

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电机与拖动基础

许建国 主 编

姚裕安 副主编

邵可然 杨 刚 许雪清 参编

高等教育出版社

内容提要

本书主要包含电机和电力拖动两部分内容。

在电机部分中，重点讲述了直流电机、变压器、交流异步电动机和同步电动机的基本结构、工作原理及运行特性；在介绍特种电机时重点讲述了直线电动机和磁悬浮装置的工作原理及应用。

在电力拖动部分中，讲述了直流电动机、交流电动机电力拖动系统的拖动原理、调速方法、控制规律，之后紧接着讲述了磁(悬)浮列车的牵引原理、导向原理及调速方法。最后还简要介绍了电力拖动系统中电动机的选择。

本书是高等学校电气及电子信息类专业的规划教材，既可以作为电气信息类和电子信息类本科教材，亦可供有关师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/许建国主编. —北京：高等教育出版社，2004.7

ISBN 7-04-014562-6

I. 电... II. 许... III. ①电机—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 066932 号

策划编辑 李 慧 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青
责任绘图 朱 静 版式设计 胡志萍 责任校对 王 雨
责任印制

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16
印 张 25.25
字 数 470 000

版 次 年 月第 1 版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 31.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展的需要，满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求，探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系，全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上，组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校，进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索，在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果，并在高等教育出版社的支持和配合下，推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材，冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月，教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项，为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台，整体设计立项研究计划，明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式，分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现，组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后，教研中心组织了首批课题立项申报，有63所高校申报了近450项课题。2003年1月，在黑龙江工程学院进行了项目评审，经过课题领导小组严格的把关，确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月，各子课题相继召开了工作会议，交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题，确定了项目分工，并全面开始研究工作。计划先集中力量，用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是，“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上，紧密结合经济全球化时代高校应用型人才工作的实际需要，努力实践，大胆创新，采取边研究、边探索、边实践的方式，推进高校应用型人才工作，突出重点目标，并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础，作为体现教学内容

和教学方法的知识载体，在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培养体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。目前，教材建设工作存在的问题不容忽视，适用于应用型人才培养的优秀教材还较少，大部分国家级教材对一般院校，尤其是新办本科院校来说，起点较高、难度较大、内容较多，难以适应一般院校的教学需要。因此，在课题研究过程中，各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果，并和教学实际结合起来，认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革，组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师，编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案，以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信，随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入，特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施，具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心
2003年4月

前 言

迈入 21 世纪，我国高等教育事业进入了蓬勃发展的新时期。高等教育事业的发展推动了教学改革，开创了教材建设的新局面。本教材就是在这种新形势下为适应高等教育事业的发展，为电气及电子信息类专业而编写的规划教材。

本教材是编者在总结多年教学工作的基础上，结合当前有关科技研究成果而编写的，具有如下特点：

1. 传统技术与高新技术相结合

伴随着工业化的进程，电动机及电力拖动技术不断地发展，逐步形成了电力拖动领域中的传统技术，如电动机的起动、制动和调速等；但是随着电力电子技术的发展，电动机及电力拖动技术又不断地在技术上取得重大突破，形成了一系列高新技术，例如近年来随着我国铁路电气化改造速度的加快，随着铁路列车不断的提速，随着磁（悬）浮列车的运行，电动机及电力拖动技术取得了令人瞩目的成就。所以本教材在讲述传统的拖动技术后，紧接着在第八章中讲述磁（悬）浮列车的拖动技术，以反映最新的科研成果。

2. 讲述基础理论与分析应用实例相结合

电动机及电力拖动技术涉及电学、磁学、力学、机械学等多种学科，基础理论丰富，需要重点讲述；但是学习理论的目的归根结底在于应用，所以在教材中增加了应用实例的分析，如磁悬浮装置、熔融玻璃液搅拌器等。

本教材由许建国教授任主编，姚裕安副教授任副主编。绪论、第二章、第四章、第五章和第八章由许建国教授编写，第一章和第六章由邵可然教授编写，第三章和第七章由姚裕安副教授编写，第九章由杨刚副教授和吴雨川副教授编写。全书由许建国教授统稿和定稿。许鼎衡在网上查询及下载资料与收集资料方面做了大量工作，许雪清在资料整理及计算机处理等方面做了大量的工作。

