



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

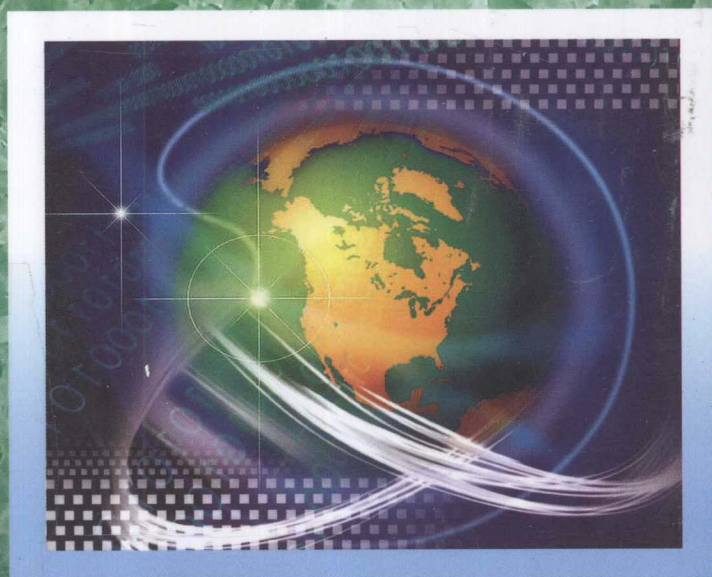


自动控制系统

(第2版)

ZIDONG KONGZHI XITONG

◆ 廖晓钟 刘向东 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制系统

(第2版)

廖晓钟 刘向东 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



* 1030122 *

内 容 简 介

本书密切结合工程实际,系统地介绍了典型自动控制系统的组成原理、分析方法和工程设计方法,并给出了实际系统线路和设计实例。内容包括直流调速系统、交流调速系统和位置伺服系统。直流调速系统在介绍脉冲相位控制和脉冲宽度调制调速系统的基础上,以脉冲相位控制系统为例介绍了直流调速系统的各种闭环控制方法、闭环控制系统的分析设计方法。交流调速系统以变频调速为主线,重点介绍异步电机转差频率控制、矢量变换控制、直接转矩控制的控制思想,同步电机他控和自控变频调速系统、矢量控制等。位置伺服系统主要介绍高精度位置伺服系统的分析、设计、调试和故障诊断等。特别介绍了非线性补偿、干摩擦、机械谐振、传动间隙对伺服系统的影响及其补偿方法,伺服系统的鲁棒性、可靠性和电磁兼容性等比较新的内容,并以伺服系统为例介绍了自动控制系统的数字控制原理和工程设计方法。

本书选材既考虑基础理论又注重工程实用性。叙述力求深入浅出,通俗易懂,并有典型线路和图表。

本书可作为高等学校自动化类专业、机电类专业等相关专业的本科生和研究生的教材或参考书,也可供科学研究与工程设计人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/廖晓钟,刘向东编著. —2版. —北京:北京理工大学出版社, 2011.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5640-0453-8

I. 自… II. ①廖…②刘… III. 自动控制系统-高等学校-教材
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 208543 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张/21.5

字 数/501 千字

版 次/2011 年 4 月第 2 版 2011 年 4 月第 3 次印刷

印 数/6001~10000 册

定 价/38.00 元

责任校对/陈玉梅

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

第2版前言

由廖晓钟、刘向东编著的《自动控制系统》，作为原国防科工委“十五”规划教材于2005年出版，先后印刷两次，得到了广大教师、学生和科研人员的充分肯定，也提出了不少宝贵的意见。该书于2006年被评为“北京市精品教材”。

由于电气自动控制系统发展迅速，交流调速控制技术日趋成熟，原教材中有些内容描述已陈旧，需要更新。本教材第2版就是在这样的背景下问世的。由于本教材鲜明的基础和理论与实际紧密结合的特色，本教材第2版被教育部列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和面向21世纪高等院校规划教材。本教材第2版继承了第1版的特点，结合作者研究成果和讲课思路的不断完善，对原书中内容的描述方法作了较多的修改。重新编著了第1.3节和第2.1节，使内容更简洁。重新编著了第3章异步电机变频调速系统和第4章同步电机变频调速系统，以清晰的思路介绍电机多变量数学模型、矢量变换控制思想和直接转矩控制思想。

