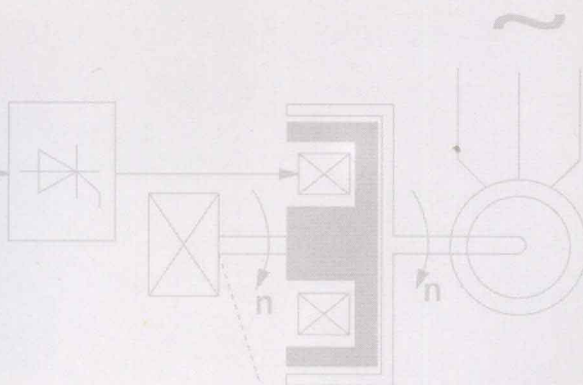
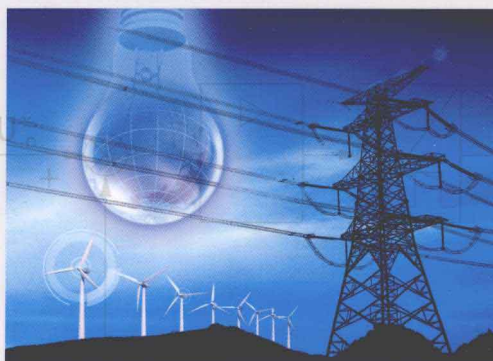
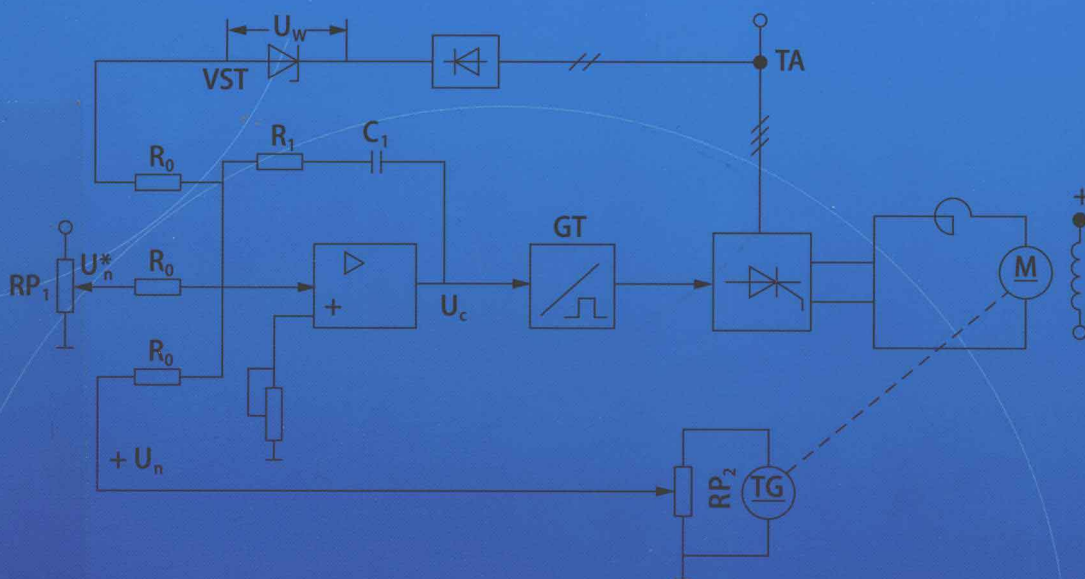




电力拖动控制系统

DIANLI TUODONG KONGZHI XITONG

郭丙君 编著



高等院校网络教育系列教材

电力拖动控制系统

郭丙君 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动控制系统 / 郭丙君编著. —上海:华东理工大学出版社,2012.9

高等院校网络教育系列教材

ISBN 978-7-5628-3347-5

I. ①电… II. ①郭… 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(2012)第 178544 号

高等院校网络教育系列教材

电力拖动控制系统

编 著 / 郭丙君

责任编辑 / 纪冬梅

责任校对 / 张 波

封面设计 / 方 雷 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

(021)64250787(编辑室)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 19.25

字 数 / 464 千字

版 次 / 2012 年 9 月第 1 版

印 次 / 2012 年 9 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3347-5

定 价 / 39.80 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

序

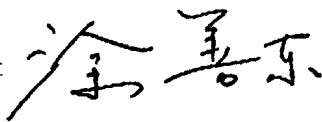
网络教育是依托现代信息技术进行教育资源传播、组织教学的一种崭新形式,它突破了传统教育传递媒介上的局限性,实现了时空有限分离条件下的教与学,拓展了教育活动发生的时空范围。从1998年9月教育部正式批准清华大学等4所高校为国家现代远程教育第一批试点学校以来,我国网络教育历经了若干年发展期,目前全国已有68所普通高等学校和中央广播电视大学开展现代远程教育。网络教育的实施大大加快了我国高等教育的大众化进程,使之成为高等教育的一个重要组成部分;随着它的不断发展,也必将对我国终身教育体系的形成和学习型社会的构建起到极其重要的作用。

