

电机与拖动基础

(第二版)

李发海 王岩 编著

清华大学出版社

电机与拖动基础

(第二版)

李发海 王 岩 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书原版由中央广播电视大学出版社出版。从1985年至1993年先后印刷7次,印数达16万套册。广为全国各地普通高校、职工大学选为教材。

本书主要内容包括:电力拖动系统动力学;直流电机原理;他励直流电动机的起动、调速与四象限运行;变压器;交流电机电枢绕组电动势与磁通势;三相异步电动机原理及起动、四象限运行;同步电动机;交流电机调速;微控电机;电动机的选择等。

本书适合于普通高等学校、职工大学和夜大学的非电机专业作为教材使用,亦可作为工科大专院校自动化专业的教材,也可供有关科技人员阅读。

(京)新登字 158 号

电机与拖动基础

(第二版)

李发海 王 岩 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 26 字数: 613 千字

1994年6月第2版 1994年6月第1次印刷

印数: 0001—5000

ISBN 7-302-01439-6/TM·18

定价: 16.60 元

前 言

本书是为工业自动化等非电机专业编写的教材,全面阐述了这些专业所需的电机与电力拖动的基本理论和基础知识。

本书为修订本。原书在中央广播电视大学出版社出版。修订后,由清华大学出版社出版。根据原书近10年使用的教学经验及交流调速技术的新发展,以及为了满足更多的普通高等院校和职工大学、夜大学的需要,我们进行了修订。修订的内容主要为:

1. 加强各章的内在联系。从电力拖动系统整体出发,编排了各章的内容和顺序;
2. 删去了继电器控制一章;
3. 增加了交流电机调速的一些内容,并单列为一章;
4. 精炼或改写了部分章节,适当压缩全书版面。例如直流电动机电枢反应及换向、交流电机电枢绕组高次谐波电动势与磁通势、各种微控电机和电动机的选择等。不仅篇幅上有所压缩,而且重点更加突出、更加实用。

本书主要特点是:

1. 电机与电力拖动两部分内容有机结合为一个整体,是一门课程,不是二者简单的组合。授课总学时相对减少;
2. 本书侧重于基本原理和基本概念的阐述,并始终强调基本理论的实际应用。阐述电机原理紧密围绕着电力拖动,着重分析电动机的机械特性;
3. 本书文字阐述方面层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出。直流电机电枢绕组电阻值的计算、绕线式异步电动机定子串电阻起动等计算,比同类教材的相同部分要简单、准确。变压器联结组别的确定方法,受到授课教师与学生的好评;
4. 内容阐述循序渐进,富于启发性,便于自学。精心编写了大量的例题、思考题与习题,主要针对内容中的重点和难点。具有典型性、规范性、启发性和趣味性,能更好地引导学生掌握本课程的主要理论,培养学生解决工程实际问题的能力;
5. 适用面宽。本书从内容和写法上考虑了为不同层次的学生所使用,大学本科与专科、职工大学、夜大学等,只要对书中内容稍加取舍,都能选作教材;
6. 采用了国家新标准。

原书自1985年以来,已七次印刷,上、下册分别累计印数达十六万余册。广泛地被普通高校、职工大学、夜大学和广播电视大学选为教材。受到广大师生普遍欢迎。1993年获清华大学优秀教材一等奖和中央广播电视大学优秀教材奖。本次修订后,相信一定能收到更为满意的效果。

由于作者水平所限,虽经修订,还会有缺点和错误。尚希广大读者批评指正。

编者 李发海 王岩

于清华园 1993年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 教材内容与课程性质	1
1.2 本课程常用的物理概念和定律	1
第 2 章 电力拖动系统动力学	7
2.1 电力拖动系统转动方程式	7
2.2 多轴电力拖动系统的简化	9
2.3 负载的转矩特性与电力拖动系统稳定运行的条件	16
思考题	21
习题	22
第 3 章 直流电机原理	24
3.1 直流电机的用途及基本工作原理	24
3.2 直流电机的主要结构与型号	26
3.3 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性	31
3.4 直流电机的电枢绕组	35
3.5 电枢电动势与电磁转矩	42
3.6 直流发电机	45
3.7 直流电动机运行原理	51
3.8 他励直流电动机的机械特性	56
3.9 串励和复励直流电动机	62
3.10 直流电机的换向	64
思考题	65
习题	66
第 4 章 他励直流电动机的运行	68
4.1 他励直流电动机的起动	68
4.2 他励直流电动机的调速	69
4.3 他励直流电动机的电动与制动运行	81
4.4 电力拖动系统的过渡过程	92
思考题	105
习题	107
第 5 章 变压器	110
5.1 概述	110
5.2 变压器的空载运行	115
5.3 变压器的负载运行	122
5.4 标么值	137
5.5 变压器参数的测定	139
5.6 变压器的运行特性	143

