



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Fundamentals of
Electric Drives

电力拖动 基础

◎ 孙克军 主 编
◎ 常宇健 孙会琴 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电力拖动基础

主 编 孙克军
副主编 常宇健 孙会琴
参 编 王素芝 石彦辉 闫彩红



机械工业出版社

本书共分5章,内容包括电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统的过渡过程和电力拖动系统电动机的选择等。全书既注重电力拖动理论的分析,也注重工程实际的应用,具有内容充实、重点突出、可操作性强的特点。

本书是普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材,也可作为其他自动化类、机电类专业的教学用书,或供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动基础/孙克军主编. —北京:机械工业出版社, 2011.5
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34036-2

I. ①电… II. ①孙… III ①电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第058747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 卢若薇

版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2011年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.25印张·278千字

标准书号:ISBN 978-7 111-34036 2

定价:23.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江 梁景凯 张元 袁德成 焦斌

吕进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善

钱平 王保家

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭伟 高亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

近年来，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。本书就是在这种新形势下为适应高等教育事业的发展，为电气工程与自动化专业而编写的规划教材。

本书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，力求做到传统技术与高新技术相结合、讲述基础理论与分析应用实例相结合。全书共分5章，内容包括电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统的过渡过程和电力拖动系统电动机的选择等。

本书的主要特点是以电力拖动系统中应用最广泛的他励直流电动机和三相异步电动机电力拖动为重点，侧重于基本理论和基本概念的阐述，并始终强调基本理论的实际应用；在文字阐述方面层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出、循序渐进、富有启发性；针对各章内容中的重点和难点，精心编写了大量例题，以利培养学生解决工程实际问题的能力；而且还适当增加了串励直流电动机的电力拖动，并介绍了运用 MATLAB 仿真工具对电力拖动的运行过程进行仿真分析的方法。

本书由孙克军主编，常宇健、孙会琴为副主编，第1章由石彦辉编写，第2章由王素芝编写，第3章第3.1~3.3节由孙克军编写，第3章第3.4、3.5节由闫彩红编写，第4章由常宇健编写，第5章由孙会琴编写。本书由吕锋教授主审。

编者对关心本书出版、热心提出建议和提供资料的单位和个人表示衷心的感谢。由于编者水平所限，书中疏漏和不当在所难免，敬请广大读者见谅，并批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 电力拖动系统的动力学基础	3
1.1 电力拖动系统的组成	3
1.2 电力拖动系统的运动方程式	3
1.2.1 单轴电力拖动系统的运动方程式	3
1.2.2 多轴电力拖动系统的等效	4
1.3 生产机械的负载转矩特性	10
1.3.1 恒转矩负载特性	10
1.3.2 恒功率负载特性	11
1.3.3 风机、泵类负载特性	12
1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	12
1.4.1 电力拖动系统的平衡状态	12
1.4.2 电力拖动系统的稳定平衡状态	12
1.4.3 电力拖动系统的稳定运行条件	13
本章小结	14
思考题与习题	14
第2章 直流电动机的电力拖动	16
2.1 他励直流电动机的机械特性	16
2.1.1 机械特性方程式	16
2.1.2 固有机械特性和人为机械特性	17
2.1.3 直流电动机机械特性的绘制	20
2.2 他励直流电动机的起动	21
2.2.1 直接起动	21
2.2.2 降低电枢绕组电压起动	21
2.2.3 电枢回路串电阻起动	22
2.2.4 起动电阻的计算	23
2.3 他励直流电动机的制动	26
2.3.1 能耗制动	27
2.3.2 反接制动	29
2.3.3 回馈制动	32
2.4 他励直流电动机的调速	34
2.4.1 调速指标	35
2.4.2 电枢回路串电阻调速	37
2.4.3 降低电枢绕组电压调速	37
2.4.4 减弱磁通调速	38
2.4.5 调速时的容许输出	39
2.5 串励直流电动机的电力拖动	42
2.5.1 串励直流电动机的机械特性	42
2.5.2 串励直流电动机的起动与调速	45
2.5.3 串励直流电动机的制动	45
2.5.4 复励直流电动机的机械特性	47
2.6 直流电动机的 MATLAB 仿真	48
2.6.1 直流电动机的机械特性仿真	48
2.6.2 直流电动机的起动过程仿真	51
本章小结	54
思考题与习题	55
第3章 三相异步电动机的电力拖动	58
3.1 三相异步电动机的机械特性	58
3.1.1 三相异步电动机机械特性的三种表达式	58
3.1.2 三相异步电动机的固有机机械特性	62
3.1.3 三相异步电动机的人为机械特性	63
3.1.4 三相异步电动机机械特性的绘制	66
3.2 三相异步电动机的起动	70
3.2.1 三相异步电动机的起动性能	70
3.2.2 三相异步电动机的直接起动	71
3.2.3 定子绕组串电阻或电抗器减压起动	71
3.2.4 星-三角(Y- Δ)起动	74
3.2.5 延边三角形起动	75
3.2.6 自耦变压器减压起动	77
3.2.7 减压起动方法的比较	78
3.2.8 绕线转子异步电动机转子回路串电阻分级起动	79
3.2.9 绕线转子异步电动机转子回路串频敏变阻器起动	86
3.2.10 特种笼型转子三相异步电动机的起动	87
3.3 三相异步电动机的调速	89

