

中等专业学校教学用书

电力拖动与控制

彭世生 王 平 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书共分八章,前三章讲述了电力拖动与控制的一些基本理论,包括电力拖动系统动力学、电动机的机械特性与选择、电力拖动系统的调速与过渡过程、电力拖动自动控制原理等内容。后五章按电动机的类型结合煤矿机械的特点讲述了各种电动机的拖动与控制,并介绍了煤矿生产实践中常用的一些典型电控系统。

本书是煤矿中等专业学校电气化专业教材,也可供有关工程技术人员和具有一定电工专业知识的工人参考。

责任编辑:胡玉雁

中等专业学校教学用书

电力拖动与控制

彭世生 王平 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092¹/₁₆

印张21¹/₄ 插页6

字数510千字

印数1—10,600

1985年4月第1版

1985年4月第1次印刷

书号15035·2715 定价3.55元

前 言

本书是根据一九八一年修订的煤矿中等专业学校“电力拖动与控制”教学大纲编写的。

全书共分八章，前三章讲述了电力拖动与控制的一些基本理论，后五章按电动机的类型结合煤矿机械的特点讲述了各种电动机的拖动与控制问题。在讲述后一部分内容时，介绍了一些煤矿生产实践中常用的典型电控系统，使理论和实践紧密结合起来。

本书是煤矿中等专业学校电气化专业教材，也可供工程技术人员和具有一定电工专业知识的工人参考。

本书由大同煤矿学校彭世生同志主编、王平同志参加编写了第一、二、六、七章。由北京煤矿学校秦守信、张汝梅同志审阅。编写过程中还得到了校内外许多同志的支持与帮助，在此我们表示衷心的感谢。

由于时间仓促、编者水平有限、书中一定存在不少缺点和问题，希望读者提出宝贵意见。

一九八三年二月

目 录

绪论

第一章 电力拖动的基本问题	4
第一节 电力拖动系统运动方程	4
第二节 电力拖动系统飞轮惯量和负载转矩的计算	5
第三节 电动机的机械特性	10
第四节 电力拖动系统稳定运行条件	22
第五节 电力拖动系统转速调节	24
第六节 电力拖动系统的过渡过程	35
第七节 电力拖动系统双电动机拖动分析	46
第二章 电动机选择	55
第一节 电动机选择的原则	55
第二节 电动机的发热过程和冷却过程	57
第三节 长时运行状态的电动机容量的选择	61
第四节 短时运行状态的电动机容量的选择	76
第五节 重复短时运行状态的电动机容量的选择	78
第三章 电力拖动自动控制原理	82
第一节 自动控制的基本概念	82
第二节 自动控制系统的静态特性	88
第三节 自动控制系统的动态特性	92
第四节 自动控制系统的品质	107
第五节 电气控制线路图	108
第六节 电力拖动自动控制的基本原理	112
第七节 电机放大机自动调速系统	115
第四章 鼠笼式异步电动机的拖动与控制	125
第一节 控制电器	125
第二节 鼠笼式电动机降压起动电控系统	131
第三节 装岩机的电控系统	137
第四节 采煤机的电控系统	140
第五节 运输机的电控系统	156
第六节 综采工作面机械的控制简介	168
第五章 绕线式异步电动机的拖动与控制	177
第一节 绕线式异步电动机的起动、调速与制动	177
第二节 绕线式异步电动机转子起动电阻的计算	189
第三节 控制电器	210
第四节 绕线式电动机转子串频敏变阻器电控系统	220
第五节 小绞车手动控制电气线路	222
第六节 提升机用绕线式电动机拖动的控制过程	223

第七节	矿井提升机KKX电控系统	228
第八节	矿井提升机TKD-A电控系统	235
第九节	矿井提升机其他电控系统简介	247
第六章	直流他激电动机的拖动与控制	252
第一节	他激电动机的起动和制动性能	252
第二节	矿井提升机直流发电机-电动机组的电控系统	260
第三节	矿井提升机可控硅整流器-电动机电控系统简介	271
第四节	钢丝绳牵引胶带输送机直流拖动电控系统简介	285
第七章	直流串激电动机的拖动与控制	291
第一节	串激电动机的起动、调速和制动性能	291
第二节	矿用架线式电机车有触点电控系统	297
第三节	矿用架线式电机车可控硅脉冲调速电控系统	305
第八章	同步电动机的拖动与控制	318
第一节	概述	318
第二节	带励磁机的同步电动机控制线路	322
第三节	可控硅励磁的同步电动机控制线路	323

绪 论

在工业、农业、交通运输等部门中，广泛地使用着各种各样的生产机械，这些生产机械的直接原动力主要是电力。用电动机为动力来拖动生产机械的拖动方式叫“电力拖动”。电力拖动所以能够得到广泛的应用是因为具有以下一系列的优点：

1. 电能输送方便、经济、便于分配；
2. 电力拖动效率高，控制方便，拖动性能好；
3. 电动机的种类和型式很多，具有各种各样的性能，可以满足不同类型生产机械的需要；
4. 电力拖动可以通过各种仪表和仪器进行观察和监视，以便对生产过程进行检查和控制，使其达到生产工艺要求的最合理工作状态；
5. 电力拖动可以远距离测量和控制，集中管理，便于实现生产过程的自动化。

