

中等专业学校教学用书

黑色电冶車間电气設備

本溪鋼鐵学院編



中国工业出版社

前 言

本书是根据鋼与鉄合金电冶炼专业1959年指导性教育计划的要求編写的。內容除包括了原有“电冶炼車間的电气装备”部分的内容以外,还包括了原“檢驗測定与自动化”課程內的自动調节原理和电弧炉的自动調节部分,分量适合计划要求(75~80課时讲课,20課时实验与习题課)。为了減輕学生学习负担,力求篇幅精減,文字通順,重点突出,并着重物理意义的闡述。在不影响理論的系統性和完整性的基础上,加强課程內容与黑色电冶炼車間生产方面的联系。

在編写时,除了根据过去教学經驗和教学資料以外,还参考了有关学校的教材和讲义。为适应本专业技术发展需要,书中对有关电弧炉方面的新技术,如电弧炉的电磁攪拌和动态稳定的基本理論,也給予了足够的重視。在中专学生可能接受的基础上把这部分內容編写成附录附在章末,作为課外閱讀材料,以增进本专业学生对新技术基本原理和发展方向的了解。书中各章附有必要的結合专业的举例,和一定数量的习题,以帮助学生对課程內容的消化、巩固和运用。

根据大綱要求和过去教学經驗,編者建議讲授本书各章的时间分配如下:

時間分配表

順 序	課 程 內 容	总 时 数	其 中 包 括			
			讲	授	实 驗	习 題 課
1	緒論	2	2			
2	电力拖动的动力学基础	6	4			2
3	电动机的机械特性	12	6		4	2
4	电力拖动的速度調整	8	6		2	
5	电力拖动裝置电动机的选择	8	6			2
6	控制电器	6	4		2	
7	电力拖动的自动控制与线路	6	4		2	
8	电冶炼車間起重运输机械的电气装备	8	6			2
9	电弧炉的电气装备和工作特性	16(18)	14(16)			2
10	自动調节原理和电弧炉的自动調节	16	16			
11	高频感应炉的电气装备	2(5)	2(5)			
12	黑色电冶炼車間的供电	4	4			
13	机动	1				
	总时数	95(100)	74(79)	10		10

本书由本溪鋼鉄学院任雪竹、呂东岳編写,經有关领导同志审閱后定稿。由于編者水平有限,時間仓促,內容欠妥与錯誤之处可能不少,欢迎同志們批評指正。

編者 1961.5.

緒 論

黑色电冶炼工业的发展，除了炼钢技术本身的进步以外，很大的程度上依靠电冶炼車間电气装备的不断改进更新和新技术的采用。例如在1500千伏安的炼钢电弧炉上，仅仅由于装置了自动调节器代替了过去的人工操作，就使熔炼时间减少13~16%，电能消耗节省8~9%。又如最近在中等容量以上电弧炉上采用电磁搅拌装置的结果，更使每炉钢的熔炼时间缩短了20~30分钟，生产率增加了10%，同时也大大地減輕了人工出渣的劳动强度，提高了钢的质量，解决了一系列过去用人工搅拌所无法解决的问题。

电冶炼車間是巨大的电能用户，在車間里除了装設着消耗大量电能和高度电气化自动化的电弧炉外，尚有其他各种电气化起重运输机械和辅助机械，这些机械对缩短冶炼的生产过程起着重要的作用，因此，迫切要求一个电冶炼技术工作者，除了要精通冶炼这一本門业务以外，还必须熟悉与之密切有关的車間电气装备，以便掌握住这些设备的构造，性能和特点，达到正确合理使用这些设备的目的，使其为进一步增加生产，提高质量，降低成本和改善劳动条件服务。

黑色电冶炼車間电气设备这门课程包括两大部分，第一部分——电力拖动与自动控制是在普通电工学的基础上，研究用电动机来带动生产机械运转时的性能和探討为满足生产机械某种性能的要求，对电动机应如何控制的理論問題；第二部分——黑色电冶炼車間电气设备是研究电力拖动，自动控制和自动调节理論在电冶炼生产中的实际应用問題。

电力拖动、自动控制和自动调节是一些年輕的学科，但它們对解决生产自动化起着重要的作用，例如由于自动调节理論的产生，它也为我們解决电弧炉电极升降高速调节过程中，出现的电极串动，和制造高度灵敏而又稳定的自动调节器打下了巩固的理論基础，从而推动了电弧炉装备的进一步改善和生产的发展。

苏联人民在社会主义和共产主义建設中，对于电力拖动与自动控制理論的奠定，发展和在高度电气化自动化电力拖动装备的制造方面作出了傑出的貢獻，創造了一系列高度电气化自动化的冶金机械和冶炼设备，用最新的技术装备了冶金工业，为我們树立了学习的榜样。

新中国成立以来，在党和毛主席的英明领导下，在苏联和其他社会主义国家的无私援助下，全国人民经过十余年来的努力，和其他工业一样，我国的冶金机械和电气设备制造业也有了很大的发展，LG系列大型电弧炉，百吨桥式起重机，高度灵敏而又稳定的PJM型自动调节器国内都已能够成批生产，并开始創造了具有我国特点的系列产品。而各种新技术，新装备，像电子計算技术在电弧炉上的应用，电弧炉的电磁搅拌器等也在着手研究。由于不断革新技术的結果，我国电冶炼方面的某些主要指标已达到了先进的水平，随着祖国工农业生产的进一步发展，在总路綫、大跃进、人民公社三面紅旗的照耀下，根据生产和国防的需要，我国的电冶金工业和电冶炼装备的制造工业，必将在不长的时间内有很大的发展。