华东理工大学是国家“211工程”重点建设高校,是教育部批准成立的现代远程教育试点院校之一。华东理工大学网络教育学院凭借其优质的教育教学资源、良好的师资条件和社会声望,自创建以来得到了迅速的发展。但网络教育作为一种不同于传统教育的新型教育组织形式,如何有效地实现教育资源的传递,进一步提高教育教学效果,认真探索其内在的规律,是摆在我们面前的一个新的、亟待解决的课题。为此,我们与华东理工大学出版社合作,组织了一批多年来从事网络教育课程教学的教师,结合网络教育学习方式,陆续编撰出版一批包括图书、课程光盘等在内的远程教育系列教材,以期逐步建立以学科为先导的、适合网络教育学生使用的教材结构体系。

掌握学科领域的基本知识和技能,把握学科的基本知识结构,培养学生在实践中独立地发现问题和解决问题的能力是我们组织教材编写的一个主要目的。系列教材包括了计算机应用基础、大学英语等全国统考科目,也涉及了管理、法学、国际贸易、机械、化工等多学科领域。

根据网络教育学习方式的特点编写教材,既是网络教育得以持续健康发展的基础,也是一次全新的尝试。本套教材的编写凝聚了华东理工大学众多在学科研究和网络教育领域中有丰富实践经验的教师、教学策划人员的心血,希望它的出版能对广大网络教育学习者进一步提高学习效率予以帮助和启迪。

华东理工大学副校长



前 言

电力拖动控制系统是电气工程及其自动化、自动化专业的主要专业课之一。

据统计,我国有 62% 左右的用电量是由电动机消耗的。电动机拖动生产机械广泛地应用于机械制造、冶金、矿业、交通、石油化工、航空航天、国防工业、家电生产、轻工业、农业等国民经济的各个领域,研究电力拖动自动控制对提高产品质量,改善系统性能,节约能源都有重要作用。

本书是作者根据电气工程及其自动化类专业的性质、教学改革的要求以及多年的“电力拖动控制系统”课程教学经验,并参阅其他教材而编写的,力求深入浅出地叙述基本知识,叙述简练,注重应用。本书在编写中着重于基本原理、基本方法、基本概念的分析 and 应用基础,充分注意应用系统的观点把交、直流两大调速系统在形式上和方法上予以统一,前后呼应,以利读者类比和对照。并结合当今应用非常广泛的 MATLAB 软件对电力拖动系统进行了仿真,有利于读者在相应的章节内容上加深理解。在每一章后附有与生产实践相结合的一定数量的思考题与习题,以帮助读者提高解决实际问题的能力。

本教材可作为高等学校网络学院的电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等专业的电力拖动控制系统课程的通用教材,也可作为工程技术人员的参考用书,还可以作为相关专业的函授教材,对于从事电气工程应用的工程技术人员也是一本实用的参考书。

