

〔苏〕B.П.安德列耶夫 IO.A.薩比宁 著

电 力 拖 动 基 础

上 册



机 械 工 业 出 版 社

PDG

序

現代電力拖动只能理解為自動化的電力拖动。這本書既然是研究現代電力拖動的，所以把它稱為“自動化電力拖动基礎”，應該是更加準確一些。但是，考慮到高等工業學校的教學大綱中這門課程仍舊保持了原有名稱——“電力拖动基礎”，所以本書也仍用這個書名。

發展生產過程和工藝過程的主要趨勢，在目前就是提高勞動生產率的鬥爭，而這一鬥爭是依靠增加工具機工作機構的運動速度並增加作用在工作機構上的應力來實現的。這種情況提高對電力拖动的要求，从而使本書作者對電力拖动過渡歷程的計算與分析等問題，以及對繪制負荷圖和速度調整等問題，加以更多的注意。

由於篇幅所限，著者就沒有可能在書中編入一些數字的例子，來說明理論敘述。因此，每一章都用計算程序的指示來結束，使得讀者更易掌握書中所包括的內容並加以實際應用。

本書內容符合蘇聯高等教育部為多科性工學院、動力學院和電工學院的相應專業所批准的“電力拖动基礎”課教學大綱。

在編寫本書時，著者曾利用了“工業企業電力設備”教研組的豐富的科學及教學經驗，也利用了該教研組創始人，技術科學博士В. К. 波波夫教授的著作。

本書第一章、第二章、第三章、第五章和第七章是В. П. 安德烈耶夫所寫；第四章、第六章、第八章、第九章及第十章是Ю. А. 薩比寧所寫。

著者歡迎對本書提出批評和建議，這些批評和建議在本書再版時將加以考慮。來信請寄列寧格勒 41，國立動力出版社列寧格勒分社（СССР，Ленинград 41，Марсово поле 1，Л. О. Госэнергоиздата）。

目 录

序

第一章 緒 論	1
第二章 电动机的机械特性	2
2-1 概論	2
2-2 相对单位	3
2-3 直流电动机的机械特性	5
2-4 他激直流电动机在 $\Phi = \text{const}$ 时的机械特性	6
2-5 他激直流电动机在磁通减弱时的机械特性	21
2-6 他激直流电动机在电枢被分路时的机械特性	24
2-7 串激电动机的机械特性	28
2-8 串激电动机的复杂的人为接綫图	38
2-9 复激直流电动机的机械特性	43
2-10 发电机-电动机系统的机械特性	45
2-11 有三绕组发电机的发电机-电动机系统的机械特性	48
2-12 由串激电机組成的发电机-电动机系统的机械特性	54
2-13 复激发电机和串激电机組成的发电机-电动机系统的机械特性	57
2-14 异步电动机的机械特性	60
2-15 异步电动机在对称状态下的机械特性	67
2-16 异步电动机的制动状态	74
2-17 异步电动机在不对称状态下的机械特性	85
2-18 双电动机拖动装置的机械特性	91
2-19 同步电动机的机械特性	93
2-20 从轉子方面饋电的三相整流子电动机的工作原理和构造	96
2-21 从轉子方面饋电的三相整流子电动机的机械特性	99
第三章 电力拖动的动力学基础	103
3-1 电力拖动的运动方程式	103
3-2 静态力矩和静态应力的折算	108
3-3 飞輪慣量归到一个軸的折算	109
3-4 轉动慣量的試驗測定	112
3-5 移动的质量归到旋轉运动的折算以及相反的折算	114
3-6 有曲柄傳动的机构中的等值轉动慣量及等值应力的决定	115
3-7 傳动装置中的損耗	121
3-8 电力拖动的启动時間和制动時間	126
3-9 启动和制动時間內电动机軸轉动的角度	129
3-10 电力拖动启动时的能量損耗	131
3-11 电动机制动时的能量損耗	134
3-12 电动机額定轉速的选择	136

第四章 电力拖动的过渡状态	140
4-1 研究电力拖动的过渡状态和负载曲线的实际意义	140
4-2 过渡状态研究的特点	141
4-3 各种工作机的静态力矩的性质	143
4-4 关于电气化机组运转稳定性的基本概念	146
4-5 有直线律机械特性的电力拖动在恒定静态力矩下的过渡状态	148
4-6 有直线律机械特性的电力拖动在 $M_c = \text{const}$ 时的启动状态	153
4-7 有直线律机械特性的电力拖动在 $M_c = \text{const}$ 时的制动状态	154
4-8 有直线律机械特性的电力拖动在静态力矩随速率变化时的机械过渡状态	158
4-9 拖动的运动方程式的图解积分和图解-解析积分的基本方法。比例原则	161
4-10 有直线律机械特性的电力拖动在静态力矩与行程有关时的过渡状态	166
4-11 有直线律机械特性的电力拖动在静态力矩与速率及行程均有关, 即在 $M_c = f(v, \alpha)$ 时的过渡状态	174
4-12 有直线律机械特性的电力拖动在静态力矩与时间有关时的过渡状态	175
4-13 有串激和复激直流电动机的电力拖动在 $M_c = \text{const}$ 和 $M_c = f(v)$ 时过渡状态	179
4-14 有串激和复激直流电动机的电力拖动在 $M_c = f(\alpha)$ 和 $M_c = f(v, \alpha)$ 时的过渡状态	181
4-15 转动惯量为变数时过渡状态的计算	183
4-16 分激直流电动机电力拖动在 $M_c = \text{const}$ 时的过渡状态	186
4-17 他激电动机在突加负载下的动态转速降以及减小它的方法	195
4-18 串激及复激电动机的拖动装置的电气-机械过渡状态	199
4-19 激磁绕组电路中的过渡过程。发电机与电动机激磁电流变化的加快	201
4-20 发电机-电动机系统的过渡状态	209
4-21 发电机-电动机系统中电动机的启动过程	213
4-22 发电机-电动机系统中电动机的制动和逆转	216
4-23 二次激磁发电机-电动机系统中的过渡状态	219
4-24 电力拖动参数的实验测定	222
4-25 研究直流电机激磁电路中过渡状态的图解-解析法	226
4-26 研究直流电力拖动的电气机械过渡状态的图解-解析法	231
4-27 异步电动机电力拖动的过渡状态	245
4-28 异步电动机电力拖动在 $M_c = 0$ 时的过渡状态的解析研究	247
4-29 异步电动机电力拖动在 $M_c = \text{const}$ 时的过渡状态的解析研究	250
4-30 异步电动机的定子和转子电路中有过渡状态时的能量损耗	254
4-31 异步电动机电力拖动的能耗制动	256
4-32 同步电动机电力拖动的过渡状态	257
4-33 与静负载有关的同步电动机拖动的过渡状态	259
4-34 同步电动机的启动	266
4-35 同步电动机的制动	268
参考文献	269