由于编者学识有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 2 月

目 录

绪论	1
0.1 电机与电力拖动在国民经济中的重要作用	1
0.2 常用的基本定律与定则	2
第一章 直流电机	9
1.1 直流电机的工作原理	9
1.2 直流电机的结构和额定值	11
1.3 直流电机的电枢绕组	16
1.4 直流电机的磁场	23
1.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	29
1.6 直流电动机	31
1.7 他励直流电动机的机械特性	36
1.8 直流发电机	40
1.9 直流电机的换向	47
思考题与习题	54
第二章 变压器	57
2.1 变压器的工作原理	58
2.2 变压器的结构和铭牌数据	59
2.3 变压器的空载运行	63
2.4 变压器的负载运行	71
2.5 用试验方法测定变压器的参数	82
2.6 变压器的运行特性	87
2.7 三相变压器	92
2.8 三相变压器的并联运行	100
2.9 特种变压器	105
思考题与习题	112
第三章 交流异步电动机	116
3.1 三相异步电动机的工作原理与结构	116
3.2 三相异步电动机的定子绕组	123
3.3 三相异步电动机定子绕组的感应电动势	128
3.4 三相异步电动机的定子磁动势	139

3.5	三相异步电动机的等值电路和相量图	149
3.6	三相异步电动机的功率和转矩	160
3.7	三相异步电动机的工作特性和参数测定	164
3.8	三相异步电动机的机械特性	168
3.9	单相异步电动机	177
	思考题与习题	182
第四章	同步电动机	186
4.1	同步电动机的结构及工作原理	186
4.2	同步电动机的电磁关系	188
4.3	同步电动机的功率关系、功角特性与矩角特性	193
4.4	同步电动机功率因数的调节和 V 形曲线	199
	思考题与习题	202
第五章	特种电机	204
5.1	伺服电机	205
5.2	测速发电机	212
5.3	自整角机	217
5.4	旋转变压器	224
5.5	步进电机	229
5.6	直线电动机与磁(悬)浮装置	234
	思考题与习题	244
第六章	直流电动机的电力拖动	246
6.1	电力拖动系统的运动方程式	246
6.2	工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算	247
6.3	生产机械的负载转矩特性	253
6.4	电力拖动系统静态稳定运行的条件	258
6.5	他励直流电动机的起动	264
6.6	他励直流电动机的制动	270
6.7	他励直流电动机的调速	284
6.8	串励直流电动机的电力拖动	294
	思考题与习题	298
第七章	三相异步电动机的电力拖动	304
7.1	三相异步电动机的起动	304
7.2	三相异步电动机的调速	320
7.3	三相异步电动机的制动	343
	思考题与习题	352

第八章 同步电动机和直线电动机及磁浮列车的电力拖动	356
8.1 同步电动机的起动	356
8.2 同步电动机的变频调速	358
8.3 直线电动机及磁浮列车的电力拖动	361
思考题与习题	368
第九章 电力拖动系统中电动机的选择	370
9.1 电动机发热与冷却规律	370
9.2 电动机工作方式分类	373
9.3 电动机的一般选择	375
9.4 电动机额定功率的选择	377
思考题与习题	390
参考文献	392

第六章 直流电动机的电力拖动

6.1 电力拖动系统的运动方程式

正如绪论所言，凡是由电动机作为动力，拖动各类生产机械，完成一定的生产工艺要求的系统，都称为电力拖动系统。电力拖动系统一般由电动机、传动机构、生产机械、电源和控制装置五部分组成，如图 6.1 所示。工业生产中最典型的电力拖动系统有电力机车、起重机、龙门刨床等。由于实际电力拖动系统种类太多，不可能逐一进行研究，所以要找到它们共同的运动规律加以综合分析。电力拖动系统的运动规律可以用动力学中的运动方程来描述。为了抓住本质，首先用简单的单轴电力拖动系统进行分析。所谓单轴电力拖动系统，就是电动机转子轴直接拖动生产机械运转的系统，如图 6.2 所示。

