

船舶小丛书

船舶电力驱动

費以法編著

人民交通出版社

电力驱动主要由三个环节所构成的机械装置：电动机、控制设备和传动装置。本书讨论有关船舶电力驱动的基本问题。着重论述如何绘制电动机的机械特性；分析电动机的各种启动、调速、制动和改向法；介绍电力驱动的各种控制线路和有关控制设备。

本书对船舶辅机电动机的功率选择，简略说明计算原则和进行步骤，使有一般概念。

本书可供造船厂电气技工和技术员作为参考资料，也可供中等技术学校学生攻读电力驱动时的参考书。

船舶电力驱动

費以法編著

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六號

新 華 書 店 發 行

公私合營慈成印刷工廠印刷

*

1958年7月北京第一版

1958年7月北京第一次印刷

開本：787×1092_{毫米}

印張：2_{1/4}張

全書：67,000字

印數：1—850冊

統一書號：15044·6132

定價(9)：0.26元

目 录

一、概 述

二、船舶电动机

§ 1 电动机的主要特性	2
§ 2 直流并激电动机的机械特性和运用	4
§ 3 直流串激电动机的机械特性和运用	11
§ 4 直流复激电动机的机械特性和运用	14
§ 5 交流电动机的机械特性和运用	15
§ 6 船舶电动机的特殊要求	20
§ 7 船舶电动机的选择	21
§ 8 电动机的控制设备	25
§ 9 电动机的保护设备	31

三、船舶辅机电动机的选择和控制

§ 10 驱动的基本概念	32
§ 11 舵机电动机的选择	34
§ 12 舵机电动机的控制线路	38
§ 13 锚机电动机的选择	43
§ 14 锚机电动机的控制线路	52
§ 15 起重机电动机的选择	58
§ 16 起重机电动机的控制线路	63
§ 17 泵、鼓风机和压缩机电动机的选择	68
§ 18 泵、鼓风机和压缩机电动机的控制线路	66
§ 19 船舶电磁控制站	67

四、船舶电气设备的安全操作

§ 20 安全技术规范	68
§ 21 安全操作规程	69
§ 22 电机的维护和检修	70

一、概 述

电力驱动的概念 过去船舶辅机常用蒸汽动力来驱动，直到本世纪中，由于电机制造的成本降低，质量提高，便于控制，而且重量亦较蒸汽设备大为减轻，因此电力驱动在现代化船舶上得到广泛地应用。

电力驱动是由三个主要环节所构成：1)电动机，2)保护和控制系统，3)电动机和工作机之间的传动设备。在个别情况下，后面两个环节的结构可能很简单。

对于船舶电力驱动的装置，要求非常严格，务必灵活、准确、迅速、可靠，以期保证船舶航行的安全。

船舶电力驱动的发展及其优越性 电力驱动的优越性，大体上可归纳成下列几方面：

- 1)电能传送方便、简单，不像热能需要复杂和巨大的输送管路；
- 2)随时可以工作，启动迅速，制动容易，便于倒车；
- 3)可以平滑或分段地调速，操纵迅速；
- 4)工作安全可靠和整洁；
- 5)机械结构简单轻便；
- 6)能实现远程控制和自动控制；
- 7)经济。

近代船舶电力驱动的发展方向是自动控制，使用交流电，并尽可能减小设备的体重。

二、船舶电动机

§ 1 电动机的主要特性

电动机的额定工作状态是指在这工作条件下，电动机能保证安全运转。额定工作状态决定于下列的各电气和机械量值：

1) 额定功率 P_H —表示电动机轴上输出的有用功率, 单位为“瓦”或“瓩”;

2) 额定电压 U_H —额定工作时电动机的端电压, 单位为“伏”;

3) 额定电流 I_H —额定工作时电动机的输入电流, 单位为“安”;

4) 额定功率因数 $\cos \phi_H$ —额定工作时功率对电压和电流乘积的比值;

5) 额定效率—额定工作时输出功率对输入功率的比值;

