

高等学校教学用书

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

高等学校教学用书

电力驱动基础

上册

苏联 В. П. 安德列耶夫 Ю. А. 薩比宁 著

鍾兆璵 译

苏联高等教育部工业和机器制造学校管理总局审定
作为动力和电工院系参考教材

水利电力出版社

內 容 提 要

本書介紹了電力驅動理論的基本知識，並且討論了各種不同系統的電力驅動的選擇和實際應用的一系列問題。

本書是電工和動力院系學生的參考教材，但也可供從事電力驅動工作的工程師參考。

В.П.АНДРЕЕВ Ю.А.САВИНИН

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1956

電力驅動基礎

上 冊

根據蘇聯國立動力出版社1956年莫斯科版翻譯

鍾 兆 璠譯

*

1084 D 317

水利電力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

北京市通州區印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092 $1/16$ 開本*20 $1/4$ 印張*443千字*定價(第10類)2.50元

1959年5月北京第1版

1959年5月北京第1次印刷(0001—7,190冊)

序

現代電力驅動只能理解為自動化的電力驅動。這本書既然是研究現代電力驅動的，所以把它稱為“自動化電力驅動基礎”，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——“電力驅動基礎”，所以書本也仍用這個書名。

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驅動的要求，从而使本書作者對電力驅動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材料並加以實際應用。

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“電力驅動基礎”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

第一章 緒 論	1
1-1 关于电力驱动及其自动化的概念	1
1-2 苏联电力驱动的發展簡史	2
第二章 电动机的机械特性	3
2-1 概 論	3
2-2 相对單位	5
2-3 直流电动机的机械特性	7
2-4 他激直流电动机在 $\Phi = \text{const}$ 时的机械特性	8
2-5 他激直流电动机在磁通减弱时的机械特性	26
2-6 他激直流电动机在电枢被分路时的机械特性	28
2-7 串激电动机的机械特性	84
2-8 串激电动机的复杂的人为接載圖	45
2-9 复激直流电动机的机械特性	52
2-10 发电机-电动机系统的机械特性	54
2-11 有三繞組发电机的发电机-电动机系统的机械特性	57
2-12 由串激电机組成的发电机-电动机系统的机械特性	64
2-13 复激发电机和串激电动机組成的发电机-电动机系统的机械特性	68
2-14 异步电动机的机械特性	72
2-15 异步电动机在对称状态下的机械特性	80
2-16 异步电动机的制动状态	88
2-17 异步电动机在不对称状态下的机械特性	100
2-18 双电动机驱动裝置的机械特性	106
2-19 同步电动机的机械特性	109
2-20 从轉子方面饋电的三相整流子电动机的工作原理和構造	113
2-21 从轉子方面饋电的三相整流子电动机的机械特性	115
第三章 电力驱动的动力学基础	119
3-1 电力驱动的运动方程式	119
3-2 静态力矩和静态应力的折算	125
3-3 飞輪慣量归到一个軸的折算	126
3-4 轉动慣量的試驗測定	129
3-5 移动的质量归到旋轉运动的折算以及相反的折算	132
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	134
3-7 傳动裝置中的損耗	140
3-8 电力驱动的起动時間和制动時間	146
3-9 起动和制动時間內电动机軸轉动的角度	150
3-10 电力驱动起动时的能量損耗	151
3-11 电动机制动时的能量損耗	155

3-12 电动机额定转速的选择	157
第四章 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 $M_c = \text{const}$ 时的起动状态	176
4-7 有直线律机械特性的电力驱动在 $M_c = \text{const}$ 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 $M_c = \text{const}$ 和 $M_c = f(v)$ 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 $M_c = f(\alpha)$ 和 $M_c = f(v, \alpha)$ 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 $M_c = \text{const}$ 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	239
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	258
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	235
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	267
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	271
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	285
4-31 异步电动机电力驱动的能耗制动	290
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

参考文献

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坚实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电子-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Б. 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電池組很不經濟，这个驱动系统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内，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，深遠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 Тяжпромэлектропроект）、“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.布爾加可夫、А.Б.車柳斯金、Е.А.羅賓曼、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。

蘇共第二十次黨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。

摆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礎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徵。

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機電性能來說，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機電性能，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。在额定电压^①、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:

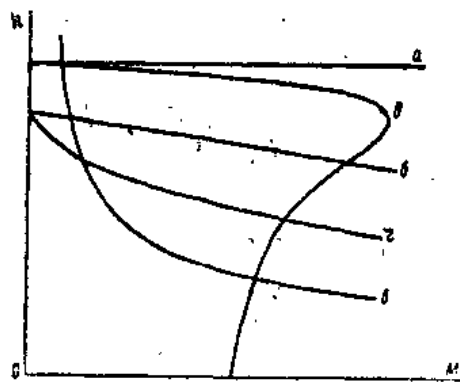


图 2-1 电动机机械特性的不同形态。

- 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。

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 $\alpha = 40-10$ 。属于这一类的有直流他激电动机的特性,异步电动机在其直线部分的特性以及某几种整流子电动机的特性(图2-1,b,d)。