目 录

前言

绪论

第一篇 电力拖动与自动控制

第一章 电力拖动的动力学基础 1

§ 1-1 概述 1

§ 1-2 电力拖动运动基本方程式 1

§ 1-3 起动和减速停车时间 3

§ 1-4 静态和动态转矩的折算 3

习题一 7

第二章 电动机的机械特性 7

§ 2-1 概述 7

§ 2-2 直流并激电动机的机械特性 8

§ 2-3 直流串激电动机的机械特性 13

§ 2-4 交流感应电动机的机械特性 14

§ 2-5 线绕式感应电动机起动
电阻的计算与选型 17

习题二 21

第三章 电力拖动的速度调整 21

§ 3-1 概述 21

§ 3-2 直流并激电动机的调速 22

§ 3-3 直流串激电动机的调速 24

§ 3-4 发电机—电动机
(Γ-Д)机组调速 24

§ 3-5 感应电动机的调速 25

§ 3-6 电机放大机制
电力拖动的调速 26

§ 3-7 用磁放大器的调速 28

习题三 29

第四章 电力拖动装置电动机

的选择 30

§ 4-1 概述 30

§ 4-2 电动机的发热与冷却 32

§ 4-3 电力拖动电动机工作
状态分类 33

§ 4-4 在持续恒定负荷或负荷极少变
动时电动机容量的选择

§ 4-5 变动负荷时电动机的

容量计算(等值法) 35

§ 4-6 短时工作电动机容量选择 37

§ 4-7 重复短时工作电动机
容量选择 37

§ 4-8 在不同环境温度下
电动机容量的修正 38

§ 4-9 冶金车间用电动机的结构 39

习题四 41

第五章 控制电器 42

§ 5-1 刀闸开关与熔断器 42

§ 5-2 自动开关 45

§ 5-3 控制器与起动变阻器 46

§ 5-4 接触器与磁力起动器 49

§ 5-5 主令开关 52

§ 5-6 继电器 54

§ 5-7 行程开关和终端开关 57

§ 5-8 制动电磁铁 60

§ 5-9 半导体整流器 61

习题五 63

第六章 自动控制原理与线路 63

§ 6-1 电力拖动的控制装置 63

§ 6-2 电力拖动装置的线路图 64

§ 6-3 电力拖动的自动控制 68

§ 6-4 电力拖动典型控制线路 70

习题六 72

第二篇 黑色冶金车间的电力设备

第七章 冶金车间起重运输机械

的电气设备 73

§ 7-1 概述 73

§ 7-2 起重机主要机构的静态负荷 74

§ 7-3 起重机的控制 76

§ 7-4 起重机的滑触线计算 81

§ 7-5 起重机械用的电气设备 83

习题七 88

第八章 电弧炉的电气装备

和工作特性 88

§ 8-1 电弧炉的构造 88

§ 8-2 电弧炉的主电路及其布置 90

§ 8-3 隔离开关和油开关 90

§ 8-4 炉用变压器及塞流线圈 94

§ 8-5 短网 99

§ 8-6 电弧炉设备的等值电路 103

§ 8-7 用实验方法确定电弧炉设备
等值电路的电气参数 104

§ 8-8 电弧炉电气特性曲线
的绘制方法 105

§ 8-9 电弧炉的测量仪器及线路 106

§ 8-10 电弧炉的自动调节器 107

§ 8-11 电弧炉的操纵装置 108

§ 8-12 电弧炉辅助机械的电气设备 108

§ 8-13 电压级变换装置
的远距离控制 110

§ 8-14 炉盖提升机构电动机的控制 113

§ 8-15 炉缸推出机构电动机的控制 113

§ 8-16 倾炉电动机的控制 115

§ 8-17 炉体转动电动机的控制 116

附录 电弧炉的电磁搅拌装置 119

习题八 123

第九章 自动调节原理

和电弧炉的自动调节 124

§ 9-1 自动调节的概念 124

§ 9-2 开环与闭环调节原理 125

§ 9-3 自动调节系统的反馈 128

§ 9-4 电弧炉电极升降机构
的自动调节器 133

§ 9-5 PM型电机式自动调节器 135

§ 9-6 磁放大器式自动调节器 143

§ 9-7 计算装置在电弧炉上的应用 148

附录 自动调节系统的动态分析 151

习题九 158

第十章 高频感应炉的电气装备

§ 10-1 概述 158

§ 10-2 无芯感应炉的理论
和工作原理 159

§ 10-3 电容器的用处和构造 162

§ 10-4 高频测量设备 163

§ 10-5 无芯感应炉的标准接线图 164

§ 10-6 电子管及离子管
的高频振荡器 164

习题十 167

第十一章 电冶炼车间的供电

§ 11-1 冶金工厂的供电系统 168

§ 11-2 冶金工厂的变电所 168

§ 11-3 冶金工厂的电网 174

§ 11-4 功率因数及其提高方法 180

习题十一 181



第一篇 电力拖动与自动控制

第一章 电力拖动的动力学基础

§ 1-1 概 述

电力拖动研究的内容主要有两个方面，一是研究用电动机拖动的生产机械用电的经济性；另一方面是研究电力拖动的控制性能，如加速过渡过程，调速性能和动态稳定等问题。这些问题对掌握，研究，改进黑色电冶炼车间的电气装备（如起重机，电弧炉电极的自动调节器）来讲都是非常重要的，而研究这些问题必需具备动力学的基础。

§ 1-2 电力拖动运动基本方程式

任何生产机械电力拖动系统的运动：均包括稳定运转（即速度不变）和过渡过程（例如起动，制动等变速过程）两种运动方式。这些过程的产生决定于电气化机组原动转矩和阻转矩的变化规律。表示这种变化规律的方程式称为运动方程式。