本书由廖晓钟、刘向东编著，高营、王丽婕参加了部分文字的录入和插图的整理工作。

由于编著者学识所限，书中难免有错误和不当之处，殷切希望读者批评指正。

作者

第1版前言

自动控制系统在国防工业和一般工业中有着广泛的运用。随着电力电子技术、计算机技术和控制技术的发展,自动控制系统也得到了迅猛发展。自动控制系统的新的控制方法,新的设计思想和新的控制线路不断出现,促进了自动控制学科的发展。教学上应将这些发展与进步及时总结,使学生既掌握本学科的传统控制方法,又掌握最新的控制方法、设计思想和先进的实际线路。另外,由于计算机和信息技术的迅猛发展,加快了社会信息化的进程,提高了现代化的水平,以信息化带动产业化成为发展工业的一种策略,因此拓宽了自动化类专业的发展空间。自动化类专业的整体教学计划在不断优化,课程设置更加合理、课程内容更加先进、课程体系更加科学。自动化类专业的人才培养正向着加强基础理论、工程技能和专业素质的培养和训练,拓宽专业口径,增强人才的适应性等目标发展。因此,作者结合多年来的教学和科研体会编写了本教材。本教材在内容上既有传统典型实用方法,又有一些最新的设计技术和方法;既考虑基础理论又注重工程实用性;强调了实用的和方向性的内容,简化了不常用的内容;体现了先进性、实用性、时代性、紧密和科研与生产实际相结合的特点和适应教学改革的需要。

本书具有如下特色:

培养学生综合运用自动控制理论、自动控制元件、电子技术、电力电子技术等专业基础理论知识于自动控制系统的能力,使学生熟练掌握自动控制系统的构成原理、分析方法和设计方法。

教材中既有科研和生产中行之有效的传统典型实用方法,又有一些最新的设计技术和方法。对伺服系统的非线性,例如干摩擦、机械谐振、传动间隙等进行了分析,并给出了改善及补偿方法。书中还包括了伺服系统的鲁棒性、可靠性和电磁兼容性的分析。结合伺服系统介绍了自动控制系统的数字控制原理、分析和设计方法。

在交流调速系统中,以调速性能好且具有广泛运用前景的变频调速为主线进行分析。内容包括转差频率控制、矢量变换控制、直接转矩控制。在分析中力求从物理概念出发,尽量避免复杂的数学推导,用较少的篇幅介绍矢量变换控制和直接转矩控制的基本控制思想,从而使内容简明易读。

在教材的取材上,以实用的和方向性的内容为主,力求少而精,深入浅出,便于自学,使学生能够在规定的有限学时内掌握基本理论和方法,培养和提高独立分析问题和解决问题的能力。

全书共分7章。第1章介绍电气传动基础,包括电气传动的动力学基础、直流他励电机和交流异步电机的特性及运行方式。第2章介绍直流调速系统,包括脉冲相位控制和脉冲宽度调制调速系统的特点,直流调速系统的各种闭环控制方法和分析设计方法。第3章介绍异步电动机的变频调速系统,包括异步电机的多变量数学模型,转差频率控制、矢量变换控制、直接转矩控制的控制思想及系统组成原理。第4章介绍同步电机的变频调速,包括同步电机的运行特性、他控变频和自控变频调速系统,同步电机矢量控制。第5章和第6章介绍位置伺服系统,包括高精度位置伺服系统的分析、设计、调试和故障诊断等。特别介绍了非线性补偿,干摩擦、机械谐振、传动间歇对伺服系统的影响及其补偿方法,伺服系统的鲁棒性、可靠性和电磁兼容性等,第7章介绍全数字伺服控制系统的组成原理及设计方法。

全书语言通俗、论述清楚、层次分明、内容简洁、重点突出。书中配以适当的例题,每章均附有习题和思考题。既适合课堂教学,也适合自学。

本书的第1、2、3章由廖晓钟编写,第4、5、6、7章由刘向东编写。全书由廖晓钟统稿。高莹、官明玉、王波、靳永强和吴继轩参加了部分文字的录入和插图的整理工作。

本书在编写过程中得到北京理工大学的胡佑德教授、马东升教授、李庆常教授、陈杰教授等的热情关怀和支持,他们对本书的编写提出了许多宝贵的意见。本书承蒙两位评审专家认真审阅,并提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者学识所限,书中内容难免有不妥和错误之处,欢迎读者批评指正。