第一章 緒 論

机器制造业是工业的心脏。技术的繼續进步、各部門工业的技术水平的提高、生产过程的机械化和自动化、劳动生产率的不断提高和国民經济所有各部門的繼續增长等問題的順利解决，在很大程度上与机器制造业的发展速度有关。

生产机构及其所完成的工艺过程的技术完善程度，在很大程度上决定于相应的电力拖动的完善程度以及电力拖动在电学原理上自动化的程度。

自动化的电力拖动乃是一整套电机、电器和控制系統的綜合設備，在这套設備里一些电动机在結構上与执行机构联成一个整体。电力拖动的个别单元的参数應該選擇得使所要求的生产过程保証能够实现。

自动化电力拖动的发展經過了几个阶段。

电力拖动的初始阶段的特点是改善它的組成单元：电动机、电动机的控制器械以及电动机和执行机构間的傳动环节。这一阶段的主要趋势是分解电力拖动，使一个集中的电力拖动为好几个单独的所代替，这些单独的电力拖动的特性能最完滿地符合生产机构的要求。

这种分解使工具机分成了好几个部件，每一部件由单独的电动机拖动。这一措施的结果是电动机接近了生产机器的工作机构。这时候，个别电动机与机器的各相应工作部件的接近，或甚至两者的直接联結，使得工具机的傳动系統大为簡化。当然，把組合拖动或甚至单独拖动改成多电动机拖动固然簡化了工作机的傳动系統，但它使电力拖动本身及其控制系統大大复杂了。

由有机的与相应的电力拖动联系的生产机器的各个工作部件組成的綜合設備，并且是被一个共同的生产过程所联合在一起的，称为电气化机組。

电力拖动的自动化过程可分为两个基本阶段。第一个阶段是創造狭义的自动控制設備，那就是用来完成控制电力拖动本身的各种操作的設備。这些操作包括使机器起动、制动、反向（逆轉）、改变速度和在行程的某一定点上停止。

第二个阶段是設計和制造自动控制和自动調整的設備，这种設備的任务是要保証工作过程按一定的条件进行：使工作机器各个环节的速度或速度的比例維持不变或按給定的曲綫变化，保証工艺过程有所要求的状态。同时应当指出，初始阶段的自动控制系統基本上是接触器-继电器系統。与此相反，現在推行得很广的控制系統是連續控制系統，在这些系統里广泛地使用着离子-电子器械、磁器械和其他无接触器械。在全部自动化的自动控制系统中，使用着自动檢查、保护和信号装置。

第二章 电动机的机械特性

2-1 概 論

正确地选择电动机，是生产机器有效而经济地工作的必要条件。电力拖动应该保证执行机构的启动、接受负载、卸除负载、制动等静力（稳定）状态及过渡状态的顺利进行。这些过程的进行首先决定于电动机转速同它所发挥的转矩之间的关系特征。

电动机的 $n = f(M)$ 或 $\omega = \varphi(M)$ 的关系称为电动机的机械特性。为执行机构选择电动机时，这些关系是主要判据之一，并且对于评价电动机的机电性能来说，具有重要的意义。

电动机的机械特性，从一方面讲，决定于电动机本身的机电性能，从另一方面讲，决定于接入电动机电路中的电阻的大小及其联接的方法。

机械特性有固有（自然）特性和人为特性之分。在额定电压[●]、正常的线路联接并且电动机电路内没有附加电阻的条件下，电动机的转速与其转矩之间的关系，也就是 $n = f(M)$ 或 $\omega = \varphi(M)$ 的关系，称为固有机械特性。比如说，直流他激电动机的固有特性就是电压和磁通有额定值而电枢电路内没有附加电阻时的 $n = f(M)$ 的关系。

电动机的人为特性是在电动机由电压不同于额定值的网路供电、电动机电路内有附加电阻或电动机按特殊的接线图联接时的 $n = f(M)$ 的关系。

有时候把直流电动机的 $n = \psi(I)$ 或 $\omega = \psi(I)$ 的关系称为该电动机的机械特性。

机械特性按电动机转速随负载力矩之增加而变化的程度来区分。

特性评价的判据是特性的硬度，它等于：

$$\alpha = -\frac{\Delta M}{\Delta n},$$

或用特性的斜度作判据，它等于：

$$\beta = \frac{\Delta n}{\Delta M}.$$

如要决定机械特性硬度及其斜度的相对值，则必须取所研究的特性曲线段内的转速降及相应的转矩变化的百分比或标么值。

所有的机械特性可以分类如下：

1. 转速严格恒定的绝对硬的机械特性，例如同步电动机的机械特性（图 2-1 a）；其硬度为：

$$\alpha = -\frac{\Delta M}{\Delta n} = \infty.$$

2. 转矩增加时转速降比较小的硬特性；它的硬度约为 $\alpha = 40 \sim 10$ 。属于这一类的有直

● 即额定电压及频率。——译者

流他激电动机的特性，异步电动机在其直线部分的特性以及某几种整流子电动机的特性（图 2-1 b）。

3. 转矩增大时转速降比较大的软特性。它的硬度约为 $\alpha = 10$ 以及 10 以下。直流串激电动机、某几种整流子交流电动机、电枢电路内有大电阻的直流他激电动机、副电路内有大的附加电阻的滑环式异步电动机都有这样的特性（图 2-1 c）。