由理论力学可知，在稳定运转时（速度不变），电动机由电网吸取电能变为机械能所产生之原动转矩 M 仅需克服生产机械完成有用功（如起重机提升重物）和机械部分摩擦（如轴与轴承，钢丝绳与卷筒）等有害阻力联合组成的静态转矩 M_0 。反之，在过渡过程中，则电动机除需克服静态转矩 M_0 以外，尚需克服机组运动部分惯性因速度变化而引起的动态转矩 M_d 。由此得出运动的普遍方程式为：

$$M = M_0 + M_d \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机产生的原动转矩，公斤—米；

M_0 ——静态转矩，公斤—米；

M_d ——动态转矩，公斤—米。

由理论力学可知，对转动惯量（ J ）为常量的大多数生产机械来说，动态转矩为：

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-2)$$

此处， $J = m\rho^2$ ——转动惯量； $(1-3)$

$\frac{d\omega}{dt}$ ——角加速度，1/秒²。

在公式（1-3）中机组的质量 m 如以重量 G 与重力加速度 g 代替；迴转半径 ρ 如以迴转直径 D 代替，则得

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{GD^2}{4g}, \text{ 公斤—米/秒}^2 \quad (1-4)$$

式中， GD^2 称为机组的飞轮力矩（公斤—米²），机组各部分的飞轮力矩，如电动机转子，齿轮，卷筒等，通常均载于产品目录中，也可用实验和计算的方法求得。

在公式（1-2）中角加速度如以电动机每秒的速率 $\frac{dn}{dt}$ 代替，则可得动态转矩的

另一种表达式为:

$$M_a = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{d\left(\frac{2\pi n}{60}\right)}{dt} = \frac{GD^2}{\left(\frac{4 \times 9.81 \times 60}{2 \times 3.14}\right)} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

式中 n ——电动机每分钟的轉数。

将动态轉矩的表示式 (1-5) 代入公式 (1-1), 則得通常应用的运动方程式:

$$M = M_e + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

$$\text{或} \quad M - M_e = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-6)$$

公式 (1-6) 中的轉矩 M 和 M_e 是代数量, 当电动机产生的原动轉矩 M 的方向与生产机械运动的方向 n 一致或协助运动时 (图 1-1 a), M 的符号取正, 称为拖动轉矩。反之, 如 M 的方向和运动的方向 n 相反 (图 1-1 b) 或阻碍运动时, M 取負值, 称为制动轉矩。

所有静态轉矩 M_e , 根据性质不同, 可分为两类, 即阻轉矩与位轉矩。

阻轉矩永远起阻碍运动的作用 (如摩擦), 故在公式 (1-6) 中 M_e 本身的符号永远取正。

位轉矩 (如图 1-2 中重量 G 产生的静态轉矩 M_e) 与运动方向无关, 当运动方向改变时, 位轉矩仍保持其原先的作用方向。例如图 1-2 中, 在提升时重量 G 产生的位轉矩是阻碍运动的 (M_e 取正号), 而下降时重量 G 产生的位轉矩仍保持原先的作用方向, 此时, 它实际上已起协助运动的作用, 故此时的位轉矩 M_e 应取負值。

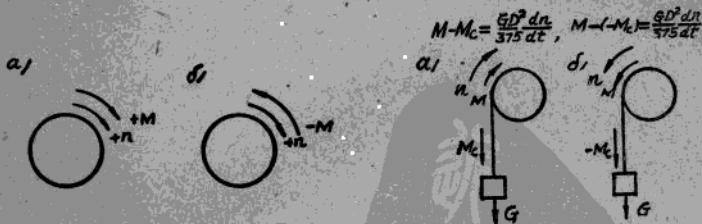


图 1-1 电动机的拖动轉矩 (+ M) 和制动力矩 (- M)

图 1-2 位轉矩与运动方向的关系

根据运动方程式 (公式 (1-6)) 中原动轉矩 M 和阻轉矩 M_e 的变化, 即可确定机组 (指 GD^2 为常量的机组而言) 的运动状态。

1) 如 $M - M_e > 0$; 則 $M_a > 0$; 此时 $\frac{dn}{dt} > 0$, 即机组处于加速运动状态;

2) 如 $M - M_e < 0$; 則 $M_a < 0$; 此时 $\frac{dn}{dt} < 0$, 即机组处于减速运动状态;

3) 如 $M - M_e = 0$; 則 $M_n = 0$; 而 $\frac{dn}{dt} = 0$, 即 n 为常量, 說明机組处于等速运动状态。

§ 1-3 启动和减速停車时间

在連續生产过程中經常启动和制动的机組, 其生产率或灵敏度将直接受到拖动装置启动和制动時間的影响, 这些時間可以根据运动方程式来确定。

当电力拖动装置启动时, 設电动机产生的启动轉矩以 M_n 表示, 則此时运动方程式可写成下式:

$$M_n - M_e = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

而启动过程的延續時間

$$t_n = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_c} \frac{dn}{M_n - M_e}$$

如果在启动过程中加速轉矩 ($M_n - M_e$) 保持不变, 則可求得启动時間

$$t_n = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_c} \frac{dn}{M_n - M_e} = \frac{GD^2}{375(M_n - M_e)} \int_0^{n_c} dn = \frac{GD^2 n_c}{375(M_n - M_e)} \quad (1-8)$$

式中 n_c ——电动机的穩定轉速, 轉/分;

GD^2, M_e ——折算到电动机軸上的机組飞輪力矩和靜态轉矩 (折算問題見 § 1-4)。

当減速以停止电动机时, 往往人为的施加一个制动轉矩 (电气的或机械的), 使机組在制动轉矩和負載轉矩作用下, 逐漸減速, 以至停止。

如制动轉矩以 M_r 表示, 則制动时的运动方程式可以写成下式:

$$-M_r - M_e = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-9)$$

制动停止过程所延續的时间

$$t_r = -\frac{GD^2}{375} \int_{n_c}^0 \frac{dn}{M_r + M_e} = \frac{GD^2}{375(M_r + M_e)} \int_0^{n_c} dn = \frac{GD^2 n_c}{375(M_r + M_e)} \quad (1-10)$$