5.7	变压器的联结组别	148
5.8	变压器的并联运行	154
5.9	自耦变压器	159
5.10	仪用互感器	160
5.11	电焊变压器	165
	思考题	165
	习题	169
第6章	交流电机电枢绕组的电动势与磁通势	173
6.1	交流电机电枢绕组的电动势	173
6.2	交流电机电枢绕组	181
6.3	交流电机电枢单相绕组产生的磁通势	190
6.4	三相电枢绕组产生的磁通势	200
6.5	两相电枢绕组产生的磁通势	206
	思考题	210
	习题	213
第7章	异步电动机原理	215
7.1	异步电动机结构、额定数据与工作原理	215
7.2	三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	221
7.3	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	227
7.4	三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	234
7.5	三相异步电动机的功率与转矩	242
7.6	三相异步电动机的机械特性	246
7.7	三相异步电动机的工作特性及其测试方法	254
7.8	三相异步电动机参数的测定	256
	思考题	258
	习题	260
第8章	三相异步电动机的起动与制动	263
8.1	三相异步电动机的直接起动	263
8.2	三相鼠笼式异步电动机降压起动	265
8.3	高起动转矩的三相鼠笼式异步电动机	272
8.4	绕线式三相异步电动机的起动	275
8.5	三相异步电动机的各种运行状态	281
	思考题	296
	习题	298
第9章	同步电动机	300
9.1	概述	300
9.2	同步电动机的电磁关系	301
9.3	同步电动机的功率关系与矩角特性	307
9.4	同步电动机功率因数的调节	312
9.5	同步电动机的起动	316
	思考题	317
	习题	318

第 10 章 三相交流电动机调速	319
10.1 降电压调速	319
10.2 绕线式异步电动机转子回路串电阻调速	321
10.3 鼠笼式三相异步电动机变极调速	322
10.4 变频调速	328
10.5 电磁转差离合器	332
10.6 绕线式异步电动机双馈调速及串级调速原理	334
10.7 自控式同步电动机	340
思考题	346
习题	348
第 11 章 电动机的选择	350
11.1 电动机的一般选择	350
11.2 电动机的发热与温升	353
11.3 电动机的额定功率	355
11.4 电动机额定功率的选择	358
思考题	370
习题	372
第 12 章 微控电机	374
12.1 单相异步电动机	374
12.2 伺服电动机	380
12.3 力矩电动机	385
12.4 微型同步电动机	386
12.5 步进电动机	389
12.6 旋转变压器	396
12.7 自整角机	397
12.8 测速发电机	403
思考题	405
习题	406
参考书目	407

第1章 绪 论

1.1 教材内容与课程性质

电机与拖动基础教材是把电机学和电力拖动基础两门课程有机结合为一门课程的教材。

电能易于转换、传输、分配和控制,是现代能源的主要形式。电能的生产是由发电机完成的,发电机把机械能转换为电能。而电能的生产集中在火力、水力及原子能发电厂进行,为了减少输电中的能量损失,远距离输电均采用高电压,然后经降压再供给用户,电压的升高和降低都是由变压器完成的。电能转换为机械能主要由电动机完成,电动机拖动生产机械运转称为**电力拖动**。由于①电动机效率高,运转经济;②电动机种类和规格很多,具有各种良好的特性,能较好地满足大多数生产机械的不同需要;③电力拖动易于操作和控制,可以实现自动控制和远距离控制……因此,在现代化生产中多数生产机械都采用电力拖动。例如各种生产机床、轧钢机、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、榨油机、碾米机、水泵、电动工具……乃至家用电器等,数不胜数。在电力拖动自动控制系统中,大量应用控制电机。控制电机是具有特殊性能、容量很小的电机。