从同步转速到接近于临界转差率的那一段异步特性，具有 $\alpha = 92 \sim 90$ 的硬度；从临界转差率这一点到停止并向负转速的方面延伸的这段特性是有很大大转速降的软特性（图 2-1 e）。

特性的选择决定于生产机构的要求。举例说，钢带的连续冷轧、造纸生产、滚筒印刷等要求很硬的特性。与此相反，某些起重运输机若有软特性的拖动，将以更高的生产率工作。

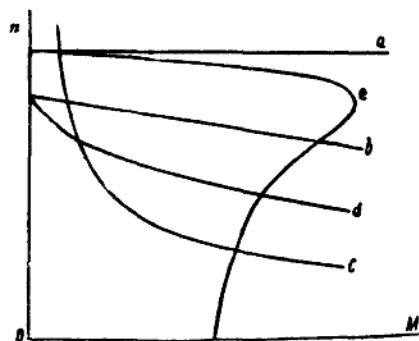


图2-1 电动机机械特性的不同形态：

a—同步电动机的绝对硬的特性；b—直流他激电动机的硬特性；c—直流串激电动机的软特性；d—直流复激电动机的软特性；e—异步特性。

2-2 相对单位

在计算不同种类的电力拖动时，往往需要比较以额定数据不同的电动机装备起来的拖动方案。将所得结果加以直接比较不能作为被比较的方案优缺点的客观判据。举例说，在研究两台直流电动机的启动过程时，如果这两台电动机有不同的额定电压，那么比较一下这两台电动机的启动电流，我们还不能作出结论哪一台电动机的启动条件更轻易些。我们也不能对各级的电阻大小作出结论。为了在类似情况下消除这种不确定性，计算不宜于用绝对单位（欧姆、安培等等），而宜于用相对抽象单位来计算，或用百分数来计算。前者又称为标么值。应用相对单位就不需要从一种单位转到另一种单位，从一些测量转到另一些测量，并且使我们能借助于专门绘制的万用曲线直接决定为了获得原有的特性所需要的电动机参数。

为了以相对单位表示某一量，必须把它的绝对值除以采用作单位的同类的量。

基本单位一般可以任意选择，但通常是用下列各量：

U_{HOM} ——额定电压；

I_{HOM} ——额定电流；

M_{HOM} ——额定转矩；

r_{HOM} ——额定电阻，它等于电动机额定电压被额定电流所除的商数；

n_{HOM} ——以转/分的额定转速。

对于同步电动机和异步电动机，采取同步转速 n_0 作为基本单位。与此类似，对于直流他激电动机来说， n_0 是理想空载转速，在这转速下，电动机的感应电动势等于网路电压。

在以后的叙述中，以标么值表示的量将用小写希腊字母来代表，以百分数表示的量将

用同样的希腊字母来代表，不过它們后面帶有%記号。这样一来，以标么值計的电压将为：

$$v = \frac{U}{U_{HOM}}; \quad (2-1)$$

以百分数計的电压将为：
$$v\% = \frac{U}{U_{HOM}} \times 100\%。 \quad (2-1')$$

在异步电动机中，最好是把两个額定电压加以区分：一个是定子的綫电压，另一个是轉子静止时的轉子电动势。

电流以标么值計是
$$i = \frac{I}{I_{HOM}}, \quad (2-2)$$

或以百分数計
$$i\% = \frac{I}{I_{HOM}} \times 100\%。 \quad (2-2')$$

按照上面所給的定义，額定电阻是

$$r_{HOM} = \frac{U_{HOM}}{I_{HOM}}。 \quad (2-3)$$

电阻以标么值計是
$$\rho = \frac{r}{r_{HOM}}, \quad (2-4)$$

或以百分数計
$$\rho\% = \frac{r}{r_{HOM}} \times 100\%。 \quad (2-4')$$

电阻的标么值和百分值可从相应的电流值和电压值来求得：

$$\rho = \frac{r}{r_{HOM}} = \frac{\frac{U}{I}}{\frac{U_{HOM}}{I_{HOM}}} = \frac{v}{i} \quad \text{或} \quad \rho\% = \frac{v\%}{i\%} \times 100\%。 \quad (2-5)$$

异步电动机的轉子电阻应理解为轉子电路每相的电阻，这个电阻由轉子繞組本身的电阻和一个外电阻所組成，其总值使轉子电流在轉子静止而定子繞組接在額定频率和額定电压下时具有額定值。轉子繞組联成星形时的額定阻抗，或联成三角形而折算成星形的等效額定阻抗将为：

$$x_{2HOM} = \frac{E_{2HOM}}{\sqrt{3} I_{2HOM}}, \quad (2-6)$$

式中 E_{2HOM} ——静止轉子的电动势；

I_{2HOM} ——轉子的額定电流。

异步电动机通常有 $x_2 \ll x_{2HOM}$ ；其中 MT 系的电动机的 $x_2 \approx (0.1 \sim 0.05) x_{2HOM}$ 因此实际上可以算作 $r_{2HOM} \approx x_{2HOM}$ 或

$$r_{2HOM} = \frac{E_{2HOM}}{\sqrt{3} I_{2HOM}} = \frac{E_{2HOM}}{1.73 I_{2HOM}}。 \quad (2-7)$$

如果繞組是联成三角形的，其每相电阻可从下式求到：

$$r_{2\Delta} = \frac{1}{3} r_{2\Delta}。$$

电动机轉矩以标么值計等于：
$$\mu = \frac{M}{M_{HOM}} \quad (2-8)$$

或以百分数計
$$\mu\% = \frac{M}{M_{HOM}} \times 100\%。 \quad (2-8')$$

轉速以相对单位計等于：

$$v = \frac{n}{n_0}; \quad (2-9)$$

$$v\% = \frac{n}{n_0} \times 100\%。 \quad (2-9')$$

对于直流串激电动机和复激电动机来说，我们用额定转速 n_{HOM} 作为基本单位：

$$v = \frac{n}{n_{HOM}}; \quad (2-9)$$

$$v\% = \frac{n}{n_{HOM}} \times 100\%。 \quad (2-9')$$

异步电动机的转差率可以通过以相对单位计的转速来表示：

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - v \quad (2-10)$$

$$\text{或} \quad s\% = 100 - v\%。 \quad (2-10')$$

2-3 直流电动机的机械特性

上面已经指出，电动机的特性应该按照生产机构的要求来选择。如果已有型式的电动机的固有特性不能满足所提出的要求，那么只能改变电动机绕组的联接法、电阻和外施电压来获得人为特性。为了改变转速，为了启动和制动，我们也必须求助于人为的接线图。