作者

2004年5月

目 录

第1章 电气传动基础	1
1.1 电气传动的动力学基础	1
一、基本运动方程式	1
二、转矩、飞轮矩的折算及实验测定	3
三、电机的机械特性和负载转矩特性	5
1.2 直流他励电机的机械特性及运行方法	7
一、直流他励电机的机械特性	7
二、直流他励电机的调速	9
三、直流他励电机的启动	11
四、直流他励电机的制动	12
五、直流他励电机传动的动态特性	15
1.3 异步电机的机械特性及运行方法	21
一、异步电机的机械特性	21
二、异步电机的调速	23
三、异步电机的启动	25
四、异步电机的制动	26
习题与思考题	27
第2章 直流调速系统	29
2.1 直流开环调速系统	29
一、旋转变流机组供电的直流调速系统	29
二、晶闸管脉冲相位控制直流调速系统	30
三、脉冲宽度调制直流调速系统	38
四、直流开环调速系统的传递函数	41
2.2 单闭环直流调速系统	45
一、闭环调速系统常用调节器	45
二、单闭环直流调速系统	49
三、带电流截止负反馈的闭环调速系统	55
四、闭环调速系统的设计	58
2.3 多环直流调速系统	63
一、转速、电流双闭环调速系统及其静特性	63
二、转速、电流双闭环调速系统的动态性能	65
三、三环控制的直流调速系统	68

四、双域控制的直流调速系统	69
2.4 晶闸管-电机闭环可逆调速系统	71
一、有环流可逆调速系统	71
二、可控环流的可逆调速系统	74
三、逻辑无环流可逆调速系统	75
2.5 闭环调速系统调节器的工程设计方法	78
一、典型系统及性能分析	78
二、调节器的工程设计方法	85
三、转速、电流双闭环系统的设计	88
习题与思考题	96
第3章 异步电机变频调速系统	98
3.1 转差频率控制变频调速系统	98
一、电压频率协调控制的机械特性	98
二、转差频率控制的基本原理	100
三、转差频率控制变频调速系统	102
3.2 异步电机多变量数学模型	106
一、异步电机的基本方程(多变量数学模型)	106
二、坐标变换及两相坐标系	109
三、异步电机在两相(α, β)静止坐标系上的数学模型	112
四、异步电机在两相(d, q)旋转坐标系上的数学模型	113
五、异步电机在两相(M, T)坐标系上的数学模型	115
3.3 矢量变换控制变频调速系统	115
一、矢量变换控制的基本思想	115
二、矢量变换控制的基本方程式	117
三、矢量变换控制变频调速系统	118
3.4 直接转矩控制变频调速系统	124
一、直接转矩控制的基本原理	125
二、定子电压矢量对磁链和转矩的控制	128
三、定子磁链观测模型	131
习题与思考题	134
第4章 同步电机变频调速系统	135
4.1 同步电机的基本特征与运行特性	135
一、同步电机的基本特征	135
二、同步电机的运行特性	136
三、同步电机的启动	137
四、同步电机的调速	138

4.2 他控变频同步电机调速系统	141
一、转速开环恒压频比控制同步电机调速系统	141
二、由交-交变频器供电的大型低速同步电机调速系统	142
4.3 同步电机的多变量数学模型	142
一、同步电机在三相(A,B,C)坐标系下的数学模型	143
二、同步电机在两相(d,q)同步旋转坐标系下的数学模型	148
4.4 同步电机矢量控制	151
一、同步电机矢量变换控制调速系统	151
二、同步电机气隙磁场定向矢量控制	154
4.5 自控变频同步电机调速系统	156
一、无换向器同步电机调速系统	156
二、无刷直流电机调速系统	159
习题与思考题	168
第5章 位置伺服系统	169
5.1 伺服系统组成及其基本特征	169
一、伺服系统的组成	169
二、伺服系统的分类	169
三、伺服系统的控制方式	170
四、伺服系统的性能指标	172
5.2 伺服系统检测与信号转换	178
一、伺服系统的位移检测	178
二、伺服系统的信号转换电路	185
三、自整角机/旋转变压器-数字转换器(SDC-RDC)	191
四、数字-自整角机/旋转变压器转换器(DSC/DRC)	194
5.3 伺服系统设计	197
一、稳态设计	197
二、动态补偿	220
5.4 伺服系统设计举例	236
一、火炮方位伺服系统设计	236
二、坦克炮塔伺服系统设计	239
5.5 伺服系统的电磁兼容性	243
一、电磁干扰模型分析	243
二、抑制电磁干扰的方法	245
三、伺服系统电磁兼容设计	252
5.6 伺服系统的可靠性	254
一、可靠性特征量	254
二、伺服系统的可靠性设计	262
习题与复习题	267