因此，电力拖动，特别是自动化的电力拖动，就成为现代工业生产高度电气化和自动化的基础与核心。

电力拖动由电动机、传动机构和控制设备等三个基本部分组成，如下图所示。

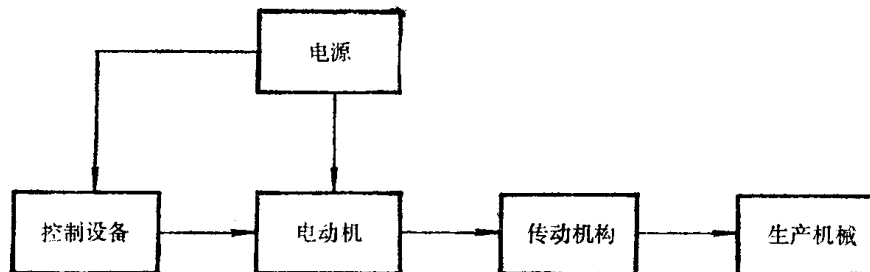


图 0-1 电力拖动组成示意图

电动机是用以实现电能与机械能相互转换的机械。通常是把电能转换成机械能，这时电动机工作在电动状态；但有时也反过来把机械能转换成电能或热能，这时电动机工作在制动状态。在一个电力拖动系统中除了有一台或几台主电动机外，还有一些辅助电动机、控制电机等。

传动机构的主要作用是传递动力，并能实现速度和运动方式的变换，如减速箱、皮带、联轴节等。

控制设备是控制与变换供给电动机电能的形式与时间，使其适应生产机械的需要。控制设备是由各种控制电器按照一定线路组成的。由于电子技术的飞速发展和电子计算机的广泛应用，使控制系统愈来愈成为一个完善的自动化系统。

“电力拖动与控制”这门课程就是研究电力拖动和控制系统中的各种问题。电力拖动研究的对象包括电动机的特性、电力拖动过渡过程、电机的选择等问题。控制研究的对象包括控制电器与控制电机的构造及性能、各种电动机控制线路组成的规律，实现自动控制的规律与方法等问题。

电力拖动大致经历了三个不同的发展阶段。十九世纪末, 由于交、直流电动机的相继出现, 电动机逐步代替了蒸气机。最初是由一台电动机通过天轴拖动数台乃至一个车间的生产机械, 这种拖动方式叫“成组拖动”。成组拖动传动机构复杂, 转速不高, 效率低, 生产灵活性小, 又不安全。在二十世纪二十年代, 开始采用一台电动机只拖动一台生产机械的“单电动机拖动”方式。这样就缩减了中间传动机构, 提高了效率, 为生产机械提供了更大的动力和更高的速度。随着生产规模的扩大, 逐渐制造出各种大型复杂的机械设备, 这些机械上运动机构和运动形式也相应增加。如果仍用一台电动机拖动, 传动机构就会变的十分复杂。因此, 在二十世纪三十年代开始出现了在一台生产机械上由几台电动机分别拖动不同的运动机构, 这就是“多电动机拖动”方式。采用多电动机拖动方式后, 大大简化了机械结构, 使各个工作机构采用最合理的运动速度, 缩短了机动与辅助工时, 便于实现生产机械的自动化, 提高生产率。

目前, 生产机械绝大多数是采用单电动机或多电动机拖动方式。

电力拖动可以分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力的拖动方式, 交流拖动是以交流电动机为动力的拖动方式。目前, 由于交流电动机具有结构简单、制造方便、维护容易、价格便宜等优点, 所以使用较为广泛。但是直流电动机有良好的起动、控制和调速性能, 可以方便地在很宽的范围内平滑地调速, 所以在频繁起动、制动及调速要求较高的场合, 直流拖动仍然居主要地位, 并被用于自动控制要求较高的各种生产部门, 例如机械制造行业的大型机床, 煤炭工业中的大型提升机。

电力拖动自动控制方式可分为断续控制和连续控制两大类。断续控制是有级控制, 连续控制是无级控制。自动控制系统的发展, 经历了一个从断续控制到连续控制、又到断续控制的过程。最早的自动控制是在本世纪20~30年代形成的, 它借助于简单的接触器与继电器等控制电器, 实现对控制对象的起动、停车以及有级调速等控制。它的控制速度慢、控制精度差。到了40~50年代, 出现了电机放大机—发电机—电动机控制, 使控制系统从断续控制发展到连续控制; 同时, 也促进了闭环控制理论的发展。连续控制系统能经常不断地检查控制对象的工作状态, 当输出量与给定量发生偏差时, 自动进行调整。连续控制的快速性及控制精度都远远超过了最初的断续控制, 并简化了控制系统, 减少了电路中的接点, 提高了可靠性, 使生产率大大提高了。50~60年代出现了磁放大器—水银整流器控制, 60年代出现了晶体管放大器—可控硅控制, 以及发展到70年代的集成电路放大器—可控硅控制, 都属于连续控制系统。由于数控技术的发展, 特别是电子计算机的应用, 又使控制理论发展到一个新阶段——采样控制。采样控制是一种控制间隔极短的断续控制, 它为生产过程的自动化开辟了新的途径。

电子技术的发展, 特别是可控硅元件的出现, 电子计算机的广泛应用, 使自动控制系统日趋完善。

电力拖动与控制在生产建设中发挥着非常重要的作用, 先进的电力拖动与自动控制不仅可以提高劳动生产率, 提高产品质量, 创造更多的物质财富, 而且改善了劳动条件, 便于实现文明生产。