直流电动机的机械特性 $n = f(M)$ 的数学表达式可借助于旋转电动机电路里电动势平衡方程式和电动机的电磁转矩的表达式推导出来：

$$U = E + I_a r \quad (2-11)$$

$$\text{和} \quad M = \frac{pN}{2\pi \times 9.81a} \Phi I_a [\text{公斤-米}]。 \quad (2-12)$$

直流电机的电动势与磁通和电枢转速成正比：

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi n [\text{伏}]。 \quad (2-13)$$

在 (2-11)、(2-12) 和 (2-13) 这三个表达式中，

- | | |
|----------------------|--------------------|
| p ——电动机的磁极对数； | n ——电枢转速以转/分计； |
| N ——电枢绕组的有效导体数； | I_a ——电枢电流以安培计； |
| a ——电枢绕组的并联分支数； | r ——电枢电路的电阻以欧姆计。 |
| Φ ——一个极的磁通以韦伯计； | |

为了简化表达式 (2-12) 和 (2-13)，我们可用下列两系数来代替式子里的常数，这些常数决定于电机的构造参数：

$$c_E = \frac{pN}{60a} \quad \text{和} \quad c_M = \frac{pN}{2\pi \times 9.81a}。 \quad (2-14)$$

把系数 c_E 和 c_M 加以比较，我们可以看到，

$$\frac{c_E}{c_M} = 1.03。 \quad (2-14')$$

把系数 c_E 和 c_M 分别代入 (2-13) 和 (2-12) 则得：

$$M = c_M \Phi I_a; \quad (2-12')$$

$$E = c_E \Phi n。 \quad (2-13')$$

从表达式 (2-13') 可以推论，直流电动机的转速与其电动势成正比而与磁通值成反比：

$$n = \frac{E}{c_E \Phi} \quad (2-15)$$

由于在负载下运转的电动机的电动势不能直接量测，较适当的办法是通过施加于电动机的电压和电枢电路内的电压降表达出来

$$E = U - I_a r_a$$

把电动势值代入电动机转速的表达式 (2-15) 中，并以转矩来代替电枢电流 $I_a = \frac{M}{c_M \Phi}$ ，则得直流电动机机械特性的通用方程式：

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a}{c_E \Phi c_M \Phi} M \quad (2-16)$$

2-4 他激直流电动机在 $\Phi = \text{const}$ 时的机械特性

在导出机械特性的解析表达式时，我们将作如下的假定：供电网络的电压当作是恒定的并等于额定值；电枢反应的影响不予考虑，假定电机是有换向极和补偿绕组的，也就是把磁通当作是恒定的；绕组温度当作是不变的因而绕组电阻算作是恒定的。

他激电动机的接线图见图 2-2 所示。

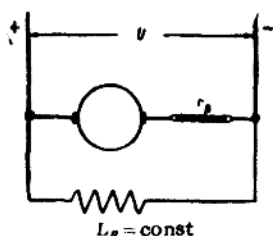


图2-2 他激电动机的接线图。

从通用方程式 (2-16) 可知，在 $\Phi = \text{const}$ 的条件下，机械特性在 n 和 M 的坐标系中乃是一根直线：

$$n = n_0 - \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi} M, \quad (2-17)$$

$$\text{式中 } n_0 = \frac{U}{c_E \Phi};$$

r_p ——变阻器电阻。

这根直线在纵坐标轴上截取的一段等于电动机在其电动势与外施电压相等时的转速。转速 n_0 称为理想空载转速。在理论上讲，当电动机空载而其电磁转矩等于零时，是能有这样的转速的。在实际上讲，如果电动机轴上有外施转矩作用用来克服不可避免的阻力（摩擦力矩、通风损耗和钢中损耗），那末，理想空载转速是可以获得的。

特性的角系数，即直线与横轴之间的倾斜角的正切

$$b = \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi}$$

决定于电动机电枢电路的电阻和磁通的大小。把 n_0 和 b 引入表达式 (2-16)，则得机械特性的方程式如下：

$$n = n_0 - bM. \quad (2-18)$$

电枢电路内电阻的增加会提高直线的角系数而使特性变得更软些。

他激电动机电枢电路内有不同电阻时的机械特性如图 2-3 所示。最上面的特性对应于电枢电路内没有附加电阻，它称为固有特性；其余带附加电阻时的特性称为人为特性。

从表达式 (2-16) 和 (2-17) 看得出，不论电枢电路内有多大的电阻，所有的特性曲线都在座标 $n = n_0$ 和 $M = 0$ 的一点相交。

机械特性的表达式仅对电磁转矩是正确的。由于轴承摩擦、通风损耗和钢中损耗必须克服，电动机轴上的转矩在电动机状态下将永远小于电磁转矩，也就是：

$$M_B = M_{g.m} - M_{mp} - M_{seH} - M_{cmo}$$

与此相反，在制动状态下，电动机轴上的转矩由于上述损耗而将比电磁转矩大。

这样看来，当旋转方向改变时，关系式 $n = f(M_B)$ 将有一次断裂。在图 2-4 中画着机械特性曲线 $n = f(M_B)$ 和 $n = f(M_{g.m})$ 。

