

电气 传动 与 调速 系统



Dianqi
Chuandong
Yu
Tiaosu
Xitong

彭志瑾 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书讨论直流电气传动、功率变流技术及调速系统等方面的知识。
内容包括：直流电力拖动基础；交磁电机放大机传动系统；可控硅传动系统；电力晶体管传动系统；直流电气传动系统控制；电气传动控制系统的设计；电气传动控制系统的数字仿真和直流传动系统实际线路。

本书可供高等院校自动控制专业和工业电气自动化专业学生使用。
也可供工矿企业从事工业电气自动化工作的技术人员参考。

电气传动与调速系统

彭志瑾 编著

★

北京理工大学出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防科工委 印刷厂印刷

★

850×1168毫米 32开本 13.25印张 341千字
1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷
ISBN 7-81013-077-3 /TP·7
印数：1—6000册 定价：3.15元

前 言

为提高劳动效率和产品质量,国民经济各部门广泛地应用着各类电气传动控制系统,其中很大一类属于直流电气传动。因此,深入研究直流电气传动系统的组成及控制特点不仅有实际意义,而且对进一步研究交流电气传动系统也有帮助。

本书以直流电气传动为基点,从直流电力拖动基础入手,研究了直流传动常用的三种驱动技术,即交磁电机放大机传动系统,可控硅传动系统,电力晶体管传动系统。在此基础上,以可控硅传动系统为主研究了传动系统的各种控制原理及工程设计的基本方法。为了分析和改善电气传动控制系统的动态品质,本书还讨论了数字仿真方法。最后本书还给出了几种实际线路供参考。

以上编排是根据我们的教学实践安排的,由于水平和能力所限,错误之处难免,恳请读者指正。

经征弟副教授在审阅中提出的许多宝贵意见,对此表示衷心的感谢!

编者

1988. 2

目 录

第一章 直流电力拖动基础

§1-1 电力拖动概述	1
1-1-1 电机机械特性和负载转矩特性	1
1-1-2 基本运动方程式	5
1-1-3 转矩的折算	8
1-1-4 转动惯量计算与实验测定	10
§1-2 直流它励电动机的机械特性	13
1-2-1 直流它励电动机固有特性	13
1-2-2 直流它励电动机人为特性	16
1-2-3 机械特性的绘制	18
§1-3 直流它励电动机的起动	20
1-3-1 它励电动机的起动	21
1-3-2 起动电阻的计算	23
1-3-3 起动过渡过程分析	24
§1-4 直流它励电动机的制动	26
1-4-1 能耗制动	27
1-4-2 反接制动	29
1-4-3 回馈(再生、发电)制动	31
1-4-4 电机运行状态小结	33
§1-5 直流它励电动机的转速调节	36
1-5-1 直流调速方法	36
1-5-2 调速性能指标	38
1-5-3 调速过程中电机转矩和功率的配合	40
§1-6 直流它励电动机数学模型	42
习题与思考题	

第二章 电机放大机传动系统

§2-1 电机放大机原理和工作特性	48
2-1-1 电机放大机的工作原理	48
2-1-2 电机放大机的工作特性	50

§2-2 电机放大机的动态模型.....	53
2-2-1 空载动态模型.....	53
2-2-2 负载动态模型.....	56
§2-3 电机放大机传动系统.....	57
2-3-1 电机放大机-电动机系统.....	57
2-3-2 电机放大机传动系统的稳态分析.....	58
2-3-3 电机放大机传动系统的动态分析.....	60
2-3-4 电机放大机的参数选择.....	62