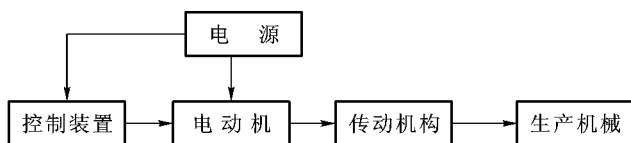


图 6.1 电力拖动系统示意图

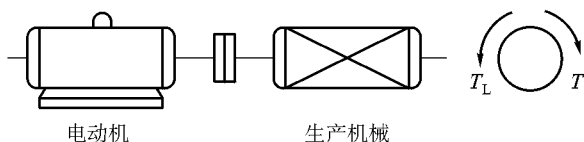


图 6.2 单轴电力拖动系统示意图

当电动机电磁转矩 T 和负载转矩 T_L 相等时，系统处于稳态， $T - T_L = 0$ 。当 $T \neq T_L$ 时，例如 $T > T_L$ ，则电动机转矩 T 除克服负载转矩 T_L 外，还使系统沿电动机转矩 T 的方向产生角加速度 $d\Omega/dt$ 。角加速度大小与系统的转动惯量 J 成反比，将此关系用方程式表示为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (6.1)$$

式中， T 为电动机产生的拖动转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)； T_L 为负载转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)； J 为单轴系统的转动惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)； Ω 为单轴系统的角速度 (rad/s)。

工程上，常常不用转动惯量 J 而用飞轮惯量或飞轮矩 GD^2 表示系统的惯性。系统的速度用转速 n 表示而不用角速度 Ω 表示。 GD^2 与 J 之间的关系为

$$GD^2 = 4gJ$$

式中， G 为系统转动部分的重量(N)； D 为系统转动部分的惯性直径(m)； g 为重力加速度， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

角速度 Ω 与转速 n 的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

将上面两式代入运动方程(6.1)式中，化简后得

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (6.2)$$

式中，375 是一个具有加速度量纲的系数，其单位为 $\text{m/min} \cdot \text{s}^{-1}$ ；转矩单位仍为 $\text{N} \cdot \text{m}$ ；转速单位仍为 r/min 。 $T - T_L$ 称为动态转矩。

当动态转矩为零时，系统处于恒转速运行的稳态；动态转矩大于零时，系统处于加速运动的过渡过程中；动态转矩小于零时，系统处于减速运动的过渡过程中。

运动方程式(6.2)中，由于电动机运行状态的不同和生产机械负载类型的不同，电动机轴上的拖动转矩 T 和负载转矩 T_L 不仅大小不同，方向也是变化的。因此，运动方程可写成

$$\pm T - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (6.3)$$

式中的正、负号的规定为：以某一旋转方向的转速 n 为参考方向，电动机拖动转矩 T 与 n 同向时取正号，反向时取负号；负载转矩 T_L 与 n 同向时取负号，反向时取正号。动态转矩 $\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ 的大小和正负符号由 T 与 T_L 的代数和来决定。

6.2 工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算

实际的电力拖动系统常常是多轴系统，如图 6.3(a)所示。工作机构的转速 n_g 与电动机转速 n 不同，在电动机与工作机构之间常备有变速机构，如齿轮减速箱、皮带轮变速装置等。对于多轴电力拖动系统，如果用单轴系统运动方程式研究其运行状态，则需对每根轴分别写出运动方程，再列出各轴间相互关系的方程，消去中间变量，联立求解。这显然是非常繁琐的。就电力拖动系统而言，一般不需研究每根轴上的问题，通常只需将电动机轴作为研究对象，所以，就要将一个实际的多轴系统采用折算的办法等效为一个单轴系统，即把

传动机构和工作机构等效为电动机轴上的一个负载。如图 6.3(b) 所示, 图中 T_L 为折算后的等效负载转矩, GD^2 为折算后系统总的等效飞轮矩。下面重点研究负载转矩和飞轮矩的具体折算方法, 折算的原则是保持两个系统传送的功率和储存的动能相同。

