

971923

• 高等学校教学用书 •

TG333

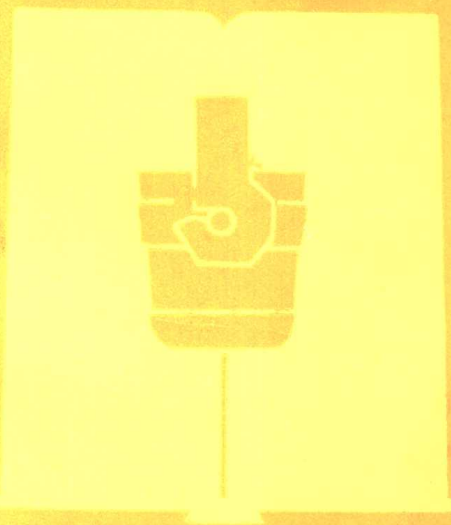
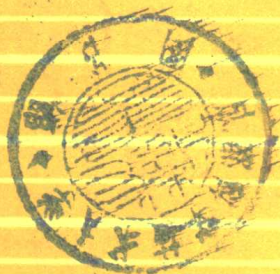
0845K

2

轧钢机械理论 与结构设计

(下册)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

轧钢机械理论与结构设计

(下 册)

北京科技大学邹家祥 施东成 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书
轧钢机械理论与结构设计
(下 册)

北京科技大学邹家祥 施东成 主编

*冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

*
787×1092 1/16 印张 25.5 字数 610 千字
1993 年 11 月第一版 1993 年 11 月第一次印刷
印数 1~1700 册

ISBN 7-5024-1232-8

TG·169 (课) 定价: 11.85 元

前 言

《轧钢机械理论与结构设计》是与《轧钢机械》(修订版)配合使用的教学参考书,以便于在学习和阅读《轧钢机械》(修订版)时加深理解教学内容和拓宽相关知识。

多年的教学实践使我们体会到,学习轧钢机械这样的专业课,仅仅囿于教科书上的那些知识是不够的,需要往深度和广度方面掘取,而浩瀚的文献资料又分散在众多的书刊之中,在现有的条件下,往往又难以查索。因此,我们编写了《轧钢机械理论与结构设计》这样一本参考书,希望能弥补这一不足。

本书的结构基本上与《轧钢机械》(修订版)有关章节相对应,考虑到配套使用,凡是教科书上已详细说明了的内容,本书不再赘述,只做进一步的扩展或细化。考虑深度和广度方面需要,增加了轧钢工艺、数学模型、轧钢机的扭振及垂振、钢管轧机参数及设备、轧钢机及其辅助设备的电力驱动、连续作业精整机组等内容。

本书分上、下两册。上册主要介绍轧钢生产工艺及设备配置、轧制工艺参数及力能参数、轧钢机主机座和主传动的主要零部件结构与计算方法、轧钢机机座刚度、厚度自动控制与板型控制、轧钢机的扭转振动及垂直振动、钢管设备。下册主要介绍轧钢机械电力驱动、剪切机械(剪切机、锯切机和飞剪机)、矫正机、卷取机、运输翻转及收集捆轧机械、连续作业精整机组。

参加上册编写的人员有:北京科技大学邹家祥(第一章、第四章第一、五节)、施东成(第六章)、高永生(第四章第二、三、四节);武汉钢铁学院李世品(第五章第一~五节)、何光逵(第八章);天津大学冶金分校戴近渊(第二章、第三章);冶金工业部冶金设备研究所陈仲明(第五章第六节);冶金工业部北京钢铁设计研究总院高荣元(第七章);南方冶金学院齐鸿恩、朱正、陈显勇、欧阳镇堂(第九章)。

参加下册编写的人员有:北京科技大学陈力(第十章)、施东成(第十一章、第十三章及第十章部分)、邹家祥(第十二章);东北工学院崔甫(第十四章);冶金工业部北京钢铁设计研究总院丛书和(第十五章);上海冶金专科学校蒋维兴(第十六章、第十七章)。

