

煤矿固定设备控制

(上册)

煤炭高等院校試用教材

煤矿固定设备控制

上册

山东矿业学院编

煤炭工业出版社

煤矿固定设备控制
上册

山东矿业学院编

* * *

煤炭工业出版社

山东矿业学院印刷厂印刷 发行

字数234千字 印数15000

1980年12月第一次印刷 定价：1.10元

序 言

本书根据煤矿电气化自动化专业教学计划和大纲编写，作为煤炭院校本专业“煤矿固定设备控制”课程的试用教材。所需学时为100学时。

“煤矿固定设备控制”是本专业的一门专业课，它研究煤矿提升、通风、排水和压气设备的控制，分上下两册出版。上册为有触点控制部分，包括：继电接触器控制原理；煤矿通风、排水和压气设备的控制；异步机拖动提升机的控制；发电机—电动机组拖动提升机控制理论等。下册为可控硅拖动控制部分，包括：三相可控整流电路；可控硅可逆整流电路；可控硅触发电路；可控硅变流器—电动机（SCR—D）拖动提升机的控制；可控硅串级调速系统；可控硅变频器；可控硅元件的选择计算及保护等。

参加本书编写工作的有葛建华（第一章、第二章第一节），傅运刚（第二章、第二、三节），苏学诚（第五、六、七、九、十、十一章），王良军（第三、四、八章和两个附录）。王良军对全稿进行了某些技术性的统一工作。

本书上册由中国矿业学院谢桂林同志主审，下册由淮南煤炭学院路世瑞同志主审。最后定稿时，按主审同志的意见对全书又进行了全面的修订。

编写本书时，煤炭系统各高等院校有关教师和贺守正、孙守生、沙俊忠三位工程师对本书初稿进行了审阅并提出了许多宝贵的意见；在编写和出版过程中许多厂、矿和编辑同志对我们给予了许多热情的帮助和支持，对这些同志在此一并表示衷心的感谢！

由于我们各方面水平有限，加以时间仓促，书中错误和不足之处在所难免，殷切希望使用本教材的师生及其他读者惠予批评指正。

编者、1979.12.20.

内 容 简 介

本书是煤矿电气化自动化专业《煤矿固定设备控制》课程的教学用书,分上下两册出版。上册为有触点控制部分,包括:继电器接触器控制原理;矿山通风、排水和压气设备的控制;异步机拖动提升机的控制;发电机—电动机组拖动提升机控制理论等。下册为可控硅拖动部分,包括:可控硅可逆整流电路;可控硅交流器—电动机拖动提升机的控制;可控硅串级调速系统;可控硅变频器等。书中介绍了矿井提升、通风、排水和压气设备的控制原理、某些典型线路及有关控制设备的计算。本书也可供有关工程技术人员参考。

目 录

(上 册)

序 言

第一章 继电器接触器控制原理	1
第一节 控制线路图的符号和类型	1
第二节 电力拖动系统的起动过渡过程	5
第三节 电力拖动控制原则及其基本线路	11
第四节 继电器接触器控制线路设计基本原则	24
第二章 通风、排水、压气设备控制	29
第一节 通风设备的控制	29
第二节 排水设备的控制	38
第三节 压气设备的控制	47
第三章 交流异步机拖动矿井提升机的控制	55
第一节 总述	55
第二节 提升电动机的加速控制	60
第三节 提升机的减速控制	63
第四节 爬行阶段的控制	76
第五节 箕斗提升设备的装载控制原则	78
第六节 交流提升机主要电控设备的选配	78
第七节 磁放大器	93
第八节 TKD电控系统电路分析	102
第四章 发电机—电动机(F—D)机组拖动提升机的控制	119
第一节 概 述	119
第二节 F—D机组调速原理	122
第三节 F—D机组拖动主机容量计算	127

第四节 F-D机组拖动系统的静态分析.....	129
第五节 F-D机组拖动系统的动态分析基础.....	140
附录一.....	145
附录二.....	149
参考文献.....	155