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,e)。

从同步转速到接近于临界转差率的那一段异步特性,具有 $\alpha = 92-90$ 的硬度;从临

① 即额定电压及频率。——编者

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, d)。

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備起來的驅動方案。將所得結果加以直接比較不能作為被比較的方案優缺點的客觀判據。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:

$U_{\text{но.н}}$ ——額定電壓;

$I_{\text{но.н}}$ ——額定電流;

$M_{\text{но.н}}$ ——額定轉矩;

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

$n_{\text{но.н}}$ ——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網路電壓。

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:

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

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

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。

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

或以百分数計 $\eta\% = \frac{I}{I_{H0.0.}} \times 100\%$. (2-2')

按照上面所給的定义, 額定电阻是

$$r_{H0.0.} = \frac{U_{H0.0.}}{I_{H0.0.}}. \quad (2-3)$$

电阻以标么值計是 $\rho = \frac{r}{r_{H0.0.}}$, (2-4)

或以百分数計 $\rho\% = \frac{r}{r_{H0.0.}} \times 100\%$. (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:

$$\rho = \frac{r}{r_{H0.0.}} = \frac{\frac{U}{I}}{\frac{U_{H0.0.}}{I_{H0.0.}}} = \frac{v}{1} \quad \text{或} \quad \rho\% = \frac{v\%}{1\%} \times 100\%. \quad (2-5)$$

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:

$$z_{2H0.0.} = \frac{E_{2H0.0.}}{\sqrt{3} I_{2H0.0.}}, \quad (2-6)$$

其中 $E_{2H0.0.}$ ——静止轉子的电动势, 而

$I_{2H0.0.}$ ——轉子的額定电流。

异步电动机通常有 $x_2 \ll z_{2H0.0.}$; 其中 MT 系的电动机的 $x_2 \approx (0.1-0.05) z_{2H0.0.}$ 因此实际上可以算作 $r_{2H0.0.} \approx z_{2H0.0.}$ 或

$$r_{2H0.0.} = \frac{E_{2H0.0.}}{\sqrt{3} I_{2H0.0.}} = \frac{E_{2H0.0.}}{1.73 I_{2H0.0.}}. \quad (2-7)$$

如果繞組是联成三角形的, 其每相电阻可从下式求到:

$$r_{2\Delta} = \frac{1}{3} r_{2\Lambda}.$$

电动机轉矩以标么值計等于: $\mu = \frac{M}{M_{H0.0.}}$ (2-8)

或以百分数計 $\mu\% = \frac{M}{M_{H0.0.}} \times 100\%$. (2-8')

轉速以相对單位計等于:

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

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

对于直流串激电动机和复激电动机来说，我们用额定转速 $n_{H0.2}$ 作为基本单位：

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

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

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：

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

或
$$s\% = 100 - \gamma\%. \quad (2-10')$$

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

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(2-12)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：

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

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:

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

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; 繞組温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。

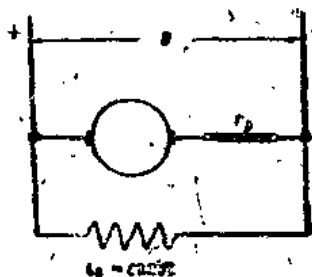


圖 2-2 他激电动机的接綫圖

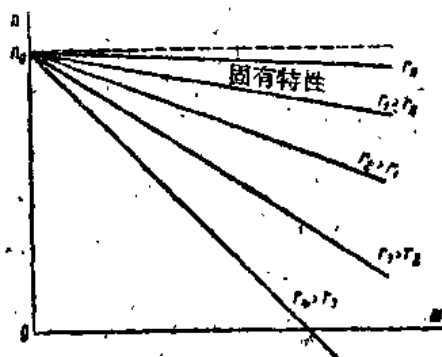


圖 2-3 他激直流电动机的机械特性曲綫

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。

特性的角系数，即直綫与横軸之間的傾斜角的正切

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

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綫的角系数而使特性变得更軟些。

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，不論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、通风损耗和鋼中损耗必须克服，电动机軸上的转矩在电动机状态下将永远小于电磁转矩，也就是：

$$M_s = M_{s, \kappa} - M_{mp} - M_{\text{вент}} - M_{cm}$$

与此相反，在制动状态下，电动机軸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 $n = f(M_s)$ 将有一次断裂。在图2-4中画着机械特性曲线 $n = f(M_s)$ 和 $n = f(M_{s, \kappa})$ 。

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、風損和鋼損等力矩当作电动机軸上静力负载的附加部分来看。力矩 $M_{mp} + M_{\text{вент}} + M_{cm}$ 的和数可以根据电动机的额定数据来决定。

由于上述諸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 $M_{s, \kappa} = M_s$ 。