习题与思考题

附录 ZKK型交磁电机放大机的主要技术数据

第三章 可控硅传动系统

§3-1 可控硅元件工作原理和主要技术参数.....	73
3-1-1 可控硅原理及伏安特性.....	73
3-1-2 可控硅的主要技术参数.....	79
§3-2 可控硅整流电路.....	84
3-2-1 单相半波可控整流电路.....	84
3-2-2 单相桥式可控整流电路.....	90
3-2-3 三相半波可控整流电路.....	94
3-2-4 三相桥式可控整流电路.....	98
3-2-5 可控硅整流电路的换相压降和外特性.....	103
3-2-6 可控硅整流电路的功率因数和谐波分量.....	108
§3-3 可控硅触发电路.....	109
3-3-1 单结晶体管触发电路.....	111
3-3-2 正弦波垂直移相控制触发电路.....	115
3-3-3 锯齿波垂直移相控制触发电路.....	117
3-3-4 触发脉冲与主回路电源电压的同步.....	120
§3-4 可控硅-电动机传动系统.....	122
3-4-1 可控硅不可逆传动系统.....	123
3-4-2 可控硅可逆传动系统.....	135
§3-5 可控硅传动系统的传递函数.....	143
3-5-1 可控硅触发和整流装置的传递函数.....	143
3-5-2 可控硅供电的电动机传递函数分析.....	147
§3-6 可控硅整流电路的设计及保护.....	149

3-6-1 可控硅整流电路设计	149
3-6-2 可控硅的保护	152
习题与思考题	

第四章 电力晶体管传动系统

§4-1 放大型电力晶体管传动系统	165
4-1-1 电力晶体管不可逆传动系统	165
4-1-2 电力晶体管可逆传动系统	170
4-1-3 传动系统的电流限制和晶体管的二次击穿	175
§4-2 放大型电力晶体管功率放大器的设计	180
4-2-1 设计步骤	180
4-2-2 设计举例	181
§4-3 开关型电力晶体管传动系统	184
4-3-1 开关型不可逆电力晶体管传动系统	185
4-3-2 开关型可逆电力晶体管传动系统	194
4-3-3 泵升电压及能量泄放电路	201
4-3-4 电动机的功耗和电流波形因数	202
4-3-5 主回路附加电感的设计	204
§4-4 开关型功率放大器电路设计	208
4-4-1 PTR器件及其运行特性	208
4-4-2 PTR开关过程分析及功耗计算	209
4-4-3 PTR驱动电路设计	219
4-4-4 开关型放大器缓冲电路设计	223
§4-5 脉冲宽度调制电路	225
4-5-1 开关频率选择	226
4-5-2 典型脉冲宽度调制器电路	227
4-5-3 脉冲宽度调制保护电路	233
习题与思考题	

第五章 直流电气传动系统控制

§5-1 电气传动系统用调节器	240
§5-2 转速负反馈控制系统	249
5-2-1 有静差单闭环调速系统	250
5-2-2 无静差单闭环调速系统	255

§5-3 转矩限制与电枢电流控制系统	257
5-3-1 电流截止负反馈系统	258
5-3-2 电枢电流控制系统	262
§5-4 典型的双环控制调速系统	266
5-4-1 典型双环调速系统	266
5-4-2 典型双环调速系统启动过程分析	268
§5-5 其他类型的电气传动控制系统	271
5-5-1 其他类型的双环控制系统	271
5-5-2 三环控制系统	274
5-5-3 电流-转速-位置三环控制系统	278
§5-6 直流可逆电气传动系统的控制	279
5-6-1 有环流可逆调速系统的控制	279
5-6-2 可控环流可逆系统的控制	283
5-6-3 逻辑无环流可逆系统的控制	284
5-6-4 错位无环流可逆系统的控制	290