本教材以电力拖动系统中采用最广泛的电机及电力拖动为重点。对电机原理及特性这部分内容,从选材、重点及阐述方法各方面都有别于一般电机学的传统作法,本教材强调基本理论,突出实用性。

电机与电力拖动基础课是工业电气自动化专业和非电机专业最主要的技术基础理论课,为学习自动控制系统等专业课打下坚实基础,同时,课程又带有专业性。

1.2 本课程常用的物理概念和定律

为学习本课程,先复习在先修课中讲过的几个常用的物理概念和定律。

1.2.1 磁感应强度(或磁通密度) B

磁场是由电流产生的。描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B 。为了形象地描绘磁场,采用磁感应线或称磁力线,磁力线是无头无尾的闭合曲线。图1.1中画出了直线电流,圆电流及螺线管电流产生的磁力线。

磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述,磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系,如图1.2所示。

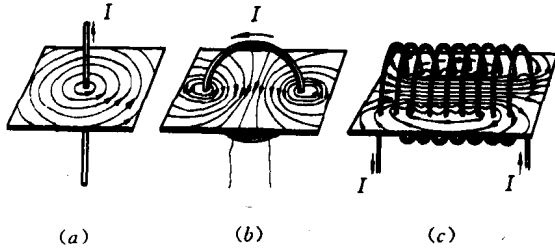


图 1.1 电流磁场中的磁力线

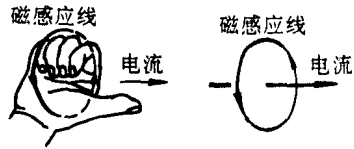


图 1.2 磁力线与电流的右手螺旋关系

1.2.2 磁感应通量(或磁通) Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量,即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁感应通量,简称磁通,用 Φ 表示。即

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

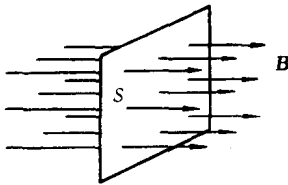


图 1.3 均匀磁场中的磁通

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,如图 1.3 所示,则上式变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S}$$

B 为单位面积上的磁通,称为磁通密度,简称磁密,在电机和变压器中常采用磁密。在国际单位制中, Φ 的单位名称为韦[伯]单位符号 Wb ; B 的单位名称为[特斯拉],单位符号 T , $1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

1.2.3 磁场强度 H

计算导磁物质中的磁场时,引入辅助物理量磁场强度 H ,它与磁密 B 的关系为

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$

式中 μ 为导磁物质的磁导率。真空的磁导率为 μ_0 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$,例如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1000 倍,各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6000~7000 倍。国际单位制中磁场强度 H 的单位名称为安[培]/米,单位符号 A/m 。

1.2.4 安培环路定律

在磁场中,沿任意一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所环链的所有电流的代数和,即

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

式中 $\sum I$ 就是该磁路所包围的全电流,因此,这个定律也叫全电流定律。工程应用中遇到的磁路,其几何形状是比较复杂的,直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的困难。为此,在计算磁路时,要进行简化。简化的办法是把磁路分成几段,几何形状规则的

为一段,找出它的平均磁场强度,再乘上这段磁路的平均长度,得磁位降(也可理解为一段磁路所消耗的磁通势)。最后把各段磁路的磁位降加起来,就等于总磁通势。即

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum I = IW$$

式中 H_k 是磁路里第 k 段磁路的磁场强度(A/m);

l_k 是第 k 段磁路的平均长度(m);

IW 是作用在整个磁路上的磁通势,即全电流数(安匝);