第一章 继电器接触器控制原理

第一节 控制线路图的符号和类型

在控制线路的设计、调整和维护工作中，经常需要阅读和绘制控制线路图。在线路图中，所有的电器元件都是用图形和文字符号表示。因此，熟悉和掌握图形和文字符号是非常必要的。

一、自动控制系统的图形和文字符号

图形符号和文字符号是由国家统一制定的。一九六四年我国制定了“电工系统图形符号国家标准GB312—64”及“电工设备文字符号GB315—64”。考虑到现场实际情况，线路图中仍然大量使用旧的图形符号，表1.1—1和表1.1—2中同时列出新、旧符号，互相对照以便参考。

二、自动控制系统的线路图

把各种电器按一定的规律用导线联接起来，就构成了电气控制线路图。线路图的用途是：可作为线路安装及接线的依据；作为线路维护及寻找故障的参考；作为技术档案及资料。

表1.1—1 电气传动系统图形符号

名 称	新	旧
鼠笼式异步电动机		
绕线式异步电动机		
它激直流电动机		
串激直流电动机		
交 磁 扩 大 机		
接 触 器 线 圈		
电 流 继 电 器 线 圈		
电 压 继 电 器 线 圈		
过 电 流 继 电 器 线 圈		
欠 电 压 继 电 器 线 圈		
接 触 器 常 开 触 点		
接 触 器 常 闭 触 点		

带弧装置的主触点 常开 常闭		
辅助触点与主触点符号一致 继电器触点 常开 常闭		
延时闭合的常开触点 延时打开的常开触点 延时闭合的常闭触点 延时打开的常闭触点 机械自锁的手动复位常闭触点		
操作装置：按钮 常开（能自动复位） 常闭（能自动复位） 主令控制器		

限位开关 常开触点 常闭触点		
熔断器 刀闸开关 空气开关 热继电器的加热元件		
电阻 电容 电感线圈 带铁芯的电感线圈		
信号灯 信号铃 信号喇叭		

表 1.1—2 电气传动系统文字符号

名 称	文 字 符 号		名 称	文 字 符 号	
	新	旧		新	旧
电 机:			加速接触器	JC或JSC	С
电 动 机	D	Д	正转接触器	ZC	В
发 电 机	F	Г	反转接触器	FC	Н
异步电动机	YD	АД	中间继电器	ZJ	РП
直流电动机	Z	ПЭ	电压继电器	YJ	PH
同步电动机	TD	СД	电流继电器	IJ	PM
励 磁 机	L	В	时间继电器	SJ	PB
激 磁 绕 组	LQ	ОВ	热 继 电 器	RJ	PT
并 激 绕 组	BLQ	ОШ	加速继电器	JSJ	PY
串 激 绕 组	CLQ	OC	过电流继电器	GLJ	PM
电 枢	S	Я	开关与控制器		
定 子	d	С	熔 断 器	RD	П
转 子	Z	P	转 换 开 关	h	BA
变 压 器	B	Т	终 端 开 关	ZK	BK
电 流 互 感 器	LH	ТТ	刀 闸 开 关	DK	P
电 压 互 感 器	YH	ПН	断路器(一般)	DL	BM
电机放大机	FD	ЭМУ	气 关 开 关	KQD	A
磁 放 大 器	CF	MY	主 令 控 制 器	LK	KK
接触器与继电器			起 动 按 钮	QA	ПУСК
线路接触器	XC	Л	停 止 按 钮	TA	СТОП

线路图根据用途不同,分为原理图(又称原理系统图或展开图)和安装图(又称接线图)两种。安装图又分为内部接线图和外部接线图。

绘制原理图的主要目的是便于理解线路的动作原理,因而不考虑电器元件各组成部件(如线圈、触点)的实际位置。在设计、调整和分析系统故障时,首先要用到的就是原理图。因此,掌握原理图的绘制和阅读方法是十分重要的。

安装图是为了便于安装接线而绘制的线路图。在安装图中,同一装置上各元件都按其实际位置画出,连接导线也基本上按其实际布线画出。连接到其它装置上去的导线都通过端子排引出。不很复杂的线路,可用一张安装图表示。当线路比较复杂时,一般将各装置的内部接线分别画出,然后再把各装置,联接线(一般用电缆)用另一张外部接线图表示出来。