全书由邹家祥、施东成任主编。

本书图稿由李秀荣、张红旗、白凤春进行了系统整理。在此向这些同志表示感谢。

由于编者水平所限,书中不足之处,恳请读者不吝指正。

编 者

1993年4月

EAC66/06

下 册 目 录

第十章 轧钢机械电力驱动	1
第一节 电力驱动系统的运动方程式	1
一、轧钢机械的工作制度	1
二、电力驱动系统的运动方程式	2
三、工作机械的静力矩和转动惯量的折算	4
第二节 电动机的机械特性	5
一、他励直流电动机的机械特性	6
二、串励直流电动机的机械特性	8
三、复励直流电动机的机械特性	11
四、三相异步电动机的机械特性	11
第三节 电力驱动系统的过渡过程	13
一、电动机的启动及其过渡过程	13
二、电动机的制动及其过渡过程	18
三、电动机的速度调节(调速)	24
第四节 电动机功率计算	31
一、电动机的发热、冷却过程及工作制度	31
二、电动机功率计算	34
三、轧钢机械常用的大中型电动机和专用电动机	42
第十一章 剪切机	55
第一节 平行刀片剪切机剪切理论及力能参数	55
一、轧件剪切过程分析	55
二、平行刀片剪切机剪切力计算公式	63
三、曲柄轴上的静力矩	70
四、电动机的功率	73
第二节 平行刀片剪切机剪切机构主要零件强度计算	76
一、曲柄轴	76
二、连杆	81
三、刀台	85
第三节 浮动偏心轴剪切机	87
一、浮动偏心轴剪切机类型	87
二、机械压板浮动偏心轴剪切机运动学分析	88
第四节 斜刀片剪切机	97
一、斜刀片剪切机的类型	97
二、滚切式剪切机	98
三、斜刀片剪切机剪切力计算	101
四、液压剪切机主要参数计算	109

第十二章 锯切机械	112
第一节 锯机的类型及锯机结构	112
一、锯机的类型	112
二、滑座式热锯机的结构	116
三、热锯机的结构参数及工艺参数	121
第二节 热锯切理论及力能参数	124
一、锯切过程	124
二、锯切力能参数	128
三、送进机构及横移机构的功率计算	134
第三节 锯切动态特性及锯切噪声	137
一、热锯机的振动特点	138
二、锯片振动特性	138
三、锯切噪声及噪声控制	145
第十三章 飞剪机	150
第一节 切头飞剪机	151
一、切头飞剪机的类型和特点	151
二、切头飞剪机的工作制度和定尺切头的控制	151
三、曲柄连杆式切头飞剪机	155
四、摆式切头飞剪机	162
第二节 定尺飞剪机	163
一、剪切工艺对定尺飞剪机的基本要求	163
二、连续工作制飞剪机剪切长度的调整	163
三、匀速原理和匀速机构	183
四、滑块式摆式飞剪机	207
第十四章 矫正机	211
第一节 弹塑性弯曲的基础知识	211
一、各种弯曲曲率间的关系	211
二、弯曲变形与曲率的关系	211
三、弯曲力矩与曲率的关系	213
四、弯曲变形能与曲率的关系	216
第二节 辊式矫正机的工作原理、参数计算与结构设计	217
一、递减反弯矫直原理	217
二、辊系设计与参数计算	220
三、机架设计与矫直力计算	224
四、传动设计与矫直功率计算	226
五、压下调节机构的设计	230
六、辊式矫正机结构	230
第三节 斜辊矫正机的工作原理、参数计算与结构设计	230
一、旋转反弯矫直原理	230
二、辊系设计与参数计算	234
三、机架设计与矫直力计算	237
四、传动设计与矫直功率计算	246

五、压下调整机构的设计	249
六、二斜辊精矫机的工作原理与参数计算	249
七、斜辊矫正机的结构	252
第四节 拉弯矫正机的工作原理、参数计算与结构设计	253
一、拉弯矫直原理	253
二、拉弯矫正机的参数计算	255
三、拉弯矫正机的传动与结构	260
第十五章 卷取机	265
第一节 热轧带钢卷取机	265
一、地下卷取机的布置和操作过程	265
二、地下卷取机的结构	267
三、地下卷取机的传动功率	289
第二节 冷轧带钢卷取机	291
一、卷取机卷筒	293
二、卷取机助卷器	230
三、卷取机的传动	302
第三节 卷取机卷筒的计算	303
一、卷筒的径向压力计算	303
二、卷筒的强度计算	308
三、胀缩缸的主要参数计算	311
第十六章 运输翻转及收集捆扎机械	316
第一节 辊道	316
一、辊道的结构	316
二、辊子结构和辊道的基本参数	327
三、辊子的强度计算	330
四、辊道驱动力矩计算	334
第二节 升降台	336
一、升降台结构	336
二、曲柄连杆式升降台平衡原理	337
三、曲柄连杆式升降台的计算	342
第三节 冷床及运输机械	346
一、冷床	346
二、运输机械	351
第四节 推床、翻钢机械及回转机械	357
一、推床	357
二、翻钢机械	359
三、回转机械	365
第五节 捆扎机械	367
一、型钢、线材捆扎机	367
二、冷轧钢卷捆扎设备	370
第十七章 连续作业精整机组	372
第一节 精整机组概况	372