W 是励磁线圈的匝数。

上式也可以理解为,消耗在任一闭合磁回路上的磁通势,等于该磁路所链着的全部电流。

1.2.5 铁磁材料的磁化特性

铁磁材料(如铁、镍、钴等)的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千到几万倍。对于铁磁材料,磁导率 μ 除了比 μ_0 大得多外,还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关,所以铁磁材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时,不按 $H=B/\mu$ 进行计算,而是事先把各种铁磁材料用试验的方法,测出它们在不同磁场强度 H 下对应的磁密 B ,并画成 $B-H$ 曲线,称为磁化曲线,如图 1.4 所示。从图 1.4(a)曲线 1,3 看出,铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是单值的,而是具有磁滞回线的特点,即在同一个大小的磁场强度 H 下,对应着两个磁密 B 值,这就是说,究竟是对应着哪一个磁密 B 值,还要看铁磁材料工作状态的历史情况。当铁磁材料的磁滞回线较窄时,可以用它的平均磁化曲线,即基本磁化曲线[见图 1.4(a)中曲线 2]来进行计算。这样 B 与 H 之间便呈现了单值关系。顺便还要指出,磁化特性的另一个特点是具有饱和性。图 1.4(b)是铁磁材料的原始磁化特性,它与平均磁化特性相差甚小。当磁场强度从零增大时,磁密 B 随磁场强度 H 增加较慢(图中 Oa 段),之后,磁密 B 随 H 的增加而迅速增大(ab 段),过了 b 点, B 的增加减慢了(bc 段),最后为 cd 段,又呈直线。其中 a 称为跗点, b 点为膝点, c 点为饱和点。过了饱和点 c ,铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。

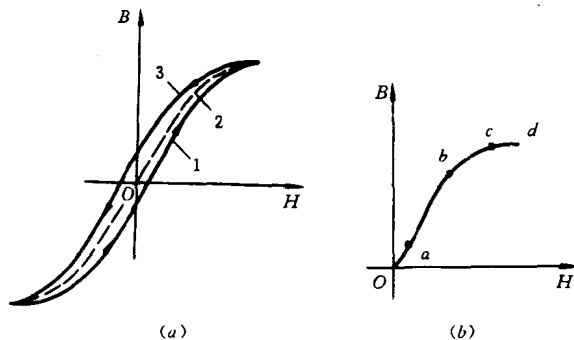


图 1.4 铁磁材料的磁化特性

1——磁滞回线上升分支; 2——平均磁化特性; 3——磁滞回线下降分支

磁滞回线较窄的铁磁材料属于软磁材料,如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高,回线包围面积小,磁滞损耗小,多用于做电机、变压器的铁心。硬磁材料,如钨钢、钴钢等,其磁滞回线较宽,主要用做永久磁铁。

1.2.6 简单磁路的计算方法

图 1.5 是一个最简单的磁路,它是由铁磁材料和空气两部分串联而成。铁心上绕了匝数为 W 的线圈称为励磁线圈,线圈电流为 I 。进行磁路计算时,把这个磁路按材料及形状分成两段,一段截面积为 S 的铁心,长度为 l ,磁场强度为 H ;另一段是空气,长度为 δ ,磁场强度为 H_0 。根据安培环路定律,则

$$Hl + H_0\delta = IW$$

在电机或变压器里,磁路计算时,已知的是磁路里各段的磁通 Φ 以及各段磁路的几何尺寸(即磁路长度与横截面),求出所需的总磁通势 IW 。从上式看出,磁路长度 l 、 δ 以及匝数 W 是已知的,要求出电流 I ,必须先找出各段磁路的 H 和 H_0 。具体计算时,根据给定各段磁路里的磁通 Φ ,先算出各段磁路中对应的磁通密度 B ($B = \frac{\Phi}{S}$, S 是截面积),然后根据算出的磁通密度 B ,求磁场强度 H ($H = \frac{B}{\mu}$)。

如果是铁磁材料,可以根据其磁化特性查出磁场强度 H 。

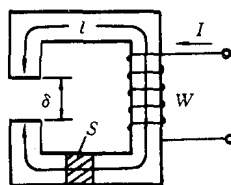


图 1.5 简单磁路

1.2.7 载流导体在磁场中的安培力

磁场对场中载流导线施加的力称为安培力,通以电流 i 的导线上取一小段为电流元,电流元受安培力的大小及方向由安培定律来描述,为

$$df = idl \times B$$

式中 dl 为线元; idl 为电流元,方向同电流 i 的方向; B 为电流元所在处的磁感应强度; df 为磁场对电流元的作用力。

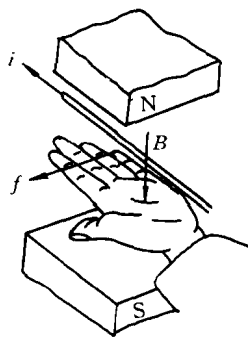


图 1.6 确定载流导体受力方向的左手定则

在均匀磁场中,若载流直导线与 B 方向垂直、长度为 l ,流过的电流为 i ,载流导线所受的力为 f ,则

$$f = Bli$$

在电机学中习惯上用左手定则确定 f 的方向,即把左手伸开,大姆指与其他四指成 90° ,如图 1.6 所示,如果磁力线指向手心,其他四指指向导线中电流的方向,大姆指指向就是导线受力的方向。

