国防科工委“十五”规划教材.控制科学与工程

自 动 控 制 系 统

廖晓钟　刘向东　编著

北京理工大学出版社
北京航空航天大学出版社　西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社　哈尔滨工程大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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，重点介绍转差频率控制、矢量变换控制、直接转矩控制的控制思想。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、分析方法和设计方法。

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、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。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/廖晓钟，刘向东编著. —北京：北京理工大学出版社，2005.6
国防科工委“十五”规划教材. 控制科学与工程
ISBN 7-5640-0453-3

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(2005)第 017018 号

自动控制系统

廖晓钟 刘向东 编著
责任编辑 任世宏
责任校对 郑兴玉
北京理工大学出版社出版发行
北京市海淀区中关村南大街 5 号(100081)
电话：010－68914775(办公室) 68944990(发行部)
http://www.bitpress.com.cn
E－mail：chiefedit@bitpress.com.cn
北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本：787×960 1/16
印张：25 字数：518 千字
2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷
印数：4000 册.
ISBN 7-5640-0453-3 定价：35.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

（按姓氏笔画排序）

主　任：张华祝

副主任：王泽山　陈懋章　屠森林

编　委：王　祁　王文生　王泽山　田　莳　史仪凯
乔少杰　仲顺安　张华祝　张近乐　张耀春
杨志宏　肖锦清　苏秀华　辛玖林　陈光禡
陈国平　陈懋章　庞思勤　武博祎　金鸿章
贺安之　夏人伟　徐德民　聂　宏　贾宝山
郭黎利　屠森林　崔锐捷　黄文良　葛小春

总　序

国防科技工业是国家战略性产业，是国防现代化的重要工业和技术基础，也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来，在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下，国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中，取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备，满足了我军由单一陆军，发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要，特别是在尖端技术方面，成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术，使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备，使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路，建立了专业门类基本齐全，科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系，奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础；掌握了大量新技术、新工艺，研制了许多新设备、新材料，以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术，大大提高了国家的科技水平和竞争力，使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来，伴随着改革开放的伟大实践，国防科技工业适时地实行战略转移，大量军工技术转向民用，为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业，国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50 多年来，国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍，他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神，勇挑重担，敢于攻关，为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动，成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战，高等院校在培养国防科技人才，生产和传播国防科技新知识、新思想，攻克国防基础科研和高技术研究难题当中，具有不可替代的作用。国防科工委高度重视，积极探索，锐意改革，大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具，但受种种客观因素的影响，现有的教材与专著整体上已落后于当

今国防科技的发展水平，不适应国防现代化的形势要求，对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况，建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系，国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量，在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上，以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者，对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审，评选出近 200 种教材和学术专著，覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者，他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等，具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中，国防特色专业重点教材和专著的出版，将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出，进入 21 世纪，我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标，对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展，提升国防实力，需要造就宏大的人才队伍，而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务，落实科教兴国和人才强国战略，推动国防科技工业走新型工业化道路，加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华，实现志向，提供了缤纷的舞台，希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识，树立正确的世界观、人生观、价值观，努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任，创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好，国防科技工业的明天将再创辉煌。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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的控制方法，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。

全书共分七章。第一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。第二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。第三章介绍异步电动机的变频调速系统，包括交流电机的数学模型、变频器，并重点介绍转差频率控制、矢量变换控制、直接转矩控制的控制思想。第四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。第五章和第六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，第七章介绍全数字伺服控制系统的组成原理及分析和设计方法。