一、冷轧钢板生产工艺过程	372
二、精整机组的分类	373
第二节 连续酸洗机组	374
一、去除带钢表面氧化铁皮的方法	374
二、酸洗机组	374
第三节 退火机组	377
一、罩式炉退火	378
二、连续退火机组	379
第四节 横切机组	380
一、停剪式横切机组	380
二、飞剪式横切机组	383
第五节 纵切机组	383
第六节 镀层机组	386
一、镀锡机组	386
二、镀锌机组	389
三、彩色涂层机组	391
第七节 机组基本参数	395
一、机组速度	395
二、活套装置	397
三、机组张力	398

第十章 轧钢机械电力驱动

绝大部分轧钢机械都采用电力驱动。在某些场合下，电力驱动的选择不仅影响设备的生产率，而且也可能影响工作机械的传动系统结构。例如，采用双电机对轧辊进行单独驱动、采用启动工作制电动机的剪切机等设备的传动系统就比一般驱动方式简单。此外，正确选择和计算电动机功率有着特别重要的意义。电动机功率选得太大，将会增加投资费用，工作效率低，电能消耗大。如果电动机功率选得太小则会降低生产率，甚至会造成事故。因此，要正确和更好地设计轧钢机械，必须具备一定的电力驱动基本知识和电动机功率计算的基本方法。

第一节 电力驱动系统的运动方程式

轧钢机械的类型较多，而具有不同的工作制度。在进行电动机选择和电动机功率计算时，必须了解设备的工作制度和运用电力驱动系统运动方程式的基本理论。

一、轧钢机械的工作制度

一般来说，轧钢机械有四种工作制度：连续工作制，启动工作制，短时工作制和“阻塞”工作制。

1. 连续工作制（连续运转）

在这种工作制下，电动机启动后，一直运转比较长的时间，中间不停顿也不反转。根据工作机械负载的情况，可将连续工作制分成负载固定不变和负载周期变化两种。

属于负载固定不变的连续工作制轧钢机械有矫正机、圆盘剪、运输辊道等。属于负载周期变化的有剪切机、热锯机、压力矫正机、型钢轧钢机等。

根据电动机与工作机械联结方式，连续工作制轧钢机械有两种方式。一种是电动机与工作机械直接通过联轴器连接，另一种则通过离合器非固定地连接。前者适用于作旋转运动的工作机械，后者则用于作往复直线运动的机械，如压力矫正机、剪切机等。

如果工作机械负载有显著高峰时，可在长期工作制轧钢机械上装有飞轮，以便选择功率较小的电动机。

2. 启动工作制（启动运转）

在这种工作制下，电动机经常启动和制动。有的工作机械还正转和反转交替地启动和制动，如可逆式初轧机、钢板粗轧机等。有的工作机械每小时启动次数较多，甚至每小时可达1500次以上，如升降台、工作辊道等。

根据负载情况，启动工作制有以下三种情况：

1) 工作机械静力矩 M_j 和转动惯量 J_j 为周期变化时，静力矩 M_j 和转动惯量 J_j 可用主轴转动角度 α 的函数来表示，即

$$M_j = f(\alpha)$$

$$J_j = f(\alpha)$$

摆动升降台、初轧机的推床翻钢机、高速剪切机等设备的负载属于这一类型。一般来

说, 具有较大的移动质量和速度较高的曲柄连杆机构, 其静力矩和转动惯量都是变化的。

2) 工作机械的转动惯量 J_j 为常数, 静力矩 M_j 周期变化时, M_j 和 J_j 为

$$M_j = f(\alpha)$$

$$J_j = C$$

式中 C ——常数。

低速剪切机、滚筒式飞剪机、热锯机等设备的负载属于这一类型。这里有两种情况, 一种是工作机构转动惯量本身是一个常数, 另一种是工作机械转动惯量虽有一定的变化, 但因工作速度较低, 反映到电动机轴上的影响较小, 故近似地认为 $J_j = C$ 。

3) 工作机械静力矩 M_j 和转动惯量 J_j 均为常数时, M_j 和 J_j 为

$$M_j = C$$

$$J_j = C$$

轧钢机械的压下装置、推钢机、辊道等设备的负载属于这一类型。一般说来, 用螺丝、齿条、链条等传动装置将电动机的旋转运动变为直线运动的设备, 其 M_j 和 J_j 往往是常数。当然, 也有一些旋转运动的轧钢机械是属于这一类型的。

3. 短时工作制 (短时运转)

短时工作制的电动机启动后, 运转时间不长就停止, 而工作机械的停歇时间则大大超过运转时间, 电动机有足够的时间降至环境温度。这种工作制在轧钢机械应用不多。轧钢机的换辊装置、热锯机的横向移动机构, 剪切机的定尺机构等设备就属于短时工作制。

4. “阻塞”工作制 (“阻塞”运转)