习题与思考题

第六章 电气传动控制系统的工程设计

§6-1 动态性能指标与典型系统	300
6-1-1 给定量作用下的动态性能和指标	300
6-1-2 典型Ⅰ型系统和输出阶跃响应指标	303
6-1-3 典型Ⅱ型系统和输出阶跃响应指标	306
6-1-4 振荡指标法的改进——引入信号变换装置	311
§6-2 典型系统的扰动性能分析	315
6-2-1 扰动量作用下的动态性能和指标	315
6-2-2 扰动量的变换	316
6-2-3 典型Ⅱ型系统扰动性能分析	319
6-2-4 典型Ⅰ型系统的扰动性能	325
§6-3 非典型系统的典型化——调节器校正	326
6-3-1 电气传动系统的等值处理	327
6-3-2 实际系统典型化——调节器的选择	332
6-3-3 饱和超调分析及反馈式调节器的应用	334
§6-4 工程设计举例	340
6-4-1 电流-转速双环系统	341

§4-2 位置随动系统.....	347
习题与思考题	

第七章 电气传动控制系统的数字仿真

§7-1 连续系统结构图法数字仿真.....	352
§7-2 连续系统离散相似法数字仿真.....	362
附录 I 线性系统结构图仿真主程序.....	376
附录 II 非线性环节仿真子程序.....	382
附录 III 离散相似法数字仿真主程序.....	383

第八章 直流传动控制系统实际线路

§8-1 放大型GTR-D小功率随动系统.....	389
§8-2 开关型PTR-D速度控制系统.....	391
8-2-1 系统的组成及原理.....	391
8-2-2 系统的动态结构图.....	395
§8-3 伺服系统用可控硅直流调速单元.....	398
8-3-1 可控硅直流调速系统结构及原理.....	399
8-3-2 系统控制用触发电路.....	401
8-3-3 系统的方向控制及换向过程分析.....	407
主要参考文献	

第一章 直流电力拖动基础

以直流电动机为动力，带动控制对象运动的电气传动，习惯上常称之为“直流电力拖动”，研究各种状态下电机与控制对象间的转矩关系，以及转矩与转速间的关系就成为电力拖动的中心议题。

§1-1 电力拖动概述

1-1-1 电机机械特性和负载转矩特性

一、电动机的机械特性

在电力拖动中，把执行电机的转速 n 与电磁转矩 M 的关系称为机械特性，表示为 $n=f(M)$ 。该特性反映了电机本身的性能。不同类型的直流电动机有不同的机械特性。定义单位转矩的转速降为特性的斜率，表示为 $\beta=\Delta n/\Delta M$ 。依特性的斜率，电机机械特性可以用图 1-1-1 表示，并分为三种情况

1. 绝对硬特性 亦称理想特性（曲线 1）转矩变化，转速不变， $\Delta n=0$ ， $\beta=0$ 。直流复励电机完全补偿时如此，若过补偿可能出现特性上翘，至使不能稳定运行。所以绝对硬特性也叫“临界”特性，在直流开环传动中很少用此特性。

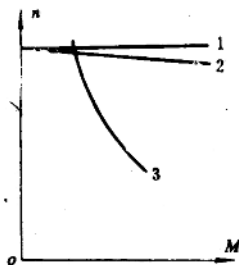


图1-1-1 电机机械特性

2 硬特性(曲线2)转矩变化时转速波动小, β 约在0.025至0.1间。直流它励电机和并励电机属于此类。

3 软特性(曲线3)随着转矩的变化,转速的波动很大,表现为电机抗扰动的能力差。通常 $\beta > 0.1$ 。如直流串励电动机的机械特性,或者它励电动机主回路串电阻的特性。

二、负载转矩特性

控制对象的负载转矩 M_L 与转速 n 之间的关系就是负载的转矩特性。也可表示为 $M_L = f(n)$ 。控制对象尽管各异,但可归纳为以下几种典型负载。

1. 恒转矩负载特性(如图1-1-2)负载转矩 M_L 与转速 n 无关,当转速变化时 M_L 维持恒定。恒转矩负载特性有反抗性的[如图1-1-2(a)]和位能性的[如图1-1-2(b)]两种。