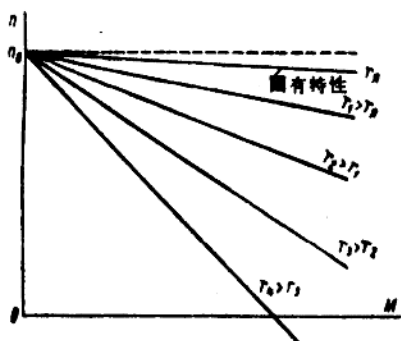


图2-3 他激直流电动机的机械特性曲线。

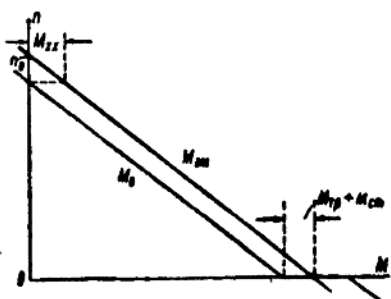


图2-4 损耗对于机械特性曲线形状的影响。

为了消除上述的不准确性，建议利用电磁转矩来作计算，而把轴承摩擦、风损和铜损等力矩当作电动机轴上静力负载的附加部分来看。力矩 $M_{mp} + M_{seH} + M_{cm}$ 的和可以根据电动机的额定数据来决定。

由于上述诸力矩总共仅为电动机额定转矩的 2 至 5%，所以实际上在许多场合可以把它们略去不计而假定 $M_{g.m} = M_B$ 。

要画出他激电动机的机械特性曲线，只需知道它的两点就够了。这两点以利用理想空载点和额定转矩点为宜。为了求出这两点，必须有电动机的额定（铭牌）数据并且知道电动机电枢绕组在 75°C 的热状态下的电阻。

根据这些数据就可决定电动机在有额定转速和额定电枢电流时的电动势：

$$E_{HOM} = U - I_{HOM} r_a = c_E \Phi n_{HOM} \quad (2-19)$$

从 (2-19) 式又得：

$$c_E \Phi = \frac{U - I_{HOM} r_a}{n_{HOM}} \quad (2-19')$$

借表达式 (2-17) 之助可以建立 n_0 和 n_{HOM} 之间的关系并且求出理想空载转速：

$$\frac{n_0}{n_{HOM}} = \frac{U}{E_{HOM}}$$

或

$$n_0 = n_{HOM} \frac{U}{E_{HOM}} \quad (2-20)$$

作为机械特性曲线的第二点，我们可以利用对应于额定转速和额定电磁转矩的一点。为此，根据转速 n_0 可求得 $c_E \Phi$ 之值，然后借 (2-14') 式之助求出

$$c_M \Phi = \frac{c_E \Phi}{1.03} = \frac{U}{1.03 n_0}$$

以后又求出

$$M_{g.m.HOM} = c_M \Phi I_{HOM}$$

在利用电动机轴上的额定转矩

$$M_{HOM} = \frac{P_{HOM}}{\omega_{HOM}} = 0.975 \frac{P_{HOM}}{n_{HOM}} [\text{公斤-米}]$$

(功率以瓦特計)时, 将容許上面所讲到过的不准确性。

直流电动机的产品目录中是沒有关于繞組电阻的数据的, 因此我們不得不用一种近似法来求这个数据。

电樞电路諸繞組——包括电樞、換向极、串激繞組——的电阻可以根据电阻 (以标么值計) 与額定功率之間的关系曲綫来决定[参考文献 2-1]。

图 2-5 中所示的就是起重机和冶金工业所用的 МП 型他激、串激和复激电动机以及統

一系列的长期運轉用的 ПН 型他激电动机的这种曲綫。借图 2-5 的曲綫之助可以找到相应型式和功率的电动机的标么值电阻; 以額定电阻乘所得数值則得繞組电阻的欧姆值。

整流子和电刷之間的接触电阻是根据这一接触在电动机額定电流下引起 2 伏的电压降而决定的。对于額定电压为 220 伏的电动机, 这相当于 $r_m \sim 0.01 r_{ном}$ 。

如果没有 $\rho = f(P_{ном})$ 的曲綫, 电动机电樞电路的电阻可以近似地根据銅損来求得。从电机这门課程已知, 当負載相当于最大效率时, 变动的損耗等于恒定損耗。电机的最大效率 η_{max} 通常发生在 $0.75 P_{ном}$ 和 $P_{ном}$ 之間。由于在最大值附

近效率变化得很少, 所以可以近似地算作 η_{max} 发生在 $P_{ном}$ 的时候。額定負載下的全部損耗等于从电力網路取用的功率与电动机軸上的額定功率之差:

$$\Delta P_{ном} = U_{ном} I_{ном} - P_{ном}$$

在这种情况下額定銅損耗将为:

$$\Delta P_{мном} = \frac{\Delta P_{ном}}{2} = \frac{U_{ном} I_{ном} - P_{ном}}{2} = I_{ном}^2 r_{\Sigma}$$

由此, 电樞繞組和換向极的电阻将等于:

$$r_{\Sigma} = \frac{U_{ном} I_{ном} - P_{ном}}{2 I_{ном}^2} \text{ [欧]}. \quad (2-21)$$

类似的計算也可借助于效率的額定值来作, 其公式如下:

$$r_{\Sigma} = 0.5(1 - \eta_{ном}) r_{ном} \text{ [欧]}. \quad (2-22)$$

如果已知 η_0 , 电樞电路的电阻即可借表达式 (2-20) 式来求得, 那就是:

$$\frac{\eta_0}{\eta_{ном}} = \frac{U}{E_{ном}} = \frac{U}{U - I_{ном} r_{\Sigma}}$$

由此得

$$r_{\Sigma} = \frac{U}{I_{ном}} - \frac{U}{I_{ном}} \frac{\eta_{ном}}{\eta_0}$$

或

$$r_{\Sigma} = r_{ном} \left(1 - \frac{\eta_{ном}}{\eta_0} \right). \quad (2-23)$$