为了提高起重机的生产率或者电极自动調节器的灵敏度, 我們常常希望縮短启动和制动停止時間, 以便电动机能在很快時間之內正反转。根据对公式 (1-8) 和 (1-10) 的分析, 知道可以采用下列方法:

1) 減小机組的飞輪力矩 GD^2 , 为此在起重机和电极自动調节器中, 常用轉子飞輪力矩較小的电动机 (如 JZ 型 JZR 型感应电动机等) 来拖动。

2) 充分利用电动机的过载能力, 增大加速轉矩 ($M_n - M_e$) 和減速轉矩 ($M_r - M_e$)。

3) 正确的选择传动装置, 并选用经济而合理的电动机工作轉速 n_n 。

§ 1-4 靜态和动态轉矩的折算

运动方程式 (公式 1-1) 說的是: 电动机軸上的原动轉矩 M 与生产机組折算到电

电动机轴上的静态转矩 M_c ，和在变速过程中电动机轴上用来克服整个机组运动部分惯量所引起的动态转矩 M_d 之间的关系。因此要研究电气化机组的运动状态，首先必须把生产机组中以不同速度移动和转动的元件的静态和动态转矩全部折算到电动机轴上去。换句话说，就是要把一个实际的电力拖动系统简化成一个力学特性和实际系统相同的单一转速的等值系统以后，才能用公式(1-1)的运动方程式来研究。

1. 静态转矩的折算

图1-3表示一个两级减速起重机的传动系统。卷筒提升重物 G 时需要克服的静态转矩为 $M_c = \frac{GD_B}{2}$ 公斤-米，根据功率守恒原则，则卷筒轴上需要的功率($M_c \omega_M$)应该等于电动机轴上的功率输出($M'_c \omega_A$)乘以传动机构的传动效率($\eta = \eta_1 \eta_2$)，即

$$M'_c \omega_A \eta_1 \eta_2 = M_c \omega_M \quad (1-11)$$

由此求得折算到电动机轴上的静态转矩为

$$M'_c = \frac{M_c \omega_M}{\eta \omega_A} = \frac{M_c}{\eta \frac{\omega_A}{\omega_M}} = \frac{M_c}{\eta \frac{\omega_A}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_M}} = \frac{M_c}{\eta_1 \eta_2 i_1 i_2} \quad (1-12)$$

式中 $i_1, i_2; \eta_1, \eta_2$ ——各级传动装置的速比和传动效率；

$\omega_A, \omega_1, \omega_M$ ——电动机，齿轮 Z_2 和卷筒的角速度，1/秒。

同理，根据功率守恒的原则也可以按下式把移动部分的静态转矩直接折算到电动机轴上去：

$$M'_c = \frac{Gv}{\omega_A \eta_1 \eta_2} \quad (1-13)$$

式中 v ——重物的移动速度，米/秒。

2. 动态转矩的折算

根据公式(1-5)，要求出折算到电动机轴上的运动系统的动态转矩 M_d ，首先必须求出折算到电动机轴上的整个运动系统的飞轮力矩，即电动机轴上总的飞轮力矩 GD_{np}^2 。各移动和转动元件飞轮力矩的折算应该遵守动能守恒的原则，如在图1-3中把转动卷筒的飞轮力矩 GD_B^2 折算到电动机轴上去时，则折算以前卷筒所贮藏的动能($J_B \frac{\omega_B^2}{2} = \frac{GD_B^2}{4g} \cdot \frac{\omega_B^2}{2}$)，应该与折算后贮藏的动能($J'_B \frac{\omega_A^2}{2} = \frac{(GD_B^2)'}{4g} \cdot \frac{\omega_A^2}{2}$)相等即：

$$\frac{GD_B^2}{4g} \cdot \frac{\omega_B^2}{2} = \frac{(GD_B^2)'}{4g} \cdot \frac{\omega_A^2}{2}$$

由此求得折算到电动机轴上后卷筒的飞轮力矩为：

$$(GD_B^2)' = \frac{GD_B^2}{\left(\frac{\omega_B}{\omega_A}\right)^2} = \frac{GD_B^2}{\left(\frac{\omega_A}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_M}\right)^2} = \frac{GD_B^2}{i_1^2 i_2^2} \quad (1-14)$$

同理，可以求得齿轮 Z_2 与 Z_3 折算到电动机轴上的飞轮力矩为：

$$(GD_{Z_2}^2 + GD_{Z_3}^2)' = \frac{GD_{Z_2}^2 + GD_{Z_3}^2}{i_1^2}$$

机组移动部分的质量折算为电动机轴上的飞轮力矩时，同样可以根据动能守恒的原则进行，如令移动部分的重量 G （图 1—3）折算到电动机轴上去时的飞轮力矩为 $(GD^2)^*$ ，则：

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{(GD^2)^*}{4g} \cdot \frac{\omega_{\pi}^2}{2}$$

故

$$(GD^2)^* = \frac{Gv^2}{\left(\frac{\omega_{\pi}^2}{4}\right)}$$

如 ω_{π} 以电动机的转速 n_{π} （转/分）的关系来表示，则：

$$(GD^2)^* = \frac{Gv^2}{\frac{1}{4} \left(\frac{2\pi n_{\pi}}{60}\right)^2} = \frac{Gv^2}{\frac{1}{4} \cdot \frac{4\pi^2}{3600} n_{\pi}^2} = \frac{365Gv^2}{n_{\pi}^2} \quad (1-15)$$

