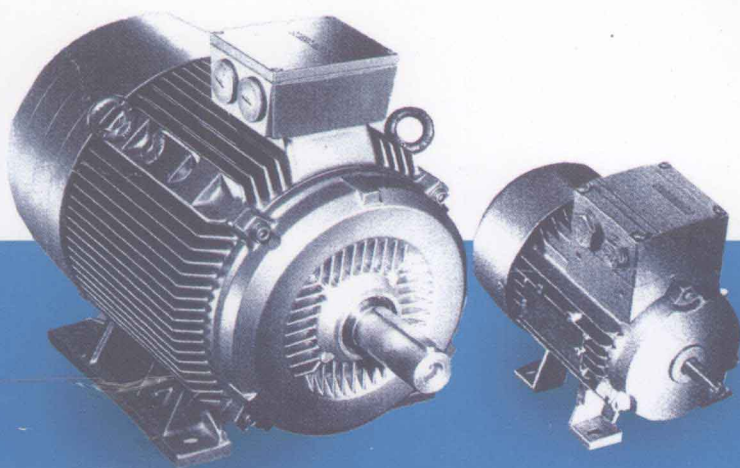


电力拖动技术 及其应用

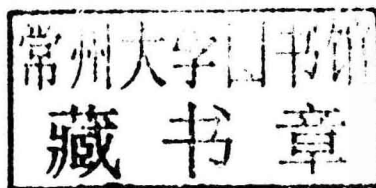
郭丙君 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力拖动技术 及其应用

郭丙君 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书简要介绍了电力拖动系统的动力学,系统地介绍了直流电动机、异步电动机和同步电动机拖动系统的各种运行状态,如起动、制动、调速及过渡过程,多电动机拖动系统、电动机的额定功率选择等内容。并用较多的实用例题进一步说明上述内容的应用方法。对于较难理解的内容应用 MATLAB 软件进行了仿真,方便读者理解和应用。

本书可作为高等工业院校电气工程专业、自动化及其他电气类专业的教材和教学参考用书,亦可用作相应专业的专科学校、业余大学的教材,对于从事电气工程应用的工程技术人员也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动技术及其应用/郭丙君编著. —北京:中国电力出版社, 2012.3

ISBN 978-7-5123-2716-0

I. ①电… II. ①郭… III. ①电力传动 IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 027545 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 6 月第一版 2012 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 320 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是为方便电气工程类专业的学生在学完《电机学》后进一步学习专业后续课程,如《电力拖动自动控制系统》、《工厂电气控制技术》等而编写的。

全书共分7章,主要内容包括:电力拖动系统动力学;直流电动机的拖动;三相异步电动机的起动与制动;三相异步电动机的调速;多电动机的拖动;三相同步电动机的拖动;电动机的选择。本书在编写中着重于基本原理、基本方法,基本概念的分析 and 应用基础,充分注意把交、直流两大拖动系统在形式上和方法上予以统一,前后呼应,以利读者类比和对照。本书结合当今应用非常广泛的MATLAB软件对于电力拖动系统进行了仿真,有利于读者在相应章节内容上的加深理解。每章后附有与生产实践相结合的思考题与习题,可帮助读者提高解决实际问题的能力。

本书可作为高等工业院校电气工程专业、自动化及其他电气类专业的教材和教学参考用书,亦可用作相应专业的专科学校、业余大学的教材,对于从事电气工程应用的工程技术人员也是一本实用的参考书。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不当和谬误之处,恳请有关专家和广大读者不吝赐教。