绘制原理图的基本原则和方法是按元件电气连系画图,即在同一电路上串联的各部件都展开地画在一条线上。全部控制线路分为主回路、控制回路和辅助回路。电动机绕组、接触器触点等强电流线路属于主回路;接触器和继电器的线圈等小电流线路属于控制回路;其他如信号、保护和测量等都属于辅助回路。

图 1.1—1 和图 1.1—2 分别为直接起动的鼠笼式电动机的继电器接触器控制的安装线路图和原理线路图。

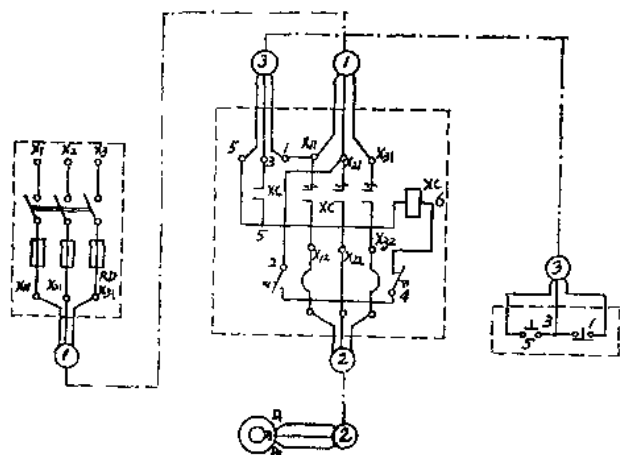


图 1.1—1 鼠笼式电动机直接起动的安装线路图

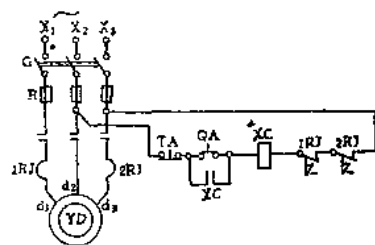


图 1.1—2 鼠笼式电动机直接起动的原理线路图

三、阅读和分析控制线路图的一般方法

继电器接触器控制线路是由触点的“开”和“闭”两种状态组成的、具有一定逻辑关系的电路。只要能明确掌握每一个触点所处的状态，按照电器动作后触点状态的改变来追索线路动作的逻辑关系，就能够分析清楚任何一个控制线路。但当线路比较复杂时，分析线路的逻辑控制关系就比较麻烦。为此，建议采用下表所列符号把电器的动作和触点的状态记录下来，以利弄清线路。

符号	V	X ⁻	+	-	△
意义	线圈得电	线圈断电	触点闭合	触点断开	延时动作

例如：XCV 表示 XC 线圈得电；—|—XC⁺ 表示 XC 接触器常开触点闭合；—|—J⁻ 表示继电器 J 的常闭触点断开。

下面以图 1.1—2 的线路为例说明分析线路的方法。

1、合上刀闸开关 DK，接通电源，此时所有电器均不动作。

2、起动操作：

按 QA → XCV → —|—XC⁺ → YD 起动；

—|—XC⁺ → XC 自保

3、停车操作：

按 TA → XC^x → —|—XC⁻ → YD 断电停车；

—|—XC⁻ → 线路复原。

4、保护：

1RJ 动作 → —|—1RJ⁻ → XC^x → 以下结果与 3 同。

2 RJ动作同上。

RD动作（熔断）→YD断电车。

图1.1—2线路很简单，不用上述方法也可一目了然。但对复杂的控制线路，运用上述方法是有助于对线路的分析。

分析线路是一个逐渐熟悉的过程。根据广大工人和工程技术人员的实践经验，可以归纳以下几个步骤：

1、首先了解电气线路所控制对象的生产工艺过程；

2、分清主回路、控制回路和辅助回路，弄清线路中每台电机和每一个电器元件的作用，搞清元件之间的闭锁关系；

3、按照工艺要求，逐步搞清楚线路动作的全过程。一般是从某一主令电器（或保护电器）的动作开始，而从电动机运转状态的改变告终。此外，同时动作的电器，应注意触点转换的时间顺序和是否延时动作。