第6章 伺服系统的非线性控制	269
6.1 伺服系统的干摩擦及其改善	269
一、低速不平稳性	269
二、减小低速跳动的措施	271
6.2 传动间隙对伺服系统的影响及其补偿	274
一、传动间隙对伺服系统性能的影响	276
二、消除间隙影响的措施	277
6.3 机械谐振对系统的影响及其补偿	280
一、传动轴变形造成的机械谐振	280
二、消除机械谐振的补偿措施	283
6.4 伺服系统的非线性补偿	286
一、非线性速度阻尼	286
二、非线性积分器和非线性 PI 调节器	287
三、多模控制技术	289
6.5 伺服系统的重复控制	289
一、重复控制原理	289
二、重复控制系统的稳定性	293
三、重复控制器设计	294
6.6 伺服系统的滑模变结构控制	295
一、二阶系统开关控制	295
二、滑动模式	297
三、伺服系统滑模控制器设计	299
习题与思考题	302
第7章 数字控制的伺服系统	304
7.1 数字伺服系统结构	304
7.2 伺服系统的数字控制器	305
一、MCS-96 系列单片机	305
二、数字信号处理器	306
7.3 模数转换和数模转换接口	307
一、模/数转换器接口	307
二、数/模转换器接口	309
7.4 轴角编码及相关接口设计	309
一、RDC 接口电路设计	309
二、DRC 相关接口电路设计	314
7.5 数字 PID 控制器设计	314
一、数字 PID 控制算法	315
二、数字 PID 控制器算法的改进	317
三、数字 PID 控制器的参数整定	319

7.6 数字伺服系统的数据采集与滤波	321
一、伺服系统的数据采集	321
二、数字滤波方法	322
附录	325
参考文献	329

第1章 电气传动基础

电气传动自动控制系统是以机械运动的驱动设备——电机为控制对象,以控制器为核心,以电力电子功率变换装置为驱动执行机构的控制系统。电气传动控制系统是最常见的一种典型自动控制系统。这类系统控制电机的转矩、转速或转角,将电能转换为机械能,实现工作机械运动的要求。

电气传动自动控制系统的种类很多。按驱动电机的类型分:由直流电机驱动工作机械的称为直流电气传动系统;由交流电机驱动工作机械的称为交流电气传动系统。按被控物理量分:以转速为被控量的系统称为调速系统;以角位移或直线位移为被控量的系统称为位置随动系统,也称伺服系统。按控制器的类型分:以模拟方式实现控制器的系统称为模拟控制系统;以数字方式实现控制器的系统称为数字控制系统。另外,按控制系统中闭环的数量多少,也可分为单闭环控制系统和多闭环控制系统等。

虽然电气传动自动控制系统种类很多,但是它们的基本结构主要由三部分组成:控制器、功率驱动装置和执行电机。图 1.1 是电气传动自动控制系统的基本结构。控制器按照给定值和实际运行值的差值调节控制量;功率驱动装置一方面把恒压恒频的电网供电转换成电机要求的直流电或交流电,另一方面按照控制量的大小将电网中的电能作用于电机上,调节电机的转矩的大小;电机则按照供电的大小拖动工作机械运转。