当拖动系统中同时包括转动和移动部分时，则折算到电动机轴上以后总的飞轮力矩为：

$$GD_{\pi p}^2 = \Sigma (GD^2)' + \Sigma (GD^2)^* + \Sigma GD_p^2 \quad (1-16)$$

式中 $\Sigma (GD^2)'$ ——各转动部分折算到电动机轴上飞轮力矩的总和（除去以电动机转速转动的部分）；

$\Sigma (GD^2)^*$ ——各移动部分折算到电动机轴上后的飞轮力矩的总和；

ΣGD_p^2 ——以电动机转速转动的各部分飞轮力矩之总和。

已知总的飞轮力矩 $GD_{\pi p}^2$ 以后，代入公式（1—5）即能求得运动系统折算到电动机轴上以后的动态转矩为：

$$M_a = \frac{GD_{\pi p}^2}{375} \cdot \frac{dn_{\pi}}{dt} \quad (1-17)$$

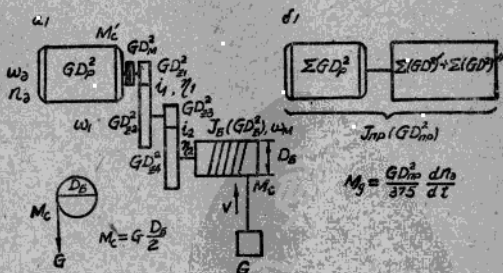


图 1—3 起重机提升机构静态和动态转矩的折算

例1—1 电动式电极升降机械的拖动系统如图 1—4 所示。ПНВ—28.5 型拖动电动机的额定功率 $P_n = 2.8$ 瓩，额定转速 $n_n = 1500$ 转/分，转子飞轮力矩 $GD_p^2 = 0.23$ 公斤—米²，对轮，减速装置及滑轮等全部转动部分折算到电动机轴上的飞轮力矩 $(GD^2)' = 15\% GD_p^2$ ，电极把持器结构（包括 7、5 和 2 在内）的总重 $Q = 2000$ 公斤，平衡锤重 $G = 1000$ 公斤，若电动机的启动转矩为电动机额定转矩的 5 倍（即 $M_n = 5M_n$ ），而电极在启动完毕后的移动速度 $V = 1.2$ 米/分，试求电动机的启动时间 t_u 。

解：1. 已知电动机等速启动至额定转速 n_n 时的启动时间为

$$t_n = \frac{GD_{np} D_n}{375(M_n - M_c)} \text{ 秒}$$

2. 根据理论力学

$$P = \frac{1}{102} \cdot M \omega = \frac{1}{102} \cdot M \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{Mn}{102 \times 60} = \frac{Mn}{975} \text{ 瓩} \quad (1-18)$$

式中 M ——公斤—米；
 n ——转/分。

故

$$M_n = \frac{975P_n}{n_n} = \frac{975 \times 2.8}{1500} = 1.82 \text{ 公斤—米；}$$

而

$$M_n = 5M_c = 5 \times 1.82 = 9.1 \text{ 公斤—米。}$$

因电极把持器重量与平衡锤在系统中互相平衡，在忽略传动系统很小的摩擦后，静态转矩可以认为是零，即 $M_c = 0$ 。

3. 运动系统折算到电动机轴上的飞轮力矩为：

$$GD_{np}^2 = \Sigma GD_p^2 + \Sigma (GD^2)' + \Sigma (GD^2)^* \quad (1-19)$$

其中： $\Sigma GD_p^2 + \Sigma (GD^2)' = 1.15 \times GD_p^2 = 1.15 \times 0.23 = 0.264 \text{ 公斤—米}^2$ ；

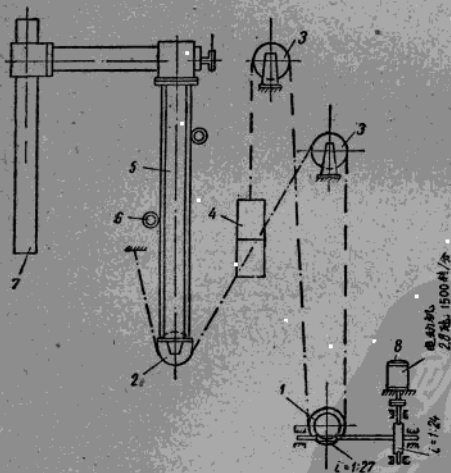


图 1-4 电极升降机械的振动系统

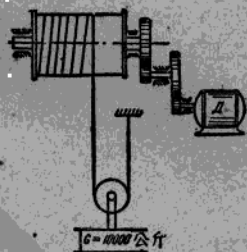


图 1—起重机提升机构的传动系统

$$\Sigma (GD^2)^* = \frac{365G(2V)^2}{n_H^2} + \frac{365QV^2}{n_M^2} \quad (\because Q \text{ 如以速度 } V \text{ 移动时, 系}$$

统中平衡锤 G 即以速度 $2V$ 移动)。

$$\therefore \Sigma (GD^2)^* = \frac{365 \times 1000 \times \left(2 \times \frac{1.2}{60}\right)^2}{(1500)^2} + \frac{365 \times 2000 \times \left(\frac{1.2}{60}\right)^2}{(1500)^2}$$

$$= 0.00026 + 0.00013 = 0.00039 \text{ 公斤—米}^2。$$

由此可見 $\Sigma(GD^2)'$ 与 $\Sigma GD_p^2 + \Sigma (GD^2)'$ 相比完全可以忽略不計。

此时 $GD_{np}^2 = \Sigma GD_p^2 + \Sigma (GD^2)' = 0.264 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$ 。

4. 以 GD_{np}^2 、 M_o 、 M_n 、 n_n 代入求启动时间的公式得：

$$t_n = \frac{GD_{np}^2 n_n}{375(M_n - M_o)} = \frac{0.264 \times 1500}{375(9.1 - 0)} = \frac{0.264 \times 1500}{375 \times 9.1} = 0.116 \text{ 秒}。$$