在煤炭工业中有大量的、各种各样的电力拖动与控制系统。我国已制造出直径6米、功率3200千瓦的大型提升机, 并配套生产了KKX、TKD、TKMK/J等半自动或全自动的电控系统, 自动化提升矿井也已在我国出现。近年来我国试验成功了可控硅供电的直流拖动

和电控系统，并且生产了全套设备。在采掘机械方面、我国已制造出400千瓦的大型采煤机，并配套生产了有线控制、载波控制和无线电控制系统。

现在，国外工业先进的国家在煤矿中已经大量地采用了电子计算机和遥控、遥测、通讯技术。由单机自动化发展成为综合自动化，现在正向全矿自动化过渡。提升机最大容量达到一万千瓦，拖动方式由单机、双机发展到多机拖动。采掘机械已经生产了750千瓦的大型采煤机。国外大型提升机优先考虑用可控硅直流拖动，采煤机也开始试验用电子计算机自动控制的可控硅直流拖动系统。运输方面已经有了用电子计算机控制的井下无人驾驶电机车。

由此可见，采用大型高效的电力拖动和高度自动化的控制系统是电力拖动与控制发展的必然趋势。

“电力拖动与控制”这门课是电气化专业的一门主要专业课。在学习本课程前必须具备力学、电工原理、电机学、电子技术和煤矿机械等方面的基础知识。在学习过程中要理论联系实际。

学习本课程，要求学生掌握煤矿常用电动机的性能和选择方法；各种主要电气控制元件的原理、构造和性能；控制系统的组成和分析方法。通过学习应具备一定的计算和选型的能力；能设计简单的控制线路；初步掌握一些常见电控系统的运行、维护和调试的基本技能。

第一章 电力拖动的基本问题

现代化的煤矿生产是机械化生产，用于拖动各种生产机械的电动机种类繁多。例如，矿井提升机采用直流他激电动机或者交流绕线式异步电动机拖动；水泵、采煤机和运输机等一般采用交流鼠笼式异步电动机拖动；空气压缩机和主扇风机多采用交流同步电动机拖动；而矿用电机车则采用直流串激电动机拖动。

尽管用于拖动煤矿生产机械的电动机的种类繁多，由它们所组成的电力拖动方式也不相同。但是，它们都具有共性的问题，即电力拖动系统运动方程、机械特性、转速调节、过渡过程和双电动机拖动等。这些共性问题是电力拖动与自动控制的基础。

第一节 电力拖动系统运动方程

任何一种由电动机和生产机械（包括传动机构）所组成的电力拖动系统的运动状态可以分为：稳定运行状态和非稳定运行状态（也叫做过渡过程）。为了描述拖动系统的运动状态，可以采用运动方程。

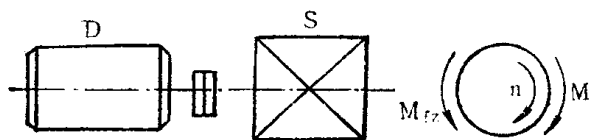


图 1-1 单轴拖动系统

图1-1是最简单的拖动系统示意图。图中的D是电动机，S是生产机械。由于二者之间没有变速机构，所以也叫单轴拖动系统，其特点是生产机械的转速与电动机转速相等。

当电动机拖动生产机械转动时，作用于电动机轴上有两个转矩。一个是电动机发出的电磁转矩 M ，其方向与转速 n 的方向相同，叫做拖动转矩；另一个是生产机械产生的负载转矩 M_{tz} ，其方向与转速 n 的方向相反，叫做静阻转矩（负载转矩）。

设拖动系统的转动惯量为 J （包括电动机转子转动惯量、联轴节转动惯量和生产机械转动部分转动惯量），电动机转动角速度为 ω 。由力学得出拖动系统运动方程为

$$M - M_{tz} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机发出的电磁转矩，公斤·米；

M_{tz} ——生产机械作用于电动机轴上的负载转矩，公斤·米；

J ——拖动系统作用于电动机轴上的转动惯量，公斤·米·秒²；

$\frac{d\omega}{dt}$ ——电动机的角加速度，弧度/秒²。

拖动系统作用于电动机轴上的转动惯量简称为系统的转动惯量，可以用下式表示

$$J = m\rho^2 \quad (1-2)$$

式中 m ——拖动系统作用于电动机轴上的变位质量，公斤·秒²/米；

ρ ——拖动系统质量 m 对其转轴的回转半径，米。

为了便于工程计算，把系统的转动惯量 J 用飞轮惯量 GD^2 表示，由式（1-2）得出二

者的关系为

$$J = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中 GD^2 ——拖动系统作用于电动机轴上的飞轮惯量，公斤·米²；

G ——拖动系统作用于电动机轴上的变位重量，公斤；

D ——拖动系统重量 G 对其转轴的转动直径，米；

g ——重力加速度，9.81 米/秒²。

将式 (1-3) 和 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入式 (1-1) 中，得出电力拖动系统运动方程的实用公式为

$$M - M_{tz} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中 n ——电动机转速，转/分；