编 者

2012年5月于华东理工大学

目 录

前言

绪论

1

0.1 概述	1
0.2 电力拖动的历史、现状与发展趋势	1
0.3 本课程的性质、任务和要求	3

第1章 电力拖动系统动力学

4

1.1 电力拖动系统运动方程式	4
1.1.1 电力拖动系统的组成	4
1.1.2 电力拖动系统的运动方程式	4
1.2 多轴电力拖动系统的简化	5
1.2.1 旋转运动	6
1.2.2 平移运动	8
1.2.3 升降运动	9
1.3 生产机械的典型负载转矩特性	13
1.3.1 恒转矩负载的转矩特性	13
1.3.2 恒功率负载特性	14
1.3.3 通风机型负载特性	14
1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	15
思考题与习题	17

第2章 直流电动机的拖动

19

2.1 直流电动机的机械特性	19
2.1.1 他励直流电动机的固有机械特性	19
2.1.2 人为机械特性	21
2.1.3 根据电机的铭牌数据估算机械特性	22
2.2 他励直流电动机的起动	24
2.2.1 对起动的要求和起动过程分析	24
2.2.2 降电压起动	24
2.2.3 电枢回路串电阻起动	25
2.2.4 他励直流电动机起动仿真	28
2.3 他励直流电动机的调速	31
2.3.1 他励直流电动机的调速方法	31

2.3.2	调速指标	34
2.3.3	调速方式与负载类型的配合	35
2.3.4	他励直流电动机的调速仿真	37
2.4	他励直流电动机的电动与制动运行	41
2.4.1	概述	41
2.4.2	电动状态	42
2.4.3	能耗制动	43
2.4.4	电压反向的反接制动过程	46
2.4.5	转速反向的反接制动运行	48
2.4.6	回馈制动运行	48
2.4.7	他励直流电动机制动仿真	51
2.5	直流拖动系统的过渡过程	55
2.5.1	他励直流电动机过渡过程的数学分析	55
2.5.2	起动的过渡过程	58
2.5.3	能耗制动过渡过程	59
2.5.4	反接制动过渡过程	62
2.6	其他类型直流电动机的运行特点	65
2.6.1	串励直流电动机	66
2.6.2	复励直流电动机	71
	思考题与习题	72
第3章	三相异步电动机的起动与制动	75
3.1	三相异步电动机的机械特性	75
3.1.1	机械特性表达式	75
3.1.2	固有机械特性	79
3.1.3	人为机械特性	80
3.1.4	异步电机机械特性的 MATLAB 绘制	82
3.2	三相异步电动机的起动	85
3.2.1	概述	85
3.2.2	三相异步电动机的直接起动	87
3.2.3	三相笼型异步电动机的降压起动	87
3.2.4	三相异步电动机的软起动	94
3.2.5	特种笼型异步电动机的起动	95
3.2.6	三相笼型异步电动机起动仿真	97
3.3	绕线式三相异步电动机的起动	101
3.3.1	转子串频敏变阻器起动	101
3.3.2	转子串电阻分级起动	102
3.3.3	异步电动机起动时间和起动时能耗的计算	106
3.3.4	绕线式三相异步电动机转子绕组串电阻起动仿真	110

3.4 三相异步电动机的制动	111
3.4.1 电动运行	111
3.4.2 能耗制动	112
3.4.3 反接制动	113
3.4.4 回馈制动运行	115
3.4.5 三相异步电动机的制动仿真	120
思考题与习题	124
第4章 三相异步电动机的调速	126
4.1 改变定子电压调速	126
4.1.1 调速原理及调速性能	126
4.1.2 调压调速的闭环控制原理	127
4.1.3 调压调速时电动机的容许输出	128
4.1.4 定子调压调速的优缺点	128
4.1.5 三相异步电动机调压调速仿真	128
4.2 绕线转子异步电动机转子串电阻调速	129
4.2.1 调速原理及调速性能	129
4.2.2 调速电阻的计算	130
4.2.3 调速时的容许输出	130
4.2.4 转子串电阻调速的优缺点	131
4.2.5 绕线转子异步电动机转子串电阻调速仿真	132
4.3 改变定子极数调速	133
4.3.1 变极方法	133
4.3.2 三种常用的变极接线方式	134
4.3.3 变极调速时容许输出	134
4.3.4 变极调速电动机的机械特性	136
4.4 三相异步电动机变频调速	137
4.4.1 变频调速的基本规律及机械特性	137
4.4.2 变频调速的特点	143
4.4.3 变频调速电源	143
4.4.4 三相异步电动机变频调速仿真	143
4.5 绕线转子异步电动机的串级调速	144
4.5.1 串级调速的一般原理	145
4.5.2 串级调速时的机械特性	147
4.5.3 典型的串级调速装置及其运行原理	149
4.6 电磁转差离合器调速	150
4.6.1 电磁转差离合器的基本结构和工作原理	151
4.6.2 电磁转差离合器的机械特性	152
4.6.3 电磁转差离合器调速时的容许输出	153