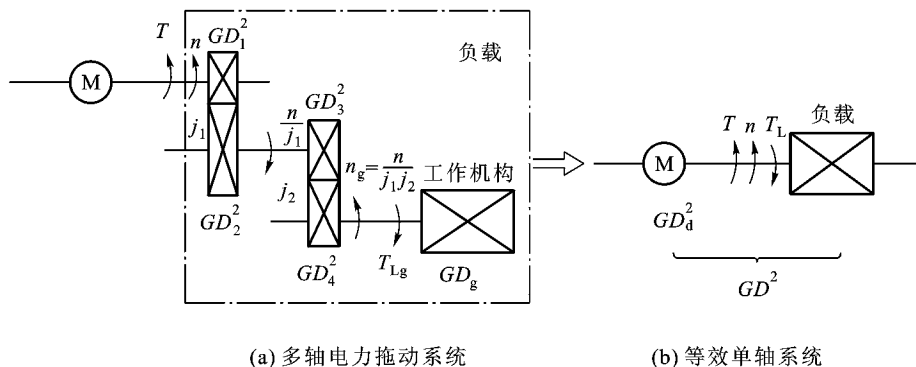


图 6.3 多轴电力拖动系统等效成单轴系统

6.2.1 工作机构转矩的折算

图 6.3(a) 及图 6.3(b) 是工作机构为旋转运动形式的实际多轴系统与折算后的等效单轴系统的示意图。图中 n 为电动机转速, 其角速度为 Ω 。 n_g 为工作机构转速, 其角速度为 Ω_g 。 j_1, j_2 为各对齿轮的转速比, 则有

$$n_g = \frac{n}{j_1 j_2} = \frac{n}{j}$$

式中, $j = j_1 j_2 = n/n_g$, 称为传动机构的总转速比或总传动比; 一般 $n_g < n$, $j > 1$, 传动机构是减速的。

图 6.3 中, T_{Lg} 为工作机构轴上的负载转矩, T_L 为折算到电动机轴上的负载转矩。若为多级传动, 传动机构的效率 η_c 应为各级效率的乘积, 即 $\eta_c = \eta_{c1} \eta_{c2} \eta_{c3} \dots$ 。由于传动机构要消耗一部分功率, 所以 $\eta_c < 1$ 。不同种类传动机构的效率, 可在机械工程师手册上查到。

负载转矩折算原则是折算前后系统传送的功率不变, 当电动机带动工作机构旋转时, 功率由电动机传给负载, 传动机构损耗由电动机承担, 即

$$T_L \Omega \eta_c = T_{Lg} \Omega_g$$

所以

$$T_L = \frac{T_{Lg} \Omega_g}{\Omega \eta_c} = \frac{T_{Lg}}{\left(\frac{\Omega}{\Omega_g}\right) \eta_c} = \frac{T_{Lg}}{j \eta_c} \quad (6.4)$$

式中, $j = \frac{\Omega}{\Omega_g} = \frac{n}{n_g}$ 为电动机轴与工作机构轴的转速比。

由负载转矩折算公式(6.4)可看出, 由低速轴折算到高速轴时, $j > 1$, 等效负载转矩变小; 由高速轴折算到低速轴时, $j < 1$, 等效负载转矩变大。

若电动机工作在制动状态, 例如提升机构下放重物时, 为保持下放速度不至于过快而且是匀速下放, 就应该使电动机运行于制动状态, 使电动机轴上产生一个与下放速度方向相反的转矩, 与负载转矩平衡。此时是重物带动电动机轴旋转, 功率传递方向是从负载传向电动机, 传动机构的功率损耗应由负载承担, 即

$$T_L \Omega = T_{Lg} \Omega_g \eta_c$$

所以

$$T_L = \frac{T_{Lg} \Omega_g}{\Omega} \eta_c = \frac{T_{Lg}}{\left(\frac{\Omega}{\Omega_g}\right)} \eta_c = \frac{T_{Lg}}{j} \eta_c \quad (6.5)$$

6.2.2 工作机构直线作用力的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构, 如龙门刨床的工作台和起重机的提升装置, 下面分别加以讨论。