375——具有加速度量纲的系数，米/秒²。

用式 (1-4) 所示的拖动系统运动方程可以分析系统的运动状态。

当 $M - M_{tz} = 0$ ，即 $\frac{dn}{dt} = 0$ 时，则 $n = 0$ 或 $n = c$ (常数)，电动机静止或匀速转动，系统处于稳定运行状态。

当 $M - M_{tz} > 0$ ，即 $\frac{dn}{dt} > 0$ 时，则 n 是升高的，电动机加速转动，系统处于非稳定运行状态。

当 $M - M_{tz} < 0$ ，即 $\frac{dn}{dt} < 0$ 时，则 n 是降低的，电动机减速转动，系统也处于非稳定运行状态。

用式 (1-4) 还可以求解电动机转速 n 在过渡过程中随时间 t 的变化规律，即

$$n = \frac{1}{\frac{GD^2}{375}} \int (M - M_{tz}) dt$$

用式 (1-4) 也可以求出电动机转速变化的时间，即

$$t = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{M - M_{tz}}$$

式中的 n_1 、 n_2 分别为电动机转速变化的起始值和终了值。

值得注意的是，运动方程中的转矩 M 、 M_{tz} 和转速 n 均为代数量，有正、负之分。为此，在运用方程时，应先假定转速 n 的正方向，然后再根据转矩 M 和 M_{tz} 的方向来判断其正与负，当电磁转矩 M 与转速 n 同方向时， M 为正值；反之，为负值。当负载转矩 M_{tz} 与转速 n 反方向时， M_{tz} 为正值；反之，为负值。如图 1-1 所示。

第二节 电力拖动系统飞轮惯量和负载转矩的计算

由于生产机械的工作要求，往往在电动机和生产机械之间设有传动机构(变速机构)，因而组成了多轴拖动系统，如图 1-2 所示。其特点是各转轴的转速不相等。

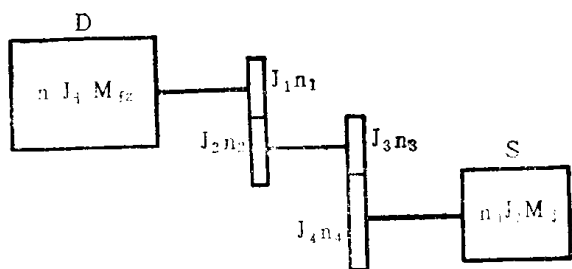


图 1-2 多轴拖动系统

在分析多轴拖动系统的运动状态时，应分别列出各轴的运动方程和各轴之间相互联系的方程，然后联立求解；这显然很烦。为了简化计算，可把实际的多轴拖动系统折算成等效的单轴系统，折算的原则是保持两个系统传送的功率及储存的动能相同。因为我们最关注的是电动机的运动状态，所以通常将处于不同转速下的各轴转动惯量（或飞轮

惯量）均折算到电动机轴上，将作用于生产机械转轴上的负载转矩也折算到电动机轴上，然后用一个等效的单轴拖动系统来代替复杂的多轴系统，并且用运动方程求解等效的单轴拖动系统的运动状态。这种应用运动方程分析多轴拖动系统运动状态的方法，也叫做“折算”法。

一、拖动系统飞轮惯量的计算

由力学可知，在不同转速下各转轴的转动惯量折算到电动机轴上时，由于转速发生变化，其转动惯量数值也要相应变化。转动惯量折算的原则是：折算前后该轴具有的动能不变。

设x轴的转速为 n_x ，角速度为 ω_x ，其转动惯量为 J_x ；又设该轴折算到电动机轴上的转动惯量为 J_{dx} ，电动机转速为 n ，角速度为 ω ，根据上述折算原则，得出如下关系

$$J_{dx} \frac{\omega^2}{2} = J_x \frac{\omega_x^2}{2}$$

$$J_{dx} = J_x \left(\frac{\omega_x}{\omega} \right)^2 = J_x \left(\frac{n_x}{n} \right)^2$$

$$J_{dx} = J_x \frac{1}{j_{dx}^2} \quad (1-5)$$

式中 $j_{dx} = \frac{n}{n_x}$ ——电动机轴对x轴的传动比。

上式说明：x轴折算到电动机轴上的转动惯量等于该轴的转动惯量除以电动机轴对该轴传动比的平方。

又根据式(1-3)，得出x轴飞轮惯量 $(GD^2)_x$ 折算到电动机轴上的飞轮惯量为

$$(GD^2)_{dx} = (GD^2)_x \frac{1}{j_{dx}^2} \quad (1-6)$$

对于多轴系统来说，作用于电动机轴上的系统飞轮惯量(转动惯量)，应等于各转轴折算到电动机轴上飞轮惯量(转动惯量)之和，即

$$GD^2 = (GD^2)_d + (GD^2)_1 \frac{1}{j_{d1}^2} + (GD^2)_2 \frac{1}{j_{d2}^2} + (GD^2)_3 \frac{1}{j_{d3}^2} + \dots \quad (1-7)$$