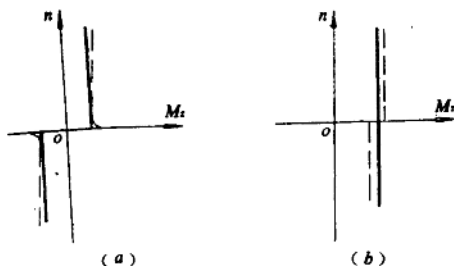


图1-1-2 负载转矩特性

(a) 反抗性 (b) 位能性

反抗性恒转矩负载特性的特点是,恒值转矩总是反对运动方向。大多数负载的摩擦阻转矩即属于此类。显然因为转速的方向改变,负载转矩的符号也随之改变,它们的图象位于第一、三象限。在工作机械中还有一类恒转矩反抗性负载,其转矩是转角的周期性函数,例如活塞式压缩机、冲床等。这种类型转矩可按平均转矩考虑,在机械上用飞轮(大惯性)作为储能元件来平滑转

矩的脉动。

位能性恒转矩负载特性与反抗性特性不同，特点是，负载转矩的方向不随转速的方向而改变。最典型的是起重机负载，它的图象位于第一、四象限。

考虑到动静磨擦以及油膜的影响，实际特性如图 1-1-2 中虚线所示。

2. 通风机负载特性 如图 1-1-3 曲线 1 所示。负载转矩大致与转速的平方成正比，即 $M_z = Kn^2$ 。K 为比例系数。这类负载如通风机、水泵、油泵等，其中空气、水、油等介质对叶片的阻力基本上和转速的平方成正比，实际上也有干磨擦存在，如图中虚线所示。

3. 恒功率负载特性 如图 1-1-3 曲线 2，转矩与转速成反比，即 $M_z = K/n$ ，K 为比例系数。例如车床在粗加工时往往为低转速大切削量，而精加工时又经常用高速小切削量加工，因此在不同转速下，负载转矩基本上与转速成反比。因为 $P_z = M_z \Omega = M_z (2n\pi/60)$ ，可见只要维持负载转矩与转速的乘积不变，就能维持功率基本不变。

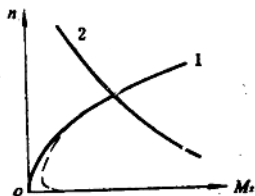


图 1-1-3 负载转矩特性

必须指出，实际负载特性往往是几种典型特性的综合，所以具体问题应具体分析。

三、稳定运行的条件

在电力拖动系统中，电动机与控制对象间或者直接相联，或者通过减速器、绳索、皮带、链条等装置构成传动系统。为了使系统运行合理，就要使电机的机械特性与控制对象的负载特性尽量相配合。特性配合好的一个起码要求是系统在稳态时能稳定运行。

电动机带动控制对象稳态运行时, 电机的电磁转矩 M 与负载转矩 M_L 平衡。它表示作用转矩与阻转矩大小相等, 方向相反, 且转速为一定值。这种状态就是电机机械特性与负载特性的交点。

例如图1-1-4中的 A 点。在该点 $M = M_L$ 。

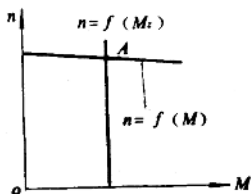


图1-1-4 机械特性与负载特性的配合

两特性具有交点是电力拖动系统稳定运行的必要条件, 但并不是充分条件。电机稳定运行后, 若由于某种扰动作用使转速稍有变化时, 一旦扰动去除后转速仍能恢复到原来的运行点, 这样的运行点才是稳定运行点。否则, 就不是稳定运行点。