第二节 电力拖动系统的起动过渡过程

电力拖动的过渡过程系由一个稳定工作状态过渡到另一个稳定工作状态的过程。

研究过渡过程对某些生产机械（如矿井提升机）具有很重要的意义，因为它们在工作中需要经常起动、制动、反转、调速以及经受很大的负载变化，过渡过程的时间在整个工作时间内占有很大的比重。研究过渡过程，可以研究如何缩短过渡过程的时间，从而提高生产机械的生产率；可以研究电机与生产机械的运行条件，改善运行情况，使设备能安全运行；可以研究过渡过程中所产生的损耗，找到减少损耗的途径，提高电机的利用率等。然而对电机容量较小或不经常起动的水泵、通风机等电动机的过渡过程则不必详细研究。

过渡过程产生的原因，一般是由电气参数突然变化（电压、电阻、频率）与负载转矩的突然变化。电力拖动的运行不能突变，原因是由惯性造成的。电力拖动系统中有三种惯性，一是机械的，主要反应在转动惯量 J 上，它使转速不能突变；二是电磁惯性，主要反应在电机绕组的电感 L 上，它使电流不能突变；三是热惯性，它使电机温度不能突变。由于热惯性影响较小，因而在研究电力拖动过渡过程中，可忽略不计。

电力拖动过渡过程可区分为两种：一、只考虑机械惯性者，称为机械过渡过程；二、同时考虑机械惯性与电磁惯性者，称为机电过渡过程。这里只研究机械过渡过程。

在研究电力拖动的过渡过程时，运动方程式是个基础，而电力拖动在过渡过程中的行为将首先决定于静态转矩的性质和电动机的机械性能。这里仅就直线机械特性，恒定负载转矩时的电力拖动过渡过程讨论如下：

一、运动方程式

电动机在旋转运动中所产生的拖动转矩 M 总是与电动机轴上的负载转矩 M_z 和加速转矩 M_a 相平衡。因此，运动的基本方程式为

$$M - M_z = M_a$$

即
$$M - M_z = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中 M —电动机发出的拖动转矩 (公斤·米) ;

M_z —电动机轴上的负载转矩 (公斤·米) ;

J —系统的转动惯量 ($J = m\rho^2$, m 为旋转部分的质量, ρ 为惯性半径) ;

$$m = \frac{G}{g},$$

G —旋转部分的重量 (公斤) ;

g —重力加速度 (米/秒²)。

因之, J 的单位为公斤·秒²·米。

因为
$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

D —惯性直径 (米)

所以
$$GD^2 = 4gJ$$

GD^2 称为飞轮惯量, 其单位为 (公斤·米²)。把 ω (弧度/秒) 化为 n (转/分) 表示的形式,

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

这样
$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \frac{dn}{dt} \left(\frac{2\pi n}{60} \right) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

故运动方程式的实用计算形式为

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.2-2)$$

式中 GD^2 —运动系统反应在电动机轴上的飞轮惯量 (公斤·米²) ;

n —电动机轴转速 (转/分) ;

t —过渡过程的时间 (秒)。

从上式可以看出电动机的运转状态:

1、当 $M > M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电动机处于加速状态;

2、当 $M = M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$ 电动机处于稳定运转状态;

3、当 $M < M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电动机处于减速状态。

二、直线机械特性, 恒定负载转矩下的机械过渡过程

电力拖动具有直线的机械特性, 带恒定负载转矩时, 加速转矩 M_a 对转速 n 是线性变化的。属于这类的有直流他激电动机、交流异步电动机 $M \leq 1.2 - 1.5 M_e$ 内的特性。