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。

本书的第一、二、三章由廖晓钟编写，第四、五、六、七章由刘向东编写。全书由廖晓钟统稿。宫明玉、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和时间紧迫，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 …… 2
一、基本运动方程式 …… 2
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 …… 6
1.2　直流他励电机的机械特性及运行方法 …… 8
一、直流他励电机的机械特性 …… 8
二、直流他励电机的调速 …… 10
三、直流他励电机的启动 …… 13
四、直流他励电机的制动 …… 13
五、直流他励电机传动的动态特性 …… 17
1.3　异步电机的机械特性及运行方法 …… 23
一、异步电机的机械特性 …… 23
二、异步电机的调速 …… 27
三、异步电机的启动 …… 30
四、异步电机的制动 …… 30
习题与思考题 …… 32
第 2 章　直流调速系统 …… 34
2.1　直流开环调速系统 …… 34
一、旋转变流机组供电的直流调速系统 …… 34
二、晶闸管脉冲相位控制直流调速系统 …… 35
三、脉冲宽度调制直流调速系统 …… 44
四、直流开环调速系统的传递函数 …… 51
2.2　单闭环直流调速系统 …… 55
一、闭环调速系统常用调节器 …… 55
二、单闭环直流调速系统 …… 60
三、带电流截止负反馈的闭环调速系统 …… 67
四、闭环调速系统的设计 …… 69
2.3　多环直流调速系统 …… 75
一、转速、电流双闭环调速系统及其静特性 …… 75
二、转速、电流双闭环调速系统的动态性能 …… 78
三、三环控制的直流调速系统 …… 80

四、双域控制的直流调速系统 …… 82
2.4 晶闸管－电机闭环可逆调速系统 …… 84
一、有环流可逆调速系统 …… 84
二、可控环流的可逆调速系统 …… 87
三、逻辑无环流可逆调速系统 …… 89
2.5 闭环调速系统调节器的工程设计方法 …… 91
一、典型系统及性能分析 …… 92
二、调节器的工程设计方法 …… 100
三、转速、电流双闭环系统的设计 …… 103
习题与思考题 …… 112
第 3 章 异步电机变频调速系统 …… 115
3.1 异步电机多变量数学模型 …… 115
一、异步电机的基本方程(多变量数学模型) …… 115
二、坐标变换 …… 118
三、异步电机在两相($\alpha-\beta$)静止坐标系上的数学模型 …… 122
四、异步电机在两相($d-q$)旋转坐标系上的数学模型 …… 124
五、异步电机在两相($M-T$)旋转坐标系上的数学模型 …… 126
3.2 变频器 …… 129
一、交－交变频器 …… 129
二、交－直－交变频器的基本类型和 180°导通型与 120°导通型逆变器 …… 131
三、电压正弦 PWM 逆变器 …… 135
四、电流正弦 PWM 逆变器 …… 139
五、磁通正弦 PWM 逆变器 …… 140
3.3 标量控制的变频调速系统 …… 145
一、电压频率协调控制的变频调速系统 …… 145
二、转差频率控制变频调速系统 …… 148
3.4 矢量变换控制变频调速系统 …… 153
一、矢量变换控制的基本思想 …… 153
二、矢量变换控制的基本方程式 …… 155
三、矢量变换控制变频调速系统 …… 156
四、转子磁链观测模型 …… 157
3.5 直接转矩控制变频调速系统 …… 159
一、电压空间矢量对电磁转矩的影响 …… 159
二、直接转矩控制的基本结构 …… 160
三、圆形磁链轨迹直接转矩控制变频调速系统 …… 162
四、定子磁链的观测模型 …… 165
习题与思考题 …… 168