3.3.1 三相异步电动机的调速性能	89	4.3 异步电动机拖动系统的过渡过程	149
3.3.2 降低定子绕组电压调速	90	4.3.1 异步电动机直线段机械特性拖动 恒转矩负载工作的过渡过程	149
3.3.3 绕线转子异步电动机转子回路串 电阻调速	91	4.3.2 异步电动机过渡过程的时间 分析	151
3.3.4 变极调速	93	4.3.3 异步电动机过渡过程的能量 损耗	153
3.3.5 变频调速	102	本章小结	155
3.3.6 绕线转子异步电动机的串级 调速	106	思考题与习题	155
3.3.7 电磁转差离合器调速	109	第5章 电力拖动系统电动机的 选择	156
3.3.8 三相异步电动机各种调速方法的 比较	113	5.1 电动机选择的原则与主要内容	156
3.4 三相异步电动机的制动	113	5.1.1 电动机选择的一般原则	156
3.4.1 三相异步电动机的能耗制动	113	5.1.2 电动机选择的主要内容	156
3.4.2 三相异步电动机的反接制动	115	5.2 电动机的发热与电动机工作制的 分类	158
3.4.3 三相异步电动机的回馈制动	120	5.2.1 电动机的发热过程	158
3.4.4 三相异步电动机各种制动方法的 比较	121	5.2.2 电动机的冷却过程	159
3.4.5 三相异步电动机的各种运行 状态	122	5.2.3 电动机工作制的分类	160
3.5 三相异步电动机的 MATLAB 仿真	123	5.3 连续工作制电动机的选择	162
3.5.1 三相异步电动机的机械特性 仿真	123	5.3.1 常值负载下电动机功率的 选择	162
3.5.2 三相异步电动机的调速过程 仿真	125	5.3.2 变化负载下电动机功率的 选择	163
本章小结	126	5.3.3 有起动、制动及停歇过程时校验 发热公式的修正	166
思考题与习题	128	5.3.4 等效法在非恒值变化负载下的 应用	167
第4章 电力拖动系统的过渡过程	130	5.4 短时工作制电动机的选择	168
4.1 引言	130	5.4.1 选用为连续工作制而设计的 电动机	168
4.1.1 过渡过程的基本概念	130	5.4.2 选用专为短时工作制设计的 电动机	169
4.1.2 过渡过程的分类	131	5.5 断续周期工作制电动机的选择	170
4.2 他励直流电动机拖动系统的过渡 过程	131	5.6 选择电动机功率的统计法或类 比法	172
4.2.1 他励直流电动机过渡过程的一般 规律	131	本章小结	172
4.2.2 他励直流电动机起动的过渡 过程	135	思考题与习题	173
4.2.3 他励直流电动机制动的过渡 过程	138	参考文献	174
4.2.4 他励直流电动机过渡过程的能量 损耗	146		

绪 论

1. 电力拖动系统的发展与应用

在现代工业生产、农业生产、交通运输、科学研究和日常生活等各个方面都广泛地使用着电能。因电能具有生产和变换比较经济、传输和分配比较容易、使用和控制比较方便等优点，从而成为国民经济中使用最普遍的一种能量，它已经成为人们用得最多的一种能源。

电能应用的一个重要方面就是利用电动机将电能转换成机械能为生产机械提供动力。在现代，几乎所有的生产机械都是由电动机来拖动的，例如各种机床、轧钢机、电梯、矿井提升机、球磨机、造纸机、纺织机械、印刷机械、化工机械、电力机车、压缩机、起重机、卷扬机、碾米机、水泵、电动工具、家用电器等，可以说是数不胜数。因此，电动机是一种在国民经济中起重要作用的电气设备。

用电动机拖动生产机械工作称为电力拖动（又称电气传动），由电动机来拖动生产机械的系统，称为电力拖动系统。一个完整的电力拖动系统一般是由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五部分组成。

众所周知，在现代化工业生产中，需要采用各种生产机械，而这些生产机械又必须由原动机来拖动。拖动生产机械的原动力及原动机可以是各种各样的，历史上就曾采用过人力、水力、风力、蒸汽、液压等拖动方式。尽管这些方式至今或多或少仍然还在沿用，但目前应用得最广泛的还是电力拖动。这是因为：①电能的传输和分配非常方便；②电动机的种类规格很多，它们具有各种各样的机械特性，能在很大程度上满足大多数生产机械的不同要求；③电力拖动系统的操作和控制比较简单，便于实现自动控制和远程操作等。因此，电力拖动在现代工业中得到最广泛的应用。可以这样说，没有电力拖动，就没有现代工业。