研究过渡过程, 是要求出 $S = S(t)$ 、 $n = n(t)$ 、 $M = M(t)$ 、 $i = i(t)$ 的变化规律。

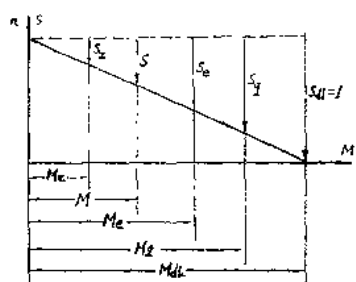


图1.2—1 机械特性为直线， M_z 为常数，转矩与转差率的关系

研究的基础是根据给定条件对运动方程式求解。给定条件是 $M_z = \text{常数}$ ，机械特性 $n = f(M)$ 为直线，如图 1. 2 - 1 所示。

运动方程式是：

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

从图 1. 2 - 1 中不难看出

$$\frac{M_z}{S_z} = \frac{M}{S} = \frac{M_e}{S_e} = \frac{M_q}{S_q} = \frac{M_k}{S_{qk}} = A$$

所以
$$M = A \cdot S = \frac{M_e}{S_e} \cdot S \quad (1. 2-3)$$

$$M_z = A \cdot S_z = \frac{M_e}{S_e} \cdot S_z \quad (1. 2-4)$$

由于
$$n = n_t (1 - S)$$

则
$$\frac{dn}{dt} = \frac{d}{dt} [n_t (1 - S)] = -n_t \frac{ds}{dt} \quad (1. 2-5)$$

将 (1. 2-3) (1. 2-4) 和 (1. 2-5) 式代入运动方程式得

$$\frac{M_e}{S_e} \cdot S - \frac{M_e}{S_e} \cdot S_z = -\frac{GD^2}{375} n_t \frac{ds}{dt}$$

将上式变量分离后得

$$\frac{ds}{S - S_z} = -\frac{375 M_e}{GD^2 \cdot n_t \cdot S_e} dt = -\frac{dt}{B}$$

式中
$$B = \frac{GD^2 n_t S_e}{375 M_e}$$

积分上式得：

$$\ln(S - S_z) - \ln K = -\frac{t}{B} \quad (1. 2-6)$$

其中K是积分常数，由此得

$$S - S_z = K e^{-t/B}$$

为了决定K，必须引入起始条件。在一般情况下，当 $t = 0$ 时， $S = S_q$ 。 S_q 为过渡过程开始时的转差率。这样一来

$$K = S_q - S_z$$

将K代入 (1. 2-6) 式，整理后得转差率方程式 $S = S(t)$ 的普遍形式

$$S = S_z (1 - e^{-t/B}) + S_q e^{-t/B} \quad (1. 2-7)$$

根据 $S = \frac{n_t - n}{n_t}$ 关系式, 可将 (1. 2—7) 式改为转速方程式 $n = n(t)$ 的普遍形式

$$n = n_z(1 - e^{-t/B}) + n_q \cdot e^{-t/B} \quad (1. 2-8)$$

根据机械特性为直线, 转差率和转矩成正比关系, 故 (1. 2—7) 式可以改写成

$$M = M_z(1 - e^{-t/B}) + M_q e^{-t/B} \quad (1. 2-9)$$

直流并激、他激电动机和交流异步电动机(工作部分)的转矩与电枢电流或负载电流成正比, 因此, (1. 2—9) 式又可写成

$$I = I_z(1 - e^{-t/B}) + I_q e^{-t/B} \quad (1. 2-10)$$

公式 (1. 2—7)、(1. 2—8)、(1. 2—9) 和 (1. 2—10) 表示负载转矩恒定 ($M_z = \text{常数}$), 机械特性曲线 $n = f(M)$ 为直线时电动机的转差率、转速、转矩和电流都是按一个相同的指数规律变化的, 如图 1. 2—2 所示。

指数曲线变化的快慢与 B 值有关。 B 命名为机电时间常数。

当电动机由静止状态启动时, $n_q = 0$, 转速的变化规律如下表所示。

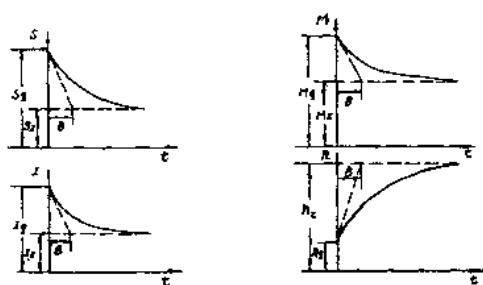


图1.2—2 $M_z = \text{常数}$, $n = f(M)$ 为直线的机械过渡过程曲线

t	$e^{-t/B}$	n
0	1	0
B	0.368	$0.632n_w$
2B	0.135	$0.865n_w$
3B	0.05	$0.95n_w$
4B	0.02	$0.98n_w$
∞	0	n_w