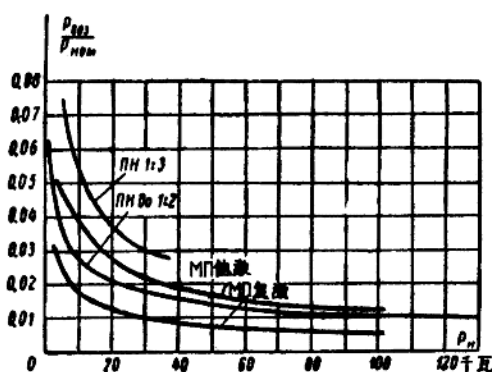


图 2-5 МП 型和 ПН 型直流电动机繞組在溫度 60°C 时的电阻。

对于 MII 型串激和复激电动机来说, 各个绕组的电阻与整个电枢电路的电阻的比可采用下列的一些近似值:

	串 激	复 激
电枢绕组	$r_a = 0.5r_\phi$	$r_a = 0.5r_\phi$
换向极	$r_{\phi n} = 0.23r_\phi$	$r_{\phi n} = 0.32r_\phi$
串联绕组	$r_n = 0.27r_\phi$	$r_n = 0.18r_\phi$

а) 启动电阻的计算

他激电动机的机械特性曲线使各级启动电阻的计算成为可能。静止的电动机是不允许直接与电力网路接通的, 因为电枢绕组的电阻比较小, 直接接通时电流可能达到额定值的 10~20 倍的数值, 这会引起整流子的环火而损坏电动机。

在转速以 0 到 n_{nom} 的范围内, ПН 型他激电动机按整流条件能允许不超过 $2.5 I_{nom}$ 的电流。用电阻与电枢串联可以把最大电流限制到任何给定的数值

$$I_{max} = \frac{U}{r_a + r_p},$$

并且得到需要的转矩。

当转速逐渐升高时, 电动机的电动势也随之增加而电流则相应地减小:

$$I_a = \frac{U - E}{r_\phi + r_p}.$$

转矩也随着电流同时减小, 因而也减低了加速的强度。为了把拖动的加速度维持恒定, 可以减少外电阻 r_p , 由此, 在一定的电动势之下电流就大了起来并且使决定加速度的转矩也加大了。应当指出, 启动电阻的级数越多, 拖动装置的加速过程就越平滑。但是, 从减少需用器械的数量及其投资观点来看, 并且为了提高工作的可靠性, 最好是尽量减少启动的级数。

计算启动电阻时可利用人为机械特性 $n = f(M)$, 或者考虑到他激电动机是在 $\Phi = \text{const}$ 的条件下工作的, 也常利用 $n = \varphi(I_a)$ 的关系, 因为电流和转矩是彼此成正比的。

为了得到启动时的机械特性曲线 (图 2-6 а), 我们先把电动机的固有特性画出来, 在 I 轴上注上静态负载电流值 I_c , 启动时的最大电流值 I_{n1} 和最小电流值 I_{n2} , 在达到此值时第一级以及以后各级电阻就切除了。

最大电流和最小电流的数值一般选择 $I_{n1} = 2.0 \sim 2.5 I_{nom}$ 和 $I_{n2} = 1.2 \sim 1.5 I_c$ 。电流 I_{n1} 和 I_{n2} 的数值对应于 a 和 k 点。

画一直线把 a 和 n_0 两点联起来, 则得电动机在带有全部启动电阻运转时的人为机械特性。在特性下部的电动机电流, 大于与静态力矩相对应的电流, 因而电动机就开始加速。当电动机逐渐加速时, 电枢电流将随之减少, 并且可以降到 I_c 。果真这样的话, 电动机加速将停止, 转速将是较低的 (p 点)。为了避免这种现象, 当电流达到 I_{n2} 值 (b 点) 时, 启动电阻将减少到这样一个数值, 使得在同一转速下电流重新增加到 I_{n1} (c 点), 而电动机则过渡到了新的人为特性 n_0c 。在这一特性上电动机将运转一直到 d 点, 那时候应该切去第二级电阻而电流又重新增加到 I_{n1} (e 点)。把 n_0 和 e 两点用直线联起来, 则得最后的一个人为特性, 电动机将沿此特性增加到 f 点, 这时候最后的一级启动电阻被切除, 电动机就应

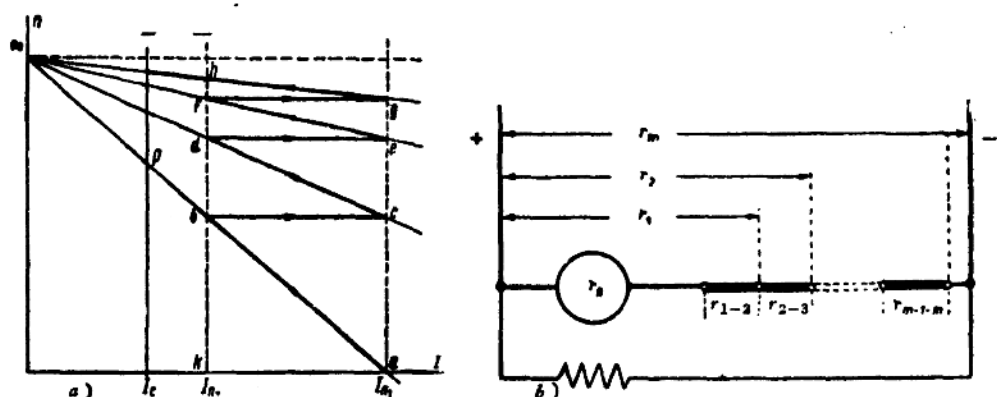


图2-6 他激电动机的机械特性曲线族和启动电阻的联接图。

該过渡到固有特性上运转。如果启动电阻各级选择得正确，电动机应该在电流 I_{n1} 之下轉上固有特性（g 点）。如果不是那样，就必须改变电流 I_{n2} 之值而将启动特性重新画过，使得从最后的启动特性轉到固有特性时正是在电流 I_{n1} 之下发生。繪制启动特性曲线族至此就結束了。在一般情形之下，启动特性的数目不一定是 3（图 2-6 a 示出），而是 m 。电动机和启动电阻的联接法以及启动电阻的编号均如图 2-6 b 所示。这里我們規定启动級的号碼是从固有特性开始向电动机开步的那一个特性增大的。