电力拖动的发展，大体上经历了成组拖动、单机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动，即用一台电动机拖动一根天轴，再经过传动带或绳索来分别拖动几台生产机械，这种拖动形式由于结构不合理，电动机性能不能充分发挥，而且效率很低、安全性能比较差，所以现在已经很少采用。单机拖动是用一台电动机来拖动一台生产机械，减少了中间传动机构，提高了效率，并可充分利用电动机的调速性能来满足生产机械的工艺要求。随着社会的进步和生产力的发展，一台生产机械往往具有许多运动机构，如仍用一台电动机来拖动，显然是不合适的。因此，人们开始采用了多台电动机来拖动运动机构较复杂的生产机械，即用一台电动机来拖动生产机械中某一个运动部件，这样也易实现自动化生产。所以，现代化电力拖动系统基本上是采用这种多电动机拖动形式。

随着科学技术的发展，尤其大功率电子元器件不断涌现及控制理论不断完善，加上微型计算机的广泛应用，使当今电力拖动已进入到一个自动化电力拖动系统崭新的阶段。然而，不论现代电力拖动系统结构如何复杂，从原理上讲，它们仍然由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源等组成。

电力拖动系统按拖动生产机械的电动机类型，可分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统。

直流电力拖动系统的优点是系统的起动转矩大,在较大范围内能进行速度的平滑调节且控制简便。然而,由于直流电动机具有换向器和电刷,给运行带来了不少麻烦,如不能在易燃、易爆场合中使用等,所以限制了直流电力拖动向高速、大容量方面发展。尽管这样,直流电力拖动系统至今在各个工业传动中仍发挥着重要的作用。

由于交流电能具有输送方便,交流异步电动机的结构简单、价格便宜、维护方便,且能在高速及环境条件较恶劣场合下应用等优点,故交流电力拖动系统获得了极广泛的应用。但是,长期以来由于交流电力拖动的调速性能(如调速范围、调速精度、平滑性、过载能力)等指标都不及直流电力拖动系统,因此,在要求较高的调速系统中,交流电力拖动系统的应用曾一度受到限制。如今,由于电力电子技术飞跃发展,出现了各种类型的整流及逆变电路,它不但为直流电力拖动系统解决了可控制直流电源问题,同时也为交流电力拖动系统提供了频率和电压可调的交流电源。交流调速系统现已广泛应用。

电力拖动自动化在新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路、电子计算机及现代控制理论发展的推动下,发生了巨大的变革,已由单机拖动自动化本身高层次的发展,扩展到生产过程与管理的自动化,数控机床、数控加工中心、智能机器人、自动化检测与运输技术等新型机电一体化产品不断涌现。特别要指出的是,随着计算机仿真技术的发展,特别是像 MATLAB 这样一些仿真软件的不断推出,为电力拖动系统的动态分析和静态分析提供了新颖的技术工具。可以相信,电力拖动系统与电力拖动自动化技术的发展和运用,必然会进入到一个划时代的新阶段。

2. 本课程的性质和任务

本课程是电气工程及其自动化专业的一门重要的专业技术基础课,学生在掌握了电路、电子、电机学等课程知识后,通过本课程学习,将获得由各种电动机所组成的电力拖动系统的基本理论,系统在各种运行状态时的静、动态特性与计算方法,并能掌握用工程方法正确地选择电动机的容量等基本技能,同时也为进一步学习本专业有关后续课程,如“自动控制系统”、“直流调速”、“交流调速”等准备必要的基础知识。

“电力拖动基础”课程的任务,就是要分析和研究电力拖动系统的运行特性、能量关系及工程运用等问题。而要分析和研究这类问题,首先就必须研究电力拖动动力学,即研究电力拖动系统内动力学规律、典型负载的机械特性、复杂系统的简化计算以及系统稳定运行的分析和判断等。其次,还必须分析交、直流电动机的机械特性,并结合负载的转矩特性(又称负载的机械特性),全面分析分别由直流电动机和三相交流电动机组成的拖动系统的运行。其中,既有电动、制动等各种稳定运行,又有包括起动、调速和制动过程在内的各种过渡过程。此外,还要对起动、制动及调速的设备进行分析。

在学习本课程时,要注意各章节之间相互的内在联系,力求达到融会贯通。而且认真做好每章思考题和习题是学好本课程的关键。另外,实验是必要的实践性教学环节,也应给予一定的重视。