理论上只有在 $t = \infty$ 时, 过渡过程才完毕。实际上可以认为在 $t = (3 \sim 4)B$ 时, 过渡过程即告完毕。可见机电时间常数 B 在研究过渡过程问题中占有很重要的地位。

机电时间常数 $B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t Se}{Me}$, 它是由机械与电气两方面作用产生的。机械方面反

应在飞轮惯量 GD^2 上; 电气方面反应在与直线机械特性有关的参数 $\frac{n_t Se}{Me}$ 上。

机电时间常数 B 又可以改写成

$$B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t Se}{Me} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{60}{2\pi} \omega_0 \cdot \frac{Se}{Me} = \frac{J \omega_0 Se}{Me} \quad (\text{秒})$$

式中, J 的因次是 (公斤·米·秒²) ω_0 的因次是 (秒⁻¹), Me 的因次是 (公斤·米), 因此, 机电时间常数 B 具有时间的单位——秒。

根据图 1, 2—1 则得

$$\frac{M_e}{S_e} = \frac{M_{dl}}{S_{dl}} = M_{dl}$$

这样, $B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t}{M_{dl}}$ 。因此, 可以解释机电时间常数 B 的大小, 相当于系统的飞轮惯量为 GD^2 , 空载起动转矩为恒值的短路转矩 M_{dl} , 电动机转速由零升到 n_t 所用的时间。

机电时间常数 B 的大小与负载转矩大小无关, 只与系统的 GD 及机械特性的硬度有关。因此, 改变 GD^2 的大小或 M_{dl} , n_t 的大小均能使 B 改变。

对他激电动机而言, $M_{dl} = C_M \phi I_{dl} = C_M \phi \frac{U}{R}$, 而 $U = C_e \phi n_e$, 将这两个关系代入式

$$B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t}{M_{dl}}, \text{ 得}$$

$$B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t}{M_{dl}} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_t}{C_M \phi \frac{U}{R}} = \frac{GD^2 \cdot R}{375 C_e C \phi^2}$$

可见, 改变电枢电路中的电阻 R 与激磁绕组的电流均能使 B 改变。对异步电动机而言,

$$\frac{S_e}{1} = \frac{R_z}{R_{ze}}$$

将此关系代入机电时间常数 B 的公式得

$$B = \frac{J \omega_0 S_e}{M_e} = \frac{J \omega_0 R_z}{M_e R_{ze}}$$

可见, 改变异步电动机转子电路电阻会使 B 值改变。

改变 B 值大小的目的, 在于求得我们所要求的过渡过程的时间, 从而提高生产率, 降低过渡过程的损耗。

最后应当指出: 在求解运动方程式时, 我们并没有规定 $(M - M_z) > 0$ 或 $(M - M_z) < 0$; 因此, 公式 (1. 2—7)、(1. 2—8)、(1. 2—9) 和 (1. 2—10) 既适用于电动机加速的场合, 也适用于电动机制动减速的场合。

三、直线机械特性, 恒定负载转矩的起动过程

绕线式异步电动机和直流他激电动机通常是在其转子或电枢中串入多级电阻起动, 在起动过程中逐步切除电阻; 起动完毕后, 所串电阻全部切除。其起动过程的机械特性见图 1. 2—3 (a), 这里以二级起动电阻为例。

第一级起动时, 转子 (或电枢) 中的电阻为 $(R_z + r_{t2} + r_{f1})$, 电流由 I_1 变到 I_2 , 转速由零变到 n_1 , 这时切除第一级附加电阻 r_{f1} 。