思考题与习题	154
第5章 多电动机的拖动	156
5.1 双电动机拖动系统	156
5.1.1 双机拖动的合成机械特性	156
5.1.2 他励直流电动机的双机拖动	157
5.1.3 交流异步电动机的双机拖动	157
5.2 电轴系统	158
5.2.1 带辅助电动机的电轴系统	159
5.2.2 具有公共转子电阻的电轴系统	164
5.2.3 具有变频装置的电轴系统	165
思考题与习题	165
第6章 三相同步电动机的拖动	167
6.1 三相同步电动机的机械特性	167
6.2 同步电动机的起动	168
6.2.1 辅助电动机起动	168
6.2.2 异步起动	169
6.2.3 变频起动	169
6.2.4 三相同步电动机异步起动仿真	170
6.3 三相同步电动机的调速	171
6.3.1 三相同步电动机变频调速时的矩角特性	172
6.3.2 三相同步电动机变频调速时的机械特性	173
6.3.3 调速用同步电动机的几种类型	175
6.3.4 三相同步电动机调速系统的几种典型结构及应用领域	176
6.3.5 三相同步电动机调速系统的分类及特点	176
6.3.6 三相同步电动机、异步电动机、直流电动机调速系统的比较	179
6.4 三相同步电动机的制动	180
6.4.1 电网供电同步电动机的制动	180
6.4.2 三相同步电动机制动仿真	181
思考题与习题	183
第7章 电动机的选择	185
7.1 电动机选择的主要内容	185
7.1.1 电动机种类的选择	185
7.1.2 电动机结构类型的选择	186
7.1.3 电动机额定参数的选择	187
7.1.4 经济性	187
7.2 电动机的发热、冷却与工作制	188
7.2.1 电动机的发热与冷却	188
7.2.2 电动机的工作制	190

7.3 电动机额定功率的选择	191
7.3.1 电动机额定功率选择的步骤	191
7.3.2 电动机额定功率选择的原则	192
7.3.3 连续工作制电动机额定功率的选择	194
7.3.4 短时工作制电动机额定功率的选择	195
7.3.5 周期性断续工作制电动机额定功率的选择	196
7.4 选样电动机额定功率的工程方法	201
思考题与习题	202
参考文献	204

绪 论

0.1 概 述

物质、能量和信息是人类赖以生存的三大基本要素。电能作为一种能量形式，由于其易于传输、变换、分配和控制，已成为使用最为广泛的现代能源，也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。在电能的生产、传输、变换、分配、控制和管理中，电机是主要的机电能量转换装置。例如：在电能的生产过程中，发电机将机械能转换成电能；在电能的传输过程中，变压器是主要的传输设备；在电能的使用中，电动机将电能转换成机械能。

由电动机来拖动生产机械运行的系统，称为电力拖动系统。也就是说电力拖动就是使用各种电动机作为原动机拖动生产机械运动，以完成一定的生产任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点，因此现代化生产中，除了一部分生产机械是采用气动或液压拖动以外，大多数生产机械都采用电力拖动。例如：在工农业生产和交通运输中，机床、轧钢机、起重机、卷扬机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动；在人们的日常生活中，各种家用电器大都使用微特电机作为驱动装置。在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中，大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