“阻塞”工作制是指工作机械运转中遇到较大的阻力时, 即工作机械被“阻塞”的情况下, 电动机转速能很快下降而产生较大的堵转力矩, 等到阻力减小时, 转速又能上升恢复正常运行。对于具有这种“阻塞”特性的工作机械, 应采用堵转力矩较大的电动机或在控制电路设置具有“阻塞”特性的人为机械特性。初轧机的推床就要求有这种“阻塞”特性。掘土机一般也要具有这种特性。故这种工作制又称为“掘土机”工作制。

在轧钢机械中应用较多的工作制是连续工作制和启动工作制。

二、电力驱动系统的运动方程式

电力驱动系统的运动规律可用运动方程式表述。在图 10-1 所示的电力驱动系统中, 工作机械通过电动机直接驱动, 工作机械的静力矩 M_j 即为电动机轴上的负载力矩 M_z (工作机械无减速装置)。当设电动机力矩为 M_D , 电动机的角速度为 ω , 驱动系统的转动惯量为 J 时, 这一驱动系统的运动方程式可用下式表示, 即电动机的动力矩 M_{don} 为

$$M_{\text{don}} = M_D - M_z = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi} \quad (10-1)$$

式中 t ——工作时间;

φ ——电动机轴的转角, rad。

式 (10-1) 等式右侧第一项 $J \frac{d\omega}{dt}$ 是由角速度 ω 变化引起的动力矩, 第二项则是由系统转动惯量引起的动力矩。

众所周知, 角速度 ω 和转速 n , 转动惯量 J 与飞轮矩 GD^2 之间存在以下关系

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (10-2)$$

$$J = G\rho^2 = \frac{GD^2}{4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (10-3)$$

式中 G ——系统转动部分的重
量(质量), kg;
 ρ ——系统转动部分的转
动惯性半径, m;
 D ——系统转动部分的转
动惯性直径, m。



图 10-1 工作机械通过电动机直接驱动的电力驱动系统
1—电动机; 2—工作机械

将式 (10-2) 和式 (10-3) 代入
式 (10-1), 并将转角 φ 单位由 rad
变为 “°” 时, 式 (10-1) 可用下式表示

$$M_{\text{don}} = M_D - M_z = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{12.7} \frac{dGD^2}{d\varphi} \quad (10-4)$$

式中 GD^2 ——系统转动部分的飞轮矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

如果不考虑转动惯量 J 或飞轮矩 GD^2 所引起的动力矩, 则式 (10-1) 和式 (10-4) 分别为

$$M_{\text{don}} = M_D - M_z = J \frac{d\omega}{dt} \quad (10-5)$$

$$M_{\text{don}} = M_D - M_z = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt} \quad (10-6)$$

由上述的运动方程式可知, 当动力矩 $M_{\text{don}} = 0$ 时, 系统处于恒转速的稳态运行。如动力矩 $M_{\text{don}} > 0$ 或 $M_{\text{don}} < 0$, 则系统处于加速或减速运行的过渡过程。

通常, 工作机械是通过减速传动装置与电动机相连的。如图 10-2a 所示为一多轴的电力驱动系统, 传动减速系统为一两级齿轮减速机构。此时, 要将工作机械和传动系统的转动惯量或飞轮矩折算到电动机轴上, 工作机械的静力矩也要折算到电动机轴上, 才能列出系统的运动方程式, 即将图 10-2a 的多轴系统简化为如图 10-2b 所示的单轴电力驱动系统。