第 1 章 电力拖动系统的动力学基础

1.1 电力拖动系统的组成

所谓的电力拖动系统，是指以电动机作为原动机拖动生产机械完成一定工艺要求的系统。电力拖动系统通常由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五部分组成，框图如图 1-1 所示。

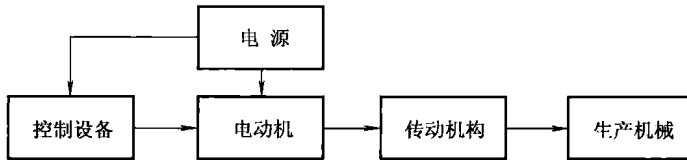


图 1-1 电力拖动系统组成框图

电动机将电能转变为机械能，拖动生产机械作旋转或直线运动。根据所采用的电动机类型不同，电力拖动系统可分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统。

传动机构是将电动机的运动经中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械的工作机构。电动机与生产机械可以直接相联，但是，实际多数拖动系统中，电动机与生产机械不同轴，而在二者之间设有传动机构，如蜗轮与蜗杆、减速箱等。

控制设备由各种电气元器件和装置组成，用来控制电动机使之按一定的规律运转，从而实现了对生产机械的自动控制。

电源为电动机、控制设备提供电能。

1.2 电力拖动系统的运动方程式

1.2.1 单轴电力拖动系统的运动方程式

实际的电力拖动系统种类很多，最简单的电力拖动系统是电动机直接与生产机械同轴连接，组成所谓的单轴电力拖动系统，简称单轴系统，示意图如图 1-2 所示。

在图 1-2 中， n 为电动机的转速， T_e 为电动机的电磁转矩， T_L 为负载转矩。需要指出的是，为分析问题方便，在电力拖动系统中，通常指的负载转矩 $T_L = T_2 + T_0$ （式中 T_2 为生产机械的转矩， T_0 为电动机本身的空载转矩），即将 T_0 归并在负载转矩 T_L 中，不再单独考虑。这样，

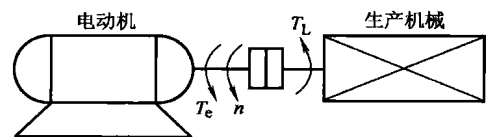


图 1-2 单轴电力拖动系统示意图

作用在电动机轴上的转矩仅为：具有驱动性质的电磁转矩 T_e 与具有制动性质的负载转矩 T_L 。根据刚体转动定律，则

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 J 为转动部分的转动惯量，包括电动机的转动惯量和生产机械的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)，它是衡量系统惯性作用的一个物理参数； Ω 为电动机的机械角速度 (rad/s)。

在工程中，系统的惯性作用常用飞轮矩（或称飞轮惯量） GD^2 来表示。 GD^2 和 J 的关系为

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-2)$$

式中 m 为转动部分的质量 (kg)； G 为转动部分的重力 (N)； ρ 为转动部分的惯性半径 (m)； g 为重力加速度， $g = 9.8 \text{m/s}^2$ ； GD^2 为电动机转子与生产机械转动部分的飞轮矩之和 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)，可从各自的产品手册中查出。

需注意的是：

1) GD^2 是用来描述整个旋转系统惯性的一个物理量，是一个完整符号，不能简单地理解为 G 和 D^2 的乘积。否则，意义完全不同。

2) 如果从产品目录中查出的飞轮矩的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，则需乘以 9.8。

由于工程上常用转速 n 而不用机械角速度 Ω 来描述电动机的转速，考虑到机械角速度 Ω 与转速 n 之间的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-3)$$

将式 (1-2)、式 (1-3) 代入式 (1-1)，即得到单轴电力拖动系统运动方程式的实用形式如下：

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知：

1) 当 $T_e = T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} = 0$ ， $n = \text{常数}$ ，电动机静止或恒速旋转，拖动系统处于稳定运行状态。

2) 当 $T_e > T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，电动机的转速升高，拖动系统处于加速暂态运行状态。

3) 当 $T_e < T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，电动机的转速下降，拖动系统处于减速暂态运行状态。

特别强调的是，电磁转矩 T_e 与负载转矩 T_L 都是具有方向性的物理量，因此使用运动方程式时必须注意转矩正负号的取法。一般规定如下：首先取转速 n 的方向为正方向，若电磁转矩 T_e 的实际方向与 n 相同， T_e 取正号，反之取负号；而对于负载转矩 T_L ，若 T_L 的实际方向与 n 相反， T_L 取正号，反之取负号。