因此，可以说电机与电力拖动系统已广泛应用到我们现代社会生产和生活的方方面面。如果没有发电机也就没有大量的电能产生，如果没有电动机也就没有用电力驱动的运动装置和设备。

0.2 电力拖动的历史、现状与发展趋势

公元前 3000 年，中国有了水车，后来又出现了风车，这些都是最简单的拖动系统。

20 世纪 17 世纪末，人类开始利用蒸汽为动力。1782 年，瓦特发明了第一台连续运转的蒸汽机，开创了机器时代。

1831 年法拉第发现了电磁感应现象。1888 年，Tesla 发明感应电动机，从此开始了电气时代。

自 19 世纪末电动机逐步代替蒸汽机以来，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，这种拖动型式由于结构不合理，电动机性能不能充分发挥，而且效率很低，所以现在已经很少采用。其后，在 20 世纪 20 年代开始采用了单机拖动，即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，显然是不适合的，因此，在 30 年代后，人们开始采用多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的。

1956 年，晶闸管在 Bell 实验室诞生，“电子”进入到强电领域，电力电子器件成为弱电控制强电的纽带，开始了电子时代。

20 世纪 60 年代，电力电子器件全面进入电力拖动领域，其重要意义在于：电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术有机地融合在一起。

其后，自动化技术和计算机技术也不断应用于电机控制，使电力拖动系统发生了根本性改变。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，无论现代电力拖动系统结构如何复杂，从原理上讲，它们仍然是由原动机、传动机构和生产机械三个部分组成。

其中，电动机是一个机电能量转换器，它把从电源输入的电能转换成生产机械所需的机械能或者将机械能（由动能或位能转换而来）转换成电能馈送至电网。传动机构是用于传送动力，实现速度和运行方式的变换。

电力拖动系统包括直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两种，它们是以拖动生产机械的电动机类型来分类的。

由直流电动机作为原动机的拖动系统称为直流电力拖动系统。其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，给运行带来不少麻烦，如需要经常维护，不能使用在易燃、易爆工业场合，以及限制了电动机向高速、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。

以交流电动机作为原动机的拖动系统，称为交流电力拖动系统。由于交流电能输送方便，交流异步电动机的结构简单、价格便宜、维护方便、并且能在高速及环境条件较恶劣场合下应用等优点，故使交流电力拖动获得极广泛的应用。但是，长期以来由于交流拖动的调速性能（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，因此，在要求较高调速系统中，交流电力拖动应用仍一度受到了限制。直至如今，由于电力电子技术飞跃发展，出现了各种类型的晶闸管（半控型电力电子器件）整流电路及逆变电路，特别是基于全控型电力电子器件的整流电路及逆变电路的高速发展，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，这显然为交流调速系统开辟了新的前景。

可以深信，今后电力拖动系统发展和应用，必然会在交、直流拖动系统相互竞争和交替发展进程中不断完善并进入到一个划时代的新领域。

目前，电力拖动的现状可以概括为两点。

(1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式，成为主要的拖动形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点，比如：电能的获得和转换比较经济；传输和分配比较便利；操作和控制容易，特别是易于实现自动与远程控制。因此，目前绝大多数的生产机械都采用电力拖动。而且，目前电力拖动的方式也几乎全部是单机或多机拖动。

(2) 当代科学和技术的新成果广泛地应用于电力拖动系统之中, 比如: 电力电子学的发展, 使半导体变流装置广泛地用作电力拖动的电源; 微电子学的发展, 使电子控制器件和微处理机成为电力拖动的主要控制手段; 自动控制理论广泛应用于电力拖动自动控制系统中, 大大提高了系统的性能等。