1. 工作机构为平移运动

某些生产机械具有作平移运动的工作机构, 如刨床的工作台, 就是典型的平移运动, 见图 6.4 所示。

图 6.4 中 F 为工作机构作平移运动时所克服的阻力, 即切削力; v 为工作机构的平移速度, 则工作机构的功率(即切削功率)为

$$P = Fv$$

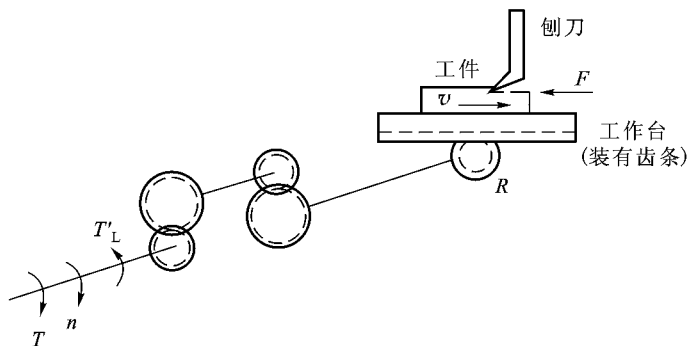


图 6.4 刨床电力拖动示意图

切削力反映到电动机轴上表现为负载转矩 T'_L ， T'_L 应满足折算前后功率不变的原则，若不计传动机构损耗，将 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入上式，则有

$$Fv = T'_L \Omega$$

$$Fv = T'_L \frac{2\pi n}{60}$$

所以

$$T'_L = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n}$$

若考虑传动机构损耗由电动机负担，则有

$$T'_L = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (6.6)$$

2. 升降运动的工作机构

生产实际中，典型的升降运动工作机构是电梯、起重机。现以起重机为例来加以讨论。

图 6.5 所示为一起重机示意图。电动机 D 通过减速装置拖动卷筒，绕在卷筒上的钢丝绳悬挂一重量为 G_g 的重物。显然，重物升降运动的转矩折算与功率传递的方向有密切关系，现分别讨论如下。

(1) 提升运动

电动机带动负载提升，功率传递的方向由电动机到负载，则减速机构的损耗应当由电动机负担。设提升时传动机构效率为 η^\uparrow ，电动机转速为 n ，重物提升和下降时速度相等，均为 v_g 。重物对钢丝绳的拉力为 F ，依据折算前后系统传送功率不变的原则，有

$$\frac{Fv_g}{\eta^\uparrow} = T'_L \Omega$$

故

$$T'_L = \frac{Fv_g}{\eta^\uparrow \Omega} = 9.55 \frac{Fv_g}{\eta^\uparrow n} \quad (6.7)$$

(2) 下降运动

当起重机带上重物下降时，运行状态是重物拖着电动机反转，负载是帮助运动的，而电动机的电磁转矩反而是阻碍运动的。此时，功率传递的方向是由

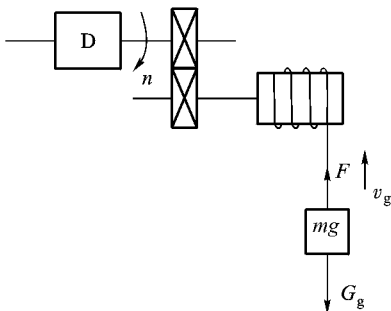


图 6.5 起重机电力拖动示意图

负载到电动机，减速机构的损耗应由负载来负担，设下降时传动机构的效率为 η^\downarrow ，则有

$$T_L \Omega = F v_g \eta^\downarrow$$

故

$$T_L = \frac{F v_g}{\Omega} \eta^\downarrow = 9.55 \frac{F v_g}{n} \eta^\downarrow \quad (6.8)$$

比较式(6.7)和式(6.8)可知，同一重物对钢丝绳产生的直线作用力 F 在提升和下放时折算到电动机轴上的等效转矩 T_L 是不相同的，下放时折算的等效转矩小于提升时折算的等效转矩。此外，在提升与下放时，若传动机构损耗相等，则提升传动效率 η^\uparrow 与下放传动效率 η^\downarrow 二者之间大小关系为

$$\eta^\downarrow = 2 - \frac{1}{\eta^\uparrow} \quad (6.9)$$

上式可以这样证明：设传动机构损耗为 ΔP ，提升时

$$\begin{aligned} \Delta P^\uparrow &= \text{电动机功率} - \text{负载功率} \\ &= \frac{F v_g}{\eta^\uparrow} - F v_g = F v_g \left(\frac{1}{\eta^\uparrow} - 1 \right) \end{aligned}$$

下放时

$$\begin{aligned} \Delta P^\downarrow &= \text{负载功率} - \text{电动机功率} \\ &= F v_g - F v_g \eta^\downarrow = F v_g (1 - \eta^\downarrow) \end{aligned}$$

