

清

ЭННИЙ КО

电力驱动基础

上册

苏联 B. П. 安德列耶夫等著

水利电力出版社

目 录

第一章 緒 論	
1-1 关于电力驱动及其自动化的概念	
1-2 苏联电力驱动的發展簡史	
第二章 电动机的机械特性	
2-1 概論	
2-2 相对單位	
2-3 直流电动机的机械特性	
2-4 他激直流电动机在 $\Phi = \text{const}$ 时的机械特性	
2-5 他激直流电动机在磁通減弱时的机械特性	
2-6 他激直流电动机在电樞被分路时的机械特性	
2-7 串激电动机的机械特性	
2-8 串激电动机的复杂的人为接綫圖	
2-9 复激直流电动机的机械特性	
2-10 发电机-电动机系統的机械特性	
2-11 有三組发电机的发电机-电动机系統的机械特性	
2-12 由串激电机組成的发电机-电动机系統的机械特性	
2-13 复激发电机和串激电动机組成的发电机-电动机系統的机械特性	
2-14 異步电动机的机械特性	
2-15 異步电动机在对称状态下的机械特性	
2-16 異步电动机的制动状态	
2-17 異步电动机在不对称状态下的机械特性	
2-18 双电动机驱动裝置的机械特性	
2-19 同步电动机的机械特性	
2-20 从电子方面饋电的三相整流子电动机的工作原理和構造	
2-21 从电子方面饋电的三相整流子电动机的机械特性	
第三章 电力驱动的动力学基础	
3-1 电力驱动的运动方程式	
3-2 静态力矩和静态应力的折算	
3-3 飞輪慣量归到一个軸的折算	
3-4 轉动慣量的試驗測定	
3-5 移动的质量归到旋轉运动的折算以及相反的折算	
3-6 有曲柄傳动的机构中的等值轉动慣量及等值应力的決定	
3-7 傳动裝置中的損耗	
3-8 电力驱动的起动時間和制动時間	
3-9 起动和制动時間內电动机軸轉动的角度	
3-10 电力驱动起动时的能量損耗	
3-11 制动和制动时的能量損耗	

3-12	电动机额定转速的选择	157
四章	电力驱动的过渡状态	161
4-1	研究电力驱动的过渡状态和负载曲线的实际意义	161
4-2	过渡状态研究的特点	163
4-3	各种工作机的静态力矩的性质	165
4-4	关于电气化机组运转稳定性的基本概念	168
4-5	有直线律机械特性的电力驱动在恒定静态力矩下的过渡状态	170
4-6	有直线律机械特性的电力驱动在 $M_0 = \text{const}$ 时的起动状态	176
4-7	有直线律机械特性的电力驱动在 $M_0 = \text{const}$ 时的制动状态	178
4-8	有直线律机械特性的电力驱动在静态力矩随速率变化时的机械过渡状态	182
4-9	驱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	186
4-10	有直线律机械特性的电力驱动在静态力矩与行程有关时的过渡状态	191
4-11	有直线律机械特性的电力驱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	199
4-12	有直线律机械特性的电力驱动在静态力矩与时间有关时的过渡状态	201
4-13	有串激和复激直流电动机的电力驱动在 $M_0 = \text{const}$ 和 $M_0 = f(v)$ 时过渡状态	205
4-14	有串激和复激直流电动机的电力驱动在 $M_0 = f(\alpha)$ 和 $M_0 = f(v, \alpha)$ 时的过渡状态	208
4-15	转动惯量为变数时过渡状态的计算	209
4-16	分激直流电动机电力驱动在 $M_0 = \text{const}$ 时的过渡状态	213
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	224
4-18	串激及复激电动机的驱动装置的电气-机械过渡状态	228
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	230
4-20	发电机-电动机系统的过渡状态	240
4-21	发电机-电动机系统中电动机的起动过程	245
4-22	发电机-电动机系统中电动机的制动和逆转	249
4-23	二次激磁发电机-电动机系统中的过渡状态	253
4-24	电力驱动参数的实验测定	256
4-25	研究直流电机激磁电路中过渡状态的图解-解析法	261
4-26	研究直流电力驱动的电气机械过渡状态的图解-解析法	267
4-27	异步电动机电力驱动的过渡状态	285
4-28	异步电动机电力驱动在 $M_C = 0$ 时的过渡状态的解析研究	287
4-29	异步电动机电力驱动在 $M_C = \text{const}$ 时的过渡状态的解析研究	291
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	295
4-31	异步电动机电力驱动的能耗制动	298
4-32	同步电动机电力驱动的过渡状态	299
4-33	与静负载有关的同步电动机驱动的过渡状态	301
4-34	同步电动机的起动	310
4-35	同步电动机的制动	312