随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展, 电机与拖动的发展趋势为: ①用交流电力拖动取代直流电力拖动; ②从节能的角度改造电力拖动系统, 比如: 用交流调速系统拖动电动水泵可以节能; ③继续采用新技术不断提高电力拖动系统的性能和完善系统功能; ④通过系统集成和技术融合, 组成综合自动化系统, 以进一步提高生产效率。

0.3 本课程的性质、任务和要求

本课程是电气工程及其自动化、自动化专业等相关专业的一门专业基础课, 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, 并能掌握结合生产实践, 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《电力拖动自动控制系统》《交、直流调速》等具备必要的基础知识。

本课程在学习时要注意到各章节之间相互内在联系, 力求达到融会贯通。认真做好每章思考题和习题是学好本课程的关键。实验及课程设计是必要的实践性教学环节应给予一定的重视。

电力拖动系统动力学

本章介绍电力拖动系统的组成和电力拖动系统的运动方程式，生产机械转矩及系统飞轮矩的折算方法，生产机械各种类型的机械特性，最后介绍电力拖动系统稳定运行的条件。本章内容不仅适用于直流电力拖动，也适用于交流电力拖动，是交、直流电力拖动系统共同问题，是电力拖动部分的基础。

1.1 电力拖动系统运动方程式

1.1.1 电力拖动系统的组成

原动机带动生产机械运动叫做拖动。用电动机带动生产机械运动的拖动方式叫电力拖动，电动机是原动机，生产机械是电动机的负载。最简单的电力拖动，如日常生活中的电风扇、洗衣机、工业生产中的水泵等；复杂的电力拖动，如钢厂中的连轧机和可逆轧机等。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的工作机构、传动机构、控制设备以及电源等五部分组成，如图 1-1 所示。电动机把电能转换成机械动力，用以拖动生产机械的某一工作机构。工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分。控制设备由各种电器元件组成，用以控制电动机的运转，从而对工作机构的运动实现自动控制。电动机与工作机构之间的传动机构，是把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械的工作机构。电源用来向电动机及电气控制设备供电。

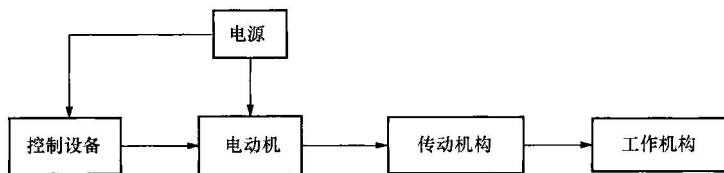


图 1-1 电力拖动系统

1.1.2 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统的运动规律可以用运动方程来描述。作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T 和负载转矩 T_L (T_L 又叫阻转矩)。一般来说，电动机是拖动运动的，负载是反抗运动的。为此在列写电力拖动系统的运动方程时，我们对转矩和转速的正方向（即参考方向）作如下规定：在画出转速 n 的正方向后，电磁转矩 T 的正方向与 n 相同，负载转矩 T_L

的正方向与 n 相反。他励直流电动机单轴电力拖动系统如图 1-2 所示。单轴电力拖动系统中电磁转矩、负载转矩与转速变化的关系用转动方程式来描述, 为

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

在实际工程计算中, 经常用转速 n 代替角速度 Ω 来表示系统转动速度, 用飞轮惯量或称飞轮矩 GD^2 代替转动惯量 J 来表示系统的机械惯性。 Ω 与 n 的关系, J 与 GD^2 的关系为

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

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} \quad (1-3)$$

式中 m ——系统转动部分的质量, kg;

G ——系统转动部分的重力, N;

ρ ——系统转动部分的转动惯性半径, m;

D ——系统转动部分的转动惯性直径, m;

g ——重力加速度, 北京地区取 $g=9.80\text{m/s}^2$;

Ω ——角速度, 弧度/s;

n ——转动速度, r/min;

T 、 T_L ——电磁转矩和负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

把上边两式代入转动方程, 化简后得

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

式中 GD^2 ——转动部分的飞轮矩, 飞轮矩是一个物理量, $\text{N} \cdot \text{m}^2$;