为了确定各个启动級上的电动机电路的各电阻之间的关系，讓我們来研究一下从特性 m 轉到特性 $m-1$ 时的电阻比值。在每个启动級上，电阻的切除是进行得相当快的，在这时間内电动机轉速以及电动势是来不及变动的。

从启动曲线图 2-6 可以看出，从启动級 m 轉到 $m-1$ 时，下列的关系可以成立：

$$I_{n2} = \frac{U - E_m}{r_m} \quad \text{和} \quad I_{n1} = \frac{U - E_m}{r_{m-1}}。$$

启动时的电流比率将是：

$$\frac{I_{n1}}{I_{n2}} = \frac{r_m}{r_{m-1}}$$

如果启动曲线图計算得正确，在所有各級上部会有类似的比率：

$$\frac{I_{n1}}{I_{n2}} = \frac{r_m}{r_{m-1}} = \frac{r_{m-1}}{r_{m-2}} = \dots = \frac{r_2}{r_1} = \frac{r_1}{r_s}。 \quad (2-24)$$

把启动时的电流比率表示为

$$\frac{I_{n1}}{I_{n2}} = \lambda, \quad (2-25)$$

根据 (2-24) 式可确定各級电阻的比率如下：

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_s \lambda, \\ r_2 &= r_1 \lambda = r_s \lambda^2, \\ &\dots\dots\dots \\ r_{m-1} &= r_{m-2} \lambda = r_s \lambda^{m-1}, \\ r_m &= r_{m-1} \lambda = r_s \lambda^m. \end{aligned} \right\} \quad (2-26)$$

由此得

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{r_m}{r_s}}。 \quad (2-27)$$

在給定的启动电流倍数下，启动級数将等于：

$$m = \frac{\lg \frac{r_m}{r_s}}{\lg \lambda} \quad (2-28)$$

启动电阻的计算是按下述方法进行的：先决定 $r_m = \frac{U}{I_{n1}}$ ，然后给定一个 λ 值并且根据 (2-28) 式求得所需的級数。如果所得 m 是一个分数，就应当把它加大到最近的整数，然后根据 (2-27) 式求出一个新的 λ 值。利用这一 λ 值和电阻 r_m 和 r_s ，根据 (2-26) 式计算出每一級上的电枢电路的总电阻。

在每一級上切去的电阻，等于相邻两級上的总电阻之差：

$$\left. \begin{aligned} r_{s-1} &= r_s \lambda - r_s = r_s (\lambda - 1) \\ r_{1-2} &= r_s \lambda^2 - r_s \lambda = r_s \lambda (\lambda - 1) \\ r_{2-3} &= r_s \lambda^3 - r_s \lambda^2 = r_s \lambda^2 (\lambda - 1) \\ &\dots\dots\dots \\ r_{(m-1)-m} &= r_s \lambda^m - r_s \lambda^{m-1} = r_s \lambda^{m-1} (\lambda - 1) \end{aligned} \right\} \quad (2-29)$$

应当指出，上面采用的总电阻的编号法符合从启动特性 m 到固有特性的转变。

启动电阻的详细计算法在参考书[参考文献2-1]中已有叙述。

比较简单而醒目的是以标么值表示的启动电阻的图解计算法。

让我们把他激电动机的机械特性用标么值表示出来。为此，以 n_0 除方程式(2-17)的两边，此外，左边的第二项乘以 $M_{HO.M}$ 又除以 $M_{HO.M}$ 。在这之后即得：

$$\frac{n}{n_0} = \frac{n_0}{n_0} - \frac{(r_s + r_p) M_{cM} \Phi I_{HO.M}}{c_E \Phi c_M \Phi M_{HO.M} n_0}$$

利用式 (2-4)、(2-5)、(2-8) 和 (2-9) 并且把它们代入上面得出的方程式中，则将得：

$$v = 1 - (\rho_s + \rho_p) \mu \quad (2-30)$$

等式 (2-30) 以百分数表示时将具有下列形式：

$$v\% = 100\% - \frac{\rho_s\% + \rho_p\%}{100} \mu\% \quad (2-30')$$

在 $v\%$ 和 $\mu\%$ 的坐标系中，表达式 (2-30) 和 (2-30') 是一根直线，它在 $v\%$ 轴上截取的一段相当于100%转速（理想空载转速）。

同以前一样，角系数是由电枢电路的电阻决定的。

对于以恒定磁通运转的他激电动机来说，下列关系式是正确的：

$$M_\theta = c_M \Phi I = k_M I,$$

$$M_{\theta HO.M} = c_M \Phi I_{HO.M} = k_M I_{HO.M},$$

由此得

$$\mu = 1 \text{ 或 } \mu\% = 1\%.$$

所以机械特性可以写成

$$v\% = 100\% - \frac{(\rho_s\% + \rho_p\%) 1\%}{100} \quad (2-31)$$

当转矩有额定值时， $\mu\% = 100\%$ 或 $1\% = 100\%$ ，方程式 (2-30') 和 (2-31) 将具有下列形式：

$$v\% = 100\% - (\rho_s\% + \rho_p\%). \quad (2-32)$$

电枢电路的电阻在这种情形下将是:

$$\rho_s\% + \rho_p\% = 100 - v\%, \quad (2-33)$$

就是说, 它将等于在 $\mu\% = 100\%$ 那一点竖起的一根垂直线上从理想空载转速的水平线到该机械特性的那一段。

实际上要计算启动电阻时, 在 $v\%$ 和 $\mu\%$ 的坐标系中 (图2-7) 画上电动机的固有机特性曲线, 给定各级电阻换接时的最大和最小转矩值 $\mu_{n1}\%$ 和 $\mu_{n2}\%$, 并且像以前一样, 画出人为机械特性曲线族。然后, 从 $\mu\% = 100\%$ 的一点画一垂直线。垂直线在水平线 $v\% = 100\%$ 和相应的机械特性之间的一段等于每一启动级上的电枢电路的总电阻。同一垂直线在两个相邻的特性之间的一段, 等于从一个特性转到另一个特性时电枢电路内切去的电阻。