第一章 緒 論

1-1 关于电力驱动及其自动化的概念

保证技术的经常进步乃是提高劳动生产率和扩大社会主义生产的基本条件。

在创造共产主义的物质生产基础时，重工业占有首要的地位。它成为整个国民经济的基础和苏联人民幸福生活不断上升的源泉。

机器制造业乃是工业的心脏。技术的继续进步、各部门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经济所有各部门的继续增长等问题的顺利解决，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驱动的完善程度以及电力驱动在电学原理上自动化的程度。

自动化的电力驱动乃是一整套电机、电器和控制系统的综合设备，在这套设备里一些电动机在结构上与执行机构联成一个整体。电力驱动的个别单元的参数应该选择得使所要求的生产过程保证能够实现。

自动化电力驱动的发展经过了几个阶段。

电力驱动的初始阶段的特点是改善它的组成单元：电动机、电动机的控制器械以及电动机和执行机构间的传动环节。这一阶段的主要趋势是分解电力驱动，使一个集中的电力驱动为好几个单独的所代替，这些单独的电力驱动的特性能最完满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驱动。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结，使得工具机的传动系统大为简化。当然，把组合驱动或甚至单独驱动改成多电动机驱动固然简化了工作机的传动系统，但它使电力驱动本身及其控制系统大大复杂了。

由有机地与相应的电力驱动联系的生产机器的各个工作部件组成的综合设备，并且是被一个共同的生产过程所联合在一起的，称为电气化机组。

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

第二个阶段是设计和制造自动控制和自动调整的设备，这种设备的任务是要保证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维持不变或按给定的曲线变化，保证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统基本上是接触器-继电器系统。与此相反，现在推行得很广的控制系统是连续控制系统，在这些系统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，使用着自动检查、保护和信号装置。

1-2 苏联电力驱动的发展简史

1834年В. С. 亞可比在旋轉运动的原理上創造了第一台直流电动机，并在1838年利用这台电动机来行駛小艇，这件事标注了电力驱动第一个工業样品的創始日期。由于这台电动机本身不够完善，并且供电給电动机的原电池組很不經濟，这个驱动系統在当时未能获得实际应用。亞可比在創造电力驱动方面的工作以后由許多發明家所繼承。

尽管俄国科学家和發明家在發展电工技术和电力驱动方面做了堅毅的探索和成功的工作，但他們的理想在資本主义俄国的条件下未能广泛实现。

在年輕的苏維埃共和国內，国民經济电气化的問題就完全以新的方式被提了出来。深刻的馬克思主义分析使弗·伊·列宁得出这样的結論：作为社会主义物質基础的大机器工業的創建，可以体现为在先进技术及全国电气化的基础上把全部国民經济加以社会主义組織和技术改造。列宁曾經指示，深远而全面的电气化乃是决定恢复被破坏了的經济和保証国家生产力繼續發展的主要环节。在列宁的直接领导下編制了全俄电气化計劃(ГОЭЛРО計劃)，即国民經济电气化的計劃。这个計劃被公正地称为“党的第二綱領”，它决定了15年以上的全部国民經济的發展方向。

工業的重建，国家工業化的第一个以及以后几个五年計劃的实现，使得許許多多大企業在工業的各不同部門里建立了起来。

电器工業的主导工厂，像以謝·米·基罗夫命名的“电力”(Электросила)工厂，哈尔科夫电气机械工厂(ХЭМЗ)和以基罗夫命名的“迭納莫”(Динамо)工厂，不仅制造出各种型式的电动机，还生产了冶金工業、造紙机所用的电力驱动，矿山电力設備以及許多其他复杂生产所用的电力設備。

由于設計專門化电力驱动的需要急速增加，于是設立了一系列的設計和科学研究机关：国立冶金工厂設計院(Гипромез)、国立煤矿設計院(Гипрошахт)、国立化学工厂設計院(Гипрохим)、国立重工業电气化設計院(ГПИ Тяжпромэлектроект)、“电力驱动”中央設計局(ЦКБ “Электропривод”)、金屬切削机床实验科学研究所(ЭНИМС)、中央重型机器制造科学研究所(ЦНИИТМАШ)以及其他机关。

苏联科学院自动控制 和远程操縱研究所、各工業部門的科学研究机关和高等学校——莫斯科动力学院、列宁格勒工学院、列宁格勒电工学院以及其他一些工学院——都在电力驱动及其自动化的領域作了广泛的科学研究工作。

