



普通高等教育 电气工程 系列规划教材
自 动 化

Electric drives motion
control system

电力拖动运动 控制系统 第2版

◎ 主 编 丁学文

◎ 副主编 陈增禄



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

电力拖动运动控制系统

第2版

主 编 丁学文
副主编 陈增禄
参 编 丁远翔
主 审 王兆安

机械工业出版社

本书为本科自动化专业、电气工程及其自动化专业的“电力拖动自动控制系统”课程教材。本书第2版是在第1版的基础上修订而成,内容包括电力拖动运动控制系统的基本理论,直流电动机、异步电动机和同步电动机等各种调速与控制的方法,电力拖动运动控制系统中使用的各种检测技术,电力拖动在各种运动控制系统中的应用,以及电力拖动运动控制系统的计算机实现。第2版还增加了习题答案。

本书适合自动化专业、电气工程及其自动化专业和其他以培养应用型人才为目的的相近专业作为教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书做教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 yu57sh@163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动运动控制系统/丁学文主编. —2版.
—北京:机械工业出版社,2014.8
普通高等教育电气工程自动化系列规划教材
ISBN 978-7-111-47061-8

I. ①电… II. ①丁… 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 129544 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 荣
版式设计:赵颖喆 责任校对:陈秀丽
封面设计:张 静 责任印制:刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2014 年 10 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·19.5 印张·477 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-47061-8
定价:39.00 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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书为高等学校电气工程、自动化专业“运动控制系统”课程教材。运动控制主要有电气传动、液压和气动3种驱动方式，本教材的内容仅涉及其中之一——电气传动，称之为“电力拖动运动控制系统”。

本书第2版在第1版的基础上作了适当修改，主要修改了第2章、第7章、第8章和思考题与习题的部分内容，思考题与习题增加了参考答案。

本书的主要特点为：

- (1) 压缩了直流调速部分的篇幅，充实了交流调速部分的内容；
- (2) 既着重电力拖动基本理论的讲述，又兼顾电力拖动在运动控制系统中的实际应用介绍；
- (3) 以连续模拟控制为主干，不偏废离散数字计算机控制；
- (4) 以“电力拖动自动控制系统”内容为核心，辅有“电机与拖动”、“电力电子技术”、“计算机控制系统”等相关内容的回顾；
- (5) 理论学习中引入了较多的例题和 MATLAB 仿真结果。

全书共分9章，第1章回顾了拖动基础，集中讲述了运动控制系统中常用的检测技术；第2章包括了直流调速系统的全部内容；第3章介绍了交流电机学习中的非常有用的基本概念和容易含混不清的问题；第4章对异步电动机的性能和变频除外的其他调速方法进行了集中讲述，用坐标变换推导出了异步电动机的动态数学模型；第5章讲述了异步电动机的恒压频比控制和通用变频器；第6章虽然篇幅不长，但最具挑战性，讲述基于动态数学模型的异步电动机矢量控制和直接转矩控制；第7章对同步电动机包括永磁同步电动机的各种调速方法进行了较为详细的讲述；第8章介绍了电力拖动在各种运动控制系统中的应用；第9章讲述电力拖动运动控制系统的计算机实现。

本书第2章由陈增禄教授编写，第9章由丁远翔编写，其余各章由丁学文教授编写，并由丁学文统稿。全书由西安交通大学王兆安教授主审。另外，对研究生完成的大量录入和仿真工作表示感谢。本书编写中参考了大量文献，在此对有关作者谨表谢意。

本书适合于电气工程、自动化等专业和其他相近专业作为本科教材，也可供有关工程技术人员参考。全书建议64学时，如果课程课时少于64学时，可以以第1、2、4、5、6、7章为重点，其他章节选讲或不讲。本书选讲的章节前标上“*”，以便于讲课或自学时选择。