1.2.2 多轴电力拖动系统的等效

在实际的多数电力拖动系统中，为了实现转速的匹配，电动机与生产机械之间往往通过

传动机构间接相联。这样，拖动系统就具有两根或两根以上不同转速的轴，故称为多轴电力拖动系统，简称多轴系统，如图 1-3a 所示。由图可知，该拖动系统的传动机构为两级齿轮减速机构，其减速比分别为 j_1 、 j_2 ，传动效率分别为 η_1 、 η_2 ；三根转轴的转速不相同，分别为 n 、 $n_1 = n/j_1$ 、 $n_L = n_1/j_2 = n/(j_1 \cdot j_2)$ ；三根轴上的转矩、飞轮矩也都不一样。若用单轴系统的运动方程式来研究其运行情况，就必须列写出每一根轴的运动方程式及各轴间相互关联的方程，然后联立求解，这显然相当复杂和麻烦。考虑到拖动系统研究的主要对象是电动机而不是每根轴上的问题，因此，为简化分析与计算，在实际工程中通常采用折算的方法，将多轴系统等效为一单轴系统，如图 1-3b 所示，然后再利用式 (1-4) 对多轴系统的静、动态问题进行分析研究。

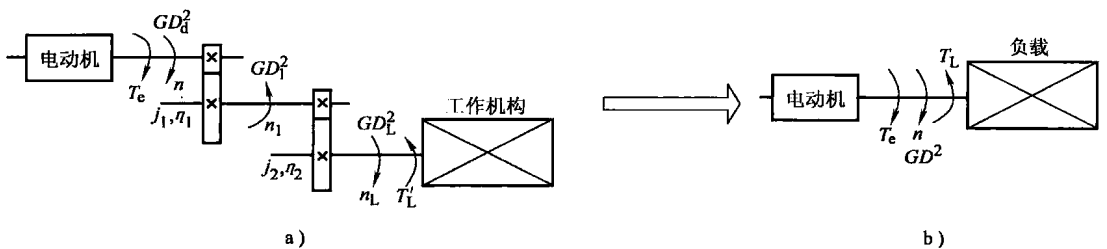


图 1-3 多轴电力拖动系统及其等效的单轴系统
a) 多轴电力拖动系统 b) 等效的单轴系统

折算的原则是：折算前后系统所传送的功率及所储存的动能不变。具体的折算包括负载转矩的折算和飞轮矩的折算。前者是指从系统已知的实际负载转矩计算出折算到电动机轴上的等效负载转矩；后者是指从已知的各传动轴上的飞轮矩计算出折算到电动机轴上的总飞轮矩。由于这两种折算随生产机械工作机构运动形式的不同而不同，下面分三种情况进行讨论。

1. 工作机构旋转运动时转矩与飞轮矩的折算

(1) 负载转矩的折算

设图 1-3a 中工作机构的实际负载转矩为 T'_L ，转速为 n_L ，相应的角速度 $\Omega_L = 2\pi n_L/60$ ，则工作机构的功率 P'_L 为

$$P'_L = T'_L \Omega_L \quad (1-5)$$

设折算到电动机轴上的负载转矩为 T_L ，电动机轴的转速为 n ，相应的角速度为 Ω ，则折算到电动机轴上的功率 P_L 为

$$P_L = T_L \Omega \quad (1-6)$$

若忽略传动机构的功率损耗，按照折算前后功率不变的原则，于是有

$$P'_L = T'_L \Omega_L = P_L = T_L \Omega \quad (1-7)$$

因此，若忽略传动机构的功率损耗，则折算后的负载转矩 T_L 为

$$T_L = T'_L \frac{\Omega_L}{\Omega} = T'_L \frac{n_L}{n} = \frac{T'_L}{j} \quad (1-8)$$

式中 j 为传动机构的总转速比， $j = \Omega/\Omega_L = n/n_L$ 。

在多级传动机构中， j 等于各级传动轴转速比的乘积，即 $j = j_1 j_2 \cdots j_n$ 。显然，对于图 1-3a 所示的系统， $j = j_1 j_2$ 。一般来说，由于大多数传动机构是减速的，所以 $j > 1$ 。由此可见，从

功率不变的角度来看, 工作机构轴上转速低, 负载转矩 T'_L 较大, 而折算到电动机轴上时, 因其转速高, 故等效负载转矩 T_L 较小。

实际上, 在机械功率的传递过程中, 传动机构存在着功率损耗, 称为传动损耗。传动损耗可以用传动机构的效率 η 来描述。传动损耗到底是由电动机承担还是由生产机械承担, 取决于功率传递的方向。

当电动机工作在电动状态时, 由于电动机提供所有的功率, 功率传递方向是从电动机流向生产机械, 因此传动损耗自然由电动机承担。此时, 按照折算前后传递功率不变的原则, 得

$$T_L \Omega \eta = T'_L \Omega_L \quad (1-9)$$

于是, 折算后的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \frac{T'_L \Omega_L}{\Omega \eta} = \frac{T'_L}{j \eta} \quad (1-10)$$