苏联科学家把电力驱动当作应用科学的一个專業部門。苏联科学家創立电力驱动理論和改善这一理論的工作成为 电力驱动在苏联不断發展与改善的源泉。1880年發表的Д. А. 拉契諾夫的著作“电气机械功”是电力驱动理論的最早著作。在拉契諾夫著作的基础上，列宁格勒电工学院的教授П. Д. 伏伊納罗夫斯基在1900年和В. В. 德米特里耶夫在1903年出版了“机械能的电傳輸及其分配”，而在1915年德米特里耶夫又出版了“在工厂里机械能的电分配”教程。

以現代意义理解的 电力驱动理論并使 之成为独立課程是在С. А. 林开維奇的著作(1925、1933和1938年)和В. К. 波波夫的著作中(1932、1939、1945、1951年)形成的。

在В.С.庫列巴金、Р.Л.阿羅諾夫、Д.П.莫羅佐夫、А.Т.郭洛宛、М.Г.奇利金和其他諸人的著作中，電力驅動理論獲得了進一步的發展。В.К.波波夫、Д.В.華西利耶夫、И.Н.卡桑采夫、В.А.布尔加可夫、А.В.車柳斯金、Е.А.羅真曼、А.Я.列爾納、С.Н.魏雪涅夫斯基和其他諸人的著作發展了電力驅動自動控制的理論。

各類生產機構的電力驅動問題在下列諸人的著作中得到闡明：Д.П.莫羅佐夫、Н.П.庫尼茨基、Н.А.齊生科(軋鋼機)，В.И.伊林斯基(高爐車間用機構)，А.Т.郭洛宛(鍛壓機)，С.А.帕萊斯、Т.Н.索可洛夫(金屬切削機床)，Н.П.庫尼茨基、А.В.法切耶夫(起重運輸機構)，К.В.烏爾諾夫(印刷機器)，П.К.庫利可夫斯基(造紙及紡織工業)，Ф.Н.希克利亞爾斯基、П.В.烏曼斯基、В.С.士林(矿山機械電力驅動)，В.И.波隆斯基、В.М.阿列克謝耶夫、Н.М.霍米亞可夫(船舶用電力驅動)。

在五年計劃的年代中，蘇聯國民經濟大規模地由新技術裝備起來了。重工業的主導部門——機器製造業——的發展使得所有工業部門中的繁重勞動的機械化水平得以提高。但是按照蘇共第二十次黨代表大會決議所提出的任務來看，生產過程的機械化和自動化所達到的水平還不能算是令人滿意的。

蘇共第二十次代表大會關於第六個五年計劃的指令規定，在所有工業部門中應大規模地實現主要工作和輔助工作的綜合機械化，大規模地掌握生產過程的自動化，從個別機組和個別工序的自動化過渡到整個車間和工藝過程的自動化並且逐漸建立全部自動化的企業。

擺在蘇聯科學家和工程師們面前的任務是要在利用物理學、電子學和無線電工學的基本原理上來設計出新的自動控制工具和系統。這使我們能保證自動化工作有所需的發展，並且對生產的綜合自動化開辟寬廣的道路。

在最近幾個五年計劃內許許多多在自動化電力驅動方面的專家所積累的豐富的實際經驗，就是他們能夠順利地解決國家交給他們的任務的保證。

第二章 電動機的機械特性

2-1 概 論

正確地選擇電動機，是生產機器有效而經濟地工作的必要條件。電力驅動應該保證執行機構的起動、接受負載、卸除負載、制動等靜力(穩定)狀態及過渡狀態的順利進行。這些過程的進行首先決定於電動機轉速同它所發揮的轉矩之間的關係的特征。

電動機的 $n = f(M)$ 或 $\omega = \varphi(M)$ 的關係稱為電動機的機械特性。為執行機構選擇電動機時，這些關係是主要判據之一，並且對於評價電動機的机电性能來說，具有重要的意義。

電動機的機械特性，從一方面講，決定於電動機本身的机电性能，從另一方面講，決定於接入電動機電路中的電阻的大小及其連接的方法。

机械特性有固有(自然)特性和人为特性之分。在額定电压及頻率^①、正常的線路联接并且电动机电路內沒有附加电阻的条件下，电动机的轉速与其轉矩之間的关系，也就是 $n = f(M)$ 或 $\omega = \varphi(M)$ 的关系，称为固有机械特性。比如說，直流他激电动机的固有特性就是电压和磁通有額定值而电樞电路內沒有附加电阻时的 $n = f(M)$ 的关系。