习 題 一

1. 起重机提升机构的传动系统如图 1—5 所示，主要技术数据如下：

每对齿轮的效率..... $\eta_o = 0.94$

卷筒的效率..... $\eta_G = 0.95$

滑轮的效率..... $\eta_{Ga} = 0.96$

每对齿轮的速比..... $i = 6$

卷筒直径..... $D_G = 0.9 \text{ 米}$

货物重量..... $G = 10 \text{ 吨}$

提升速度..... $v = 0.6 \text{ 米/秒}$

試求电动机的轉矩，轉速和容量。

答：77.7 公斤·米；918 轉/分；73.2 瓩。

2. 上題中如果已知，电动机轉子的飞輪力矩 $GD_p^2 = 22 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$ ，并假定整个传动系统轉动部分折算到电动机軸上的飞輪力矩 $(GD^2)' = 15\% GD_p^2$ 。

試求在 5 秒鐘内达到額定提升速度 $v = 0.6 \text{ 米/秒}$ 所需的启动轉矩 M_n 。

答：約 91 公斤·米。

第二章 电动机的机械特性

§ 2—1 概 述

在現代化的黑色电冶炼車間中采用着各种各样的生产机械，如起重机，循环水泵，扇风机，电弧炉等等，而这些机械或其絕大部分机构都是采用电动机来拖动的，因此研究采用具有何种性能的电动机才能滿足一定生产机械（或机构）所提出的要求，这是非常重要的課題。而解决这个課題首先要从研究各种电动机的机械特性开始。

各种生产机械有不同的机械特性，以生产中常見的电动起重机作例，对輸出功率一定的电动机讲，当起吊的重量大，則电动机軸上的輸出轉矩和产生的电磁轉矩 ($M = K_a \phi I_a$) 必然要大，同时起吊速度和电动机的轉速 (n) 一定也会小些。反之，起吊重量輕时，則电动机的轉矩 (M) 必然也小，而起吊速度和拖动电动机的轉速 (n) 一定会較大。以上的工作状态可以电动机的机械特性描繪說明，所謂电动机的机械特性乃是指在一定負荷下作等速运动时，电动机所产生的轉矩 M (公斤·米) 与其轉速 n (轉/分) 之間的关系。

电动机的机械特性主要可以分为三类：

1) 超硬特性——当轉矩发生变化时，轉速严格的保持恒定不变。同步电动机即具

有这种特性(图2-1曲线1)。

2) 硬特性——从空载到满载, 转速降低较小(5~10%以内)。如直流并激电动机和交流感应电动机的工作部分(图2-1曲线2和曲线4的a5段)。

3) 软特性——从空载到满载, 转速降低较大。如直流串激电动机的特性(图2-1曲线3)。

§ 2-2 直流并激电动机的机械特性

1. 电动机工作状态时的机械特性

1) 机械特性方程式

直流并激电动机的接线如图2-2所示。

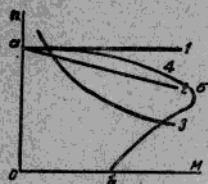


图 2-1 电动机的机械特性

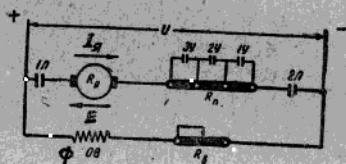


图 2-2 直流并激电动机的接线

1—同步电动机的机械特性; 2—直流并激电动机的机械特性;
3—直流串激电动机的机械特性; 4—感应电动机的机械特性

由电工学已知:

在电动机工作时, 电动机电枢的端电压 U 为电枢产生的反电势 E 和电枢回路电压降 $I_a(R_a + R_n)$ 所平衡, 即:

$$U = E + I_a(R_a + R_n) \quad (2-1)$$

电动机由电能转换为机械能部分的电磁转矩 M 与每极磁通 ϕ (韦) 和电枢电流 I_a (安) 的乘积成正比, 即:

$$M = K_m \phi I_a \quad \text{公斤一米。} \quad (2-2)$$

式中 $K_m = \frac{PN}{2a} \cdot \frac{1}{9.81\pi}$ 称为电机常数, 对制成的电机讲是固定不变的;

P ——电动机磁极对数;

N ——电枢有效导体数, 根;

a ——电枢并联支路对数。

电动机电枢旋转时绕组切割磁场所产生的反电势为:

$$E = K_e \phi n \text{ 伏。} \quad (2-3)$$

式中 $K_e = \frac{P}{60} \cdot \frac{N}{a}$ 对制成的电机讲也是一个常数。

由公式(2-3)可得电动机的转速

$$n = \frac{E}{K_e \phi}$$

由公式(2-1)中 $E = U - I_a(R_a + R_n)$ 和公式(2-2)中

$$I_a = \frac{M}{K_a \phi} \quad \text{代入上式}$$

$$\text{得: } n = \frac{U}{K_a \phi} - \frac{R_a + R_n}{K_a K_a \phi^2} M. \quad (2-4)$$

在理想空载时, 以 $M=0$ 的条件代入上式, 可以求得在理想空载时的转速 $n_0 = \frac{U}{K_a \phi}$, n_0 称为理想空载转速。

在公式 (2-4) 中, 令 $\Delta n = \frac{R_a + R_n}{K_a K_a \phi^2} M$, 则 Δn 称为转速降, 当转矩 M 增加时 Δn 也随之增加。由上式可知, n 与 M 为一次方的关系, 故知其图象为直线。