375——有单位的系数, $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 。

转矩的单位仍为 $\text{N} \cdot \text{m}$, 转速的单位仍为 r/min。

式 (1-4) 表明, 电力拖动系统的运动状态是由作用在转轴上所有转矩的代数和决定的。我们称 $(T - T_L)$ 为动转矩。当动转矩等于零时, 系统处于恒转速运行的稳态, 即当 $T = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 转速不变, 系统或以恒速运行或者静止, 这叫做稳定运转状态, 简称稳态。静止状态只是转速为零的一种特殊的稳态。动转矩大于零时, 系统处于加速运动的过渡过程中, 即当 $T > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统加速; 动转矩小于零时, 系统处于减速运动的过渡过程中。即当 $T < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统减速。

这里必须注意, T 与 T_L 本身都是有方向性的变量, 在代入具体数值时, 如果其实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则就用负数。掌握这一点, 才能正确运用系统的运动方程式。

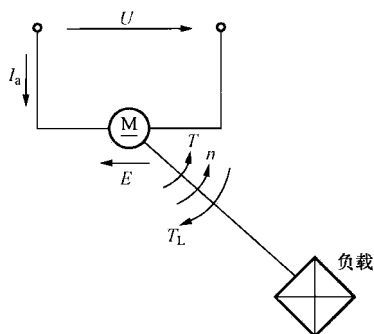


图 1-2 他励直流电动机
单轴电力拖动系统

1.2 多轴电力拖动系统的简化

上节讨论的拖动系统中, 电动机和工作机构直接相连, 这时工作机构的转速等于电动机

的转速，工作机构负载转矩就等于作用在电动机轴上的阻转矩（忽略电动机空载转矩 T_0 ），这种系统称为单轴系统，见图 1-2。

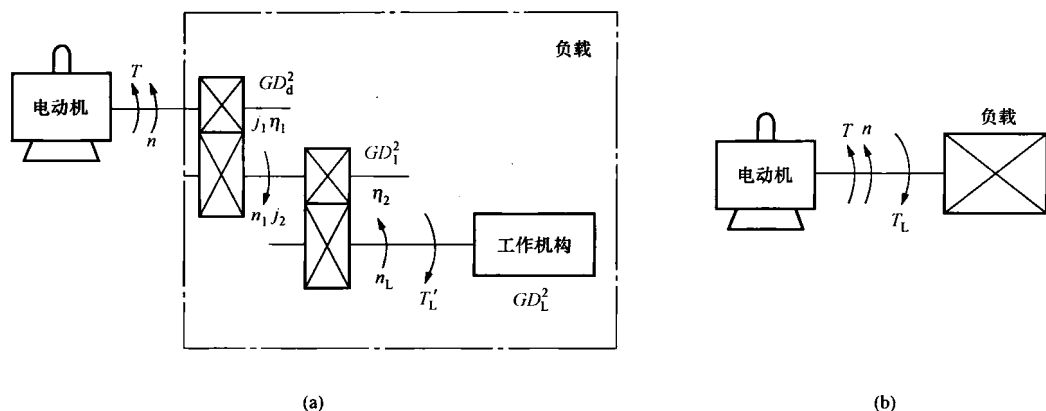


图 1-3 电力拖动系统的简化

(a) 多轴系统；(b) 等效单轴系统

实际的电力拖动系统，往往不是单轴系统，而是通过传动机构使电动机的转速 n 变换为工作机构所需要的转速 n_L ，这种系统称为多轴系统。图 1-3 (a) 就是一种三轴的拖动系统。其传动机构为两级齿轮减速机构，其转速比为 j_1 、 j_2 ，传动效率为 η_1 、 η_2 ，三根转速不相同的转轴，其转速分别为 n 、 $n_1 = n/j_1$ 、 $n_L = n/(j_1 j_2)$ 。三根轴上的转矩、飞轮矩也都不一样。