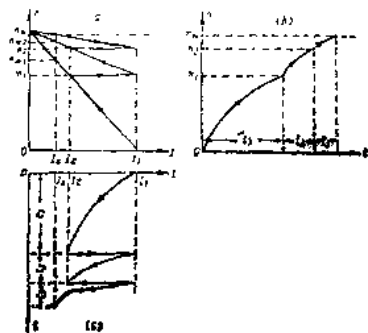


图 1. 2—3 直线机械特性、电动机串二级电阻起动过程

第二级启动时, 转子 (或电枢) 中的电阻为 $(R_2 + r_{f2})$, 电流仍由 I_1 变到 I_2 , 转速由 n_1 变到 n_2 , 这时切除第二级附加电阻 r_{f2} 。在该特性曲线上对应负载电流 I_z 的转速为 n_w 。

现在要求计算出 $n = n(t)$ 及 $i = i(t)$ 以了解启动过渡过程的全貌。要求计算出每级加速所用的时间; 据此时间来整定电动机自动启动线路中的时间继电器的延时, 以使电阻按设计的规律来切除, 从而使转速与电流按预定规律进行变化。另外也可以准确地计算出全部启动过程的时间。

(一) 各启动级转速、电流的变化规律

观察分析图 1. 2 (a), 我们可以看出以下几个问题:

1、各机械特性曲线均为直线, 负载恒定, 故可引用公式 (1. 2—8) 和 (1. 2—10) 求 $n = n(t)$ 和 $i = i(t)$;

2、由于各级转子电阻不同, 故对应于各级的机电时间常数 B 也不同, 转子电阻越大, B 值也越大;

3、各级的起始转速分别为零, n_1 和 n_2 ;

4、各级的稳定转速分别为 n_{w1} 、 n_{w2} 和 n_w 。

因此, 把不同的机电时间常数 B 、不同的起始值与稳定值代入公式 (1. 2—8) 和 (1. 2—10) 中, 即表征了启动过程的 $n = n(t)$ 和 $i = i(t)$ 的变化规律。为清楚起见, 列表如下:

直线机械特性电动机启动参数变化关系表

	第一级	第二级	最末一级
转子(电枢)中电阻 R	$R_z + r_{f1} + r_{f2} = R_1$	$R_z + r_{f2} = R_2$	$R_z (R_s)$
机电时间常数 B	$B_1 = \frac{J\omega_0 R_1}{Me R_{ze}}$ 或 $B_1' = \frac{GD^2 R_1}{375 Ce C_M \phi^2}$	$B_2 = \frac{J\omega_0 R_2}{Me R_{ze}}$ 或 $B_2' = \frac{GD^2 R_2}{375 Ce C_M \phi^2}$	$B = \frac{J\omega_0 R_z}{Me R_{ze}}$ 或 $B' = \frac{GD^2 R_z}{375 Ce C_M \phi^2}$
稳定转速	n_{w1}	n_{w2}	n_w
稳定电流	I_z	I_z	I_z
转速 n 变化区域	$0 \rightarrow n_1$	$n_1 \rightarrow n_2$	$n_2 \rightarrow n_w$
电流 i 变化区域	$I_1 \rightarrow I_2$	$I_1 \rightarrow I_2$	$I_1 \rightarrow I_2$
$n = n(t)$	$n_{w1}(1 - e^{-t/B_1})$	$n_{w2} - (n_{w2} - n_1)e^{-t/B_2}$	$n_w - (n_w - n_2)e^{-t/B}$
$i = i(t)$	$I_2 - (I_2 - I_1)e^{-t/B_1}$	$I_2 - (I_2 - I_1)e^{-t/B_2}$	$I_2 - (I_2 - I_1)e^{-t/B}$
进行时间 t_x	$t_1 = B_1 \ln \left(\frac{I_1 - I_z}{I_2 - I_z} \right)$	$t_2 = B_2 \ln \left(\frac{I_1 - I_z}{I_2 - I_z} \right)$	$t_3 = (3 \sim 4) B$

表中各级 $n = n(t)$ 和 $i = i(t)$ 中的时间 t 是由切换电阻算起的, 与其对应的曲线见图 1. 2—3 (b) 和 (c)。

(2) 启动时间的计算