式中 GD^2 ——拖动系统的飞轮惯量；

$(GD^2)_d$ ——电动机转子的飞轮惯量；

$(GD^2)_1, (GD^2)_2, \dots$ ——各转轴的飞轮惯量；

$j_{d1}, j_{d2}, \dots$ ——电动机轴对于各转轴的传动比。

上式说明：作用于电动机轴上拖动系统的飞轮惯量等于电动机转子飞轮惯量加上各转轴飞轮惯量除以电动机轴对于该轴传动比平方之和。

如果以生产机械转轴做为研究对象，拖动系统作用于该轴上的飞轮惯量也可以模仿式(1-7)写出，即

$$(GD^2)' = (GD^2)_j + (GD^2)_d \frac{1}{j_{jd}^2} + (GD^2)_1 \frac{1}{j_{j1}^2} + (GD^2)_2 \frac{1}{j_{j2}^2} + \dots$$

式中 $(GD^2)_j$ ——生产机械转动部分飞轮惯量；

j_{jd} ——生产机械转轴相对于电动机轴的传动比；

$j_{j1}, j_{j2}, \dots$ ——生产机械转轴相对于各转轴的传动比。

有些生产机械具有做直线运动的物体，其质量为 m ，该质量也要储存动能，并产生机械惯性，使电动机的转速不能突变。为此，需将该质量产生的惯性也折算到电动机轴上，折算的原则仍然是动能不变。

设物体的直线运动速度为 V (米/秒)，其惯性折算到电动机轴上的转动惯量为 J_m ，根据上述折算原则有

$$J_m \frac{\omega^2}{2} = m \frac{V^2}{2}$$

$$J_m = m \left(\frac{V}{\omega} \right)^2 \quad (1-8)$$

将式(1-3)和 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 代入上式后，得出质量 m 的惯性折算到电动机轴上的飞轮惯量为

$$(GD^2)_m = \frac{364 G_m V^2}{n^2} \quad (1-9)$$

式中 G_m ——物体的重量，公斤。

如果计入直线运动物体质量的机械惯性后，作用于电动机轴上的系统飞轮惯量为

$$GD^2 = (GD^2)_d + (GD^2)_m + (GD^2)_1 \frac{1}{j_{d1}^2} + (GD^2)_2 \frac{1}{j_{d2}^2} + \dots \quad (1-10)$$

二、拖动系统负载转矩的计算

生产机械用于做功的转矩 M_j 和力 F_j 在电动机轴上均要产生静阻转矩，此转矩叫做电动机的负载转矩 M_{tz} ，或者叫做拖动系统的负载转矩。

由于生产机械转轴的转速与电动机转速不相等，所以转矩 M_j 折算到电动机轴上时，其数值要发生变化。折算的原则是：折算前后系统传递的功率不变，但是要考虑传动效率 η_c 。

当电动机运行运行时，功率传递方向是由电动机到生产机械，传动损耗功率是由电动机来承担。如果设电动机和生产机械转轴的角速度分别为 ω 和 ω_j ，根据上述原则，有如下的关系

$$M_{tz}\omega = \frac{M_j\omega_j}{\eta_c}$$

$$M_{tz} = \frac{M_j}{\frac{\omega}{\omega_j} \eta_c} = \frac{M_j}{j_c \eta_c} \quad (1-11)$$

式中的 j_c 叫拖动系统传动比，它等于各级传动比的乘积，即

$$j_c = j_1 \cdot j_2 \cdot j_3 \cdots$$

η_c 是总的传动效率，它等于各级传动效率的乘积，即

$$\eta_c = \eta_{c1} \cdot \eta_{c2} \cdot \eta_{c3} \cdots$$

当电动机制动运行时，功率的传递方向是由生产机械到电动机，此时传动损耗功率由生产机械承担，因此有

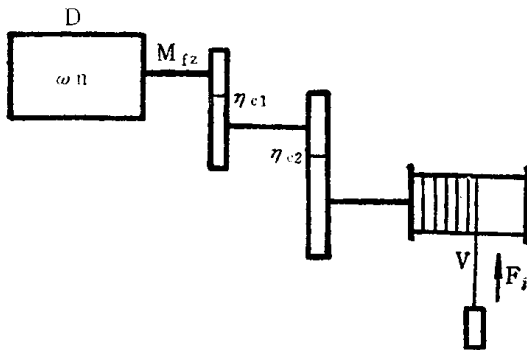


图 1-3 矿井提升机示意图

$$M_{tz} = \frac{M_j}{j_c} \eta_c \quad (1-12)$$

如果生产机械用直线运动的力 F_j (公斤) 来做功， F_j 折算到电动机轴上也将产生负载转矩 M_{tz} 。例如，矿井提升机钢丝绳的静拉力 F_j ，如图 1-3 所示。