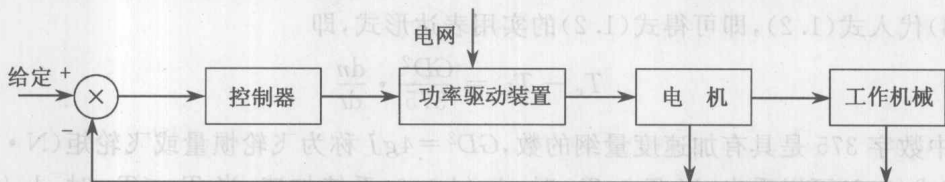


图 1.1 电气传动自动控制系统基本结构

不管是哪种电气传动自动控制系统,都必须具有电机驱动工作机械的基本结构,如图 1.2 所示。

1.1 电气传动的动力学基础

一、基本运动方程式

如图 1.2 所示,电机带动工作机械的电气传动系统的运动规律取决于电机的输出转矩 T_M 和负载转矩 T_L 之间的关系,并符合刚体旋转的运动定律,即

$$T_M - T_L = d(J\omega)/dt$$

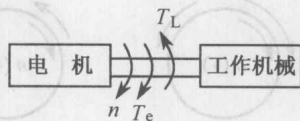


图 1.2 电气传动系统

稳态时电机的电磁转矩 T_e 是电机输出转矩 T_M 和空载转矩 T_0 之和。由于一般情况下空载转矩占电磁转矩 T_e 或输出转矩 T_M 的比例较小,在一般工程计算中可省略掉空载转矩,而粗略地认为电磁转矩 T_e 与电机轴上的输出转矩 T_M 相等,那么就有下面的旋转运动方程式

$$T_e - T_L = d(J\omega)/dt = Jd\omega/dt + \omega dJ/dt \quad (1.1)$$

式中 T_e ——电机的电磁转矩, $N \cdot m$;

T_L ——负载转矩, $N \cdot m$;

J ——拖动系统折算到电机轴上的总转动惯量, $kg \cdot m^2$;

ω ——电机的角速度, rad/s 。

$d(J\omega)/dt$ 表示动量矩,它包括两部分,其中, $\omega dJ/dt$ 对转动惯量可变的对象是有意义的。例如离心机和卷取机传动,或者具有可变形体的工业机器人传动。大多数情况下可以认为总转动惯量为常数,因此式(1.1)可以简化为

$$T_e - T_L = Jd\omega/dt \quad (1.2)$$

式(1.2)表明,电气传动系统的运动状态是由作用在轴上的所有转矩的代数和决定的。工程计算中,往往不用转动惯量 J ,而用飞轮矩 GD^2 ,两者的关系为

$$J = m\rho^2 = mD^2/4 = GD^2/4g \quad (1.3)$$

式中 ρ, D ——惯性半径与直径, m ;

m ——旋转部分的质量, kg ;

G ——旋转部分的重量, N ;

g ——重力加速度, $g=9.81 m/s^2$ 。

在式(1.2)中,如将角速度 $\omega(rad/s)$ 化为以每分钟转数 $n(r/min)$ 表示,即 $\omega=2\pi n/60$,并将式(1.3)代入式(1.2),即可得式(1.2)的实用表达形式,即

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1.4)$$

式(1.4)中数字 375 是具有加速度量纲的数, $GD^2=4gJ$ 称为飞轮惯量或飞轮矩($N \cdot m^2$)。

研究式(1.2)可以看出:当 $T_e > T_L$ 时, $d\omega/dt > 0$, 系统加速;当 $T_e < T_L$ 时, $d\omega/dt < 0$, 系统减速。当 $T_e \neq T_L$ 时,系统处于加速或减速的运动状态(动态),此时,存在一个使系统的运动状态发生变化的动态转矩 T_t ,即 $T_t = Jd\omega/dt$,该转矩是由于系统转速发生变化时,转动系统需要释放或吸收动能而产生的。式(1.2)也可以写成下述转矩平衡方程式

$$T_e - T_L = T_t \quad \text{或} \quad T_e = T_L + T_t$$

当 $T_e = T_L$ 时,动态转矩 T_t 为零,系统以恒速运动,即稳态运动。稳态时,电机的电磁转矩大小由工作机械即电机的负载转矩所决定。

由于电机转矩性质及运行状态的不同以及工作机械负载性质的不同,电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 不仅大小不同,方向也是变化的。在运动方程式中它们所取的符号也不同,通常以电机轴的旋转方向为参考来确定转矩的正负。设电机某一旋转方向为正,则规定电机电磁转

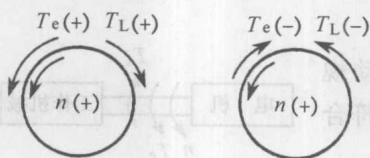


图 1.3 轴端图

矩 T_e 的方向与所设定电机旋转的正方向相同时为正,相反时为负。负载转矩 T_L 的规定符号与电磁转矩 T_e 的规定符号相反,即与所设定电机旋转的正方向相同时为负,相反时为正。以上符号关系可以用图 1.3 所示轴端图来表示,图中选择逆时针旋转方向为电机旋转的正方向。