因为 $\Delta P^\uparrow = \Delta P^\downarrow$ ，所以有

$$\frac{1}{\eta^\uparrow} - 1 = 1 - \eta^\downarrow$$

则

$$\eta^\downarrow = 2 - \frac{1}{\eta^\uparrow}$$

由上式可知，当 $\eta^\uparrow < 0.5$ 时， $\eta^\downarrow < 0$ 。 η^\downarrow 出现负值是因为当重物很轻或者仅有吊钩，由之产生的负载功率 $F v_g$ 比传动机构损耗 ΔP 还要小，要空钩或轻负载下放，电动机必须产生一个下放方向的电磁转矩才能完成下放动作。

在生产实际中， η^\downarrow 为负值是有益的，它起到了安全保护作用。这样的提升系统在轻载的情况下，如果没有电动机作下放方向的推动，负载是掉不下来的，这称之为提升机构的自锁作用，它对于像电梯这类涉及人身安全的提升机械尤为重要。要使 η^\downarrow 为负，必须采用高损耗的传动机构，如蜗轮蜗杆传动，它的提升效率 η^\uparrow 仅为 0.3~0.5。

6.2.3 传动机构与工作机构飞轮矩的折算

在类似图 6.3(a) 所示的多轴系统中，将各级传动轴作为电动机 D 负载的

一部分，在等效为图 6.3(b)所示的单轴系统时，必须将各级传动轴的飞轮矩 GD_1^2 、 GD_2^2 、 GD_3^2 和负载的飞轮矩 GD_g^2 折算到电动机轴上，用一个等效的飞轮矩 GD^2 来表示实际的多轴电力拖动系统中各个传动轴的飞轮矩对电动机轴的影响。各级飞轮矩的大小反映出运动中的各传动机构所储存的机械惯性的 大小，即所储存动能的大小，因此折算的原则应是折算前后实际的多轴系统与等效单轴系统所储存的动能相同。

图 6.3(b)所示旋转物体的动能为 $A = \frac{1}{2} J \Omega^2$ ，将 $GD^2 = 4gJ$ 变为 $J = \frac{GD^2}{4g}$ ， $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入可得

$$A = \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

故对图 6.3(a) 和 (b) 而言，飞轮矩折算的关系应为

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_d^2 + GD_z^2 \\ &= GD_d^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{j_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{j_1^2 j_2^2} \end{aligned} \quad (6.10)$$

式中， GD_d^2 为电动机本身的飞轮矩； $GD_1^2 \sim GD_4^2$ 为各个齿轮的飞轮矩； GD_g^2 为负载的飞轮矩。

由式(6.10)可知，每级的飞轮矩折算到电动机轴上，应除以电动机与该级转速比的平方。

实际上，传动机构和负载飞轮矩的折算值 GD_z^2 在总的飞轮矩 GD^2 中所占比例较小，所以在实际工作中为简化较繁杂的计算，常采用适当加大电动机飞轮矩的方法来估算总的飞轮矩。于是有下式

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (6.11)$$

式中， δ 取值范围为 0.2~0.3，视实际传动机构与负载的飞轮矩大小而定。如果电动机轴上还有其他大飞轮矩的部件，如抱闸的闸轮，则 δ 的取值要适当加大。

6.2.4 工作机构直线运动质量的折算

在类似图 6.4 和图 6.5 所示的电力拖动系统中，工作机构均作直线运动，若工作机构的质量为 m_z ，直线运行速度为 v_g ，则其所产生的动能为

$$A_g = \frac{1}{2} m_z v_g^2 = \frac{1}{2} \frac{G_z}{g} v_g^2$$

要将这部分由工作机构的质量所产生的动能折算到电动机轴上，需要在电动机轴上用一个转动惯量为 J_z 的转动体与之等效。此转动体产生的动能为

$$A = \frac{1}{2} J_z \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_z^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

则依据折算前后动能相等的原则有

$$A = A_g$$

$$\frac{1}{2} \frac{GD_z^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{G_z v_g^2}{g}$$