教授本书需要 64 学时左右,不同院校、不同专业可根据授课学时的差异,选择学习本教材内容,其中带 * 部分是为学生拓展知识面而编写的,不是必修内容。

由于编者水平有限,书中难免存在不当和谬误之处,恳请有关专家和广大读者不吝赐教。

编者

2012 年 8 月

目 录

1 单闭环直流调速系统	1
1.1 直流调速系统用的可控直流电源	1
1.1.1 旋转变流机组	2
1.1.2 静止可控整流器	2
1.1.3 直流斩波器和脉宽调制变换器	3
1.2 V-M 系统的开环机械特性及稳定性能指标	4
1.2.1 V-M 系统的开环机械特性	4
1.2.2 转速控制要求和稳态调速指标	6
1.3 转速负反馈单闭环调速系统的组成及其特性分析	8
1.3.1 系统的组成及静特性分析	8
1.3.2 开环系统的机械特性与闭环系统静特性的比较	9
1.3.3 转速闭环调速系统的基本性质	11
1.3.4 转速负反馈单闭环调速系统的稳态参数计算	13
1.4 带电流截止负反馈环节的转速闭环调速系统	15
1.4.1 系统的组成和工作原理	15
1.4.2 系统的静特性及参数选择	16
1.5 带有电压负反馈和电流正反馈的调速系统	18
1.5.1 电压负反馈调速系统	18
1.5.2 带有电压负反馈和电流正反馈的调速系统	19
1.6 单闭环调速系统的动态分析	20
1.6.1 系统的动态数学模型	20
1.6.2 单闭环系统的稳定条件	24
1.7 无静差调速系统	25
1.7.1 积分控制规律	25
1.7.2 采用比例积分调节器的单闭环无静差调速系统	26
本章小结及学习要求	31
思考题与习题	31
2 多环控制的直流调速系统与调节器的工程设计方法	33
2.1 双闭环调速系统的构成及静特性	33
2.1.1 单闭环系统存在的问题	33
2.1.2 转速、电流双闭环调速系统的组成	34
2.1.3 双闭环直流调速系统稳态结构图和静特性	35

2.1.4	各变量的稳态工作点和稳态参数计算	37
2.2	双闭环直流调速系统的动态性能	37
2.2.1	双闭环直流调速系统的动态数学模型	37
2.2.2	双闭环直流调速系统的起动过程	38
2.2.3	动态性能和两个调节器的作用	40
2.3	双闭环调速系统的工程设计	42
2.3.1	设计方法与步骤	42
2.3.2	系统的动态性能指标	42
2.3.3	典型Ⅰ型系统参数和性能指标的关系	44
2.3.4	典型Ⅱ型系统参数和性能指标的关系	48
2.3.5	调节器结构的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的典型化	52
2.4	按工程设计方法设计双闭环系统的电流调节器和转速调节器	57
2.4.1	电流调节器的设计	58
2.4.2	转速调节器的设计	63
2.4.3	转速调节器退饱和时转速超调量的计算	66
2.4.4	设计举例	70
2.5	转速超调的抑制——转速微分负反馈	74
2.5.1	问题的提出	74
2.5.2	带转速微分负反馈双闭环直流调速系统的基本原理	74
2.5.3	退饱和时间与退饱和转速	76
2.5.4	转速微分反馈参数的工程设计方法	77
2.5.5	带转速微分负反馈双闭环直流调速系统的抗扰性能	78
2.6	多环控制的直流调速系统	79
2.6.1	带电流变化率内环的三环直流调速系统	79
2.6.2	弱磁控制的直流调速系统	82
	本章小结及学习要求	85
	思考题与习题	86
3	直流可逆调速系统	88
3.1	可逆方案	88
3.1.1	电枢反接可逆线路	88
3.1.2	励磁反接可逆线路	90
3.2	晶闸管直流可逆调速系统的回馈制动*	90
3.3	有环流可逆调速系统	91
3.3.1	可逆调速系统中的环流	91
3.3.2	直流平均环流与配合控制	92
3.3.3	瞬时脉动环流及其抑制	94
3.3.4	直流可逆调速系统的制动分析	95
3.4	可控环流的可逆调速系统	97
3.5	逻辑控制的无环流可逆调速系统	100