在分析该三轴系统时，应分别对每一根转轴列写出它的转动方程式，三个转动方程式联立求解，便可得出系统的运行状态。显然，对于多轴电力拖动系统，上述方法是相当麻烦的。为了简化多轴系统的分析计算，通常把负载转矩与系统飞轮矩折算到电动机轴上来，变多轴系统为单轴系统，列写一个转动方程式进行计算，其结果与联立求解多个方程式的结果完全一样。例如，把图 1-3 (a) 所示的多轴系统，简化为图 1-3 (b) 所示的单轴系统，折算的原则是：保持系统的功率传递关系及系统的贮存动能不变。这样一来，分析计算该系统时，首先就要从已知的实际负载转矩 T_L' 求出等效的负载转矩 T_L ，称为负载转矩的折算，从已知的各转轴上的飞轮矩 GD_d^2 、 GD_1^2 、 GD_L^2 求出系统的总飞轮矩 GD^2 ，称为系统飞轮矩的折算。

转矩和飞轮矩的折算随工作机构运动形式的不同而不同，现分别加以讨论。

1.2.1 旋转运动

在实际生产中，有很多生产机械的工作机构的运动都属于旋转运动，如车床的主轴。下面仍以图 1-3 为例来说明旋转运动转矩和飞轮矩的折算。

1. 转矩的折算

设工作机构的负载转矩为 T_L' ，转速为 n_L 对应的角速度 $\Omega_L = 2\pi n_L/60$ ，则工作机构对应的功率为

$$P_L' = T_L' \Omega_L$$

而折算后的功率 P_L 为

$$P_L = T_L \Omega_L$$

式中, T_L 为折算到电动机轴上的等效负载转矩; Ω 为电动机轴的角速度, $\Omega = 2\pi n/60$ 。

根据折算前后功率不变的原则, 应有下列关系, 即

$$\begin{aligned} T'_L \Omega_L &= P'_L = P_L = T_L \Omega \\ T_L &= T'_L \frac{\Omega_L}{\Omega} = T'_L \frac{n_L}{n} = \frac{1}{j} T'_L \end{aligned} \quad (1-5)$$

$j = \Omega_L / \Omega = n_L / n$ 为电动机与工作机构的转速比, 一般来说, $j > 1$, 即传动机构是减速的。

式 (1-5) 表明: 在工作机构的低速轴上, 转矩 T'_L 较大, 而折算到电动机的高速轴上时, 等效转矩 T_L 数值减小。从功率不变的观点来看, 显然低速轴的转矩大, 高速轴的转矩小。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。传动损耗可以在传动机构的效率 η_c 中考虑。

当电动机带动工作机构旋转时, 功率的传递力向是由电动机到负载, 传动损耗由电动机负担, 电动机输出的功率比生产机械消耗的功率大, 这时的功率关系应为

$$\begin{aligned} P_L &= P'_L \frac{1}{\eta_c} \\ T_L \Omega &= T'_L \Omega_L \frac{1}{\eta_c} \\ T_L &= T'_L \frac{1}{j \eta_c} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 中, 电动机轴与工作机构轴的转速比 j 为总的转速比, 在多级传动中应为各级转速比之积, 即 $j = j_1 j_2 \dots$ 。传动效率 η_c 是传动机构的总效率, 同样为各级传动效率之积, 即 $\eta_c = \eta_1 \eta_2 \dots$ 。

不同种类的传动机构, 其传动效率是不同的, 并且负载大小不同时, 其效率也不同。通常均常用满载效率进行计算。传动效率可从《机械工程手册》上查得, 例如, 每对齿轮 (用滚动轴承) 的满载效率为 0.975~0.985, 蜗轮蜗杆的满载效率为 0.5~0.7。