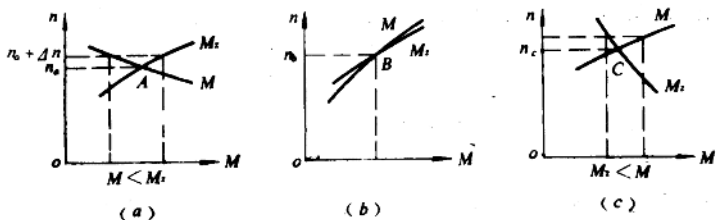


图1-1-5 $M(n)$ 与 $M_L(n)$ 配合的三种情况
(a) 稳定 (b) 临界 (c) 不稳定

常见的扰动有电源电压波动和负载波动等。

图1-1-5在 $M-n$ 平面内绘出了机械特性 $M(n)$ 和负载特性 $M_L(n)$ 在交点处配合的三种情况。图1-1-5(a)中, 若在 A 点以上转速有个增量 Δn , 对应 $M < M_L$, 在阻力矩作用下有恢复到 A 点的能力, 重新建立 $M = M_L$ 的平衡关系, 故 A 点为稳定运行点。在图1-1-5(c)中, 情况恰好相反, 出现 $M > M_L$ 的现象, 在 M 的作用下进一步偏离原交点 C , 故 C 点为不稳定运行点。图1-1-5(b)

中, B 点附近 $M = M_z$ 表示的是临界状况, 这时没有固定的运行点。

综上所述, 电力拖动系统稳定运行的条件是, $M(n)$ 及 $M_z(n)$ 两特性的交点是稳态运行点, 但只要在该点对应的转速之上有 $M < M_z$ 的关系, 而在对应转速之下有 $M > M_z$ 的关系时, 该点才是“稳定的”稳态运行点。也就是说, 只有这样的特性配合, 在受到外界扰动后才有恢复到原来的稳态运行点的能力。

以上研究的都是电力拖动系统的稳态情况, 即 $M = M_z$ 的情况, 那么 $M \neq M_z$ 时, 电力拖动系统就处于动态, 这正是下节将研究的问题。

1-1-2 基本运动方程式

如图 1-1-6 所示, 电力拖动系统的运动规律取决于电动机的电磁转矩 M 和负载转矩 M_z 之间的关系, 并符合刚体旋转的运动定律, 即

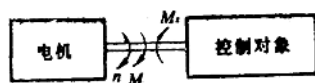


图1-1-6 电力拖动系统

$$M - M_z = d(J\Omega)/dt = Jd\Omega/dt + \Omega dJ/dt \quad (1-1-1)$$

式中 M 和 M_z 的单位为 $[N \cdot m]$; $J\Omega$ 为拖动系统 (包括电机和控制对象) 的总动量, 其中 J 为总转动惯量 $[kg \cdot m^2]$, Ω 为电机轴的角速度 $[rad/s]$; $d(J\Omega)/dt$ 表示动量矩, 它包括两部分, 其中 $\Omega dJ/dt$ 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。然而绝大多数情况可以认为总转动惯量为常数, 因此 (1-1-1) 式可简化为

$$M - M_z = Jd\Omega/dt \quad (1-1-2)$$

$d\Omega/dt$ 表示电机轴的角加速度 $[rad/s^2]$ 。(1-1-2) 式表明, 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。

应当指出 M 是指电磁转矩，而不是电机轴上的输出转矩。它们两者的差别是 M 中还包括加速电机本身惯性所需转矩和克服内部摩擦的转矩。

当 $M > M_r$ 时， $d\Omega/dt > 0$ ，系统加速；当 $M < M_r$ 时， $d\Omega/dt < 0$ ，系统减速。 $M = M_r$ 的情况使系统处于加速或减速的运动状态叫做动态。处于动态时必然存在一个动态转矩 M_d ，它使系统的运动状态发生变化。即

$$M_d = J d\Omega/dt \quad (1-1-3)$$

动态转矩，是速度发生变化时，由于转动系统要释放或吸收动能而产生的正、负转矩。因此 (1-1-1) 和 (1-1-2) 式可写成下述转矩平衡方程式

$$M - M_r = M_d \text{ 或 } M = M_r + M_d \quad (1-1-4)$$

也就是说电动机的电磁转矩 M 在任何情况下，总是被轴上的负载转矩 M_r 与动态转矩 M_d 之和所平衡。当 $M = M_r$ 时， $M_d = 0$ ，动态转矩为零，系统以恒速运动，这就是前面所说的稳态运行。稳态时，电机的电磁转矩的大小由控制对象亦即电动机的负载所决定。