我们在编写过程中虽然花费了不少精力，并多次审阅，但书中仍难免有错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言	
常用符号表	1
第1章 电力拖动运动控制系统	
基础	5
1.1 电力拖动系统的运动方程	5
1.2 电力拖动系统的负载特性	6
1.2.1 恒转矩负载特性	6
1.2.2 风机类负载特性	6
1.2.3 恒功率负载特性	7
1.3 电力拖动系统的转矩与功率	8
1.3.1 电动机允许输出的转矩和功率	8
1.3.2 调速方式与负载类型的配合	9
1.4 电力拖动系统的检测技术	10
1.4.1 模拟检测技术	10
1.4.2 数字检测技术	12
思考题与习题	19
第2章 直流电动机调速系统	20
2.1 调速系统的性能指标	20
2.1.1 稳态指标	21
2.1.2 动态指标	22
2.2 直流调速系统的组成及数学模型	24
2.2.1 系统组成	24
2.2.2 可控直流电源	24
2.2.3 他励直流电动机	38
2.3 开环直流调速系统	40
2.3.1 静态特性	40
2.3.2 动态特性	41
2.3.3 开环直流调速系统的局限性	42
2.4 转速单反馈闭环直流调速系统	43
2.4.1 转速单反馈闭环系统的静特性	43
2.4.2 转速单反馈闭环系统的稳定性	45
2.5 闭环控制系统的工程设计方法	47
2.5.1 自动控制原理的基本结论	47
2.5.2 典型系统	49
2.5.3 近似典型系统	58
2.6 转速单反馈闭环直流调速系统的动态设计	62
2.6.1 动态设计	62
2.6.2 电流截止负反馈	64
2.6.3 转速单反馈闭环直流调速系统的局限性	68
2.7 转速电流双闭环直流调速系统的原理和静态设计	68
2.7.1 电流反馈环的作用	68
2.7.2 双闭环直流调速系统的起动过程	70
2.7.3 双闭环直流调速系统的稳态设计	71
2.8 双闭环直流调速系统的动态设计	73
2.8.1 电流环设计	73
2.8.2 转速环设计	74
2.8.3 转速调节器积分退饱和超调	78
2.8.4 转速超调的抑制措施	79
2.9 转速电流双闭环直流调速系统的抗扰特性	82
2.9.1 扰动模型	82
2.9.2 抗负载电流扰动的特性	83
2.9.3 抗扰性能的进一步改进	85
2.10 可逆直流调速系统	88
2.10.1 H形PWM变换电源供电的可逆直流调速系统	88
2.10.2 可逆相控整流供电的直流调速系统	89
2.11 本章小结	92
思考题与习题	93
第3章 机电能量转换基础	95
3.1 磁路	95
3.1.1 磁场的建立	95
3.1.2 磁路的欧姆定律	96
3.1.3 磁路中铁心的作用	97
3.2 感应电动势	98
3.2.1 电磁感应定律与电动势	98

3.2.2 变压器电动势与运动电动势	99	的工作原理	147
3.3 磁场能量与电感	100	5.1.4 逆变器的电压控制方式	148
3.3.1 磁场储能与磁共能	100	5.2 转速开环交-直-交电压型变频调速系统	149
3.3.2 电感及用电感表示的磁场能量	101	5.2.1 系统结构框图	149
3.4 机电能量转换的基本原理	104	5.2.2 系统的基本单元	149
3.4.1 典型的机电能量转换装置	104	5.3 转速开环交-直-交电流型变频调速系统	152
3.4.2 电磁力和电磁转矩	104	5.3.1 系统结构框图	152
思考题与习题	108	5.3.2 系统的基本单元	153
第4章 异步电动机与调速	110	5.4 谐波的影响	154
4.1 概述	110	5.4.1 转矩脉动	154
4.1.1 直流电动机与交流电动机的比较	110	5.4.2 谐波发热	155
4.1.2 交流电动机调速的技术突破	111	5.4.3 参数变化	155
4.1.3 交流电动机调速的方法	111	5.4.4 噪声	155
4.2 异步电动机调速	112	5.5 脉宽调制	158
4.2.1 旋转磁场	112	5.5.1 正弦 PWM (SPWM)	158
4.2.2 正弦波磁场的矢量表示及时空矢量图	114	5.5.2 电流跟踪型 PWM	161
4.2.3 转矩的产生	116	5.5.3 空间矢量 PWM (SVPWM)	163
4.2.4 稳态等效电路	117	5.6 转速闭环转差频率控制的变频调速系统	169
4.2.5 机械特性	120	5.6.1 转速闭环磁链开环的转差频率控制系统	169
4.2.6 变压恒频 (VVCF) 运行	120	5.6.2 转矩和磁链闭环的转差频率控制系统	170
4.2.7 变压变频 (VVVF) 运行	121	5.7 基于小信号模型的异步电动机闭环控制	171
4.2.8 恒流运行时的机械特性	124	5.8 V/F 控制的通用变频器	175
4.2.9 绕线转子异步电动机调速	126	5.8.1 通用变频器的基本结构	175
4.3 异步电动机的动态数学模型与坐标变换	130	5.8.2 通用变频器的控制方式	178
4.3.1 电动机等效的原则	130	5.8.3 通用变频器的附加功能	178
4.3.2 坐标变换	131	5.8.4 通用变频器的保护	180
4.3.3 三相异步电动机的多变量非线性数学模型	134	5.8.5 通用变频器的外围设备	182
4.3.4 异步电动机在两相 d-q 坐标系上的数学模型	138	思考题与习题	183
4.3.5 三相异步电动机在两相坐标系上的状态方程	142	第6章 异步电动机矢量控制与直接转矩控制	184
思考题与习题	143	6.1 矢量控制的基本思路	184
第5章 异步电动机恒压频比控制	146	6.1.1 模仿直流电动机	184
5.1 变压变频调速的一般基础	146	6.1.2 矢量控制原理	185
5.1.1 变压变频调速时的 U/f 关系	146	6.2 按转子磁链定向异步电动机矢量控制系统	186
5.1.2 交-直-交电压型方波逆变器的工作原理	147	6.2.1 按转子磁链定向的矢量控制方程	186
5.1.3 交-直-交电流型方波逆变器			