第 4 章 同步电机变频调速系统 …… 169
4.1 同步电机的基本特征与运行特性 …… 169
一、同步电机的基本特征 …… 169
二、同步电机的运行特性 …… 170
三、同步电机的启动 …… 172
四、同步电机的调速 …… 173
4.2 他控变频同步电机调速系统 …… 176
一、转速开环恒压频比控制同步电机调速系统 …… 176
二、由交－交变频器供电的大型低速同步电机调速系统 …… 177
三、同步电机的矢量变换控制调速系统 …… 177
四、同步电机的多变量动态数学模型 …… 180
4.3 自控变频同步电机调速系统 …… 183
一、无换向器同步电机调速系统 …… 183
二、无刷直流电机调速系统 …… 187
习题与思考题 …… 196
第 5 章 位置伺服系统 …… 197
5.1 伺服系统组成及其基本特征 …… 197
一、伺服系统的组成 …… 197
二、伺服系统的分类 …… 198
三、伺服系统的控制方式 …… 199
四、伺服系统的性能指标 …… 200
5.2 伺服系统检测与信号转换 …… 207
一、伺服系统的位移检测 …… 207
二、伺服系统的信号转换电路 …… 215
三、自整角机/旋转变压器－数字转换器(SDC－RDC) …… 222
四、数字－自整角机/旋转变压器转换器(DSC/DRC) …… 225
5.3 伺服系统设计 …… 228
一、稳态设计 …… 229
二、动态补偿 …… 254
5.4 伺服系统设计举例 …… 273
一、火炮方位伺服系统设计 …… 273
二、坦克炮塔伺服系统设计 …… 276
5.5 伺服系统的电磁兼容性 …… 280
一、电磁干扰模型分析 …… 280
二、抑制电磁干扰的方法 …… 283
三、伺服系统电磁兼容设计 …… 291
5.6 伺服系统的可靠性 …… 293

一、可靠性特征量 …… 293
二、伺服系统的可靠性设计 …… 302
习题与思考题 …… 307
第 6 章 伺服系统的非线性控制 …… 309
6.1 伺服系统的干摩擦及其改善 …… 309
一、低速不平稳性 …… 310
二、减小低速跳动的措施 …… 312
6.2 传动间隙对伺服系统的影响及其补偿 …… 316
一、传动间隙对伺服系统性能的影响 …… 317
二、消除间隙影响的措施 …… 318
6.3 机械谐振对系统的影响及其补偿 …… 322
一、传动轴变形造成的机械谐振 …… 322
二、消除机械谐振的补偿措施 …… 325
6.4 伺服系统的非线性补偿 …… 328
一、非线性速度阻尼 …… 328
二、非线性积分器和非线性 PI 调节器 …… 330
三、多模控制技术 …… 331
6.5 伺服系统的重复控制 …… 332
一、重复控制原理 …… 332
二、重复控制系统的稳定性 …… 336
三、重复控制器设计 …… 337
6.6 伺服系统的滑模变结构控制 …… 338
一、二阶系统开关控制 …… 339
二、滑动模态 …… 341
三、伺服系统滑模控制器设计 …… 343
习题与思考题 …… 347
第 7 章 数字控制的伺服系统 …… 348
7.1 数字伺服系统结构 …… 348
7.2 伺服系统的数字控制器 …… 349
一、MCS－96 系列单片机 …… 350
二、数字信号处理器 …… 351
7.3 模数转换和数模转换接口 …… 352
一、模/数转换器接口 …… 352
二、数/模转换器接口 …… 354
7.4 轴角编码及相关接口设计 …… 354
一、RDC 接口电路设计 …… 354
二、DRC 相关接口电路设计 …… 360

需要全本请访问 www.ertongbook.com

7.5 数字 PID 控制器设计 …… 361
一、数字 PID 控制算法 …… 361
二、数字 PID 控制器算法的改进 …… 363
三、数字 PID 控制器的参数整定 …… 365
7.6 数字伺服系统的数据采集与滤波 …… 368
一、伺服系统的数据采集 …… 368
二、数字滤波方法 …… 369
7.7 全数字控制的交流永磁同步电机伺服系统 …… 371
一、永磁同步伺服电机的矢量控制策略 …… 373
二、基于 TMS320 的全数字化 PMSM 交流伺服系统 …… 374
附录 …… 378
参考文献 …… 383