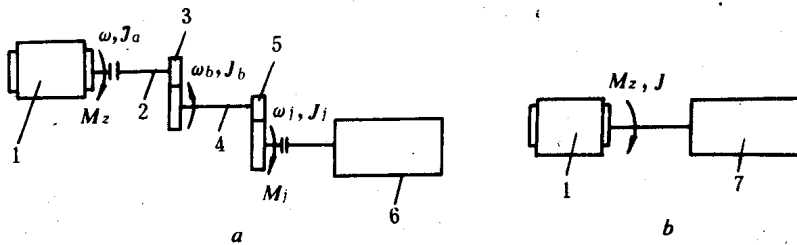


图 10-2 多轴的电力驱动系统

a—具有两级齿轮减速机构的多轴系统; b—简化后的单轴电力驱动系统

1—电动机; 2—传动轴 a; 3—减速齿轮; 4—传动轴 b; 5—减速齿轮; 6—工作机械;
7—等效负载

三、工作机械的静力矩和转动惯量的折算

1. 工作机械为旋转运动时，静力矩与转动惯量的折算

现以图 10-2 所示多轴的电力驱动系统为例来说明静力矩和转动惯量折算的方法。

(1) 静力矩的折算 静力矩折算的原则是，折算前后的功率不变，即

$$M_j \omega_j = M_z \omega \quad (10-7)$$

式中 M_j ——工作机械的静力矩；

M_z ——折算到电动机轴上的负载力矩(静力矩)；

ω_j ——工作机械的角速度；

ω ——电动机的角速度。

由式 (10-7) 可得折算到电动机轴上的负载力矩 M_z 为

$$M_z = \frac{M_j \omega_j}{\omega} = \frac{M_j}{i_0} \quad (10-8)$$

式中 i_0 ——工作机械传动系统的总传动比, $i_0 = \omega/\omega_j$ 。

由式 (10-8) 可见，工作机械的静力矩是按传动比的反比来折算的。

(2) 转动惯量的折算 转动惯量折算的原则是：折算前后的动能不变，即

$$\frac{1}{2} J_j \omega_j^2 = \frac{1}{2} J_J \omega^2 \quad (10-9)$$

式中 J_j ——工作机械主轴上的转动惯量；

J_J ——折算到电动机轴上的转动惯量。

由式 (10-9) 可得折算到电动机轴上的转动惯量 J_J 为

$$J_J = J_j \left(\frac{\omega_j}{\omega} \right)^2 = \frac{J_j}{i_0^2} \quad (10-10)$$

由式 (10-10) 可见，转动惯量是按传动比平方的反比来折算的。

同理可得图 10-2 a 中轴 b 上的转动惯量 J_b 折算到电动机轴上的转动惯量 J_B 为

$$J_B = J_b / i_1^2 \quad (10-11)$$

式中 i_1 ——轴 b 与电动机轴之间的传动比。

考虑电动机轴本身的转动惯量 J_a 后，折算到电动机轴上的总转动惯量 J 为

$$J = J_a + \frac{J_b}{i_1^2} + \frac{J_j}{i_0^2} \quad (10-12)$$

如缺乏各传动件的转动惯量时，往往用电动机的转动惯量 J_D 来估算系统的总转动惯量 J ，即

$$J = (1 + \delta) J_D \quad (10-13)$$

式中 δ ——系数，一般取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ ，如电动机轴上有制动器等传动件时， δ 值应适当加大。

如果考虑式 (10-3)，则折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD^2 为

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{i_1^2} + \frac{GD_j^2}{i_0^2} \quad (10-14)$$

或

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_D^2 \quad (10-15)$$

式中 GD_a^2 、 GD_b^2 和 GD_j^2 ——相应于图 10-2a 中的轴 a 、轴 b 和工作机械主轴上的飞轮矩；

GD_D^2 ——电动机的飞轮矩。

2. 工作机械为平移运动时, 静力矩和转动惯量的折算

今以图 10-3 所示的推钢机简图为例, 说明其折算方法。

(1) 静力矩的折算 推钢机是通过齿轮齿条传动将电动机的旋转运动变为推杆的直线运动的。推钢时的功率 N_j 和电动机轴上的功率 N_D 分别为

$$N_j = Fv \quad (10-16)$$

$$N_D = M_z \omega = M_z \frac{2\pi n}{60} \quad (10-17)$$

式中 F ——推钢时的阻力, N;

v ——推钢时的速度, m/s;

M_z ——阻力 F 折算到电动机轴上的负载力矩(静力矩), N·m;

ω ——电动机的角速度, 1/s;

n ——电动机的转速, r/min。

根据折算前后功率相等的原则, 由式 (10-16) 和式 (10-17) 可得折算到电动机轴上的静力矩 M_z 为

$$M_z = 9.55 \frac{Fv}{n} \quad (10-18)$$

(2) 转动惯量的折算 推钢时的动能 E_j 和电动机轴上的动能 E_D 分别为

$$E_j = \frac{1}{2} G_j v^2 \quad (10-19)$$

$$E_D = \frac{1}{2} J_J \omega^2 = \frac{1}{2} J_J \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \quad (10-20)$$

式中 G_j ——推钢时直线运动部分质量, kg;

J_J ——直线运动部分折算到电动机轴上的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

根据折算前后动能相等的原则, 由式 (10-19) 和式 (10-20) 可得折算到电动机轴上的转动惯量 J_J 为

$$J_J = G_j \left(9.55 \frac{v}{n} \right)^2 \quad (10-21)$$

如果考虑式 (10-3), 则直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩 GD_D^2 为

$$GD_D^2 = 365 \frac{G_j v^2}{n^2} \quad (10-22)$$

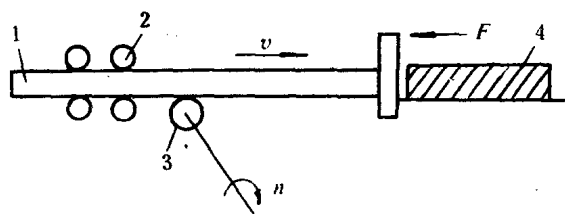


图 10-3 推钢机简图

1—推钢机推杆; 2—推钢机压辊; 3—齿轮齿条传动; 4—钢坯

第二节 电动机的机械特性

电动机的转速 n 和电动机电磁力矩 M 的关系 $n = f(M)$ 称为电动机的机械特性。不同的电动机具有不同的机械特性。图 10-4 表示各种直流电动机的机械特性曲线。机械特性是电动机的重要性能, 可以根据 $n = f(M)$ 曲线判断转速随力矩的变化程度。当力矩 M 变化