二、转矩、飞轮矩的折算及实验测定

实际的电气传动系统中,在电机与工作机械之间往往要经过齿轮减速箱、皮带、联轴结等,这就是常见的多轴传动。在多轴传动系统中,各轴的转速和飞轮矩各不相同,因此分析和计算这类传动时,必须将所有轴的转矩和飞轮矩折算到同一根轴上(通常折算到电机轴上),将系统等效为单轴传动系统,如图 1.2 所示,然后才能使用基本运动方程式(1.2)和式(1.4)。

图 1.4(a)为带减速器的双轴传动系统,图 1.4(b)为带减速器的起重传动系统,其中直线运动的重物质量为 m 、重量为 G ,卷筒的半径为 R 、转动惯量为 J_L 。

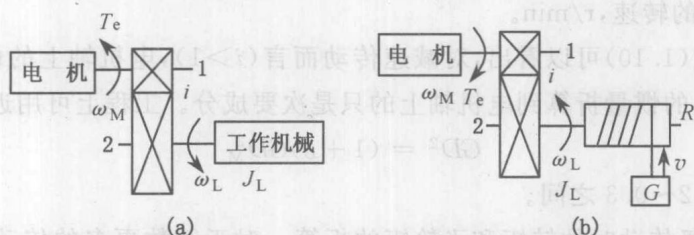


图 1.4 多轴传动系统

(a) 双轴传动系统; (b) 起重传动系统

(一) 转矩的折算

按照能量守恒定律,折算至电机轴上的负载功率应等于工作机械的负载功率加上传动机构中的损耗。设 T_L 表示负载轴上的负载转矩, T'_L 表示折算到电机轴上的负载转矩,则

$$T'_L \omega_M = T_L \omega_L / \eta \quad (\text{用于旋转运动负载})$$

和

$$T'_L \omega_M = GR \omega_L / \eta \quad (\text{用于直线运动负载})$$

式中 η —— 传动效率, $\eta < 1$ 。

两种运动负载折算到电机轴上的转矩分别为

$$T'_L = T_L / i\eta \quad (1.5)$$

和

$$T'_L = GR / i\eta \quad (1.6)$$

式中 i —— 主动轴与从动轴的转速比, $i = \omega_M / \omega_L$ 。

(二) 飞轮矩的折算

根据能量守恒定律,折算后等效系统储存的动能应该与实际系统储存的动能相等。设电机轴上的等效的转动惯量为 J (飞轮矩为 GD^2), 电机轴的转动惯量为 J_M (飞轮矩为 GD_M^2), 负载轴的转动惯量为 J_L (飞轮矩为 GD_L^2)。对图 1.4(a) 所示系统有

$$\frac{1}{2} J \omega_M^2 = \frac{1}{2} J_M \omega_M^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2$$

等效转动惯量 J 为

$$J = J_M + J_L / (\omega_M / \omega_L)^2 = J_M + J_L / i^2 \quad (1.7)$$

同样,等效的飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_M^2 + GD_L^2/i^2 \quad (1.8)$$

对图 1.4(b)有

$$\frac{1}{2}J\omega_M^2 = \frac{1}{2}J_M\omega_M^2 + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

式中 v ——直线运动的线速度, m/s。

这样,等效转动惯量为

$$J = J_M + J_L/i^2 + mv^2/\omega_M^2 \quad (1.9)$$

图 1.4(b)所示系统等效飞轮矩为

$$GD^2 = GD_M^2 + GD_L^2/i^2 + 365(Gv^2/n_M^2) \quad (1.10)$$

式中 n_M ——电机的转速, r/min。

由式(1.9)和式(1.10)可以看出,对减速传动而言($i>1$),电机轴上的惯量是总惯量的主要成分,而其他轴上的惯量折算到电机轴上的只是次要成分。工程上可用近似公式估算,即

$$GD^2 = (1+\delta)GD_M^2 \quad (1.11)$$

一般情况下, δ 在 0.2~0.3 之间。

以上介绍了两级传动时的转矩和飞轮矩的折算。对于级数更多的传动,则应按照前述原理一级一级地将转矩和飞轮矩折算到同一轴上,才能应用基本运动方程式来研究电气传动系统的运动规律。本书以后只研究等效单轴系统。