3.5.1 系统的组成及工作原理	100
3.5.2 可逆系统对无环流逻辑控制器的要求	101
3.5.3 无环流逻辑控制器 DLC 的实现	102
本章小结及学习要求	106
思考题与习题	106
4 直流脉宽调速系统	108
4.1 脉宽调制变换器	108
4.1.1 不可逆脉宽调制变换器	108
4.1.2 可逆脉宽调制变换器	111
4.2 脉宽调制变换器的控制电路	115
4.2.1 三角波振荡器	115
4.2.2 脉冲形成及脉冲分配器	117
4.2.3 电力晶体管基极驱动电路	118
4.3 双闭环直流脉宽调速系统	119
4.3.1 脉宽调速系统的开环机械特性	119
4.3.2 双闭环直流脉宽调速系统	121
4.3.3 脉宽调速系统最佳开关频率的确定	122
4.3.4 泵升电压限制电路	123
4.4 直流脉宽调速系统实例	124
4.4.1 采用模拟电路的直流脉宽调速系统	124
4.4.2 由集成 PWM 控制器控制的不可逆调速系统	125
4.4.3 由单片微机控制的不可逆调速系统	128
本章小结及学习要求	129
思考题与习题	130
5 直流调速系统仿真	131
5.1 SimPower System 模型库简介	131
5.2 单闭环直流调速系统的仿真	137
5.2.1 开环直流调速系统的仿真	137
5.2.2 单闭环有静差转速负反馈调速系统的建模与仿真	142
5.2.3 单闭环无静差转速负反馈调速系统的建模与仿真	145
5.2.4 单闭环电流截止转速负反馈调速系统的建模与仿真	148
5.2.5 单闭环电压负反馈调速系统的建模与仿真	150
5.2.6 单闭环电压负反馈和带电流正反馈调速系统的建模与仿真	151
5.2.7 单闭环转速负反馈调速系统定量仿真	152
5.3 双闭环及 PWM 直流调速系统仿真	154
5.3.1 双闭环直流调速系统的建模与仿真	154
5.3.2 PWM 直流调速系统的建模与仿真	157
本章小结及学习要求	160
思考题与习题	161

6 交流异步电动机转差功率消耗性调速系统	162
6.1 交流调速系统概述	162
6.1.1 交流调速的发展	162
6.1.2 交流调速的基本方法	163
6.2 闭环控制的异步电动机变压调速系统	165
6.2.1 异步电动机变压调速电路	165
6.2.2 异步电动机改变电压时的机械特性	166
6.2.3 闭环控制的变压调速系统及其静特性	168
6.2.4 闭环变压调速系统的近似动态结构图	170
6.3 电磁转差离合器调速系统	173
本章小结及学习要求	175
思考题与习题	176
7 交流异步电动机转差功率回馈型调速系统	177
7.1 异步电动机串级调速原理	177
7.1.1 异步电动机转子附加电动势的作用	177
7.1.2 电气串级调速系统	178
7.2 串级调速系统的性能	180
7.2.1 串级调速时异步电动机的机械特性	180
7.2.2 串级调速装置的容量	184
7.2.3 串级调速系统的效率和功率因数	185
7.3 闭环控制的串级调速系统	188
7.3.1 双闭环串级调速系统的组成	188
7.3.2 串级调速系统的动态数学模型	189
7.3.3 双闭环串级调速系统调节器的设计	192
7.3.4 串级调速系统的控制方式	192
7.4 串级调速系统的改进线路	194
7.4.1 逆变器的不对称控制——纵续连接线路	194
7.4.2 斩波控制串级调速系统	195
7.4.3 直流回路无平波电抗器的串级调速系统	197
本章小结及学习要求	198
思考题与习题	198
8 交流异步电动机转差功率不变型调速系统	200
8.1 变压变频调速的基本控制方式	200
8.1.1 基频以下调速	200
8.1.2 基频以上调速	201
8.2 异步电动机电压、频率协调控制时的机械特性	202
8.2.1 正弦波恒压恒频供电时异步电动机的机械特性	202
8.2.2 基频以下电压、频率协调控制时的机械特性	203
8.2.3 基频以上变频调速时的机械特性	206