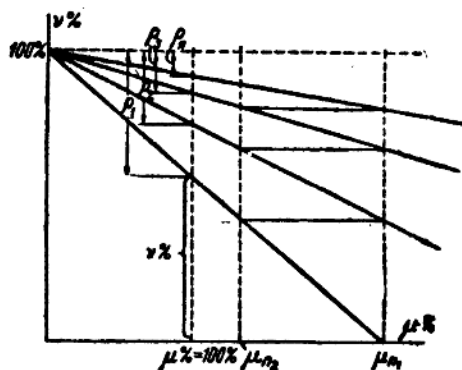


图2-7 分激电动机各级启动电阻的图解算法。

电阻以欧姆计将等于:

$$r_x = \frac{\rho_x\%}{100} r_{HO.MO} \quad (2-34)$$

有许多问题在解决时必须用更简单的机械特性的表达式。让我们利用一下等式(2-16)并且以理想空载转速引入此等式。这时候我们得:

$$n = n_0 - \frac{r}{c_E \Phi \times c_M \Phi} M.$$

把 n 移到右边而把 $\frac{r}{c_E \Phi \times c_M \Phi} M$ 这一项移到左边, 然后等式两边各除以 n_0 :

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{r}{c_E \Phi \times n_0 c_M \Phi} M. \quad (2-35)$$

根据上面所叙述的, $c_E \Phi n_0 = U = I_{HO.M} r_{HO.M}$, 而 $c_M \Phi I_{HO.M} = M_{HO.M}$. 利用这些关系, 表达式(2-35)可以取得下列形式:

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{r}{r_{HO.M} M_{HO.M}} M. \quad (2-36)$$

根据和异步电动机的形式上的类似, 左边的一项 $\frac{n_0 - n}{n_0}$ 可以称为转差率。在适当的代置以后, 机械特性的表达式将有下列形式:

$$s = \frac{r}{r_{HO.M} M_{HO.M}} M = \beta M, \quad (2-37)$$

其中

$$\beta = \frac{r}{r_{HO.M} M_{HO.M}}.$$

为不同的电枢电路的电阻值所绘的 $s = f(M)$ 的特性曲线族如图 2-8 所示。把关系式(2-37)表示成标么值则得:

$$s = \rho \mu. \quad (2-38)$$

上面得到的表达式指出了, 当电动机的电磁转矩有额定值时, $\mu = 1$, 转差率就在数值上等于电枢电路的电阻的标么值, 就是说:

$$s = \rho. \quad (2-39)$$

b) 电动机的逆转

上面讨论过的他激电动机的机械特性是指顺转的长期运转状态。在电力拖动的实践中,

常常需要改变电动机的旋转方向。为了达到这一目的，必须改变电动机所产生的转矩的方向。因为转矩决定于磁通同电枢电流的相互作用，即 $M = c_M \Phi I$ ，所以要改变转矩的方向，只须改变磁通或者电枢电流的方向就够了。

看起来好象使电动机逆转的最简单的方法是改变激磁绕组中的电流方向，因为激磁电流总是比电枢电流小。但是，激磁绕组有很多与磁通交链的匝数，它的电感很大，而以后将要证明，电感使新方向的磁通的建立过程拖延得很长，从而使逆转过程本身缓慢了。此外，当激磁绕组断开时如果磁通消失得很快，绕组内会感应起比额定电压大的电势，这在不良的情况下会造成绝缘的损坏（击穿）。因此，旋转方向的改变总是靠改变电枢绕组中的电流方向来实现的。

为了指出在电动机为了反向旋转接通时电枢电路中电流方向的变化，在接线图中，电网的正极已与另一电刷联接（图2-9）●。

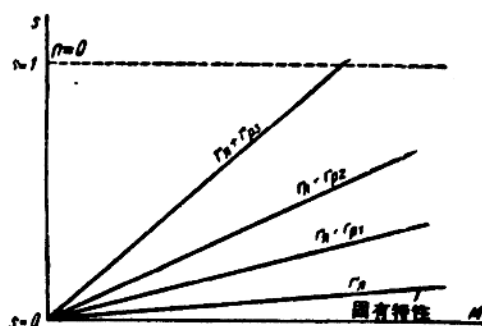


图2-8 他激直流电动机电枢电路中有不同电阻时的 $s = f(M)$ 的关系。

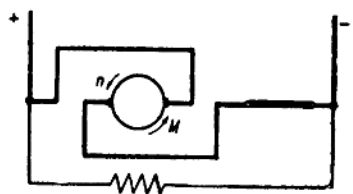


图2-9 逆转时他激电动机的接线图。

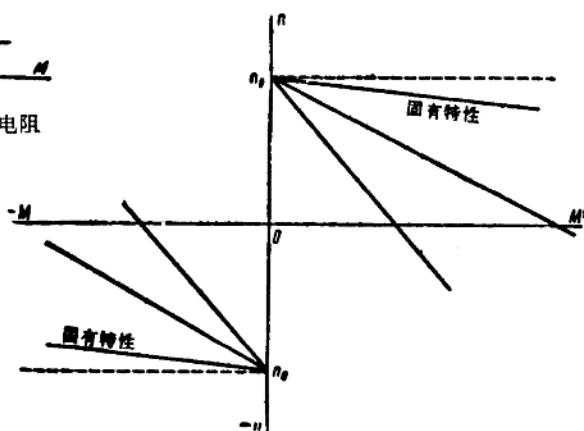


图2-10 他激直流电动机在顺转和逆转时的机械特性。

意选择的，在研究单与逆向旋转有关的特性时，也可把坐标轴的新方向当作是正的，这就使得我们有充分理由利用所有以前已导出的机械特性表达式。如果保留研究电动机“顺向”旋转工作时所采用的坐标轴正方向，那么，逆向旋转时的机械特性方程式将具有下列形式：

$$n = -n_0 - \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi} M. \quad (2-40)$$

当研究依次连续在第二、第三和第四象限内进行的过程时，这种形式的机械特性将更为方便。不要忘记，在第二和第三象限内，电动机转矩是负的。

● 请与图2-6比较。——译者