2. 飞轮矩的折算

飞轮矩的大小是旋转物体机械惯性大小的体现。旋转体的动能为 $J\Omega^2/2$ 。设折算成单轴系统后的等效转动惯量为 J , 则对应于图 1-3 的系统有

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} J_d \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2$$

公式两边同乘以 $4g$, 除以 Ω^2 。即可得与 J 相对应的等效飞轮矩 GD^2 的折算公式, 为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_L^2 \frac{1}{j_1^2 j_2^2} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 右边各项的 GD^2 是系统每根轴的 GD^2 。如图 1-3 中, 电动机轴的 GD_d^2 为电动机转子的飞轮矩与装在该轴的齿轮飞轮矩之和; 第二根轴的飞轮矩 GD_1^2 为该轴上两个齿轮飞轮矩之和; 第三根轴的飞轮矩 GD_L^2 为工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

一般情况下, 在总的飞轮矩 GD^2 中, 电动机转子本身的飞轮矩 GD_d^2 占的比重最大, 工

作机构轴上的飞轮矩折算值占的比重较小,而传动机构飞轮矩的折算值所占比重则更小。因此在实际工作中,为了减少折算的麻烦,往往可以采用下式估算系统的总飞轮矩

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

GD_d^2 为电动机转子本身的飞轮矩,其值可从产品目录中查得; δ 为小于1的数,一般取 $\delta=0.2\sim 0.3$ 。如果在电动机轴上还有其他大飞轮矩的部件。如制动器的闸轮等, δ 值则需加大。

1.2.2 平移运动

有些生产机械,其工作机构是作平面运动的,例如刨床的工作台。平面运动属于直线运动,它的转矩和飞轮矩的折算公式有并自己的特点。

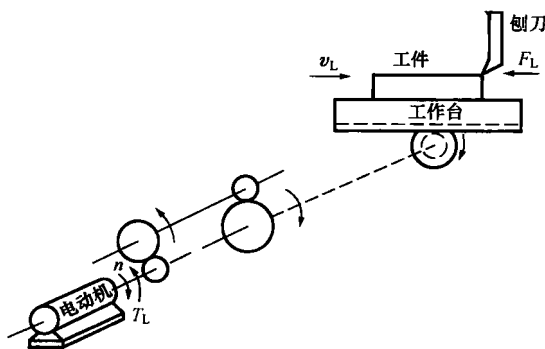


图 1-4 工作机构作平面运动的示意图

图 1-4 所示为工作机构作平面运动的示意图,电动机经多级齿轮减速后,通过由齿轮与齿条的啮合,将旋转运动变成直线运动。

1. 转矩的折算

设切削时工件与工作台的速度为 v_L (m/s),刨刀作用在工件上的力(切削力)为 F_L (N),则切削功率 P_L (W) 为

$$P_L = F_L v_L$$

切削力 F_L 反映到电动机轴上表现为转矩 T_L , 切削功率 P_L 反映到电动机轴上为

$$T_L \Omega_d = T_L \frac{2\pi n_d}{60}$$

如果不考虑传动系统的传动损耗,根据传递功率的原理,有

$$F_L v_L = T_L \frac{2\pi n_d}{60}$$

$$T_L = \frac{F_L v_L}{2\pi n_d / 60} = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d}$$

如果考虑传动损耗,传动损耗同样由电动机负担,则

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d \eta_p} \quad (1-8)$$

2. 飞轮矩的折算

设直线运动部分的重力 $G_L = m_L g$, 则直线运动部分的动能为

$$\frac{1}{2} m_L v_L^2 = \frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v_L^2$$

直线运动部分折算到电动机轴的飞轮矩 GD_L^2 应满足折算前后动能不变的原则,即

$$\frac{1}{2} J_L \Omega_d^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_L^2}{4g} \left(\frac{2\pi n_d}{60} \right)^2 = \frac{GD_L^2 n_d^2}{7150} = \frac{1}{2} \frac{G_L}{G} v_L^2$$