当电动机工作在发电制动状态时, 所有功率都由生产机械提供, 功率传递方向是由生产机械流向电动机, 此时传动损耗由生产机械承担。同样, 按照折算前后传递功率不变的原则, 得

$$T_L \Omega = T'_L \Omega_L \eta \quad (1-11)$$

因此, 折算后的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \eta \frac{T'_L \Omega_L}{\Omega} = \eta \frac{T'_L}{j} \quad (1-12)$$

需要注意的是, 式 (1-10) 和式 (1-12) 中, η 为传动机构的总效率。在多级传动机构中, η 为各级传动部件效率的乘积, 即 $\eta = \eta_1 \eta_2 \cdots \eta_n$ 。在图 1-3a 所示的系统中, $\eta = \eta_1 \eta_2$ 。传动机构的效率可在相应的机械工程手册中查得。不同种类的传动机构, 其传动效率通常不同。即便同一传动机构, 若负载大小不同时, 其传动效率也有所不同。因此, 在工程中, 一般采用满载效率来计算。

(2) 飞轮矩的折算

设图 1-3a 中第一根轴 (电动机轴) 上的转动惯量为 J_d , 第二根轴的转动惯量为 J_1 , 第三根轴 (工作机构转轴) 的转动惯量为 J_L , 折算到电动机轴上的等效转动惯量为 J 。按照折算前后系统储存动能不变的原则, 有

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} J_d \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2 \quad (1-13)$$

所以, 折算后的等效转动惯量 J 为

$$J = J_d + \frac{J_1}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{J_L}{\left(\frac{n}{n_L}\right)^2} \quad (1-14)$$

化简整理后得

$$J = J_d + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{(j_1 j_2)^2} \quad (1-15)$$

将 $J = \frac{GD^2}{4g}$ 代入式 (1-15), 可得到等效的单轴飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{(j_1 j_2)^2} \quad (1-16)$$

式中 GD_d^2 为电动机转子的飞轮矩与装在该轴上的齿轮飞轮矩之和； GD_1^2 为第二根轴上两个齿轮飞轮矩之和； GD_L^2 为第三根轴上工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

由式 (1-16) 可知，各级飞轮矩折算到电动机轴上时，应除以电动机与该级之间转速比的平方。因此，飞轮矩折算的一般形式为

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_2^2}{(j_1 j_2)^2} + \frac{GD_3^2}{(j_1 j_2 j_3)^2} + \dots + \frac{GD_L^2}{j^2} \quad (1-17)$$

由于减速传动机构的转速比大于 1，所以由式 (1-17) 可见，在等效的单轴飞轮矩 GD^2 中，电动机转子本身的飞轮矩所占的比重较大，而工作机构轴上的飞轮矩的折算值占的比重较小；机械轴越远离电动机轴，其折算值越小，对电机轴的影响就越小。因此，在实际工程中，通常采用下式来估算系统的等效飞轮矩，以减少折算的麻烦：

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1-18)$$

式 (1-18) 中， GD_d^2 是电动机自身转子的飞轮矩； δ 为小于 1 的数，一般取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ ，若电动机轴上还有其他部件，则 δ 的值需加大。

2. 工作机构平移运动时转矩与飞轮矩的折算

图 1-4 所示为龙门刨床传动机构示意图，经多级齿轮减速后，再通过齿轮与齿条的啮合，电动机的旋转运动就变成工作台的平移运动。由于平移运动属于直线运动，所以其转矩和飞轮矩的折算与上述的旋转运动有所不同。

(1) 转矩的折算

设切削时图 1-4 中工作台与工件的平移速度为 v (m/s)，工作机构做平移运动时受到的阻力（切削力）为 F (N)，则切削功率 P (W) 为

$$P = Fv \quad (1-19)$$

切削力 F 反映到电动机轴上表现为负载转矩 T_L ，依据折算前后功率不变的原则，若不考虑传动损耗，则有

$$Fv = T_L \Omega \quad (1-20)$$

于是

$$T_L = \frac{Fv}{\Omega} = \frac{Fv}{2\pi n/60} = 9.55 \frac{Fv}{n} \quad (1-21)$$

当考虑传动损耗时，由于传动机构的损耗是由电动机承担的，若设传动机构效率为 η ，则有

$$T_L = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-22)$$

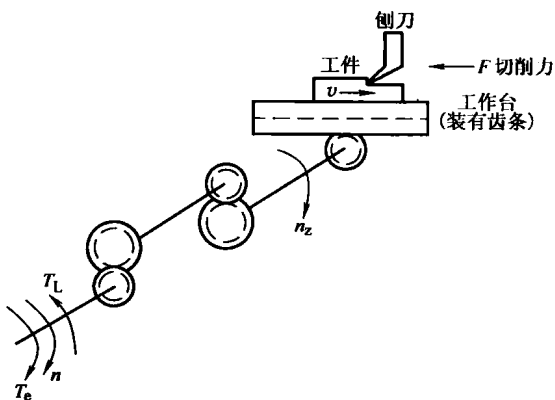


图 1-4 龙门刨床传动机构示意图

(2) 飞轮矩的折算

设作平移运动的物体总质量为 m_L ，其重量 $G_L = m_L g$ ，所产生的动能为

$$\frac{1}{2} m_L v^2 = \frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v^2 \quad (1-23)$$