时,速度降较小的机械特性称为硬特性,而速度降较大者则为软特性。一般来说,他励(也称为他激)直流电动机的机械特性为硬特性,其速度降不超过10~12%。串励(串激)和复励(复激)电动机的机械特性为软特性。如果电动机的转速不随其力矩的变化而变化,这种机械特性称为绝对硬特性,同步电动机属于这一特性。

大多数生产机械要求使用具有硬特性的电动机。对直流电动机来说,他励直流电动机应用广泛。但是,从安全角度考虑,起重机类的生产机械一般采用具有软特性的电动机,以便在负载大时,运行速度能自动降低。

本节重点阐述他励直流电动机的机械特性。

一、他励直流电动机的机械特性

图10-5为他励直流电动机电路原理图。由电工学可知,电动机的电磁力矩 M 决定于通过电枢的电流和磁通,即

$$M = C_M \phi I_a \quad (10-23)$$

式中 M ——电动机电磁力矩,当忽略电动机摩擦力矩和电枢中涡流的反作用力矩时, M 即为电动机(输出)力矩 M_D ;

C_M ——表示电动机构造特性的常数;

ϕ ——磁通;

I_a ——电枢电流。

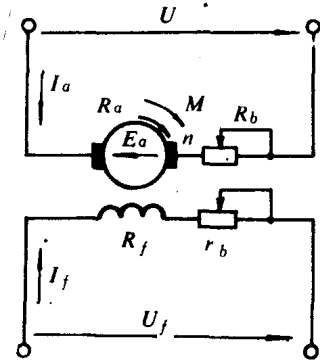


图 10-5 他励直流电动机
电路原理图

机械特性的一般表达式,即

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_M \phi^2} M = n_0 - \beta M \quad (10-26)$$

式中 n_0 ——理想空载转速, $n_0 = U/C_e \phi$;

β ——机械特性曲线的斜率, $\beta = R/C_e C_M \phi^2$ 。

由式(10-26)可知,当电压 U 、磁通 ϕ 、电枢总电阻 R 为常数时,他励直流电动机的机械

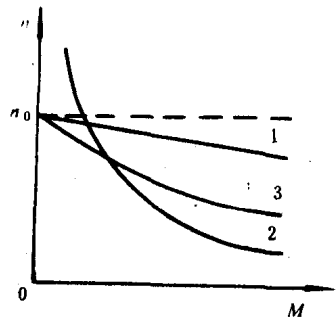


图 10-4 各种直流电动机的
机械特性曲线

1—他励(他激)直流电动机; 2—串励
(串激)直流电动机; 3—复励(复激)
直流电动机

当磁通为 ϕ ,电动机转速为 n 时,电动机电枢的反电势

E_a 为

$$E_a = C_e \phi n \quad (10-24)$$

式中 C_e ——电势常数,它与电动机磁极对数、电枢绕组有效导体数等因素有关,对已制成的电动机, C_e 为一常数。

电枢电路中的外加电压为 U ,应与电枢的反电势和电枢电路中的电压降相平衡,即

$$U = E_a + I_a R \quad (10-25)$$

式中 R ——电枢电路中的总电阻,在图10-5中 $R = R_a + R_b$ 。其中, R_a 为电枢电阻, R_b 为电枢附加电阻(电动机启动或调速时加入)。

根据式(10-23)~式(10-25)可得出他励直流电动机

特性曲线是以 β 为斜率的向下倾斜的直线(图 10-6)。负载力矩增大,电动机转速 n 下降。式(10-26)中的第二项 βM 表示 n 随 M 增大而下降的程度,即为速度降 Δn 。

$$\Delta n = \beta M = \frac{R}{C_e C_M \phi^2} M \quad (10-27)$$

因此,式(10-26)也可用下式表示

$$n = n_0 - \Delta n \quad (10-28)$$

如果电枢电压为额定电压 U_{er} ,磁通为额定磁通 ϕ_{er} ,而在电枢中不串接附加电阻 R_b ,则电动机机械特性方程式为

$$n = \frac{U_{er}}{C_e \phi_{er}} - \frac{R_a}{C_e C_M \phi_{er}^2} M \quad (10-29)$$