(三) 转动惯量或飞轮矩的实验测定

飞轮矩是研究电气传动系统动态过程不可缺少的重要参数。电机的转动惯量通常在手册或技术说明书中给出,而负载的结构却各式各样,简单的几何形体可通过计算得到,复杂的非匀质的结构计算起来就比较困难。在这种情况下,可以借助于实验手段测定系统的飞轮矩。

实验测定飞轮矩的方法有多种,这里只介绍整机滑行实验法。

测试原理是将电气传动系统加速到某个转速,达到稳态后突然切断电源,使系统在负载转矩作用下自由滑行减速。此时电磁转矩 T_e 为零,运动方程式(1.4)为

$$-T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1.12)$$

只要测得负载转矩 T_L 和转速变化率 dn/dt ,就可测得飞轮矩 GD^2 。

具体步骤如下:

首先,测出不同转速下电气传动系统的稳态输入功率,扣除电机的铜耗后,即可得到负载损耗曲线 $P_L(\omega)$ (忽略空载损耗、稳态时电磁功率与负载损耗相等)。

其次,算出不同转速下的稳态负载转矩

$$T_L = 9.55P_L/n \quad (1.13)$$

式中,各量的单位为 T_L (N·m), P_L (W), n (r/min)。

用图解插值法可以得到 $T_L(n)$ 曲线,如图 1.5 所示。然后,测出电气传动系统自由滑行减速的转速下降曲线 $n(t)$,并绘于坐标系 $n-t$ 中,分段求得 $\Delta n/\Delta t$ 和 T_L ,以 $\Delta n/\Delta t$ 代替 dn/dt ,由式(1.12)求得各段的 $375 \times T_L/(\Delta n/\Delta t)$,作平均后即得系统的飞轮矩 GD^2 ,而转动惯量

$$J = GD^2/4g。$$

三、电机的机械特性和负载转矩特性

(一) 电机机械特性

电机的机械特性是指电机的转速 n 和电磁转矩 T_e 之间的关系,表示为 $n=f(T_e)$ 。该特性反映了电机本身的特性。不同类型的电机有不同的机械特性,典型的机械特性如图 1.6 所示。特性 1 为直流他励电机和直流并励电机的机械特性,特性 2 为直流串励电机的机械特性,特性 3 为异步电机的机械特性。

(二) 负载转矩特性

工作机械的负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $n=f(T_L)$ 即为负载转矩特性。负载转矩特性因工作机械的不同而不同,但是负载转矩特性可被归纳为下列三种类型。

(1) 恒转矩负载特性。这种特性的负载转矩 T_L 与转速 n 无关,即当转速变化时,负载转矩 T_L 维持恒定。恒转矩负载有反抗性和位能性两种,如图 1.7 所示。

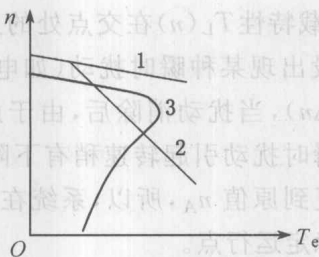


图 1.6 电机的机械特性

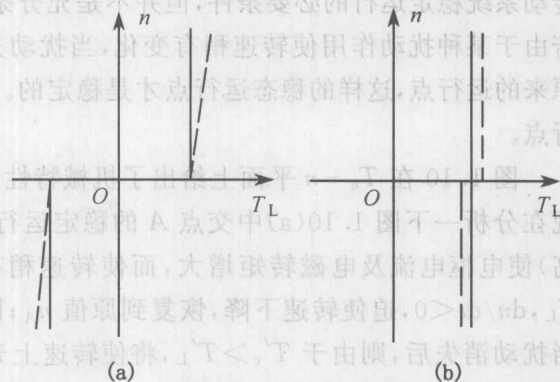


图 1.7 恒转矩负载转矩特性

(a) 反抗性; (b) 位能性

反抗性恒转矩负载特性的特点是:恒值转矩 T_L 总是与运动方向相反。因为转速方向改变,负载转矩的方向也随之改变,它们的图像位于第一与第三象限,如图 1.7(a)所示。大多数负载的摩擦阻转矩属于此类。属于此类负载的还有金属的压延、机床的平移机构等。

位能性恒转矩负载的特点是:负载转矩的方向不随转速的方向而改变。最典型的位能性恒转矩负载是起重机负载,不论重物提升(n 为正)或下放(n 为负),负载转矩方向始终不变。特性曲线位于第一、第四象限,如图 1.7(b)所示。