整理后可得

$$GD_z^2 = 365 \frac{G_z v_g^2}{n^2} \quad (6.12)$$

6.3 生产机械的负载转矩特性

从前面所讨论的电力拖动系统的运动方程式可知，系统运行状态取决于电动机和负载双方。因此，在用运动方程分析系统运行状态前，必须知道电动机的电磁转矩 T 和负载转矩 T_L 与转速 n 之间的函数关系。将电动机的 T 与 n 的关系称为电动机的机械特性；将负载转矩 T_L 与 n 的关系称为生产机械的负载转矩特性。本节只讨论负载转矩特性。

根据统计，大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为下列三种类型。

6.3.1 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性，是指负载转矩 T_L 与转速 n 无关，无论转速 n 如何变化， T_L 始终保持为常数，即 $T_L = C$ 。恒转矩负载又分为反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

1. 反抗性恒转矩负载

此类负载又称之为摩擦转矩负载，其特点是负载转矩作用的方向总是与运动方向相反，即总是阻碍运动的制动性质的转矩。当转速方向改变时，负载转矩大小不变，但作用方向随之改变。依据 6.1 节中对 T_L 正负号的规定，对于反抗性恒转矩负载，当 n 为正向时， T_L 与 n 的正向相反， T_L 应为正，负载特性曲线位于第 I 象限；当 n 为反向时， n 为负， T_L 应为负，负载特性曲线位于第 III 象限，如图 6.6 所示， T_L 始终与 n 同正负。

2. 位能性恒转矩负载

这类负载的特点是转矩的大小和方向恒定不变，即负载转矩 T_L 与转速 n 的方向无关，提升机带重物的升降运动是最典型例子。由图 6.7 看出，重物不论是作提升或下放运动，重物的重力所产生的负载转矩的方向总是不变的。图 6.7 中，设提升作为 n 的正向，提升时重物产生的 T_L 与 n 的方向相反，则 T_L

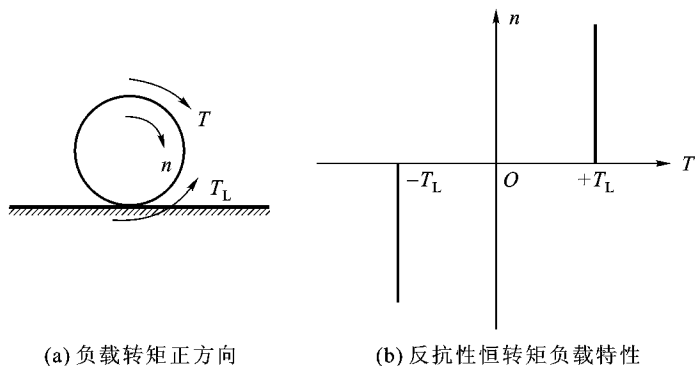


图 6.6 反抗性恒转矩负载特性及其正方向

为正，负载特性曲线位于第Ⅰ象限；下放时， n 为负，而 T_L 的方向不变，仍旧为正，负载特性曲线位于第Ⅳ象限。

6.3.2 泵及通风机类负载转矩特性

水泵、油泵、通风机和螺旋桨等都属此类负载，特点是负载转矩的大小基本上与转速的平方成正比，即

$$T_L = Kn^2$$

式中， K 为比例系数，转矩特性曲线如图 6.8 所示。

由公式和图均可知，此类负载的转矩特性曲线为一条抛物线。

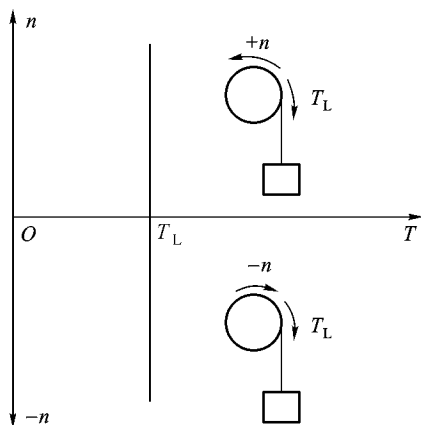


图 6.7 位能性恒转矩负载特性

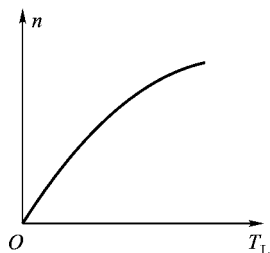


图 6.8 通风机型负载特性