电动机的人为特性是在电动机由电压不同于額定值的額路饋电、电动机电路內有附加电阻或电动机按特殊的接線圖联接时的 $n = f(M)$ 的关系。

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

机械特性按电动机轉速随負載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，則必須取所研究的特性曲線段內的轉速降及相应的轉矩变化的百分比或标么值。

所有的机械特性可以分类如下：

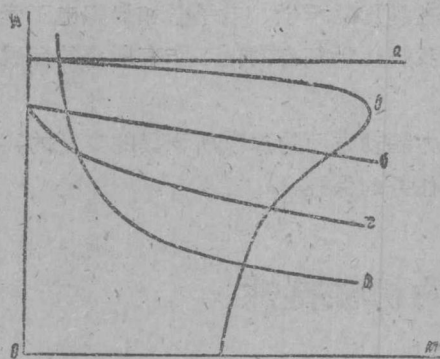


圖 2-1 电动机机械特性的不同形态

- a—同步电动机的绝对硬的特性；
- б—直流他激电动机的硬特性；
- в—直流串激电动机的软特性；
- г—直流复激电动机的软特性；
- д—异步特性。

1. 轉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(圖2-1, a)；其硬度为：

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

2. 轉矩增加时轉速降比較小的硬特性；它的硬度約为 $\alpha = 40-10$ 。属于这一类的有直流他激电动机的特性，异步电动机在其直線部分的特性以及某几种整流子电动机的特性(圖2-1, б)。

3. 轉矩增大时轉速降比較大的软特性。它的硬度約为 $\alpha = 10$ 以及10以下。直流串激电动机、某几种整流子交流电动机、电樞电路內有大电阻的直流他激电动机、副电路內有大的附加电阻的滑环式异步电动机都有这样的特性(圖2-1, в)。

从同步轉速到接近于临界轉差率的那一段异步特性，具有 $\alpha = 92-90$ 的硬度；从临

① 即額定电压及頻率。——譯者

界轉差率這一點到停止并向負轉速的方面延伸的這段特性是有很大轉速降的軟特性（圖2-1,δ）。

特性的選擇決定於生產機構的要求。舉例說，鋼帶的連續冷軋、造紙生產、滾筒印刷等要求很硬的特性。與此相反，某些起重運輸機若有軟特性的驅動，將以更高的生產率工作。

2-2 相對單位

在計算不同種類的電力驅動時，往往需要比較以額定數據不同的電動機裝配起來的驅動方案。將所得結果加以直接比較不能作為被比較的方案的優缺點的客觀判斷。舉例說，在研究兩台直流電動機的起動過程時，如果這兩台電動機有不同的額定電壓，那麼比較一下這兩台電動機的起動電流，我們還不能作出結論哪一台電動機的起動條件更輕易些。我們也不能對各級的電阻大小作出結論。為了在類似情況下消除這種不確定性，計算不宜於用絕對單位（歐姆、安培等等），而宜於用相對抽象單位來計算，或用百分數來計算。前者又稱為標么值。應用相對單位就不需要從一種單位轉到另一種單位，從一些測量轉到另一些測量，並且使我們能借助於專門繪制的萬用曲線直接決定為了獲得原有的特性所需要的電動機參數。

為了以相對單位表示某一量，必須把它的絕對值除以採用作單位的同類的量。

基本單位一般可以任意選擇，但通常是用下列各量：

$U_{\text{ном}}$ ——額定電壓；

$I_{\text{ном}}$ ——額定電流；

$M_{\text{ном}}$ ——額定轉矩；

$r_{\text{ном}}$ ——額定電阻，它等於電動機額定電壓被額定電流所除的商數；

$n_{\text{ном}}$ ——以轉/分計的額定轉速。

對於同步電動機和異步電動機，採取同步轉速 n_0 作為基本單位。與此類似，對於直流他激電動機來說， n_0 是理想空載轉速，在這轉速下，電動機的感應電動勢等於端路電壓。

在以後的敘述中，以標么值表示的量將用小寫希臘字母來代表，以百分數表示的量將用同樣的希臘字母來代表，不過它們後面帶有 % 記號。這樣一來，以標么值計的電壓將為：

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

以百分數計的電壓將為： $v\% = \frac{U}{U_{\text{ном}}} \times 100\%.$ (2-1')

在異步電動機中，最好是把兩個額定電壓加以區分：一個是定子的線電壓，另一個是轉子靜止時的轉子電動勢。

電流以標么值計是 $i = \frac{I}{I_{\text{ном}}},$ (2-2)

或以百分数計 $\iota\% = \frac{I}{I_{HOM}} \times 100\%.$ (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 $\rho = \frac{r}{r_{HOM}};$ (2-4)

或以百分数計 $\rho\% = \frac{r}{r_{HOM}} \times 100\%.$ (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:

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

異步電動機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靜止而定子繞組接在額定頻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將为:

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

其中 E_{2HOM} ——靜止轉子的电动势, 而

I_{2HOM} ——轉子的額定电流。

異步电动机通常有 $x_2 \ll z_{2HOM}$; 其中 MT 系的电动机的 $x_2 \approx (0.1-0.05) z_{2HOM}$ 。因此实际上可以算作 $r_{2HOM} \approx z_{2HOM}$ 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: $\mu = \frac{M}{M_{HOM}}$ (2-8)

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

轉速以相对單位計等于:

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

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

对于直流串激电动机和复激电动机来说，我们用额定转速 $n_{H0.N}$ 作为基本单位：

$$\nu = \frac{n}{n_{H0.N}}; \quad (2-9)$$

$$\nu\% = \frac{n}{n_{H0.N}} \times 100\%. \quad (2-9')$$

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：

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

或 $s\% = 100 - \nu\% \quad (2-10')$

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，为了起动和制动，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：

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

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

直流电机的电动势与磁通和电枢转速成正比：

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

在 (2-12) 和 (2-13) 这两个表达式中，

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 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 —— 一个极的磁通以韋伯计； | |

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：

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

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')可以推論, 直流电动机的轉速与其电动势成正比而与磁通值成反比:

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

由于在負載下運轉的电动机的电动势不能直接量測, 較适当的办法是通过施加于电动机的电压和电樞电路內的电压降表达出来

$$E = U - I_a r$$

把电动势值代入电动机轉速的表达式(2-15)中, 并以轉矩来代替电樞电流 $I_a = \frac{M}{c_M \Phi}$, 則得直流电动机机械特性的通用方程式:

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

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, 我們將作如下的假定: 饋电網路的电压当作是恒定的并等于額定值; 电樞反应的影响不予考虑, 假定电机是有換向極和补偿繞組的, 也就是把磁通当作是恒定的; 繞組溫度当作是不变的因而繞組电阻算作是恒定的。

他激电动机的接綫圖見圖2-2所示。

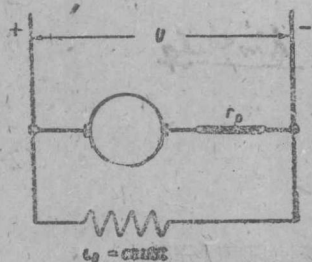


圖 2-2 他激电动机的接綫圖

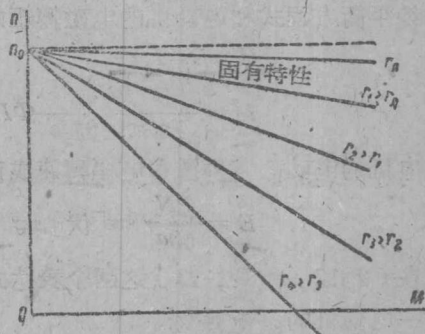


圖 2-3 他激直流电动机的机械特性曲綫

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綫:

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

其中

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

r_p ——变阻器电阻。

这根直綫在縱坐标軸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轉速。轉速 n_0 称为理想空載轉速。在理論上講, 当电动机空載而其电磁轉矩等于零时, 是能有这样的轉速的。在实际上講, 如果电动机軸上有外施轉矩作用来克服不可避免的阻力(摩擦力矩、通風損耗和鋼中損耗), 那末, 理想空載轉速是可以获得的。

实际上由于机械损耗和铁耗的存在, 实际上的 n_0 比理想空载轉速要小些。

特性的角系数，即直线与横轴之间的倾斜角的正切

$$b = \frac{r_a + r_p}{c_E \Phi c_M \Phi} = \frac{r_a + r_p}{c_E c_M \Phi^2} = \frac{R_g}{c_E c_M \Phi^2}$$

决定于电动机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：

$$M_e = M_{\text{э.н}} - M_{mp} - M_{\text{вех}} - M_{cm}.$$

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 $n = f(M_e)$ 将有一次断裂。在图2-4中画着机械特性曲线 $n = f(M_e)$ 和 $n = f(M_{\text{э.н}})$ 。

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、风损和钢损等力矩当作电动机轴上静力负载的附加部分来看。力矩 $M_{mp} + M_{\text{вех}} + M_{cm}$ 的和数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 $M_{\text{э.н}} = M_{\text{э.0}}$ 。