工程计算中，往往不用转动惯量 J ，而用飞轮惯量 GD^2 。因为所有旋转物体的转动惯量都可写成 $J = m\rho^2 = mD^2/4$ 的形式，其中 ρ 与 D 分别定义为惯性半径和惯性直径[m]，而质量 m [kg]和重量 G [N]的关系是 $G = mg$ ， g 为重力加速度[m/s²]，所以 J 与 GD^2 有下列关系

$$J = mD^2/4 = GD^2/4g [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\text{或者} \quad GD^2 = 4gJ [\text{N} \cdot \text{m}^2] \quad (1-1-5)$$

应当注意，这里的 GD^2 应作为一个整体物理量看待， D 是指旋转体的惯性直径，而不是旋转体的外径。

还应指出，电动机转子的 GD^2 值，目前手册上仍沿用工程单

位制 $[\text{kgf}\cdot\text{m}^2]$ ，计算时应换算为国际单位制，换算关系是 $1[\text{kgf}\cdot\text{m}^2]=9.8[\text{N}\cdot\text{m}^2]$ 。所以只要将手册中查出的以工程单位表示的 GD^2 值乘以9.8即可得到以国际单位制表示的 GD' 值。

再将(1-1-2)式中的角速度 $\Omega[\text{rad/s}]$ 用常用的转速 $n[\text{r/min}]$ 表示。便可得出电力拖动系统在工程上常用的运动方程实用表达式形式

$$M - M_r = (GD^2/375) \, dn/dt \quad (1-1-6)$$

其中换算常数375具有加速度量纲。

关于基本运动方程式中转速和转矩的符号。

由于拖动系统有各种运转状态，相应地，运动方程式中的转速和转矩也有不同的符号。对单轴系统而言，电动机与控制对象同速旋转，所以一般以转动的方向为参考，来确定转矩的正负。设电动机某一旋转方向为正，则规定电动机电磁转矩 M 的方向与 n 同向为正，反向为负。 M 为正时是驱动转矩； M 为负时是制动转矩，起阻碍系统运动的作用。负载转矩 M_r 的规定符号与 M 相反，即与 n 反向为正，与 n 同向为负。就是说 M_r 为正时是制动转矩，阻碍运动；而 M_r 为负时是驱动转矩。

反抗性负载转矩因始终与运动方向相反，故在运动方程式中始终取正号。而位能性负载转矩，在提升重物时起制动作用取正号，而在下放重物时起驱动作用故取负号。

以上符号关系可以用图1-1-7轴端图表示。其中选择逆时针旋转方向为正。

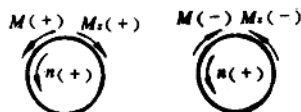


图1-1-7 轴端图

下面再从能量观点考察一下基本运动方程式(1-1-2)。以 Ω 乘(1-1-2)式，可以得到电力拖动系统的功率平衡方程式，即

$$M\Omega - M_s\Omega = J\Omega \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1-7)$$

其中 $M\Omega = P_d$ 是电动机电磁功率, 即驱动功率, $M_s\Omega = P_s$ 是负载功率, 而 $J\Omega \frac{d\Omega}{dt}$ 是旋转体所贮动能的变化。

将 (1-1-7) 式积分, 并代入初始条件 $\Omega(0) = 0$, 可得电力拖动系统的能量平衡方程式

$$\int_0^t P_d d\tau - \int_0^t P_s d\tau = \int_0^t J\Omega \frac{d\Omega}{d\tau} d\tau = J \int_0^{\Omega} \omega d\omega$$

$$\text{即} \quad W_d - W_s = \frac{1}{2} J\Omega^2 \quad (1-1-8)$$

上式表明, 在 $0-t$ 区间的动态过程中, 电动机克服负载所做的功等于储藏在拖动系统中的动能。类似于 $mv^2/2$ 、 $LI^2/2$ 及 $CU^2/2$ 等储能系统。上式还表明动能不能突变, 因为没有无穷大的功率源, 所以转速不能突变, 且为时间的连续函数。