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。

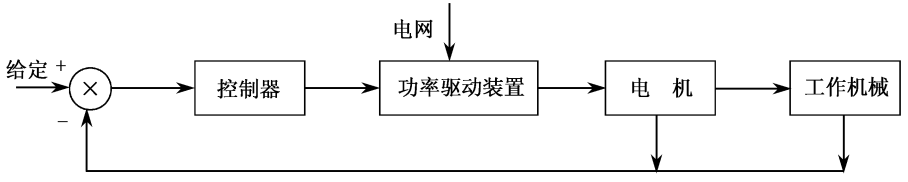


图 1.1　电气传动自动控制系统基本结构

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

$$T_M - T_L = \mathrm{d}(J\omega)/\mathrm{d}t$$

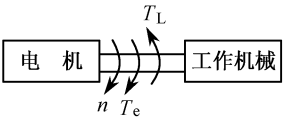


图 1.2 电气传动系统

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

$$T_e - T_L = \mathrm{d}(J\omega)/\mathrm{d}t = J\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t + \omega\mathrm{d}J/\mathrm{d}t \tag{1.1}$$

式中 T_e——电机的电磁转矩，N·m；

T_L——负载转矩，N·m；

J——拖动系统折算到电机轴上的总转动惯量，kg·m²；

ω——电机的角速度，rad/s。

$\mathrm{d}(J\omega)/\mathrm{d}t$ 表示动量矩，它包括两部分，其中 $\omega\mathrm{d}J/\mathrm{d}t$ 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

$$T_e - T_L = J\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t \tag{1.2}$$

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

$$J = m\rho^2 = mD^2/4 = GD^2/4g \tag{1.3}$$

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，$g=9.81\ \mathrm{m/s^2}$。

在式(1.2)中，如将角速度 ω(rad/s)化为每分钟转数 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

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \tag{1.4}$$

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·m²)。

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 $T_t = J d\omega/dt$，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

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

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。T_e 为正时是驱动转矩，T_e 为负时是制动转矩。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。

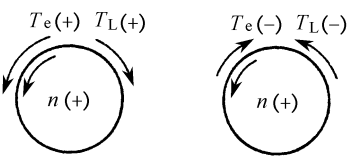


图 1.3　轴端图

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、惯量为 J_L。

(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

$$T'_L = T_L/i\eta \tag{1.5}$$

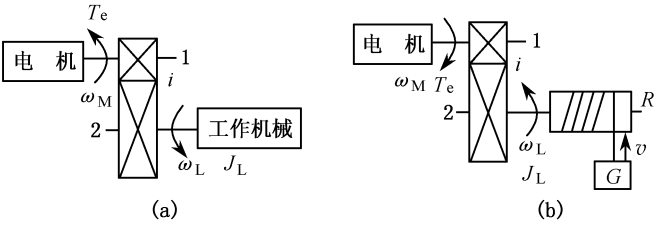


图 1.4 多轴传动系统

(a)双轴传动系统;(b)起重传动系统

和
$$T'_L = GR/i\eta \tag{1.6}$$

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

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

同样,等效的飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_M^2 + GD_L^2/i^2 \tag{1.8}$$

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

$$J = J_M + J_L/i^2 + mv^2/\omega_M^2 \tag{1.9}$$

图 1.4(b)所示系统等效飞轮矩为

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

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

$$GD^2 = (1+\delta)GD_M^2 \tag{1.11}$$

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

飞轮矩是研究拖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。

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

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

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，测出不同转速下电力拖动系统的稳态输入功率，再扣除电机的铜耗后，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

$$T_L = 9.55P_L/n \tag{1.13}$$

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，测出电力拖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 $J=GD^2/4g$。

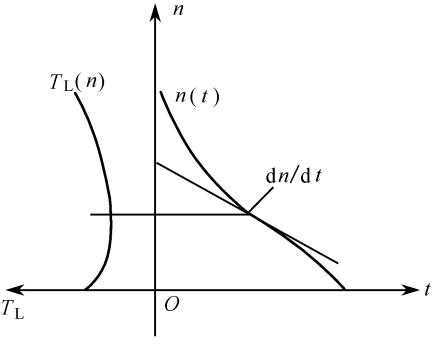


图 1.5　自由滑行曲线

需要全本请访问 www.ertongbook.com