6.2.2 转子磁链的电压和电流模型	188	第8章 电力拖动在运动控制系统	
6.2.3 异步电动机转子磁链定向矢量控制系统	191	中的应用	240
6.2.4 转差频率推算中参数变化的影响与对策	194	8.1 电力拖动速度控制系统	240
6.2.5 无速度传感器矢量控制系统	196	8.1.1 恒压供水系统(无塔上水)	240
6.3 基于动态模型按定子磁链控制的异步电动机直接转矩控制	198	8.1.2 多电动机同步调速系统	242
6.3.1 用定子和转子磁链表示的转矩方程	198	8.1.3 卷绕机械恒张力控制	245
6.3.2 定子电压矢量对磁链和转矩的调节作用	199	8.2 电力拖动位置控制系统	245
6.3.3 异步电动机直接转矩控制系统	200	8.2.1 位置控制系统概述	245
6.4 矢量控制与直接转矩控制的比较	204	8.2.2 电梯位置控制系统	246
思考题与习题	204	8.2.3 运动对象的位置控制	248
第7章 同步电动机与变频调速	206	8.2.4 时间最优的位置控制	249
7.1 同步电动机	206	8.3 数控机床伺服系统	251
7.1.1 直流励磁同步电动机	206	8.3.1 数控机床概述	251
7.1.2 永磁同步电动机	210	8.3.2 闭环伺服系统	252
7.2 变磁阻电动机	214	8.3.3 数控机床的轨迹控制原理及实现	255
7.2.1 开关磁阻电动机	214	8.4 机器人运动控制技术	261
7.2.2 步进电动机	215	思考题与习题	262
7.3 同步电动机他控变频调速系统	215	第9章 计算机控制的电力拖动运动控制系统	263
7.3.1 正弦波永磁同步电动机开环V/F控制	216	9.1 数字控制电力拖动运动控制基础	263
7.3.2 正弦波永磁同步电动机矢量控制	217	9.1.1 数字控制的电力拖动系统结构	263
7.3.3 直流励磁同步电动机调速系统	219	9.1.2 计算机控制系统的数学描述	266
7.4 同步电动机自控变频调速系统	223	9.2 连续域-离散化设计	269
7.4.1 梯形波永磁同步电动机(无刷直流电动机)自控变频调速系统	224	9.2.1 设计原理及步骤	269
7.4.2 正弦波永磁同步电动机自控变频调速系统	230	9.2.2 各种离散化的方法	270
7.5 开关磁阻电动机调速系统	231	9.2.3 数字PID调节器的设计	275
7.6 同步电动机在同步旋转d-q坐标系上的动态数学模型	235	9.2.4 PID调节参数的整定	277
7.7 交流电动机变频调速总结	237	9.3 电动机控制专用微处理器与集成电路	279
思考题与习题	238	9.3.1 单片机与DSP	279
		9.3.2 专用集成电路	282
		9.4 基于TMS320LF2407A的DSP电动机控制系统	286
		9.4.1 直流电动机的DSP控制	286
		9.4.2 无刷直流电动机的DSP控制	287
		9.4.3 异步电动机的DSP矢量控制	291
		思考题与习题	297
		思考题与习题参考答案	298
		参考文献	305

常用符号表

表 0-1 元器件和装置用的符号 (按国家标准 GB/T 7159—1987)

A	放大器, 调节器, A 相绕组, 电枢绕组	M	电动机 (总称)
ACR	电流调节器	MA	异步电动机
AFR	励磁电流调节器	MD	直流电动机
APR	位置调节器	MS	同步电动机
ASR	转速调节器	R	电阻器, 变阻器
ATR	转矩调节器	RP	电位器
AΨR	磁链调节器	SM	伺服电动机
AVR	电压调节器	T	变压器
BQ	位置传感器	TA	电流互感器
B	B 相绕组	TC	测速发电机
C	C 相绕组, 电容器	U	变换器, 调制器
DLC	逻辑控制环节	UCR	晶闸管整流器
F	励磁绕组	UI	逆变器
FA	具有瞬时动作的限流保护	UPE	电力电子变换器
FBC	电流反馈环节	UR	整流器
FBS	测速反馈环节	VD	二极管
G	发电机	VS	稳压管
GT	触发装置	VT	晶闸管, 功率开关器件
HBC	滞环控制器	VF	正组晶闸管整流装置
HCT	霍尔电流传感器	VR	反组晶闸管整流装置
K	继电器, 接触器		
L	电感器, 电抗器		

表 0-2 常用缩写符号

ASIC	专用集成电路 (application-special integrated circuit)
BLDM	无刷直流电动机 (brushless DC motor)
CSI	电流源 (型) 逆变器 (current source inverter)
CVCF	恒压恒频 (constant voltage constant frequency)
CEMF	反电动势 (counter electromotive force)
DTC	直接转矩控制 (direct torque control)
DSP	数字信号处理器 (digital signal processor)
GTO	门极可关断晶闸管 (gate turn-off thyristor)
GTR	大功率晶体管 (great transistor)

(续)