式(10-29)的机械特性曲线如图 10-7 中直线 1 所示,称为电动机自然机械特性曲线。它是电动机本身固有的特性,故又称为电动机的固有机械特性曲线。

当人为地改变电动机电压或磁通,使其不等于额定值或在电枢电路中接入附加电阻 R_b 时,其机械特性曲线称为电动机的人为机械特性曲线。现分别阐述如下:

1) 电枢电路中串接附加电阻 R_b 时,电压 $U = U_{er}$,磁通 $\phi = \phi_{er}$,均为额定值,电枢电路电阻则为 $R = R_a + R_b$,人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_{er}}{C_e \phi_{er}} - \frac{R_a + R_b}{C_e C_M \phi_{er}^2} M = n_0 - \beta M = n_0 - \Delta n \quad (10-30)$$

与固有机械特性方程式相比(式(10-29)),理想空载转速 n_0 不变,但速度降 Δn 增大,串接电阻 R_b 愈大, Δn 愈大,机械特性曲线愈“软”,如图 10-7 中曲线 2、3 所示。

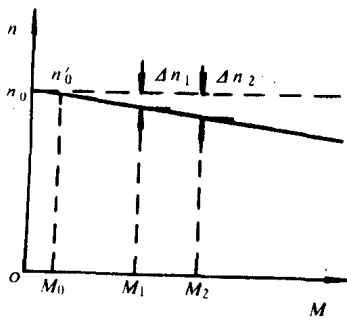


图 10-6 他励直流电动机机械特性曲线

(M_0 为电动机空载力矩, n_0' 为 $M = M_0$ 时的空载转速,也称为实际空载转速)

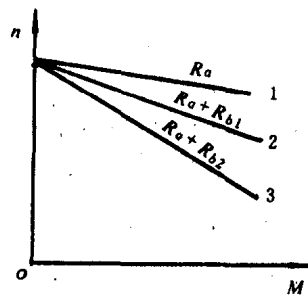


图 10-7 他励直流电动机的固有机械特性曲线和串接附加电阻时的人为机械特性曲线

1—固有机械特性曲线; 2—附加电阻为 R_{b1} 时的机械特性曲线; 3—附加电阻为 R_{b2} 时的机械特性曲线($R_{b2} > R_{b1}$)

2) 改变电动机电压 U 时, $R_b = 0$, $\phi = \phi_{er}$,人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \phi_{er}} - \frac{R_a}{C_e C_M \phi_{er}^2} M = n_0 - \beta M \quad (10-31)$$

由于电动机的工作电压以额定电压 U_{er} 为上限,故电压的改变只能低于额定电压。与固有机械特性方程相比,特性曲线的斜率不变,理想空载转速 n_0 将随电压的减小成正比减小,

其人为特性曲线是一组低于固有机特性曲线而与之平行的直线（图 10-8）。

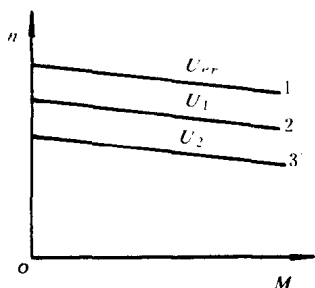


图 10-8 改变电压时的人为机械特性曲线
1 - $U = U_{er}$ 时的机械特性曲线(固有机特性曲线); 2 - $U = U_1$ 时的机械特性曲线; 3 - $U = U_2$ 时的机械特性曲线($U_{er} > U_1 > U_2$)

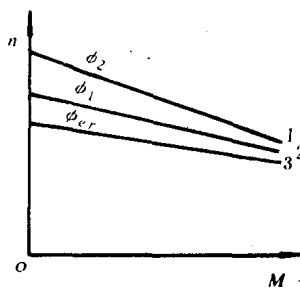


图 10-9 改变磁通时的人为机械特性曲线
1 - $\phi = \phi_2$ 时的机械特性曲线; 2 - $\phi = \phi_1$ 时的机械特性曲线; 3 - $\phi = \phi_{er}$ 时的机械特性曲线(固有机特性曲线); ($\phi_{er} > \phi_1 > \phi_2$)

3) 改变磁通时, 磁通 ϕ 是在额定磁通 ϕ_{er} 以下范围进行的。如图 10-9 所示, 当降低励磁电压 U_f , 或在励磁回路中串接附加电阻 r_b 时就可使磁通减弱。此时, $U = U_{er}, R_b = 0$, 机械特性方程为

$$n = \frac{U_{er}}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \phi^2} M = n_0 - \beta M \quad (10-32)$$

由式 (10-32) 可见, 空载转速 n_0 与磁通 ϕ 成反比, 斜率 β 则与磁通的平方成反比。因此, 当磁通减弱时, 机械特性曲线上移至固有机特性之上, 曲线的特性变“硬”(图 10-9), 为一组既非放射又不平行的直线。

