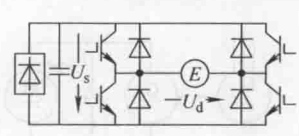
(1) 整流器 目前应用的电力电子整流器主要是晶闸管整流器，采用可关断器件的 PWM 整流器可以控制网侧功率因数，但是成本较高，目前使用还不普遍。晶闸管整流器的特点是：采用相位控制，通过脉冲移相控制晶闸管触发时刻调节输出电压，输出电压的脉动与整流相数有关，一般在直流回路串电感（平波电抗器）来减小输出电压和电流的脉动。常用的整流器主电路见表 1.1。

表 1.1 整流器

整流器	单相半波	单相桥	三相半波	三相桥
主电路				
整流电压	电流连续时 $U_d = U_{d0} \cos \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 90^\circ$			
$U_{d0}$	$0.45U_2$	$0.9U_2$	$1.17U_2$	$2.34U_2$
整流输出电流 $I_d$	稳态时 $I_d = \frac{U_d - E}{R}$			

(2) 斩波器 电力电子斩波器采用可关断器件 (MOSFET、IGBT 等) 和 PWM 调制, 其调制频率较高, 输出电流脉动小、响应快, 但由于受器件容量限制, 因此目前主要使用在小功率高性能的调速系统中。斩波调速的调制频率较高, 依靠电动机电枢电感电枢电流就可以连续, 因此电枢回路一般不必串联平波电抗器, 使系统体积、重量都大大减小。常用的斩波器主电路见表 1.2。

表 1.2 斩波器

斩波器	BUCK	半桥式	全桥式 (H 形)
主电路			
	单向运行无制动能力	单向运行可用能耗制动	正反转运行有制动能力
平均电压 $U_d$	$U_d = \rho U_s$	$U_d = \rho U_s$	$U_d = (2\rho - 1) U_s$
占空比 $\rho$	$\rho = \frac{t_{on}}{T} \quad 0 \leq t_{on} \leq T$		

## 2. 电力电子变流器的传递函数

(1) 失控时间 电力电子变流器依靠脉冲移相 (晶闸管) 或改变脉冲宽度 (PWM) 来调节输出电压, 晶闸管脉冲移相和 PWM 调制在原理上都是由锯齿波和控制信号  $U_c$  比较来产生脉冲信号, 如图 1.8 所示。由图可以看出, 虽然  $t_1$  时  $U_c$  发生了变化, 但是并不能立刻产生脉冲, 而要等到  $t_2$  时才能产生驱动脉冲信号, 中间有时间滞后  $t_s$  ( $t_s = t_2 - t_1$ ), 而且在  $t_s$  内输出脉冲和变流器输出电压也都不会变化, 因此  $t_s$  称为失控时间。显然,  $t_s$  是随机不固定的, 这在系统设计时很不方便, 工程上常用  $t_s$  的最大值 (即锯齿波周期  $T_s$ ) 或平均值  $T_s/2$  作为变流器的失控时间常数。晶闸管整流器的失控时间见表 1.3。

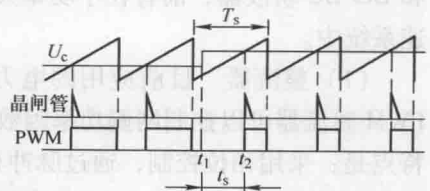


图 1.8 失控时间

表 1.3 晶闸管整流器的失控时间 ( $f=50\text{Hz}$ )

整流器	波头数 $m$	最大失控时间/ms	平均失控时间/ms
单相半波	1	20	10
单相桥式 (全波)	2	10	5
三相半波	3	6.67	3.33
三相桥式, 六相半波	6	3.33	1.67

(2) 传递函数 电力电子变流器从输入控制信号改变到输出电压变化中间有时间延迟, 因此是一个滞后控制环节, 其传递函数 (见图 1.9) 为

$$W_s(S) = \frac{U_d(S)}{U_c(S)} = K_s e^{-T_s S} \quad (1.11)$$

式中,  $K_s$  为变流器放大倍数;  $T_s$  为变流器失控时间常数。

$K_s$  和  $T_s$  在 PWM 变流器时常表示为  $K_{\text{PWM}}$  和  $T_{\text{PWM}}$ 。

含有滞后环节的系统, 属于非最小相位系统, 分析和设计时都比较复杂, 为了简化, 一般将指数项

$e^{-T_s S}$  用泰勒级数展开, 考虑到失控时间  $T_s$  较小, 忽略其高次项后, 电力电子变流器的传递函数可以近似为一阶惯性环节。

$$W_s(S) = K_s e^{-T_s S} = \frac{K_s}{1 + T_s + \frac{1}{2} T_s^2 S^2 + \frac{1}{3} T_s^3 S^3 + \dots} \approx \frac{K_s}{1 + T_s S} \quad (1.12)$$

### 1) 放大倍数

$$K_s (\text{或 } K_{\text{PWM}}) = \frac{U_d}{U_c} \approx \frac{U_{\text{dN}}}{U_{\text{cN}}} \quad (1.13)$$

因为变流器的输入/输出特性不一定是线性的, 例如晶闸管整流器输出电压  $U_d$  与触发延迟角  $\alpha$  为余弦关系 (见表 1.1), 放大倍数  $K_s$  在实际使用中可以实测几点输出电压和控制电压之比, 然后求平均值, 或者以变流器额定输出电压  $U_{\text{dN}}$  和额定电压时的控制电压  $U_{\text{cN}}$  进行估算。

### 2) 失控时间常数 $T_s$ ( $T_{\text{PWM}}$ ) 如下:

对晶闸管整流器

$$T_s = \frac{1}{mf} \quad (1.14)$$

对 PWM 斩波器

$$T_s = \frac{1}{f_{\text{PWM}}} \quad (1.15)$$

式中,  $m$  为整流电压波头数;  $f$  为交流电源频率, 工频为  $50\text{Hz}$ ;  $f_{\text{PWM}}$  为斩波器调制频率。

## 1.1.7 调速系统的调速指标

生产机械对电动机的转速控制有一定要求, 这些要求用调速指标来衡量, 一般调速指标分为稳态指标和动态指标两类。

### 1. 稳态指标

(1) 调速范围  $D$  生产机械要求电动机提供的最高转速  $n_{\text{max}}$  与最低转速  $n_{\text{min}}$  之比称为调