IGBT	绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor)
IPM	智能功率模块 (intelligent power module)
LCI	负载换相逆变器 (load-commutated inverter)
MMF	磁动势 (magneto motive force)
MRAC	模型参考自适应控制 (model referencing adaptive control)
PD	比例-微分 (proportion-differentiation)
PI	比例-积分 (proportion-integration)
PID	比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation)
PIC	功率集成电路 (power integrated circuits)
PWM	脉宽调制 (pulse width modulation)
PMSM	永磁同步电动机 (permanent magnet synchronous motors)
P-MOSFET	功率场效应晶体管 (power MOS field effect transistor)
PLL	锁相环 (phase-locked loop)
SOA	安全工作区 (safe operation area)
SRM	开关磁阻电动机 (switched reluctance motors)
SPWM	正弦脉宽调制 (sinusoidal PWM)
SVPWM	空间矢量脉宽调制 (space vector PWM)
VC	矢量控制 (vector control)
VSI	电压源 (型) 逆变器 (voltage source inverter)
VR	矢量旋转变换 (vector rotation)
VVVF	变压变频 (variable voltage variable frequency)
VCO	压控振荡器 (voltage controlled oscillator)
RDC	旋转变压器—数字量转换器 (resolver-to-digital converter)
ZOH	0 阶保持器 (zero order holder)

表 0-3 参数和物理量文字符号

A	安培	H	磁场强度
B	磁感应强度, 磁通密度	I, i	电流
C	电容	I_a, i_a	电枢电流
C_t, C_T	直流电动机转矩常数	I_d/i_d	直流电流平均值/瞬时值
C_e, C_E	直流电动机电动势常数	I_f, i_f	励磁电流
D	直径; 调速范围	I_N	额定电流
E, e	反电动势, 感应电动势; 误差	i_A, i_B, i_C	电动机定子三相电流
f	频率; 力	i_a, i_b, i_c	电动机转子三相电流
f_c	载波频率	I_L/\hat{I}_L	负载电流/负载电流的估值
F	磁动势; 扰动量	I_m	峰值电流; 励磁电流
G	重力	I_s, I_r	定子电流, 转子电流
g	重力加速度	I_{dbl}	电枢堵转电流
GD^2	飞轮矩	I_{dcr}	电流截止负反馈电流临界值
h	开环对数频率特性中频宽度	I_{df}	正组变流器整流输出平均电流

(续)

I_{dr}	反组变流器整流输出平均电流	R_{rec}	整流器内阻
I_{dN}	电枢额定电流	s	拉普拉斯算子; 静差率; 转差率
I_0	空载电流	S	视在功率
J	转动惯量	t	时间
K	放大系数, 增益	T	周期, 采样周期; 时间常数
K_p	比例系数	T_s	采样周期; 电源控制滞后时间
K_s	电力电子变换器放大系数	T_l	电枢回路电磁时间常数
k	谐波次数; 采样次数	T_m	机电时间常数
L	电感, 自感; 长度; 电抗器	T_r	转子回路时间常数
L_s, L_r	定子电感, 转子电感	T_0	滤波时间常数
L_l	漏感	T_i	积分时间常数
L_m	互感	T_d	微分时间常数
l	长度	t_m	扰动最大速降时间
m	质量; 调制度, 整流电路脉冲数	t_p	峰值时间
M	互感; 闭环系统频率特性幅值	t_r	上升时间
M_r	闭环系统谐振峰值	t_{on}	开通时间
n/n_0	转速/理想空载转速	t_{off}	关断时间
n_{syn}	同步转速	t_s	调节时间
n_N	额定转速	t_v	扰动恢复时间
n_∞	稳态转速	T_e	电磁转矩
n_p	极对数; 转速阶跃响应超调峰值	T_L	负载转矩
N	匝数	T_N	电动机额定转矩
P, p	功率	U, u	电压
P_m	电磁功率	U_1, U_2	一次电压, 二次电压
P_s	转差功率	U_d, u_d	整流电压, 直流平均电压
P_N	额定功率	U_{d0}, u_{d0}	$\alpha = 0$ 时相控整流电压平均值
P_L	负载功率	U_{df}	正组变流器平均输出电压
$p = d/dt$	微分算子	U_{dr}	反组变流器平均输出电压
Q	无功功率	U_s, u_s	电源电压, 定子电压
R	电阻, 电枢回路总电阻	U_N	额定电压
R_a	电枢电阻	U_{dN}	直流电动机额定电压
R_f	励磁回路电阻	U_c	控制电压
R_r/\tilde{R}_r	转子电阻/转子电阻的估值	$W(s)$	传递函数, 开环传递函数
R_s	定子电阻	$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
R_{dq^s}	d-q 坐标系定子等效电阻	$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
R_{dq^r}	d-q 坐标系转子等效电阻	$W_x(s)$	环节 x 的传递函数
R_m	磁阻	W_m	磁场储能

(续)

W_m'	磁共储能	μ_{Fe}	铁心磁导率
X	电抗	$\sigma/\sigma\%$	漏磁系数/超调量
Z	电阻抗	Λ_m	磁导
α	转速反馈系数, 晶闸管整流触发延迟角	ρ	半径; 占空比
β	电流反馈系数, 晶闸管整流逆变角	τ	时间常数, 微分时间常数
β_r	正组变流器逆变角	τ_i	电流调节器微分时间常数
β_r	反组变流器逆变角	τ_n	转速调节器微分时间常数
γ	相角裕度; 转矩角; 电压反馈系数	$\omega/\tilde{\omega}$	角速度, 角频率/角速度估值
Δ	增量	ω_b	系统闭环带宽; 基准频率
Δn	转速降	ω_c	开环频率特性交越频率
ξ	阻尼比	ω_n	谐振频率
η	效率; 占空比	ω_r	闭环谐振峰值频率
θ	角位移; 导通角	ω_m	机械角速度
θ_m	机械角位移	ω_s	转差角速度
Φ	磁通	ω_1	同步角速度; 基波角频率
Φ_m	每极气隙磁通	$\omega_{ci(n)}$	电流(转速)环开环交越频率
φ	相位角; 阻抗角; 功率因数角	λ_m	电动机允许过载倍数
Ψ	磁链	δ	空气隙宽度; 脉冲宽度
$\hat{\Psi}$	磁链峰值	ΔU	偏差电压
μ	磁导率	\hat{I}	电流峰值
μ_0	真空磁导率		