设平移物体折算至电动机轴上的转动惯量为 J_L ，根据折算前后动能相等的原则，有

$$\frac{1}{2} m_L v^2 = \frac{1}{2} J_L \Omega^2 \quad (1-24)$$

将 $J_L = \frac{GD_L^2}{4g}$ ， $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 及式 (1-23) 代入式 (1-24)，即得到平移物体折算到电动机轴上的飞轮矩为

$$GD_L^2 = 365 \frac{G_L v^2}{n^2} \quad (1-25)$$

需指出的是，系统传动机构中转动部分飞轮矩的折算与前面相同，系统总飞轮矩应为这两部分之和。

例 1-1 某机床电力拖动系统如图 1-4 所示，已知切削力 $F = 10000\text{N}$ ，工作台与工件运动速度 $v = 0.8\text{m/s}$ ，传动机构效率 $\eta = 0.91$ ，交流电动机转速 $n = 1450\text{r/min}$ ，电动机的飞轮矩 $GD_a^2 = 200\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。求：(1) 切削时折算到电动机轴上的负载转矩；(2) 估算系统的总飞轮矩；(3) 不切削时，工作台及工件反向加速，电动机以 $\frac{dn}{dt} = 500\text{r}/(\text{min} \cdot \text{s}^{-1})$ 恒加速运行，计算此时系统的动转矩绝对值。

解：(1) 切削时切削功率为

$$P = Fv = 10000 \times 0.8\text{W} = 8000\text{W}$$

折算后的负载转矩

$$T_L = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \times \frac{8000}{1450 \times 0.91} \text{N} \cdot \text{m} = 57.9\text{N} \cdot \text{m}$$

(2) 估算系统的总飞轮矩，取 $\delta = 0.2$

$$GD^2 \approx (1 + \delta) GD_a^2 = (1 + 0.2) GD_a^2 = 1.2 \times 200\text{N} \cdot \text{m}^2 = 240\text{N} \cdot \text{m}^2$$

(3) 不切削时，系统的动转矩绝对值为

$$T = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{240}{375} \times 500\text{N} \cdot \text{m} = 320\text{N} \cdot \text{m}$$

3. 工作机构做升降运动时转矩与飞轮矩的折算

有些生产机械的工作机构是做升降运动的，如电梯、起重机等。虽然升降运动与平移运动同属直线运动，但两者仍有区别。现以起重机为例来进行讨论。图 1-5 所示为起重机电力拖动示意图。

(1) 转矩的折算

在图 1-5 中，当提升重物时，电动机工作在电动状态，功率的传递方向由电动机到负载；而当下放重物时，重物因重力作用拉着整个系

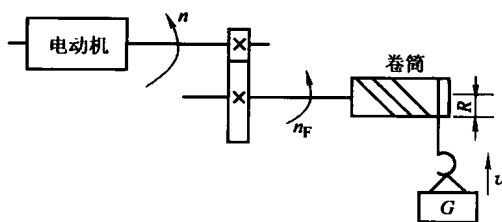


图 1-5 起重机电力拖动示意图

统反向运动,此时电动机工作在发电制动状态,所有的功率由负载提供,功率的传递方向由负载流向电动机。由于负载转矩的折算与功率传递方向密切相关,因此,提升重物 and 下放重物时负载转矩的折算值不同,需分别进行分析。

假设重物的重量为 $G = mg$,提升重物和下放重物时的速度均为 v ,卷筒半径为 R ,总转速比为 j 。

1) 提升重物。提升重物时,作用在卷筒轴上的负载转矩为 GR ,若不计传动机构损耗,则折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \frac{GR}{j} \quad (1-26)$$

若考虑传动机构的损耗,则折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \frac{GR}{j\eta_c^\uparrow} = 9.55 \frac{Gv}{n\eta_c^\uparrow} \quad (1-27)$$

式中 η_c^\uparrow 为提升重物时传动机构的效率。

由此可见,提升重物时,传动机构的损耗转矩 ΔT^\uparrow 为

$$\Delta T^\uparrow = \frac{GR}{j\eta_c^\uparrow} - \frac{GR}{j} \quad (1-28)$$

2) 下放重物。下放重物时,重物对卷筒轴的负载转矩仍为 GR 。若不计传动损耗,折算到电动机轴上的负载转矩仍为 GR/j ,且负载转矩的方向也不变。

若考虑传动机构的损耗,则折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = \frac{GR}{j}\eta_c^\downarrow = 9.55 \frac{Gv}{n}\eta_c^\downarrow \quad (1-29)$$