电动机电枢电路没有外加电阻 (R_n) 时的特性称为自然机械特性, 接入外加电阻 (R_n) 后获得的特性叫人工机械特性。由公式 (2-4) 可知, 在并激电动机中, 外加电阻愈大, 则在同一转矩下的转速愈小, 特性即愈软。例如电动机的转矩为 M_n , 则无外加电阻时的转速为 n_n , 而有外加电阻后, 电枢回路总电阻为 R_s 时的转速则降为 n_{ns} (图 2-3), 所以电动机电枢接入电阻后, 将使电动机转速降低。

此外不管电枢回路有无外加电阻和外加电阻的大小, 在理想空载 ($M=0$) 时的转速都等于 $n_0 = \frac{U}{K_a \phi}$, 由此可见, 不管自然特性还是人工特性都相交于纵轴上的 n_0 点。

2) 并激电动机的起动

并激电动机的电枢电阻 R_a 甚小 (十分之几欧姆), 在起动瞬间, 转速 $n=0$, 故起动瞬间的反电势 $E = K_a \phi n = 0$, 当电动机加上线路全电压 U 时, 所产生的直接启动电流 $I_a = \frac{U}{R_a}$ 常常大于额定电流 I_n 的 10~20 倍, 这样大的电流在电刷上将引起危险的火花, 所产生的强大机械力可能引起电机绕组和转轴的损坏。

为了限制起动电流, 必须在电枢回路中串联起动电阻 R_n 以便将启动电流限制在 2~2.5 额定电流范围之内, 即:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_n} \geq 2 \sim 2.5 I_n \text{ 安。} \quad (2-5)$$

此时, 电动机的起动转矩 $M_a = K_a \phi I_a$ 必然大于负载的静态转矩 M_e , 根据公式 (1-6) 可见, 在 $M_a > 0$, 电动机转速将逐渐增加。

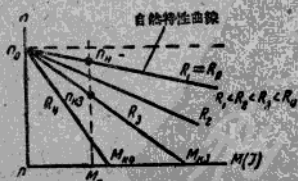


图 2-3 并激电动机的机械特性

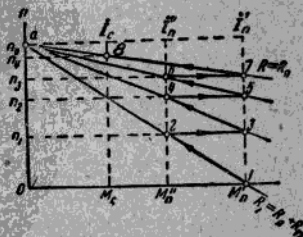


图 2-4 并激电动机的起动特性曲线

随着轉速的增加，电枢内部的反电势 $E = K_e \phi n$ 也增加，因此电枢电流 $I_a = \frac{U - E}{R_a + R_{\Sigma}}$

和轉矩 $M = K_m \phi I_a$ 将减少，拖动系统的加速度也相应的减小。

为了使轉矩和拖动系统的加速度保持一定，必须减少外加的起动电阻 R_{Σ} ，方法是随着电动机轉速的增高，逐段的把起动电阻切出，直至电动机达到额定轉速 n_n 为止。此时，外加起动电阻完全被切出，电动机按自然特性运转。

图 2—4 表示并激电动机起动时的特性曲线。起动开始时，电动机轉速为零，电枢串联全部起动电阻 ($R_a + R_{\Sigma} = R_1$)，此时起动轉矩 M'_a 最大 ($M'_a > M_e$)，随着电动机轉速升高，电枢电流和轉矩 M_a 逐渐减小 (电动机按曲线 1—2 特性变化)，为保持电动机一定的起动加速度，当轉矩减小到某一值 M'_a (称为最小启动轉矩) 时，必需切出一段电阻，此时电枢电流和轉矩又突然增大到 M'_a (称为最大启动轉矩)，电动机即由总电阻为 R_1 的机械特性过渡到下一条特性曲线上继续起动，如此继续下去，电动机即按机械特性曲线上的 1—2—3—4—5—6—7—8 过渡。自然特性曲线上的点 8 为电动机达到的稳定运转点，因为在这一点上，电动机所产生的轉矩 M 刚好与负载的静态轉矩 M_e 相等，根据公式 (1—6) 可知，此时电动机处于等速运转的稳定状态。

2. 电动机的电气制动状态

为了迅速使电动机拖动的电气化机组很快的停止或反转，除了可以采用机械抱闸的方法以外，还可以使拖动电动机产生一种与机组运动方向相反的制动电磁轉矩以使电动机迅速停止或反转，这种方法称为电气制动，由于这种方法具有磨损小、经济和便于自动控制等特点，因此在拖动系统中经常和机械抱闸联合使用。

电动机电气制动的的方法有三种：

- (1) 向电源反馈电能的发电制动或再生制动；
- (2) 把电动机轉子积儲的动能轉变为热能散发給周围介质的能耗制动；
- (3) 由电源輸入电能的反接制动。

不管那一种制动方式，它們最后的目的都要达到把电动机轉子积儲的动能 ($\frac{1}{2} J_{\Sigma} \omega_a^2$) 轉变为其他形式能量的目的，以便使电动机轉速 (ω_a) 受到限制或减小。

(1) 发电 (再生) 制动

接入线路的电动机被工作机带动且轉速超过理想空载轉速 n_0 时，就会出现电动机的发电制动状态。如在提升机的拖动系统中，重物下降时就可能发生这种情况。对比一下电动机和发电制动状态下接线图 (图 2—5) 中电枢电流 I_a 的方向，可知当 $n > n_0$ 时，反电势 $E = K_e \phi n$ 现在大于端电压 $U = K_e \phi n_0$ (由定义 $n_0 = \frac{U}{K_e \phi}$ 求得)。根据公式 (2—1)，图中电枢电流的方向与电动机状态时相反，而激磁电流 i_{ϕ} 和由它所产生的磁通 ϕ 的方向仍和电动机状态时一样不变。根据左手定则可知发电制动时产生的轉矩方向 M 和电动机状态时产生的轉矩 ($M = K_m \phi I_a$) 方向相反，亦即和运动方向 n 相反，因此是起制动作用的。