考虑到动静摩擦以及油膜的影响,实际的特性如图 1.7 中虚线所示。

(2) 通风机负载特性。这种特性的负载转矩大致与转速的平方成正比,即 $T_L = Kn^2$, K 为比例系数。属于这类负载的有通风机、水泵、油泵等,其中空气、水、油等介质对叶片的阻力基

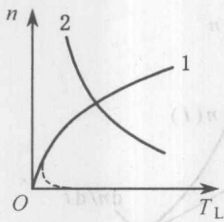


图 1.8 通风机和恒功率
负载转矩特性

本上和转速的平方成正比。如图 1.8 特性 1 所示。实际上这类负载也存在干摩擦,特性如图 1.8 中虚线所示。

(3) 恒功率负载转矩特性。这种特性的负载转矩与转速成反比,即 $T_L = K/n$, K 为比例系数。特性如图 1.8 曲线 2 所示。例如一些车床,在粗加工时往往为低速大切削量,而精加工时为高速小切削量,因此在不同转速下负载转矩基本上与转速成反比,因为负载功率 $P_L = T_L \omega = T_L (2\pi n/60) = K(2\pi/60)$, ω 为电机的角速度,可见,这种机床的切削功率基本不变。

必须指出的是,实际负载特性往往是几种典型特性的综合,所以具体问题应该具体分析。

(三) 电力拖动系统稳定运行的条件

前面已经分析了电机的机械特性和工作机械的负载转矩特性,在电气传动系统运行时,这两种特性是同时存在的。为了分析电气传动的运行问题,可以把两者画在同一个坐标图上。如图 1.9 所示。

在电气传动运动方程式中已指出,当电磁转矩 T_e 与负载转矩 T_L 方向相反、大小相等而相互平衡时,电机轴的转速为某一稳定值,传动系统处于稳态,即图 1.10 中机械特性和负载转矩特性的交点 A 点,在 A 点对应的转速时 $T_L = T_e$ 。机械特性和负载转矩特性具有交点是电气传动系统稳定运行的必要条件,但并不是充分条件。电机稳定运行时,若由于某种扰动作用使转速稍有变化,当扰动去除后转速仍能恢复到原来的运行点,这样的稳态运行点才是稳定的。否则,就是不稳定的运行点。

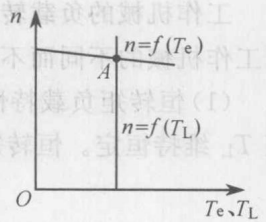


图 1.9 机械特性与
负载特性的配合

图 1.10 在 $T_e - n$ 平面上给出了机械特性 $T_e(n)$ 和负载特性 $T_L(n)$ 在交点处的几种配合。现在分析一下图 1.10(a) 中交点 A 的稳定运行情况。假设出现某种瞬时扰动(如电枢电压升高)使电枢电流及电磁转矩增大,而使转速稍有增大($+\Delta n$),当扰动消除后,由于此时 $T_e < T_L$, $dn/dt < 0$,迫使转速下降,恢复到原值 n_A ;同理,如果瞬时扰动引起转速稍有下降($-\Delta n$),当扰动消失后,则由于 $T'_e > T'_L$,将使转速上升,也会恢复到原值 n_A ,所以,系统在 A 点能稳定运行。用同样方法可以分析图 1.10(b) 中交点 B 是不稳定运行点。

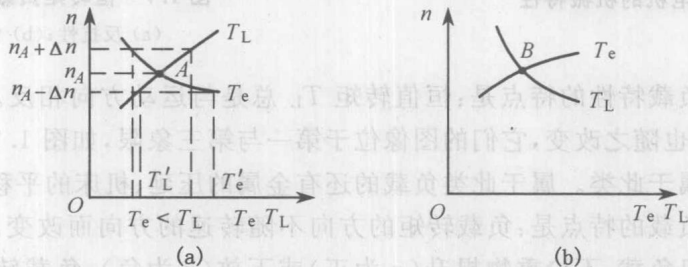


图 1.10 机械特性与负载转矩特性配合的两种情况

(a) 稳定; (b) 不稳定

综上所述,电气传动系统稳定运行的条件也可写成:特性 $T_e(n)$ 和特性 $T_L(n)$ 有交点,并