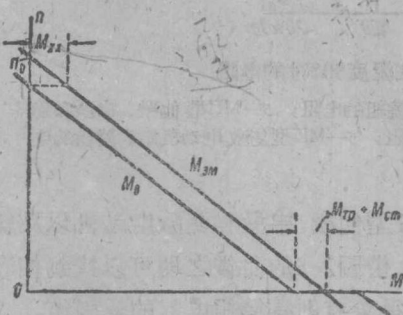


图 2-4 损耗对于机械特性曲线形状的影响

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。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路绕组在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路电流时的电动势：

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

从(2-19)式又得：

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

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

$$\frac{n_0}{n_{\text{н.н}}} = \frac{U}{E_{\text{н.н}}}$$

或

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

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

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

以后又求出

$$M_{э.м.ном} = c_M \Phi I_{ном}$$

在利用电动机轴上的额定转矩

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

(功率以瓦特计)时，将容许上面所讲到过的不准确性。

直流电动机的产品目录中是没有关于绕组电阻的数据的，因此我们不得不用一种近似法来求这个数据。

电枢电路诸绕组——包括电枢、换向极、串激绕组——的电阻可以根据电阻（以标么值计）与额定功率之间的关系曲线来决定（参考文献2-1）。

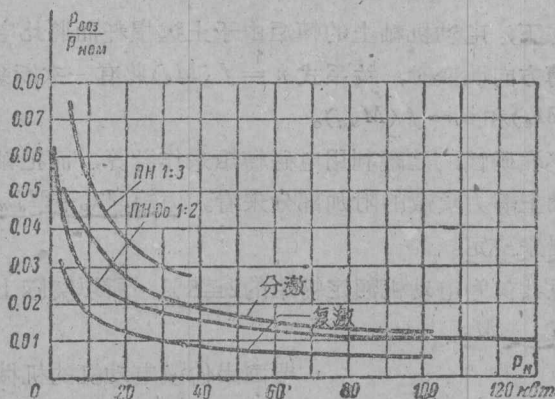


圖 2-5 МП型和ПН型直流电动机绕组在温度60°时的电阻

1—ПН型电动机的电枢电阻；2—ПН型电动机的电枢绕组和励磁绕组的电阻；3—МП型他激、串激和复激电动机的电枢绕组的电阻；4—МП型串激电动机励磁绕组的电阻；5—МП型复激电动机串联绕组的电阻。

圖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一系列的长期运转用的ПН型他激电动机的这种曲线。借圖2-5的曲线之助可以找到相应型式和功率的电动机的标么值电阻；以额定电阻乘所得数值则得绕组电阻的欧姆值。

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

（如果没有 $\rho = f(P_{ном})$ 的曲线，电动机电枢电路的电阻可以近似地根据铜损来求得。从电机这门课程已知，当负载相当于最大效率时，变动的损耗等于恒定损耗。电机的最大效率 η_{max} 通常发生在 $0.75 P_{ном}$ 和 $P_{ном}$ 之间。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。额定负载下的全部损耗等于从电力网路取用的功率与电动机轴上的额定功率之差：）

$$\Delta P_{НОМ} = U_{НОМ} I_{НОМ} - P_{НОМ}.$$

在这种情况下额定铜损耗将为:

$$\Delta P_{МНОМ} = \frac{\Delta P_{НОМ}}{2} = \frac{U_{НОМ} I_{НОМ} - P_{НОМ}}{2} = I_{НОМ}^2 r_{\pi},$$

由此, 电枢绕组和换向极的电阻将等于:

$$r_{\pi \partial n} = \frac{U_{НОМ} I_{НОМ} - P_{НОМ}}{2 I_{НОМ}^2} [\text{欧}]. \quad (2-21)$$

类似的计算也可借助于效率的额定值来作, 其公式如下:

$$r_{\pi \partial n} = 0.5(1 - \eta_{НОМ}) r_{НОМ} [\text{欧}]. \quad (2-22)$$

如果已知 n_0 , 电枢电路的电阻即可借表达式(2-20)式来求得, 那就是:

$$\frac{n_0}{n_{НОМ}} = \frac{U}{E_{НОМ}} = \frac{U}{U - I_{НОМ} r_{\partial}},$$

由此得

$$r_{\partial} = \frac{U}{I_{НОМ}} - \frac{U}{I_{НОМ}} \frac{n_{НОМ}}{n_0}$$

或

$$r_{\partial} = r_{НОМ} \left(1 - \frac{n_{НОМ}}{n_0} \right). \quad (2-23)$$

对于 M П 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.....	$r_{\pi} = 0.5 r_{\partial}$	$r_{\pi} = 0.5 r_{\partial}$
换向极.....	$r_{\partial n} = 0.23 r_{\partial}$	$r_{\partial n} = 0.32 r_{\partial}$
串联绕组.....	$r_n = 0.27 r_{\partial}$	$r_n = 0.18 r_{\partial}$

a) 起动电阻的计算

他激电动机的机械特性曲线使各级起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络接通的, 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 $n_{НОМ}$ 的范围内, П H 型他激电动机按整流条件能容许不超过 $2.5 I_{НОМ}$ 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