表 0-4 常见下角标

a	a 相, 转子 a 相	av	平均 (average)
b	b 相, 转子 b 相	add	附加 (additional)
c	c 相, 转子 c 相; 载波	cl	闭环 (close)
A	A 相, 定子 A 相	d	二相旋转坐标系 d 轴
B	B 相, 定子 B 相	q	二相旋转坐标系 q 轴
C	C 相, 定子 C 相	e	电磁
f	正向 (forward); 磁场 (field); 反馈 (feedback)	1	一次 (primary)
L	负载 (load)	2	二次 (secondary)
l	漏磁 (leakage); 线值 (line)	α	二相静止坐标系 α 轴
lim	极限, 限制 (limit)	β	二相静止坐标系 β 轴
max	最大值 (maximum)	M	转子磁链定向 M 轴
min	最小值 (minimum)	T	转子磁链定向 T 轴
m	峰值; 励磁 (magnetizing); 极限值	on	闭合 (on)
m	机械 (mechanical); 励磁分量	off	断开 (off)
N	额定值; 标称值 (nominal)	in	输入 (input)
r	转子 (rotator); 上升 (rise); 反馈	o	输出 (output)
s	定子 (stator); 电源 (source); 采样 (sample)	∞	稳态值; 无穷大处 (infinity)
t	转矩分量 (torque)	Σ	和 (sum)
ref	参考 (reference)	sam	采样 (sampling)

第 1 章 电力拖动运动控制系统基础

1.1 电力拖动系统的运动方程

电力拖动系统的运动规律可以用运动方程来描述。在预先选定转速 n 的正方向以后，电磁转矩 T_e 的正方向与 n 相同，负载转矩 T_L 的正方向与 n 相反。若忽略系统传动机构中的粘滞摩擦和扭转弹性，则系统的运动方程是

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

式中 T_e ——电动机的电磁转矩，单位为 $N \cdot m$ ；

T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩，单位为 $N \cdot m$ ；

J ——拖动对象的转动惯量，单位为 $kg \cdot m^2$ ；

ω_m ——电动机机械角速度，单位为 rad/s 。

工程上习惯采用飞轮矩 GD^2 ，其单位是 $N \cdot m^2$ 。 J 与 GD^2 的关系为

$$J = m \rho^2 = \frac{GD^2}{4g}$$

式中 m ——旋转体的质量，单位为 kg ；

ρ ——旋转部分的惯量半径，单位为 m ；

G ——旋转部分所受的重力，单位为 N ；

D ——旋转部分惯性直径，单位为 m ；

g ——重力加速度， $g = 9.8 m/s^2$ 。

角速度 ω_m (rad/s) 与转速 n (r/min) 的关系为

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9.55}$$

于是，电力拖动系统的运动方程可改写为

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

由式 (1-1) 可以看出

1) 当 $T_e > T_L$ 时， $dn/dt > 0$ ，系统加速；反之，系统减速。不管是哪一种情况，系统都处于变速运动中，称为动态。

2) 当 $T_e = T_L$ 时， $dn/dt = 0$ ，即系统处于静止或匀速运行，称为稳态。

在运动方程中，要注意转矩的符号，在代入具体数据时，如果其实际方向与规定的正方向一致，就用正；否则就用负。

多数电力拖动系统是不会以不变转速长期运转的，更不要说在电动机的轴上以不变的负载长期运转了。电动机的运转状况是变化的，电动机周期性地起动和停止，负载不断变化，

有时根据生产工艺的要求需要调节转速，这就是说电动机经常处于动态之中。

有的拖动系统只是要求一般地调速，对动态特性没有提出特别的要求，如不经常起/停，也不经常调速的纺织机械、造纸机械等；有的拖动系统则对电动机完成工序的准确性和快速性提出特别高的要求（快速跟随、准确停止），如机器人、数控机床等伺服控制系统。

从式 (1-1) 可以看出，提高动态性能的关键有两条：减小转动惯量和控制动态转矩。直流电动机的动态转矩容易控制，因而用它构成的电力拖动系统动态性能优良；永磁同步电动机兼有动态转矩容易控制和转动惯量小的双重优点，因而在伺服控制系统中获得了广泛应用；异步电动机的动态转矩控制比较困难，要达到好的动态性能，则需要采取一些比较复杂的控制策略。

1.2 电力拖动系统的负载特性

负载特性是指生产机械的负载转矩与转速之间的关系，一般可以分为以下 3 类。

1.2.1 恒转矩负载特性

恒转矩负载的特点是负载转矩 T_L 恒定不变，与转速无关。恒转矩负载特性又可以分为反抗性和位能性两种。

1. 反抗性恒转矩负载（又称摩擦转矩负载）

它的特点是负载转矩的方向总与运动方向相反，即总是反抗运动的，当运动方向改变时，负载转矩的方向也随之改变。摩擦类型的负载就具有这样的性质，例如机床刀架的平移运动、车辆在平道上的行驶等。反抗性恒转矩负载特性如图 1-1 所示。