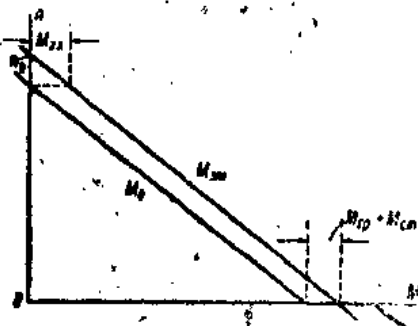


图 2-4 损耗对于机械特性曲线形状的影响

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：

$$E_{n_0, \kappa} = U - I_{n_0, \kappa} r_s = c_E \Phi n_{n_0, \kappa} \quad (2-19)$$

从(2-19)式又得：

$$c_E \Phi = \frac{U - I_{n_0, \kappa} r_s}{n_{n_0, \kappa}} \quad (2-19')$$

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

$$\frac{n_0}{n_{n_0, \kappa}} = \frac{U}{E_{n_0, \kappa}}$$

或
$$\eta_0 = \eta_{\text{НО.М}} \frac{U}{E_{\text{НО.М}}} \quad (2-20)$$

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 η_0 可求得 $c_E \Phi$ 之值，然后借(2-14')式之助求出

$$c_M \Phi = \frac{c_E \Phi}{1.03} = \frac{U}{1.03 \eta_0}$$

以后又求出 $M_{\text{НО.М}} = c_M \Phi I_{\text{НО.М}}$

在利用电动机轴上的额定转矩

$$M_{\text{НО.М}} = \frac{P_{\text{НО.М}}}{\omega_{\text{НО.М}}} = 0.975 \frac{P_{\text{НО.М}}}{\eta_{\text{НО.М}}} [\text{公斤-公尺}]$$

(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）。

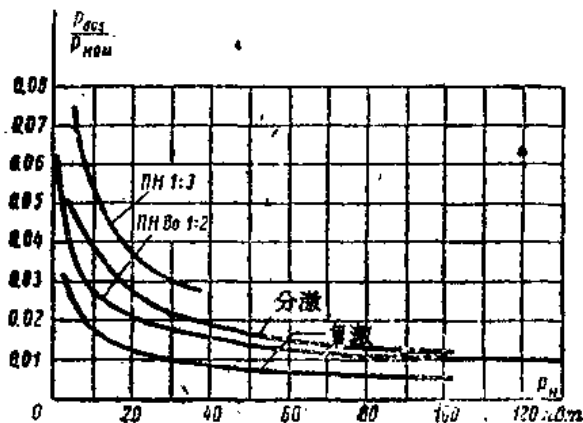


圖 2-5 MΠ型和ΠH型直流电动机绕组在温度60°时的电阻

1—ΠH型电动机的电枢电阻；2—ΠH型电动机的电枢绕组和额定绕组的电阻；3—MΠ型他激、串激和复激电动机的电枢绕组的电阻；4—MΠ型串激电动机激磁绕组的电阻；5—MΠ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MΠ型他激、串激和复激电动机以及一系列的长期运转用的ΠH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 $r_{\text{к}} \approx 0.01 r_{\text{НО.М}}$ 。

如果没有 $\rho = f(P_{\text{НО.М}})$ 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 $0.75 P_{\text{НО.М}}$ 和 $P_{\text{НО.М}}$ 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 $P_{\text{НО.М}}$ 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：

$$\Delta P_{\text{HOM}} = U_{\text{HOM}} I_{\text{HOM}} - P_{\text{HOM}}$$

在这种情况下额定铜损耗为:

$$\Delta P_{\text{HOM}} = \frac{\Delta P_{\text{HOM}}}{2} = \frac{U_{\text{HOM}} I_{\text{HOM}} - P_{\text{HOM}}}{2} = I_{\text{HOM}}^2 r_{\text{H}}$$

由此, 电枢绕组和换向极的电阻将等于:

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

类似的计算也可借助于效率的额定值来作, 其公式如下:

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

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

$$\frac{\eta_0}{\eta_{\text{HOM}}} = \frac{U}{E_{\text{HOM}}} = \frac{U}{U - I_{\text{HOM}} r_{\text{H}}}$$

由此得

$$r_{\text{H}} = \frac{U}{I_{\text{HOM}}} - \frac{U}{I_{\text{HON}}} \cdot \frac{\eta_{\text{HOM}}}{\eta_0}$$

或

$$r_{\text{H}} = r_{\text{HON}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{HOM}}}{\eta_0} \right). \quad (2-23)$$

对于 M II 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.....	$r_{\text{H}} = 0.5 r_{\text{d}}$	$r_{\text{H}} = 0.5 r_{\text{d}}$
换向极.....	$r_{\text{dH}} = 0.23 r_{\text{d}}$	$r_{\text{dH}} = 0.32 r_{\text{d}}$
串联绕组.....	$r_{\text{H}} = 0.27 r_{\text{d}}$	$r_{\text{H}} = 0.18 r_{\text{d}}$

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 η_{HOM} 的范围内, II H 型他激电动机按整流条件能容许不超过 $2.5 I_{\text{HOM}}$ 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

$$I_{\text{HOM}} = \frac{U}{r_{\text{H}} + r_{\text{p}}}$$

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:

$$I_{\text{H}} = \frac{U - E}{r_{\text{H}} + r_{\text{p}}}$$

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。