8.2.4 正弦波恒流供电时的机械特性	207
8.3 静止式电力电子变压变频装置	208
8.3.1 间接变压变频装置(交-直-交变压变频装置)	209
8.3.2 直接变压变频装置(交-交变压变频装置)	210
8.3.3 电压源型变频器和电流源型变频器	211
8.3.4 180° 导通型和 120° 导通型逆变器	213
8.3.5 正弦波脉宽调制(SPWM)变压变频器	216
8.4 转速开环、恒压频比控制的调速系统	229
8.4.1 电压源型晶闸管变频调速系统	229
8.4.2 电流源型晶闸管变频调速系统	232
8.5 转速闭环、转差频率控制的变压变频调速系统	233
8.5.1 转差频率控制的基本概念	234
8.5.2 转差频率控制的规律	235
8.5.3 转差频率控制的变压变频调速系统	237
8.6 异步电动机的多变量数学模型和坐标变换*	238
8.6.1 异步电动机动态数学模型的性质	238
8.6.2 三相异步电动机的多变量非线性数学模型	239
8.6.3 坐标变换和变换矩阵	243
8.6.4 异步电动机在二相坐标系上的数学模型	249
8.7 按转子磁场定向矢量控制的变压变频调速系统	254
8.7.1 异步电动机的坐标变换结构图和等效直流电动机模型	254
8.7.2 矢量控制系统的构想	254
8.7.3 矢量控制的基本方程式*	255
8.7.4 磁链开环、转差型矢量控制系统*	256
8.7.5 转速、磁链闭环控制的矢量控制系统*	257
本章小结及学习要求	260
思考题与习题	261
9 交流调速系统仿真	262
9.1 交流异步电动机转差功率消耗性调速系统的仿真	262
9.1.1 交流调速系统仿真中常用模块	262
9.1.2 单闭环交流电动机调压调速系统的建模与仿真	264
9.2 交流异步电动机转差功率回馈型调速系统仿真	267
9.3 交流异步电动机转差功率不变型调速系统仿真	269
9.3.1 SPWM 内置波调速系统的建模与仿真	269
9.3.2 SPWM 外置波调速系统的建模与仿真	272
9.3.3 电流滞环跟踪控制调速系统的建模与仿真*	273
9.3.4 转速开环恒压频比的交流调速系统的建模与仿真*	276
9.3.5 转速、磁链闭环控制的矢量控制系统的建模与仿真*	278
本章小结及学习要求	283

思考题与习题.....	283
附录一 自测题一	284
附录二 自测题二	289
参考文献	294

1 单闭环直流调速系统

直流电动机具有良好的起、制动性能,宜于在广范围内平滑调速,在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、金属切削机床、造纸机、高层电梯等需要高性能可控电力拖动的领域中得到了广泛的应用。近年来,交流调速系统发展很快,然而直流拖动控制系统毕竟在理论上和实践上都比较成熟,而且从反馈闭环控制的角度来看,它又是交流拖动控制系统的基础。所以首先应该很好地掌握直流系统。

从生产机械要求控制的物理量来看,电力拖动自动控制系统有调速系统、位置随动系统、张力控制系统、多电动机同步控制系统等多种类型,而各种系统往往都是通过控制转速来实现的,因此调速系统是最基本的拖动控制系统,本书主要介绍调速系统。

直流电动机的转速和其他参量的关系如式(1-1)表示:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中, n 为转速,单位为 r/min ; U 为电枢供电电压,单位为 V ; I_a 为电枢电流,单位为 A ; R_a 为电枢回路总电阻,单位为 Ω ; Φ 为励磁磁通,单位为 Wb ; C_e 为电动势常数。

由式(1-1)可以看出,调节电动机的转速有三种方法:

- (1) 调节电枢供电电压 U ;
- (2) 减弱励磁磁通 Φ ;
- (3) 改变电枢回路总电阻 R_a 。

对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说,以调节电枢供电电压的方式为最好。改变电阻只能有级调速;减弱磁通虽然能够平滑调速,但是调速范围不大,往往只是配合降压方案,在基速(即电动机额定转速)以上作小范围的升速。因此,自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主。

1.1 直流调速系统用的可控直流电源

变电压调速是直流调速系统用的主要方法,调节电枢供电电压需要有专门的可控直流电源。常用的可控直流电源有以下三种。

- (1) 旋转变流机组:用交流电动机和直流发电机组成机组,以获得可调的直流电源。
- (2) 静止可控整流器:用静止的可控整流器,例如晶闸管可控整流器,以获得可调的直流电压。

(3) 直流斩波器和脉宽调制变换器: 用恒定直流电源或不控整流电源供电, 利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压。

1.1.1 旋转变流机组

在 20 世纪 50 年代以前直流调速系统电源采用直流发电机-电动机系统。这种系统中直流电动机的直流电由一台直流发电机供给, 直流发电机由一台交流电动机拖动。使用时通过调节发电机的励磁电流来改变其输出电压, 从而调节电动机的转速。这样的调速系统简称 G-M 系统。如图 1-1 所示。这种系统的四象限运行特性平稳, 如图 1-2 所示。容易实现可逆运行, 无论正转减速还是反转减速都能实现回馈制动。但这种系统至少需要两台与调速电动机容量相当的旋转电动机, 还需要一台励磁发电机, 因而设备多、体积大、费用高、效率低, 运行有噪声, 维护不方便。