2. 位能性恒转矩负载

它的特点是负载转矩的方向固定不变，与转速的方向无关。具有位能的拖动对象所产生的转矩就有这样的性质。例如起重机所吊重物的升降运动，不论是提升或下降，重物所产生的负载转矩，其方向总是不变的。位能性恒转矩负载特性如图 1-2 所示。

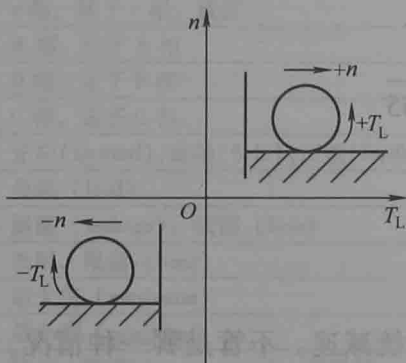


图 1-1 反抗性恒转矩负载特性

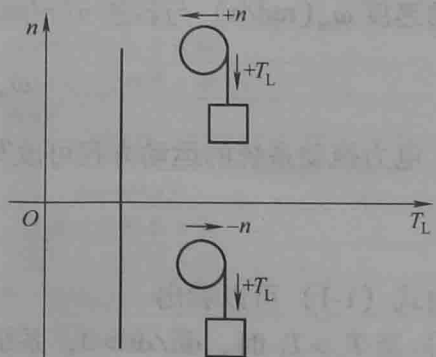


图 1-2 位能性恒转矩负载特性

1.2.2 风机类负载特性

风机类负载的特点是负载转矩基本上与转速的二次方成正比，如图 1-3 所示，即

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

式中 K ——比例常数。

属于风机类负载的生产设备有通风机、水泵和油泵等。风机类负载也属于反抗性负载。

1.2.3 恒功率负载特性

恒功率负载的特点是负载转矩基本上与转速成反比,如图 1-4 所示,即

$$T_L = K/n \quad (1-3)$$

式中 K ——比例系数。

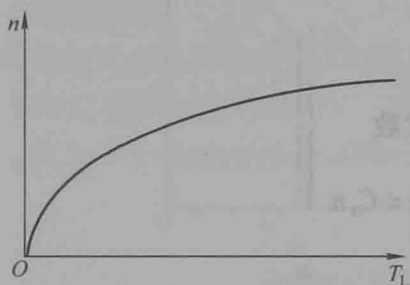


图 1-3 风机类负载特性

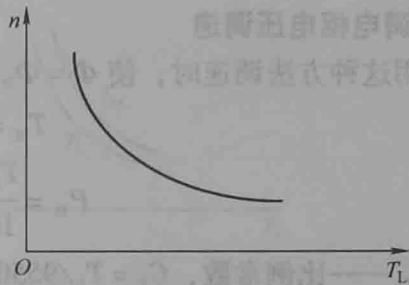


图 1-4 恒功率负载特性

负载功率为

$$P_L = T_L n = \text{常数}$$

某些机床的切削加工就具有这种特性,例如车床、刨床等,在粗加工时,切削量大,因而阻力也大,这时常开低速;在精加工时,切削量小,阻力也小,这时常开高速,即具有高、低速下功率近似不变的特性。

以上介绍的是 3 类典型的负载特性。实际生产机械的负载特性可能是几种典型特性的综合。例如在拖动位能负载的生产机械中,除了位能负载转矩 T_{LW} 以外,传动机构和轴承中还产生一定的摩擦转矩 T_{L0} , 因此实际负载转矩应为

$$T_L = T_{L0} + T_{LW}$$

对应的负载转矩特性如图 1-5 所示。提升时,负载转矩为两者之和;下放时,负载转矩为两者之差。

又如,实际通风机除了主要是风机类负载外,其轴承还有一定的摩擦转矩 T_{L0} , 因此,实际通风机负载转矩为

$$T_L = T_{L0} + Kn^2$$

对应的负载特性如图 1-6 所示。

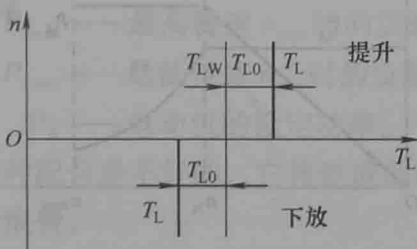


图 1-5 实际负载转矩特性

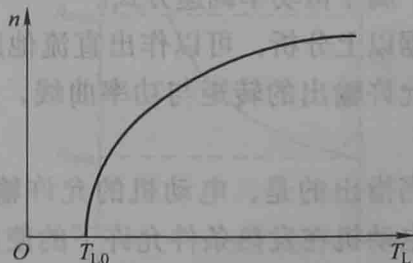


图 1-6 实际通风机负载特性

1.3 电力拖动系统的转矩与功率

1.3.1 电动机允许输出的转矩和功率

电动机长时间工作允许输出的电磁转矩和允许输出的功率由电动机发热条件决定。下面仅以直流他励电动机为例加以说明。直流电动机的发热主要取决于电枢电流 I_a ，而额定电流 I_N 就是电动机长时间工作所允许的电流值。