根据传递功率不变的原则，当电动机电动运行时，有如下关系

$$M_{tz} \omega = \frac{F_j V}{\eta_c}$$

将式中角速度 ω 用转速 n 表示，并经化简后有

$$M_{tz} = 9.55 \frac{F_j V}{n \eta_c} \quad (1-13)$$

式中 V ——钢丝绳的直线运动速度，米/秒；

n ——电动机转速，转/分。

F_j ——钢丝绳的静拉力，公斤 (1 公斤 = 9.81 牛顿)。

同理，当电动机制动运行时，有

$$M_{tz} = 9.55 \frac{F_j V}{n} \eta_c \quad (1-14)$$

例 1-1 图 1-4 是单绳缠绕双滚筒提升机提升示意图。已知有关的技术数据如下：

该矿年产量为 60 万吨，井筒深度 $H_s = 232$ 米，装载水平低于井下运输水平 $H_z = 18$ 米，卸载水平高于井口水平 $H_x = 16$ 米。采用箕斗提升，箕斗的载重量 $G_z = 4000$ 公斤，箕斗自重 $G_r = 4400$ 公斤。采用直径为 37 毫米的钢丝绳，钢丝绳每米长度的重量 $p_0 = 4.882$ 公斤/米。提升机采用 2JK-3/11.5 型，滚筒直径 $D = 3$ 米，传动比 $j_c = 11.5$ ，传动效率 $\eta_c = 0.85$ ，减速器和滚筒折算到滚筒轴上的总重量 $G_j = 16.3$ 吨。天轮直径 $D_t = 3$ 米，变位重量 $G_t = 781$ 公斤。电动机采用三相交流绕线式异步电动机，型号为 YR-118/51-12 型，额定功率 $P_e = 500$ 千瓦，额定转速 $n_e = 492$ 转/分，转子飞轮惯量 $(GD^2)_d = 800$ 公斤·米²。井架高度 $H_j = 30$ 米，钢丝绳弦长 $L_x = 40.89$ 米。试求：

(1) 作用于电动机轴上的拖动系统最大负载转矩；

(2) 提升系统的飞轮惯量；

(3) 提升系统的变位质量;

(4) 若提升机匀加速起动, 当加速度 $a_1 = 1$ 米/秒²时的起动时间和起动转矩。

解: (1) 作用于电动机轴上的拖动系统最大负载转矩

对于滚筒轴来说, 两个箕斗的自重、井口卸载水平以上的两根钢丝绳重量是相互抵消的。作用于滚筒圆周上钢丝绳最大静负载力等于箕斗载重与井口卸载水平以下两根钢丝绳最大长度差的重量和。

井口卸载水平以下两根钢丝绳最大长度差(提升高度)为

$$H = H_x + H_s + H_z = 16 + 232 + 18 = 266 \text{ 米}$$

作用于滚筒圆周上钢丝绳最大静负载力为

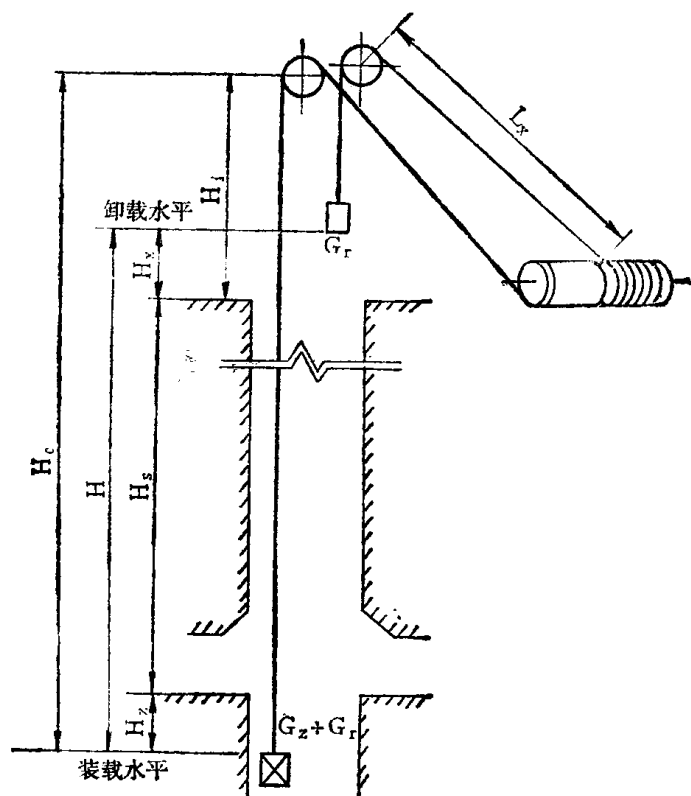


图 1-4 例1-1提升机示意图

$$F_j = KG_z + p_0 H = 1.15 \times 4000 + 4.882 \times 266 = 5899 \text{ 公斤}$$

式中 K ——矿井阻力系数, 箕斗提升取 1.15, 罐笼提升取 1.2。

作用于滚筒上的最大负载转矩为

$$M_j = F_j \frac{D}{2} = 5899 \times \frac{3}{2} = 8848 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

作用于电动机轴上最大负载转矩为

$$M_{tz} = \frac{M_j}{j_c \eta_c} = \frac{8848}{11.5 \times 0.85} = 905 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

(2) 提升系统飞轮惯量

因为箕斗、载重和钢丝绳运动速度均等于滚筒圆周的线速度, 所以它们的变位重量等于自身的重量。

钢丝绳的最大悬垂长度(从天轮轴线至井下装载水平之间距离)为

$$H_c = H_j + H_s + H_z = 30 + 232 + 18 = 280 \text{ 米}$$

两根钢丝绳重量为(考虑钢丝绳缠在滚筒上摩擦圈数 3 圈和试验长度 30 米)

$$\begin{aligned} 2G_s &= 2p_0(H_c + L_x + 3\pi D + 30) \\ &= 2 \times 4.882 \times (280 + 40.89 + 3 \times 3.14 \times 3 + 30) = 3702 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

折算到滚筒圆周上运动部分(不包括电动机转子)的变位重量为

$$\begin{aligned} G' &= G_j + 2G_s + 2G_t + 2G_r + G_z \\ &= 16300 + 3702 + 2 \times 781 + 2 \times 4400 + 4000 = 34364 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