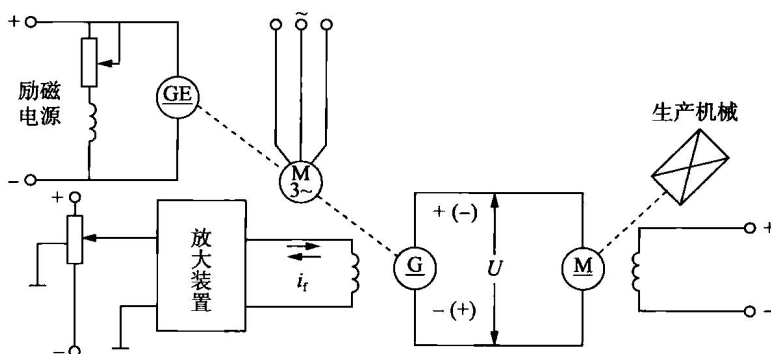


图 1-1 旋转机组供电的直流调速系统 (G-M 系统)

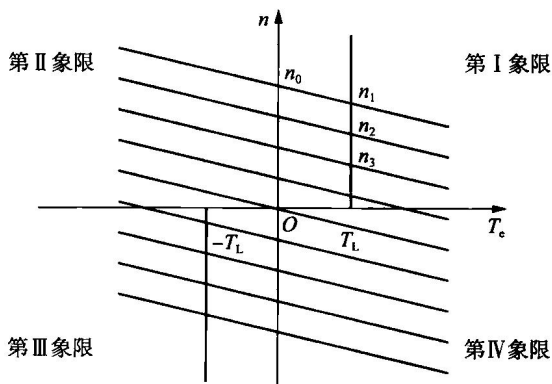


图 1-2 G-M 系统的机械特性

1.1.2 静止可控整流器

到 20 世纪 60 年代, 晶闸管整流器出现后, 直流电源几乎都采用晶闸管相控整流电源。

图 1-3 所示为晶闸管相控整流器供电的直流调速系统,简称 V-M 系统,V 为晶闸管可控整流器,它可以是单相、三相或多相的,也可以是半波、全波半控或全控的。GT 为触发装置,通过改变 GT 的控制电压可移动触发脉冲的相位,从而改变整流电压 U_d ,实现平滑调控。与旋转变流机组 G-M 系统比较,V-M 系统有如下优点和不足。

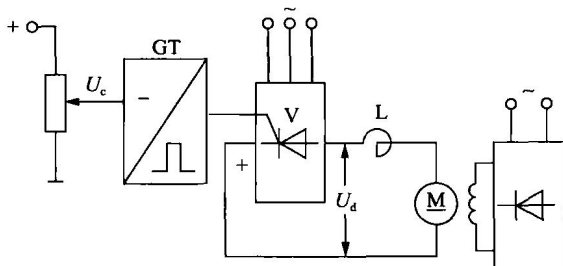


图 1-3 晶闸管相控整流器供电的直流调速系统

优点:调速范围大,精度高,动态性能好,效率高,易控制等。

不足:①晶闸管具有单向导电性,只能流过正向电流,不可能流过反向电流,故可逆运行困难。要实现可逆运行须采用两组全控整流电路,使变流设备增加。②由电力电子技术可知,晶闸管对电压、电流变化特别敏感,因此必须有可靠的保护装置和散热条件,而且元件的选择又要有足够的余量。③系统在深调速,即在低速运行时,晶闸管的导通角很小,使系统的功率因数低,有较大的谐波电流,引起电网电压波形畸变,严重时使附近的用电设备不能正常运行。

1.1.3 直流斩波器和脉宽调制变换器

直流斩波器或 PWM 变换器的电力电子器件不工作于位控状态,而是工作于开关状态。图 1-4(a)为晶闸管直流斩波器的原理图,当晶闸管 VT 被触发时,电源电压 U_s 加到电动机上;当 VT 关断时,直流电源与电动机断开,电动机经二极管 VD 续流,两端电压接近于零,如此反复,电机电枢两端电压波形如图 1-4(b)所示。

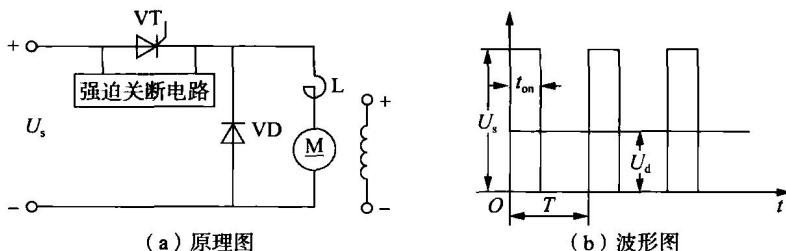


图 1-4 晶闸管直流斩波器

电机电枢两端电压为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (1-2)$$

式中, T 为晶闸管的开关周期, t_{on} 为 VT 开通时间, $\rho = \frac{t_{on}}{T} = t_{on}f$, ρ 为占空比, f 为开关频率。