1-1-3 转矩的折算

实际电力拖动系统, 在电动机与控制对象之间直接传动的情况较少, 电动机轴往往要经传动机构, 如齿轮减速箱、皮带、联轴结等与控制对象相连, 这就是常见的多轴转动。各轴的转速和惯性矩各不相同, 因此在分析和计算这类传动时, 必须将所有的转矩都折算到同一根轴上 (通常折算到电机轴上), 将实际系统等效为单轴系统 (图1-1-6)。然后才能使用基本运动方程式 (1-1-2) 或 (1-1-6) 式。

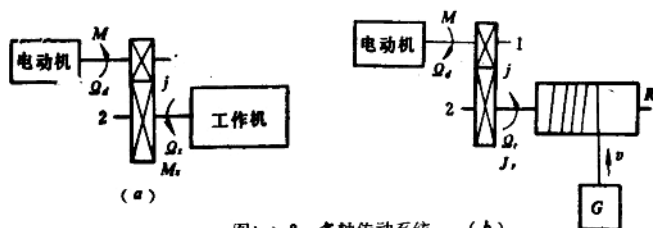


图1-1-8 多轴传动系统 (b)

图1-1-8(a)为简单双轴传动, (b)为带减速器的起重传动, 其中质量为 m 的重物 G 作直线运动; 卷筒半径为 R , 惯量为 J_z 。

一、转矩的折算

按照能量守恒定律, 折算至电动机轴上的负载功率应等于控制对象的负载功率加上传动机构中的损耗。以 M'_z 表示折算到电机轴上的负载转矩。则

$$M'_z \Omega_d = M_z \Omega_z / \eta \quad (\text{用于旋转运动负载})$$

$$\text{和} \quad M'_z \Omega_d = GR \Omega_z / \eta \quad (\text{用于直线运动负载})$$

其中 $\eta < 1$ 表示传递效率。

折算到电机轴上的转矩为

$$M'_z = M_z / j \eta \quad (1-1-9)$$

$$\text{和} \quad M'_z = GR / j \eta$$

$$\text{式中} \quad j = \Omega_d / \Omega_z \quad (1-1-10)$$

表示主动轴与从动轴的速比。

二、转动惯量(飞轮矩)的折算

由不同轴上转动惯量构成的动态转矩——惯性矩, 应按动能守恒规律折算。实质上动态转矩的折算就是转动惯量 J (或者飞轮矩 GD^2)的折算。以 J'_z 表示折算至电机轴上的负载转动惯量。则

$$J'_z \Omega_d^2 = J_z \Omega_z^2 \quad (\text{用于旋转运动})$$

$$\text{和} \quad J'_z \Omega_d^2 = J_z \Omega_z^2 + mv^2 \quad (\text{用于旋转加直线运动})$$

考虑到电动机的转动惯量 J_d (或飞轮矩 GD_d^2), 所以电动机轴上拖动系统的总惯量为

$$\text{或者} \quad J = J_d + J'_z = J_d + (J_z / j^2) \quad (1-1-11)$$

$$J = J_d + (J_z / j^2) + (mv^2 / \Omega_d^2)$$

若用飞轮矩表示(1-1-11)式可写为

$$GD^2 = GD_d^2 + (GD_z^2 / j^2)$$

$$\text{或者} \quad GD^2 = GD_d^2 + (GD_z^2 / j^2) + 365(Gv^2 / n_d^3) \quad (1-1-12)$$

式中 GD_z^2 为负载飞轮矩。

由(1-1-11)和(1-1-12)式可以看出, 对减速传动而言, 电机