二、串励直流电动机的机械特性

串励电动机的电路图如图 10-10 所示。其特点是励磁绕组与电枢串联, 励磁电流等于电枢电流, 磁通 ϕ 是电枢电流 I_a 的函数。当磁路未饱和时, ϕ 与 I_a 成正比, 即

$$\phi = C_f I_a \quad (10-33)$$

式中 C_f —— 比例常数。

串励直流电动机的机械特性方程式从形式上看与他励直流电动机相同, 如式 (10-26), 即

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_M \phi^2} M \quad (10-34)$$

此时, 电枢电路总电阻 R 为电枢电阻 R_a 、附加电阻 R_c 和串励绕组电阻 R_b 之和。

式 (10-34) 与式 (10-26) 的最大不同点是, 磁通 ϕ 不是常数, ϕ 随电枢电流 I_a 的变化而变化。在磁通未饱和时, ϕ 可用式 (10-33) 代入。如果考虑式 (10-23), 则式 (10-34) 可用下式表示

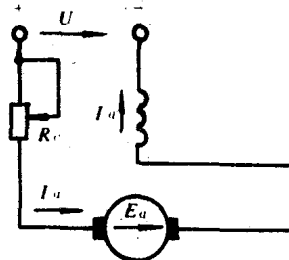


图 10-10 串励直流电动机电路图

$$n = \frac{U}{C_e C_f I_a} - \frac{R}{C_e C_f} \quad (10-35)$$

或

$$n = \frac{U \sqrt{C_M}}{C_e \sqrt{C_f}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} - \frac{R}{C_e C_f} \quad (10-36)$$

式(10-36)表明,当磁路不饱和时,串励直流电动机的转速 n 与 \sqrt{M} 成反比,其机械特性曲线为双曲线。当磁路饱和时,磁通 ϕ 为一常数,则根据式(10-35),其机械特性曲线为一直线,接近于他励直流电动机的特性。图10-11中的 AB 段为一双曲线, BC 段则为特性较硬的直线段。

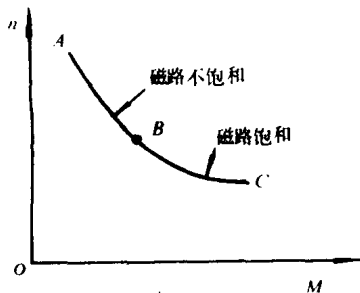


图 10-11 串励直流电动机的机械特性曲线

由上可见,串励直流电动机的机械特性曲线具有以下特点:1)在负载较小时,磁路未饱和,其机械特性曲线为软特性的双曲线,转速降较大。当负载较大时,使磁路饱和,机械特性曲线则为较硬的直线;2)在空载时, $M=0, I_a=0, \phi=0$,由式(10-26),理想空载转速 $n_0 \approx \infty$ 。但由于还存在剩磁 ϕ_0 ,实际空载转速为一有限值,但转速可高达额定转速的5~6倍,会造成电动机的损坏。因此,串励直流电动机是不允许空载运行的;3)由于 $M = C_M \phi I_a = C_M C_f I_a^2$,而电动机在启动和过载时,具有较大的电枢电流 I_a ,所以串励直流电动机的启动转矩大,过载能力强。

与他励直流电动机相同,串励直流电动机也可通过改变电压 U 、磁通 ϕ 或串接附加电阻 ϕ_b 来获得人为的机械特性曲线。这种电动机的固有机特性曲线是在电压 U 为额定电压 U_n ,附加电阻为零,以及只存在串励绕组电阻 R 时获得的。图10-12表示了串接附加电阻和降低电压时的人为机械特性曲线。

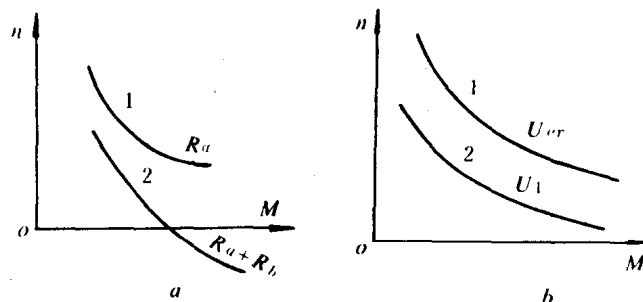


图 10-12 串励直流电动机的人为机械特性曲线
 a--电枢电路中串接附加电阻时的机械特性曲线; b--降低电压时
 ($U_1 < U_n$)的机械特性曲线
 1--固有机特性曲线; 2--人为机械特性曲线

串励直流电动机改变磁通有两种方法:励磁绕组并联分路电阻 R_d 和电枢并联分路电阻