1.2.8 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场,使导体中产生感应电动势,这就是电磁感应现象。在电机中电磁感应现象主要表现在两

个方面:①导线与磁场有相对运动,导线切割磁力线时,导线内产生感应电动势,称之为切割电动势;②线圈中的磁通变化时,线圈内产生感应电动势。下面介绍这两种情况下产生的感应电动势的定性与定量的描述。

1. 切割电动势

长度为 l 的直导线在磁场中与磁场相对运动,导线切割磁力线的速度为 v ,导线处的磁感应强度为 B 时,若磁场均匀、直导线 l 、磁感应强度 B 、导线相对运动方向 v 三者互相垂直,则导线中感应电动势为

$$e = Blv$$

在电机学中,习惯上用右手定则确定电动势 e 的方向,即把右手手掌伸开,大拇指与其他四指成 90° 角,如图 1.7 所示,如果让磁力线指向手心,大拇指指向导线运动方向,其他四指的指向就是导线中感应电动势的方向。

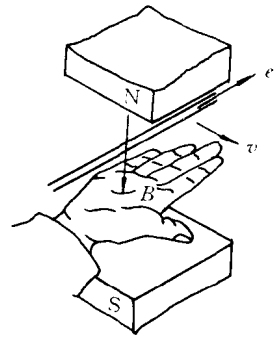


图 1.7 确定感应电动势方向的右手定则

2. 变压器电动势

图 1.8 所示,匝数为 W 的线圈环链着磁通 Φ ,当 Φ 变化时,线圈 AX 两端感应电动势 e ,其大小与线圈匝数及磁通变化率成正比。方向由楞次定律决定。当 Φ 增加时,即 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$, A 点为高电位, X 点为低电位;当 Φ 减小时,即 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$,根据楞次定律, X 点为高电位、 A 点为低电位。为了写成数学表达式,首先要规定电动势 e 的正方向,有以下两种规定方法。

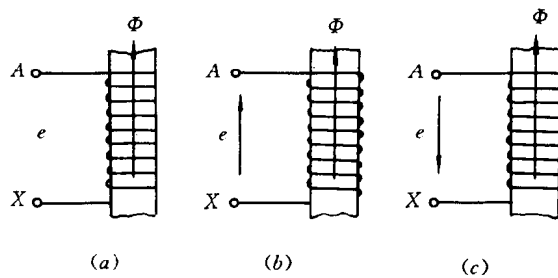


图 1.8 磁通及其感应电动势

(1) 按左手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1.8(b)所示,此时 e 的正方向从 X 指向 A 。与实际情况比较,当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时,实际上是 A 点高电位, X 点低电位,而规定的 e 的正方向与之相同,这样 $e > 0$;当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时,实际上是 A 点低电位, X 点高电位,而规定的 e 的方向与之正好相反,因此 $e < 0$ 。也就是说, $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 的符号是一致的,同时为正或同时为负,这样, e 和 Φ 之间的关系就应写为

$$e = W \frac{d\Phi}{dt}$$

(2) 按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

如图 1.8(c) 所示, 此时 e 的正方向从 A 指向 X 。与实际情况比较, 当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时, 实际上 A 点为高电位, X 点为低电位, 而规定的 e 的正方向与实际方向相反, 此时 $e < 0$; 显然, 当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时, $e > 0$ 。这就是说 $\frac{d\Phi}{dt}$ 与 e 总是不同符号, e 与 Φ 的关系式就应写成为

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}$$

以上两种不同正方向的规定下, 数学式的符号不同。

第 2 章 电力拖动系统动力学

2.1 电力拖动系统转动方程式

电动机能够作为原动机拖动生产机械运转的原因是:电动机通常由定子(不转动部分)和转子(旋转部分)组成,电动机接通电源后,转子槽内的线圈便在磁场中受力,转子产生了电磁转矩,这样便可以旋转起来,并且向转子轴上的负载输出机械功率。