该重量在滚筒轴上产生的飞轮惯量为

$$G'D^2 = 34364 \times 3^2 = 309276 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$$

作用于电动机轴上提升系统飞轮惯量为

$$GD^2 = (GD^2)_d + \frac{G'D^2}{j_c^2} = 800 + \frac{309276}{11.52} = 3138.6 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2$$

(3) 提升系统变位质量

提升系统变位质量是指包括电动机转子在内的折算到滚筒圆周上的变位质量。

电动机转子的变位质量为

$$m'_d = \frac{(GD^2)_d}{g \cdot D^2} j_c^2 = \frac{800}{9.81 \times 3^2} \times 11.5^2 = 1198 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米};$$

提升系统变位质量为

$$m = \frac{G'}{g} + m'_d = \frac{34364}{9.81} + 1198 = 4701 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米};$$

(4) 当加速度 $a_1 = 1 \text{ 米/秒}^2$ 时的起动时间和起动转矩

电动机加速起动时间为 (起动按匀加速运动考虑)

$$t_q = \frac{V_m}{a_1} = \frac{\pi D n_0}{60 a_1 j_c} = \frac{3.14 \times 3 \times 492}{60 \times 1 \times 11.5} = 6.72 \text{ 秒}$$

式中 V_m ——最大的提升速度, 米/秒。

电动机起动转矩由拖动系统运动方程得出

$$M_q = M_{tz} + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 905 + \frac{3138.6}{375} \times \frac{492}{6.72} = 1518 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

第三节 电动机的机械特性

电动机轴上输出的机械转矩与其转速的关系称之为机械特性。在忽略了机械损耗的条件下, 机械特性可以定义为电磁转矩 M 与转速 n 的关系, 即 $n = f(M)$, 有时也用电流 I 与转速 n 的关系表示, 即 $n = f(I)$ 。图1-5画出了几种常用电动机的机械特性曲线。

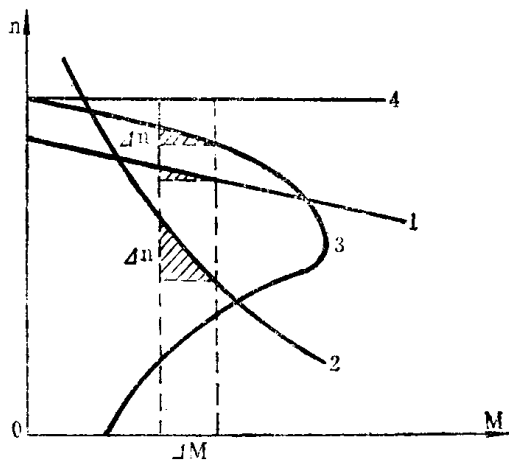


图 1-5 几种常用电动机的机械特性曲线

1—直流他激电动机; 2—直流串激电动机; 3—异步电动机; 4—同步电动机

由图看出: 在同一个电磁转矩变化量 ΔM 的条件下, 各种电动机转速的变化量 Δn 是不等的, 为了表示由于电磁转矩的改变而引起的转速变化的程度, 引用了机械特性曲线硬度系数 α , 其定义为转矩变化量与转速变化量比值的极限, 即

$$\alpha = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta n} = \frac{dM}{dn} \quad (1-15)$$

由此得出: 在给定转矩变化量时, 硬度系数越大, 电动机转速变化越小, 机械特性曲线越接近于水平线, 其特性越硬。同步电动机的机械特性曲线为一水平线, 其硬度系数 α 趋于无穷大, 此种特性称之为绝对硬特性。

直流他激电动机和异步电动机稳定运行区域的机械特性曲线为一斜直线, 其硬度系数 α 很大, 称之为硬特性。直流串激电动机的机械特性曲线为非线性曲线, 其硬度系数很小,

称之为软特性。

一、直流他激电动机的机械特性

他激电动机的接线如图1-6所示，图中的 R_s 是电枢绕组电阻， R_t 是外接的起动电阻。由《电机学》得出他激电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{RI}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1-16)$$

或者

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{RM}{C_e C_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n \quad (1-17)$$

式中 U ——电动机的端电压，伏；

I ——电动机的电枢电流，安；

Φ ——电动机每个磁极的工作磁通，韦伯；

R ——电枢回路总电阻， $R = R_s + R_t$ ，欧；

$C_e \Phi$ ——电动机电势系数，伏/转/分；

$C_m \Phi$ ——电动机转矩系数，公斤·米/安。

上述两个系数有如下的关系

$$C_m \Phi = \frac{C_e \Phi}{1.03} \quad (1-18)$$

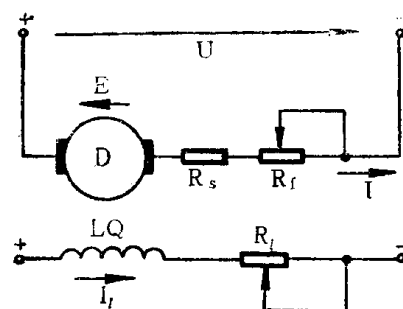


图 1-6 他激电动机原理图

当电动机的电压为额定值 U_e 、磁通也为额定值 Φ_e ，电枢中没有串入附加电阻 R_t 时，他激电动机自然机械特性方程为

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_s I}{C_e \Phi_e} = n_0 - \Delta n \quad (1-19)$$