式中 η_c^\downarrow 为下放重物时传动机构的效率。

下放重物时,传动机构的损耗转矩 ΔT^\downarrow 为

$$\Delta T^\downarrow = \frac{GR}{j} - \frac{GR}{j}\eta_c^\downarrow \quad (1-30)$$

当对同一重物提升和下放时,可认为传动机构的损耗相等,即 $\Delta T^\uparrow = \Delta T^\downarrow$,于是有

$$\eta_c^\downarrow = 2 - \frac{1}{\eta_c^\uparrow} \quad (1-31)$$

由式(1-31)可知,提升与下放同一重物时传动机构的效率不同。若提升时传动机构的效率 $\eta_c^\uparrow < 0.5$,则下放时传动机构的效率 $\eta_c^\downarrow < 0$,这说明下放重物时,重物重力产生的功率不足以克服传动机构的损耗,还需要电动机输出机械功率,以帮助重物下放。此时,称为强迫下放。如果电动机不提供下放方向的驱动,重物是掉不下来的,这种传动机构的自锁作用将会使电梯这类升降系统的运行更为安全。因此,在实际生产中,常采用高损耗的传动机构,如蜗轮蜗杆传动(其提升效率 η_c^\uparrow 仅为 $0.3 \sim 0.5$),来使下放效率 η_c^\downarrow 为负值,以达到安全保护的作用。

(2) 飞轮矩的折算

由于升降运动和平移运动都属于直线运动,所以其飞轮矩的折算方法与平移运动相同。

例 1-2 由电动机与卷扬机组成的电力拖动系统如图 1-5 所示。设重物 $G = 5000\text{N}$,当电动机的转速为 $n = 1000\text{r/min}$ 时,重物的上升速度为 $v = 2\text{m/s}$,电动机转子的转动惯量为 $GD_a^2 = 78.4\text{N}\cdot\text{m}^2$,卷筒直径 $D_f = 0.5\text{m}$,卷筒的转动惯量 $GD_f^2 = 74.48\text{N}\cdot\text{m}^2$,减速机构的转

动惯量和钢绳质量可以忽略不计, 传动机构的效率 $\eta_c^1 = 0.95$ 。试求: (1) 使重物匀速上升时电动机转子轴上的输出转矩; (2) 整个系统折算到电动机轴上的总飞轮矩; (3) 使重物以 1m/s^2 的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩。

解: (1) 当重物匀速上升时, 电动机转子轴上的输出转矩与折算到电动机轴上的负载转矩相等。

按照功率传递方向, 于是有

$$T_L = 9.55 \frac{Gv}{n\eta_c^1} = 9.55 \times \frac{5000 \times 2}{1000 \times 0.95} \text{N} \cdot \text{m} = 100.5 \text{N} \cdot \text{m}$$

(2) 根据题意, 卷筒的转速为

$$n_F = \frac{60v}{\pi D_F} = \frac{60 \times 2}{\pi \times 0.5} \text{r/min} = 76.43 \text{r/min}$$

由于传动机构的总转速比 j 为

$$j = \frac{n}{n_F} = \frac{1000}{76.43} = 13.084$$

所以折算到电动机转子轴上的总飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_F^2}{j^2} + 365 \frac{Gv^2}{n^2} = \left(78.4 + \frac{74.48}{13.084^2} + 365 \frac{5000 \times 2^2}{1000^2} \right) \text{N} \cdot \text{m}^2 = 86.135 \text{N} \cdot \text{m}^2$$

(3) 考虑到电动机的转速与提升重物速度之间的关系

$$n = n_F j = \frac{60v}{\pi D_F} j$$

于是电动机的加速度与提升重物时的加速度之间的关系为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{60}{\pi D_F} j a_L$$

因此, 当重物以 1m/s^2 的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩为

$$\begin{aligned} T &= T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{60}{\pi D_F} j a_L \\ &= \left(100.5 + \frac{86.135}{375} \times \frac{60}{\pi \times 0.5} \times 13.084 \times 1 \right) \text{N} \cdot \text{m} = 215.35 \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

1.3 生产机械的负载转矩特性

生产机械的负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $n = f(T_L)$ 称为生产机械的负载转矩特性 (又称为生产机械的机械特性)。大多数生产机械的负载转矩特性基本上可归纳为恒转矩负载特性、恒功率负载特性和风机、泵类负载特性三大类。

1.3.1 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性是指当转速变化时, 负载转矩保持不变, 即负载转矩不受转速变化的影响。根据负载转矩的方向是否与转速方向有关, 恒转矩负载可进一步分为反抗性恒转矩负载