由式(1-2)可知, 直流斩波器输出平均电压 U_d 可通过改变占空比来调节。图 1-5 所示为几种常用控制方式的电压、电流波形。

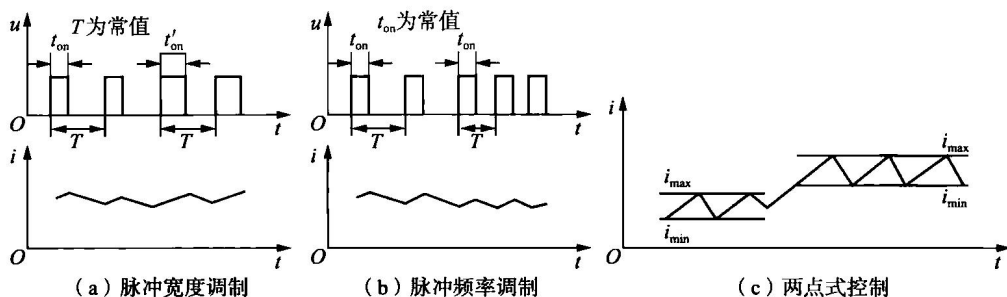


图 1-5 直流斩波器常用控制方式的电压、电流波形

图 1-5(a)为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation), 简称 PWM, 脉冲周期 T 一定, 改变晶闸管导通时间 t_{on} , 即改变脉冲宽度。

图 1-5(b)为脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation), 简称 PFM, 晶闸管导通时间 t_{on} 不变, 只改变开关频率 f (或开通周期 T), 也就是只改变晶闸管的关断时间。

图 1-5(c)为两点式控制, 当负载电压或电流低于某一最小值时, VT 触发导通; 当电压或电流达到某一最大值时, VT 关断, 导通和关断时间均是不确定的。

随着大功率全控型电力电子器件的出现, 开关频率得到大幅度的提高, 使控制方式变得简单, 装置的体积减小。采用全控型器件实行开关控制时, 多用脉冲宽度调制的控制方式, 形成了日益广泛的 PWM 装置—电动机系统, 简称 PWM 调速系统或脉宽调速系统。

与 V-M 系统相比, PWM 调速系统有如下优点。

(1) 由于 PWM 调速系统采用高开关频率的电力电子器件, 仅靠电枢电感滤波就可获得脉动很小的直流电流, 电枢电流容易连续, 系统的低速性能稳定, 调整范围宽, 在相同的负载转矩下, 电动机的发热损耗都较小。

(2) 由于开关频率高, 若与快速响应的电机相配合, 使系统的快速响应性能好, 动态抗干扰能力强。

(3) 由于电力电子器件只工作在开关状态, 主电路简单, 装置效率高。

1.2 V-M 系统的开环机械特性及稳定性能指标

1.2.1 V-M 系统的开环机械特性

图 1-3 所示的调速系统, 电流连续时其主回路电压平衡方程式为

$$U_{d0} = E_a + I_a R \quad (1-3)$$

式中, E_a 为电动机反电动势; R 为主电路的等效电阻, 包括装置内阻、电动机电枢电阻、平波电抗器电阻; I_a 为主电路电流; U_{d0} 为理想空载整流电压平均值。

对于一般全控式整流电路, 当电流连续时, 有

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (1-4)$$

式中, α 为从自然换向点算起的触发脉冲控制角; U_m 为 $\alpha=0$ 时的整流电压波形峰值; m 为交流电源一周期内的整流电压脉波数。

已知 $E_a = C_e \Phi n$, 在调压调速中为额定磁通, 可以认为是常数, 并令 $K_e = C_e \Phi$, 将式(1-4)代入式(1-3)可得

$$n = \frac{1}{K_e} (U_{d0} - I_a R) = \frac{1}{K_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_a R \right) = n_0 - \Delta n \quad (1-5)$$