电动机转子旋转时,转子本身由于风阻、轴承摩擦等原因有一些损耗,称之为空载损耗。电动机若不拖动负载即空载运行,空载损耗也存在;电动机负载运行时,空载损耗仍然存在,因此电动机输出的转矩就比电磁转矩小,相差一个空载转矩。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成,如图 2.1 所示。

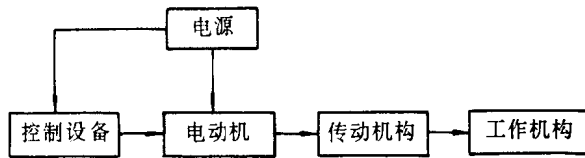


图 2.1 电力拖动系统组成

最简单的电力拖动系统是电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连,工作机构是电动机的负载,这种简单系统称为单轴电力拖动系统,电动机与负载为一个轴、同一转速。

图 2.2 所示的为单轴电力拖动系统,图中标示的物理量主要有: n ——电动机转速, T ——电动机电磁转矩, T_0 ——电动机空载转矩, T_F ——工作机构(负载)的转矩。在图中还标注各量的正方向。为了分析问题的方便,通常称 $T_F + T_0 = T_L$ 为负载转矩,分析电力拖动系统运行时,所指负载转矩即为 T_L 。在上述正方向规定中,若转速、电磁转矩、负载转矩都为正值,那么电磁转矩是拖动性质的转矩,负载转矩属制动性质的转矩。电动机负载运行时,一般情况下 $T_F \gg T_0$,可以忽略 T_0 ,认为 $T_L = T_F$ 。

转速的单位名称为[转/分],单位符号为 r/min,转矩的单位名称为[牛·米],单位符号为 N·m。

如图 2.2 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

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

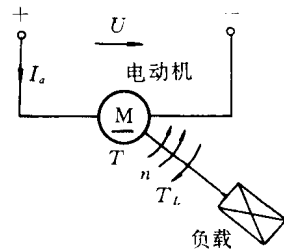


图 2.2 单轴电力拖动系统

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 的关系是

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

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g}$$

式中 m 为系统转动部分的质量,单位为 kg;
 G 为系统转动部分的重力,单位为 N;
 ρ 为系统转动部分的转动惯性半径,单位为 m;
 D 为系统转动部分的转动惯性直径,单位为 m;
 g 为重力加速度,北京地区取 $g=9.80\text{m/s}^2$ 。

把上边两式代入转动方程,化简后得

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

式中 GD^2 为转动部分的飞轮矩,它是一个物理量,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^2$;
 系数 375 是个有单位的系数,单位为 $\text{m}/\text{min} \cdot \text{s}$;
 转矩的单位仍为 $\text{N} \cdot \text{m}$,转速的单位仍为 r/min 。

我们称 $(T - T_L)$ 为动转矩。动转矩等于零时,系统处于恒转速运行的稳态;动转矩大于零时,系统处于加速运动的过渡过程中;动转矩小于零时,系统处于减速运动的过渡过程中。

实际的电力拖动系统,大多数是电动机通过传动机构与工作机构相连。图 2.3(a) 所

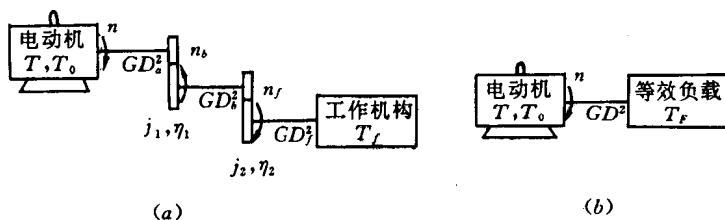


图 2.3 电力拖动系统的简化

示的电力拖动系统,传动机构为二级齿轮减速机构,其速比为 j_1, j_2 ,传动效率为 η_1, η_2 。这个系统中,有三根转速不相同的转轴,其转速分别为 n, n_b 和 n_f 。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 2.3(a) 所示的多轴系统,简化为(或变为)图 2.3(b)所示的单轴系统,把负载转矩 T_f 折算到电动机轴上变成为 T_F ,这时 T_F 可看成为一个等效负载的负载转矩;把系统各轴上的飞轮矩折算到电动机轴上变成为一个总飞轮矩 GD^2 。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_f 求出等效的负载转矩 T_F ,称为负载转矩的折算,从已知的各转轴上的飞轮矩 GD_a^2 、 GD_b^2 、 GD_f^2 求出系统的总飞轮矩 GD^2 ,称为系统飞轮矩的折算。