1. 调电枢电压调速

采用这种方法调速时，使 $\Phi = \Phi_N = \text{常数}$ ，所以

$$T_M = C_T \Phi_N I_N = T_N = \text{常数}$$

$$P_M = \frac{T_M \omega_m}{1000} = \frac{T_M n}{9550} = \frac{T_N n}{9550} = C_1 n$$

式中 C_1 ——比例常数， $C_1 = T_N/9550$ ；

n ——电动机转速，单位为 r/min；

ω_m ——电动机角速度，单位为 rad/s；

T_M ——电动机允许的转矩，单位为 N·m；

P_M ——电动机允许的功率，单位为 kW。

可见调压调速时（在额定转速 n_N 以下调速）， $T_M = \text{常数}$ ， P_M 与 n 成正比，属于恒转矩调速方式。

2. 弱磁调速

弱磁调速时， $U = U_N$ ， $I_M = I_N$ ，则

$$\Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{C_E n} = \frac{C_2}{n}$$

$$T_M = C_T \Phi I_N = \frac{C_T C_2 I_N}{n} = \frac{C_3}{n}$$

式中 C_3 ——比例常数， $C_3 = C_T C_2 I_N$ 。

所以 $P_M = \frac{T_M n}{9550} = \frac{C_3}{9550} = \text{常数}$

可见弱磁调速时（在额定转速 n_N 以上调速）， $P_M = \text{常数}$ ，属于恒功率调速方式。

根据以上分析，可以作出直流他励电动机调速时的允许输出的转矩与功率曲线，如图 1-7 所示。

应当指出的是，电动机的允许输出转矩 T_M 只表示电动机在发热条件允许下的使用限度，并不代表电动机的实际输出。电动机的实际输出应由负载的实际需要来决定。

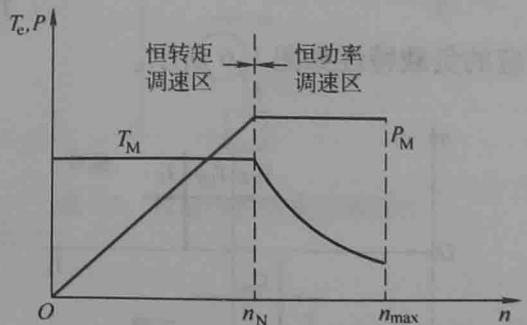


图 1-7 直流他励电动机调速时允许输出的转矩与功率曲线

1.3.2 调速方式与负载类型的配合

1. 恒转矩负载配恒转矩调速方式和恒功率负载配恒功率调速方式

调速方式与负载类型的特性配合如图 1-8 所示, 在任何转速下都满足 $T_M = T_L$, $P_M = P_L$ 。这样电动机既能满足生产机械的需要, 本身又能得到充分利用。显然, 这样的配合是合适的。要使电动机在任何速度下都能长时间运行, 应使负载转矩 T_L 总是小于 T_M (电动机允许的转矩)。

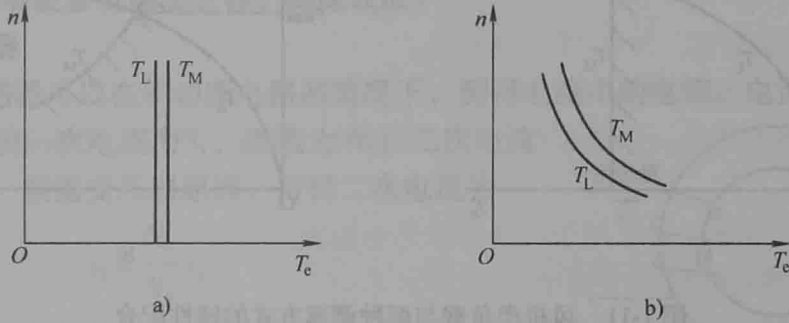


图 1-8 调速方式与负载类型的特性配合

a) 恒转矩 b) 恒功率

2. 恒转矩负载配恒功率调速方式

恒转矩负载配恒功率调速的特性配合如图 1-9 所示。为使电动机在最高转速 n_{max} 时能满足负载的需要, 应使 $T_M |_{n=n_{max}} = T_L$, 但在其他转速下电动机总有不同程度的浪费 ($T_M > T_L$, $P_M > P_L$)。可以证明, 在最低转速 n_{min} 时, 电动机的额定功率将是实际功率的 D (调速范围) 倍。证明如下:

$$\text{令 } D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-4)$$

$$\text{由于 } T_N = 9550 \frac{P_N}{n} = \text{常数}$$

当 $n = n_{max}$ 时, 为使电动机能满足负载功率的要求, 应使

$$P_N = P_{Lmax} = \frac{T_L n_{max}}{9550} = \frac{n_{max}}{n_{min}} \frac{T_L n_{min}}{9550} = D P_{Lmin}$$

式中 P_{Lmax} ——最高转速 n_{max} 时的负载功率;

P_{Lmin} ——最低转速 n_{min} 时的负载功率;