因为发电制动只在轉速 $n > n_0$ 时出现，因此发电制动只能用来限制电动机下降重物时的轉速而不能达到使电动机停止的目的。

(2) 能耗制动

在这种情况下, 电动机的电枢回路与电源断开后接在电阻 R_x 上, 激磁绕组仍旧接在电路中 (图 2-6)。而电动机在运动系统的惯性作用下仍按原来方向旋转。此时, 磁

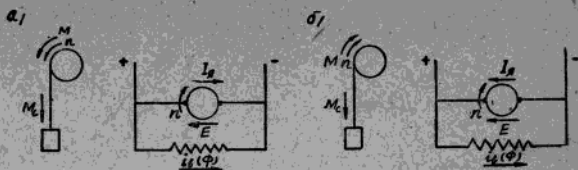


图 2-5 a) 电动机运转状态 $n < n_0$; $I_a = \frac{U-E}{R_x} > 0$, $M > 0$; 起协助运动作用

b) 发电制动状态 $n > n_0$; $U < E$; $I_a = \frac{U-E}{R_x} < 0$, $M < 0$, 起制动作用

通 ϕ 方向不变, 电枢中的反电势 E 方向也不变。但由反电势 E 所产生的能耗制动电流 I 的方向却与电动机状态时电枢电流的方向相反 (对比图 2-6 a 和 b), 因此产生制动转矩。这种制动能保证电动机的停车, 其缺点是当转速 n 减小时, 随着反电势 $E = K_e \phi n$ 的减小, 制动效果随之降低, 为了补救这个缺点, 因此在低速时, 能耗制动可以和机械抱闸配合使用。

(3) 反接制动

反接制动有两种: 第一种反接制动用于低速下降重物, 第二种反接制动用于紧急停车及反转。

a) 第一种反接制动

第一种反接发生于当工作机带动电动机向一个方向转动, 而电动机却产生反方向转矩的时候。如在电枢回路中接有限流电阻 I_a 和转矩 M 的大电阻的电动机被接向提升重物的方向, 而此时重物的位转矩 M_L 却超过电动机的拖动转矩 M 而迫使电动机的转速 n 变为负值, 即向下降方向旋转 (图 2-7 a)。

第一种反接制动的机械特性曲线是电动机状态的人工特性在第四象限内的延长 (图 2-7 b), 由图可见限流电阻 R_p 愈大, 则在同一负荷下, 下降的速度愈大。

在反接制动时, 电动机从电源和运动系统积蓄的动能两方面得到功率, 在电动机电枢内产生电流, 又通过电枢电路的电阻, 把电能转变为热能散发给空气。

b) 第二种反接制动

第二种反接是改变电枢电压的极性, 而激磁的方向和大小仍保持不变。在改变电枢

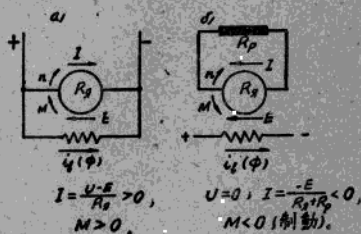


图 2-6 a) 电动机运转状态;

b) 能耗制动运转状态, $U = 0$;

$$I = \frac{-E}{R_a + R_p} < 0, \quad M < 0, \quad \text{起制动作用,}$$

$$I = \frac{U-E}{R_a} > 0, \quad U = 0, \quad I = \frac{-E}{R_a + R_p} < 0, \quad M < 0 \text{ (制动)}.$$

极性前，在电枢回路要接入限流电阻 R_r (图 2—8)。由于电枢电流方向改变，所以新产生的转矩将与惯性旋转方向相反，于是对电动机产生制动作用，使速度迅速下降。

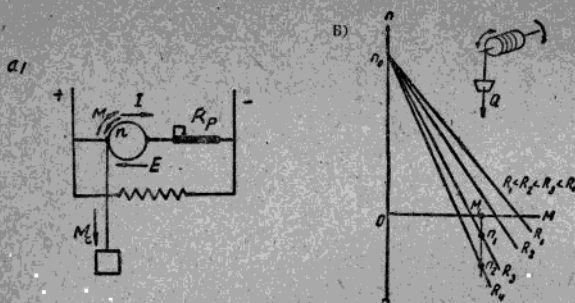


图 2—7 a) 第一种反接制动的原理, $M_c > M$, $n < 0$; M 对 $(-n)$ 讲起制动作用;
B) 第一种反接制动时的特性曲线

第二种反接，制动作用强烈，能使电动机很快停车。当速度降到零时，必须迅速断开电源，否则电动机接着又会向反方向起动，使电动机反转起来。

在第二种反接中，由于电枢极性改变或电枢端电压变为负值，此外，由于惯性，电动机仍按原来方向旋转；磁通方向仍和电动机状态一样，因此反电势 E 的方向不变。这样在第二种反接制动时，电枢回路中的电流就很大，即：

$$I = \frac{-(U+E)}{R_a + R_r} \gg I_n.$$

为此必须接入较大的限流电阻 R_r 。

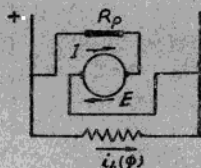


图 2—8 第二种反接运转状态

$$I = \frac{-(U+E)}{R_a + R_p} < 0, M < 0, \text{起强烈制动和反转作用}$$

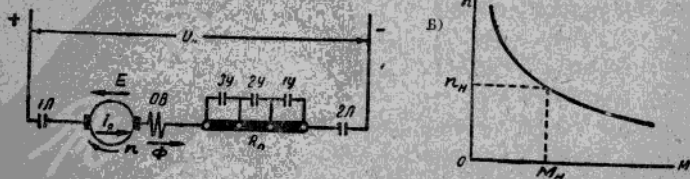


图 2—9 a) 串激电动机的接线图; b) 串激电动机的机械特性