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_s M}{C_e C_m \Phi_e^2} = n_0 - \Delta n \quad (1-20)$$

由此可见，在给定电压 U_e 、磁通 Φ_e 和电阻 R_s 后，他激电动机自然机械特性 $n = f(I)$ 和 $n = f(M)$ 是一条斜直线，如图1-7所示。

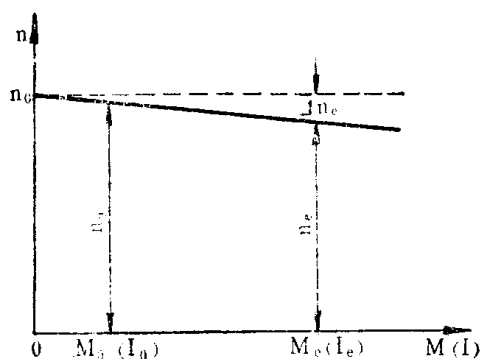


图 1-7 他激电动机自然机械特性

图中的 $n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi_e}$ ，是电动机理想空载转速，

它比实际的空载转速 n'_0 偏高一些： $\Delta n = \frac{R_s I}{C_e \Phi_e} =$

$\frac{R_s M}{C_e C_m \Phi_e^2}$ ，是电动机转速降落，它与电流 I （转矩

M ）成正比，是由电枢压降产生的。由于他激电动机电枢电阻 R_s 很小，所以自然机械特性的满载转速

降落 $\Delta n_e = \frac{R_s I_e}{C_e \Phi_e}$ 很低，其硬度系数很大，是个硬

特性。

由于他激电动机的自然机械特性是斜直线，所以在确定直线上两点座标之后，便可以绘制。其方法如下：

确定理想空载点的座标: $I = 0$, $n = n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi_e}$ 。电动机电势系数 $C_e \Phi_e$ 可以用下式计算

$$C_e \Phi_e = \frac{U_e - R_s I_e}{n_e}$$

式中 I_e ——电动机的额定电流, 安;

n_e ——电动机的额定转速, 转/分。

电枢绕组电阻 R_s 可以根据满载时铜损约占全部损耗一半的原则来估算, 即

$$R_s = \frac{0.5(U_e I_e - P_e)}{I_e^2}$$

式中 P_e ——电动机的额定功率, 瓦。

确定额定工作点的座标: $I = I_e$, $n = n_e$ 。连接上述两点, 便做出自然机械特性曲线 $n = f(I)$ 。

有时需要绘出 $n = f(M)$ 直线, 此时额定工作点的座标为 $M = M_{ce}$, $n = n_e$ 。额定电磁转矩 M_{ce} 可以用下式计算

$$M_{ce} = C_m \Phi_e I_e = \frac{C_e \Phi_e}{1.03} I_e$$

在要求精度不高时, 额定电磁转矩 M_{ce} 可以用额定转矩 M_e 代替, 即

$$M_{ce} \approx M_e = 975 \frac{P_e}{n_e} \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

式中的 P_e 的单位采用千瓦。

他激电动机人工机械特性分为三种: 电枢串附加电阻、降低电压和减小工作磁通。

由式(1-16)和式(1-17)看出: 在电压和磁通为额定值, 电枢串入附加电阻之后, 理想空载转速不变, 转速降落与电枢回路电阻成正比例地增加, 特性硬度系数降低, 特性变软, 如图1-8a所示。在磁通为额定值, 电枢没有串入附加电阻, 降低电压后, 理想空载转速成正比例地减小, 但是, 转速降落不变, 特性硬度也不变, 如图1-8b所示。在电压为额定值, 电枢没有串入附加电阻, 减小工作磁通后, 理想空载转速成反比例地增大, 同时, 转速降落也增大, 特性软化。当给定电流时, 转速降落与磁通成反比例地增大; 当给定转

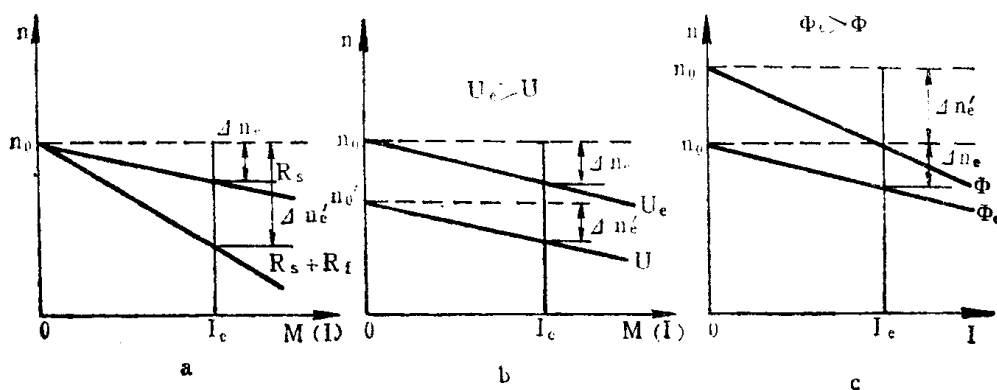


图 1-8 他激电动机人工机械特性

a—电枢串附加电阻; b—降低电压; c—减小工作磁通