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{r_{\pi} + r_p},$$

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:

$$I_{\pi} = \frac{U - E}{r_{\pi} + r_p}.$$

转矩也随着电流同时减小, 因而也减低了加速的强度。为了把驱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, 起动电阻的级数越多, 驱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的观点来看, 并且为了提高工作的可靠性, 最好是尽量减少起动的级数。

起动的工艺要求: ① 限制 I_{π} 至 M_{π}
② 保持转速在 M_{π} 附近
③ 保持转速的平滑
④ 具有 r_{π} 的

計算起動電阻時可利用人為機械特性 $n = f(M)$ ，或者，考慮到他激電動機是在 $\Phi = \text{const}$ 的條件下工作的，也常利用 $n = \varphi(I_a)$ 的關係，因為電流和轉矩是彼此成正比的。

為了得到起動時的機械特性曲綫(圖2-6, a), 我們先把電動機的固有特性畫出來，在 I 軸上註上靜態負載電流值 I_c ，起動時的最大電流值 I_{n1} 和最小電流值 I_{n2} ，在達到此值時第一級以及以後各級電阻就切除了。

最大電流和最小電流的數值一般選擇 $I_{n1} = 2.0 - 2.5 I_{n0.n}$ 和 $I_{n2} = 1.2 - 1.5 I_c$ 。電流 I_{n1} 和 I_{n2} 的數值對應於 a 和 b 點。

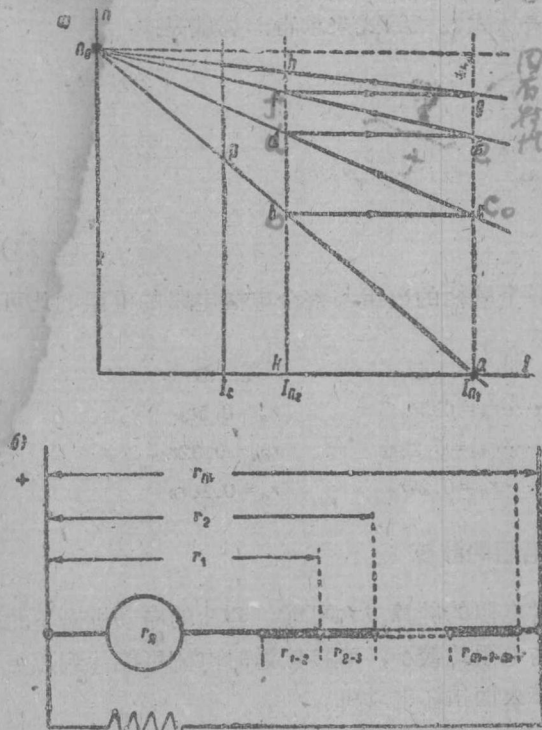


圖 2-6 他激電動機的機械特性曲綫族和起動電阻的联接圖

畫一直綫把 a 和 n_0 兩點聯起來，則得電動機在帶有全部起動電阻運轉時的人為機械特性。在特性下部的電動机电流，大於與靜態力矩相對應的電流，因而電動機就開始加速。當電動機逐漸加速時，電樞電流將隨之減少，並且可以降到 I_c 。果真這樣的話，電動機加速將停止，轉速將是較低的 (p 點)。為了避免這種現象，當電流達到 I_{n2} 值 (b 點) 時，起動電阻將減少到這樣一個數值，使得在同一轉速下電流重新增加到 I_{n1} (c 點) 而電動機則過渡到了新的人為特性 n_0c 。在這一特性上電動機將運轉一直到 d 點，那時候應該切去第二級電阻而電流又重新增加到 I_{n1} (e 點)。把 n_0 和 e 兩點用直綫聯起來，則得最後的一個為特性，電動機將沿此特性增加到 f 點，這時候最後的一級起動電阻被切除，電動機就應該過渡到固有特性上運轉。如果起動電

阻各級選擇得正確，電動機應該在電流 I_{n1} 之下轉上固有特性 (g 點)。如果不是那樣，就必須改變電流 I_{n2} 之值而將起動特性重新畫過，使得從最後的起動特性轉到固有特性時正是在電流 I_{n1} 之下發生。繪制起動特性曲綫族至此就結束了。在一般情形之下，起動特性的數目不一定是上述舉例中的三，而是 m 。電動機和起動電阻的联接法以及起動電阻的編碼均如圖2-6, δ 所示。這裡我們規定起動級的號碼是從固有特性開始向電動機開步的那一個特性增大的。