式中, $n_0 = \frac{U_{d0}}{K_e}$ 为理想空载转速; $\Delta n = \frac{R I_a}{K_e}$ 为对应 I_a 的转速降落。

由式(1-5)可知, 改变控制角 α , 会得到一簇平行直线, 如图 1-6 所示。

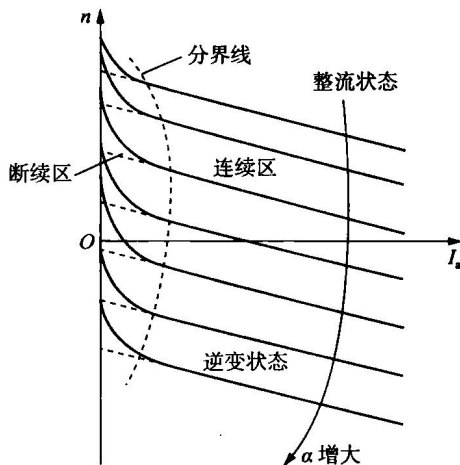


图 1-6 V-M 系统的开环机械特性(箭头表示 α 增大方向)

平均电流较小的部分画成虚线, 因为这时电流波形可能断续, 式(1-5)不再适用。可见, 在电流连续时, 晶闸管可控整流器可以看成是一个线性的可控电压源。

当电流断续时, 机械特性方程比较复杂, 转速 n 与电流 I_a 呈非线性, 其中包含了整流和逆变状态, 连续和断续区。由图 1-6 可见, 电流连续时, 特性比较硬; 电流断续时, 特性比较软, 且呈非线性, 理想空载转速较高。只要主电路的电感足够大, 在分析时可近似认为整个范围均为线性, 即图 1-6 中用连续段特性及其延长线(图中虚线)作为系统特性。在必须考虑非线性时, 可用另一段直线逼近断续特性, 如图 1-7 所示。这相当于把 R 看成一个更大的等效电阻 R' , $R' = K_e \tan \delta$ 。

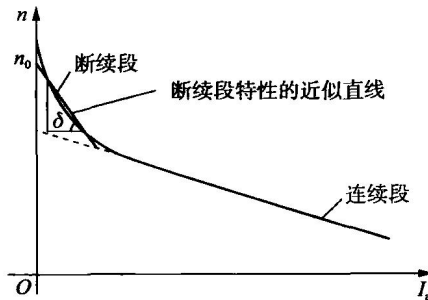


图 1-7 断续的近似计算

1.2.2 转速控制要求和稳态调速指标

1. 转速控制要求

不同的生产机械对转速控制有不同的要求,但归纳起来有如下三个方面。

(1) 调速:在一定的最高转速和最低转速范围内,分级或平滑地调节转速。

(2) 稳速:以一定的精度在所需的转速上稳定运行,在各种可能的扰动下转速波动限制在一定范围内。

(3) 加减速:频繁起、制动的设备要尽量快地加减速,以提高生产效率;而对于不宜经受剧烈速度变化的机械则要求起、制动平稳。

以上三个方面对不同的生产设备有不同的侧重,有时要求三个方面都必须具备,有时则只要求具备一项或两项。

2. 调速系统的稳态性能指标

生产设备对转速控制的三项要求中,有时各项之间会有矛盾,如调速系统要求系统能在一定范围内变化转速,而稳速系统则要求转速稳定。为了定量分析,针对这两项要求定义如下性能指标。

(1) 静差率 δ

静差率总是针对某一机械特性而言的,其定义为

$$\delta = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-6)$$

式中, n_0 为该特性上的理想空载转速, n_N 为该特性上额定负载(电磁转矩等于其额定值)时的转速, Δn_N 为该特性在额定负载时的转速降。习惯上,静差率常用百分数表示。

静差率与特性的硬度是有区别的。以降压调速为例,不同电压下的机械特性是一组平行线,可以说它们的硬度相同,额定负载时的转速降也相同,但电压越低,理想空载转速越低,静差率越大(参见图 1-8,图中 T_N 为额定电磁转矩)。

为了使负载的变化引起转速的变化相对较小,即保证一定的转速稳定性,常要求 δ 小于某一允许值。例如,普通车床可允许 $\delta \leq 30\%$,而高精度的造纸机则要求 $\delta \leq 0.1\%$ 。一般来讲,若对应于最低转速的机械特性能满足静差率的要求,则其他情况下也能满足要求。

(2) 调速范围 D