2.2 多轴电力拖动系统的简化

2.2.1 工作机构为转动情况时,转矩与飞轮矩的折算

1. 转矩的折算

多轴电力拖动系统中,如果不考虑传动机构的损耗时,工作机构折算前的机械功率为 $T_f\Omega_f$,折算后的机械功率为 $T_F\Omega$,折算的原则是折算前后功率不变,因此

$$\begin{aligned} T_f\Omega_f &= T_F\Omega \\ T_F &= \frac{T_f\Omega_f}{\Omega} = \frac{T_f n_f}{n} = \frac{T_f}{j} \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 Ω_f 为工作机构转轴的角速度;

Ω 为电动机轴的角速度;

T_f 为工作机构的实际负载转矩;

T_F 为工作机构负载转矩折算到电动机轴上的折算值;

$j = \frac{n}{n_f}$ 为传动机构总的速比,写成一般形式为 $j = j_1 j_2 j_3 \dots$,等于各级速比乘积,图

2.3 所示系统中 $j = j_1 j_2$ 。

式(2-2)说明,转矩按照转速的反比来折算。

若考虑传动机构的传动效率,根据功率不变的原则,负载转矩的折算值还要加大,为

$$T_F = \frac{T_f}{j\eta} \quad (2-3)$$

式中, η 为传动机构总效率,等于各级传动效率乘积, $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$ 。图 2.3 所示系统中, $\eta = \eta_1 \eta_2$ 。

式(2-2)与式(2-3)为工作机构转矩的折算关系式。显然,上两式转矩折合值之差为

$$\frac{T_f}{j\eta} - \frac{T_f}{j} = \Delta T$$

式中 ΔT 为传动机构转矩损耗。图 2.3 所示电力拖动系统中,负载由电动机拖着转,电磁转矩为拖动性转矩, ΔT 由电动机负担。

2. 飞轮矩的折算

飞轮矩的大小是运动物体机械惯性大小的体现。旋转物体的动能大小为

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

以图 2.3 所示系统为例,其工作机构转轴的飞轮矩为 GD_f^2 ,动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_f^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n_f}{60} \right)^2$$

折合到电动机轴上以后的飞轮矩为 GD_F^2 (亦称 GD_F^2 为 GD_f^2 的折算值),折算后其动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$$

折算的原则是折算前后该轴的动能不变,即

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_f^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n_f}{60}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$$

化简后得到

$$GD_F^2 = \frac{GD_f^2}{j^2} \quad (2-4)$$

式(2-4)为负载轴上飞轮矩的折算公式。该式说明,飞轮矩的折算按照转速平方的反比进行的。

传动机构中还有转速为 n_b 的轴,其轴上各部分的总飞轮矩实际值为 GD_b^2 ,动能是

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_b^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n_b}{60}\right)^2$$

折合到电动机轴上以后的飞轮矩为 GD_B^2 ,其动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_B^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$$

根据折算前后该轴动能不变的原则,有

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_b^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n_b}{60}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_B^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$$

$$GD_B^2 = \frac{GD_b^2}{j_1^2} \quad (2-5)$$

式(2-4)和(2-5)是一致的。飞轮矩折算时,其折算值为实际值除以速比的平方,注意不同转速的轴其速比也不一样。

从上面分析的结果可以得到整个电力拖动系统折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD^2 ,也就是简化后的系统转轴的飞轮矩,为

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_f^2}{(j_1 j_2)^2}$$

写成一般形式为

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{GD_f^2}{j^2}$$

一般地说,传动机构各轴以及工作机构转轴的转速要比电动机轴的转速低,飞轮矩的折算与转速平方成反比,因此尽管可能有多根轴,但它们的飞轮矩折算到电动机轴上后数值不大,是系统总飞轮矩中的次要部分。而电动机转子本身的飞轮矩,却是系统总飞轮矩中的主要部分,其值可以从产品目录中查到。因此,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:

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

式中 GD_b^2 是电动机转子的飞轮矩。若电动机轴上只有传动机构中第一级小齿轮时,取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$,如果电动机轴上有其他部件如抱闸等, δ 的数值需要加大。

例题 2-1 图 2.3(a)所示的电力拖动系统中,已知飞轮矩 $GD_a^2 = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,