為了確定各個起動級上的電動机电樞電路的各電阻之間的關係，讓我們來研究一下從特性 m 轉到特性 $m-1$ 時的電阻比值。在每個起動級上，電阻的切除是進行得相當快的，在這時間內電動機轉速以及電動勢是來不及變動的。

從起動曲綫圖2-6可以看出，從起動級 m 轉到 $m-1$ 時，下列的關係可以成立：

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

起动时的电流比率将是:

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

如果起动曲线图计算得正确, 在所有各级上部会有类似的比率:

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

把起动时的电流比率表示为

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

根据 (2-24) 式可确定各级电阻的比率如下:

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

由此得

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

在给定的起动电流倍数下, 起动级数将等于:

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

起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) 式求得所需的级数。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) 式计算出每一级上的电枢电路的总电阻。

在每一级上切去的电阻, 等于相邻两级上的总电阻之差:

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

应当指出, 上面采用的总电阻的编号法符合从起动特性 m 到固有特性的转变。

起动电阻的详细算法在参考书 [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起动电阻的图解算法。

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 $M_{n0.m}$ 又除以 $M_{n0.n}$ 。在这之后即得:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{n_0}{n_0} - \frac{(r_a + r_p) M c_M \Phi I_{H0.M}}{c_E \Phi c_M \Phi M_{H0.M} n_0}$$

利用(2-4)、(2-5)、(2-8)和(2-9)并且把它們代入上面得出的方程式中，則將得：

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

等式(2-30)以百分数表示时將具有下列形式：

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

在 $v\%$ 和 $\mu\%$ 的坐标系中，表达式(2-30)和(2-30')是一根直綫，它在 $v\%$ 軸上截取的一段相当于100%轉速(理想空載轉速)。

同以前一样，角系数是由电樞电路的电阻决定的。

对于以恒定磁通運轉的他激电动机來說，下列关系式是正确的：

$$M_d = c_M \Phi I = k_M I,$$

$$M_{dH0.M} = c_M \Phi I_{H0.M} = k_M I_{H0.M},$$

由此得

$$\mu = 1 \quad \text{或} \quad \mu\% = 1\%.$$

所以机械特性可以写成

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

当轉矩有額定值时， $\mu\% = 100\%$ 或 $1\% = 100\%$ ，方程式(2-30')和(2-31)將具有下列形式：

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

电樞电路的电阻在这种情形下將是：

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

就是說，它將等于在 $\mu\% = 100\%$ 那一点豎起的一根垂直綫上从理想空載轉速的水平綫到該机械特性的那一段。

实际上要計算起動电阻时，在 $v\%$ 和 $\mu\%$ 的坐标系中(圖2-7)画上电动机的固有机机械特性曲綫，給定各級电阻換接时的最大和最小轉矩值 $\mu_{r1}\%$ 和 $\mu_{r2}\%$ ，并且像以前一样，画出人为机械特性曲綫族。然后，从 $\mu\% = 100\%$ 的一点画一垂直綫。垂直綫在水平綫 $v\% = 100\%$ 和相应的机械特性之間的一段等于每一起动級上的电樞电路的总电阻。同一垂直綫在两个相鄰的特性之間的一段，等于从一个特性轉到另一个特性时电樞电路內切去的电阻。电阻以欧姆計將等于：

$$r_x = \frac{\rho_x\%}{100} r_{H0.M}. \quad (2-34)$$

有許多問題在解决时必须用更簡單的机械特性的表达式。讓我們利用一下等式(2-16)并且以理想空載轉速引入此等式。这时候我們得：

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

把 n 移到右边而把 $\frac{r}{c_E \Phi c_M \Phi} M$ 这一項移到左边，然后等式兩边各除以 n_0 ：

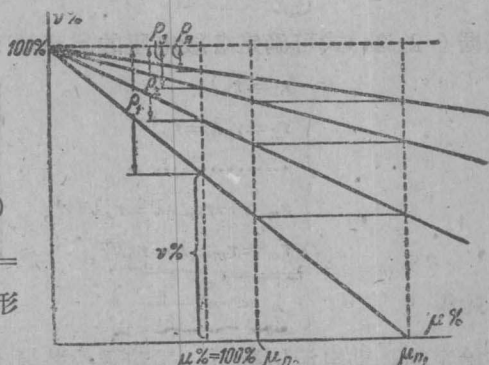


圖 2-7 分激电动机各級起動电阻的圖解計算法