P_N ——电动机的额定功率。

显然这种配合是不好的, 它将造成低速运行时电动机容量的浪费。

3. 恒功率负载配恒转矩调速方式

恒功率负载配恒转矩调速的特性配合如图 1-10

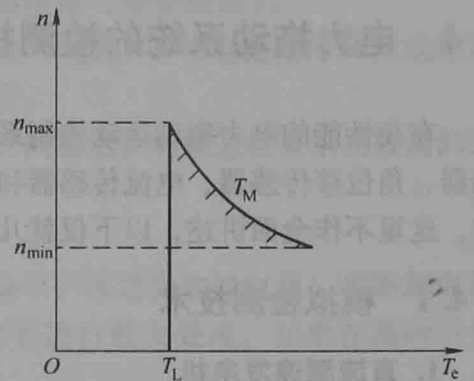


图 1-9 恒转矩负载配恒功率调速特性

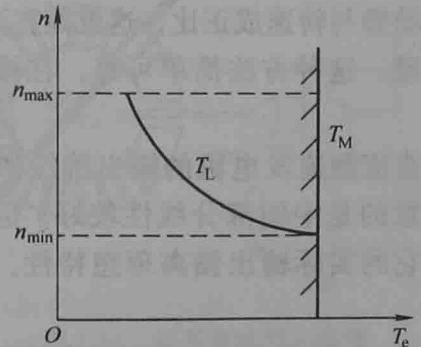


图 1-10 恒功率负载配恒转矩调速特性

所示。为了使电动机在最低转速 n_{\min} 时能满足负载转矩的需要，应使 $T_M = T_L |_{n=n_{\min}}$ ，但在其他转速下电动机都有浪费 ($T_M > T_L, P_M > P_L$)。

显然，这种配合也是不好的，它将造成高速运行时电动机容量的浪费。

4. 风机类负载与两种调速方式的配合

风机类负载与恒转矩和恒功率两种调速方式的特性配合如图 1-11 所示。

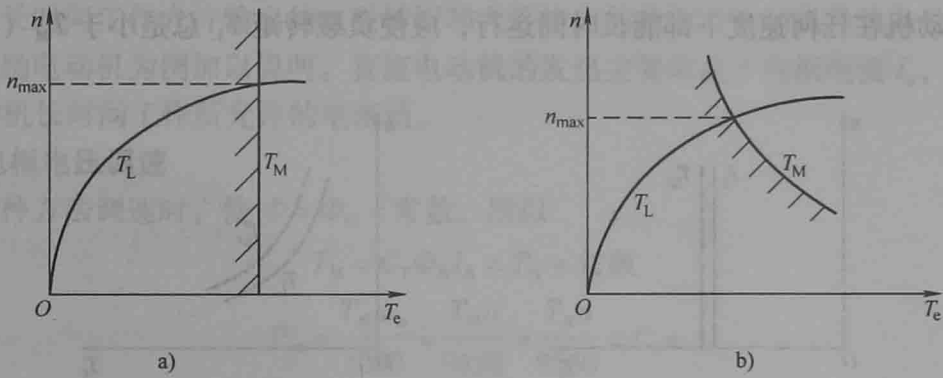


图 1-11 风机类负载与两种调速方式的特性配合
a) 恒转矩 b) 恒功率

为了使电动机在最高转速时能满足负载的需要，则 $T_M |_{n_{\max}} = T_L |_{n_{\max}}$ ，但在其他转速下电动机都有浪费 ($T_M > T_L, P_M > P_L$)，转速越低，浪费得越多。可以看出风机类负载与两种调速方式的配合都是不好的。

1.4 电力拖动系统的检测技术

在高性能的电力拖动运动控制系统中，需要高精度的传感器，包括转速传感器、位置传感器、角位移传感器、电流传感器和电压传感器等。现有的传感器品种很多，可参考有关著作，这里不作全面讲述，以下仅就几种常用的传感器作一简单介绍。

1.4.1 模拟检测技术

1. 直流测速发电机

测速发电机分直流和交流两种，这里仅简单介绍直流测速发电机。直流发电机产生电动势 $E = C_E \Phi n$ ，其中 C_E 是电动势常数， Φ 是气隙磁通， n 是转速。如果维持气隙磁通恒定，则电动势与转速成正比，这就是直流测速发电机的工作原理。这种方法简单可靠，在模拟系统中采用较多。

直流测速发电机的输出特性如图 1-12 所示，需要注意的是中间部分线性较好，但在低速端和高速端，它的实际输出偏离理想特性，主要影响因素如下：

1) 电枢反应的去磁和换向绕组的附加电流所产生的延时去磁导致输出特性高速端向下弯曲。

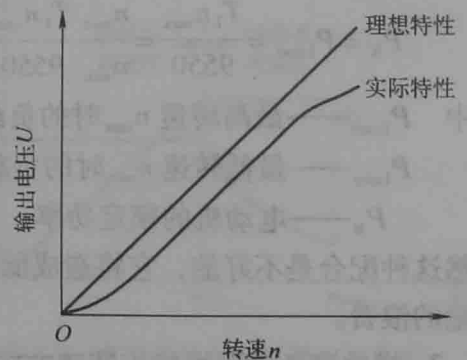


图 1-12 直流测速发电机的输出特性