直流电机: $\eta_H = P_H / U_H \cdot I_H$ (1)

三相交流电机: $\eta_H = P_H / \sqrt{3} U_H I_H \cos \phi_H$ (2)

6) 额定转速 n_H —额定工作时电动机每分钟的转数;

7) 额定转矩 M_H —对应于额定功率和额定转速下, 电动机产生的旋转力矩, 单位为“公斤公尺”;

$$M_H = 975 P_H / n_H \quad (3)$$

式中: P_H 的单位为瓩。

上列各额定值都注明于电动机的名牌中。

表示某两个变量之间的相互关系, 叫做电动机的工作特性。最主要的是转速和转矩之间的关系, 即 $n = f(M)$, 叫做机械特性。

在稳定运转时, 电动机的转速和转矩是恒定的, 但在启动和制动的过渡状态中, 转速和转矩随时间而变值。为符合驱动的技术要求, 电动机必须具有适当的机械特性。

根据机械特性的不同, 电动机可分为三大类型(见图1):

1) 绝对硬特性—负载转矩变动时, 转速不变, 例如同步电动机;

2) 硬特性—负载转矩变动时, 转速微有变动, 例如直流并激电动机和交流异步电动机;

3) 软特性—负载转矩变动时, 转速变动很大, 例如直流串激电动机。

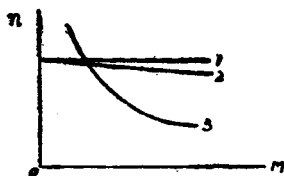


图1 电动机机械特性: 1-绝对硬特性; 2-硬特性; 3-软特性

机械特性有自然和人造的区别。自然机械特性表示电动机在正常运

轉時的 $n=f(M)$ 。所謂正常運轉，是指自變電氣參數都屬額定值；例如并激電動機的自然特性，應在額定電壓和電樞電路中沒有附加電阻時電動機的轉速和轉矩關係；異步電動機則在額定電壓和額定頻率下，以及轉子中沒有附加電阻時的轉速和轉矩關係。

如果電壓不是額定值，或電樞電路中有附加電阻，這時的 $n=f(M)$ 關係，叫做人造機械特性。

電動機作穩定運轉時，產生的旋轉力矩 M ，根據力學定律，一定確好等於軸上受到的阻力矩 M_c 。阻力矩也叫負載力矩，就是被驅動機械給電動機的反向旋轉力矩。

如果 $M_c > M$ ，電動機轉速將減低，隨着 n 降低，電樞中的應電勢 E 也就減小，電樞電流就增大，和電樞電流成正比的轉矩 M 隨着增大，當 M 增大到重新等於阻力矩時，轉速就不再降低，電動機再度在這新的轉速下穩定運轉。

反之，如果 $M_c < M$ ，轉速將增大，應電勢 E 增大，電樞電流減小， M 也就減少，直到重新等於 M_c 時，電動機又穩定運轉。

顯然，電動機由降低轉速而增大轉矩是有一定限度的。每只電動機有它的某一最大轉矩，如果電動機軸上受到的阻力矩，超過此最大轉矩，電機就得停轉或不能啟動。

§ 2 直流并激電動機的機械特性和運用

(1) 機械特性 并激電動機的機械特性是一條直線（圖26）。

并激電動機的接綫圖如圖2a所示。

在電工學中，已知電動機產生的旋轉力矩為，

$$M = C_M \Phi I_a, \text{ 公斤公尺} \quad (4)$$

式中： I_a = 電樞電流，安；

Φ = 每極磁通，馬；

$C_M = P N \cdot 10^{-8} / 9.81 \cdot 2\pi a$ —— 力矩常數；

P = 極對數；

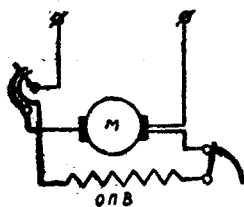


圖2a 并激电动机接线圖

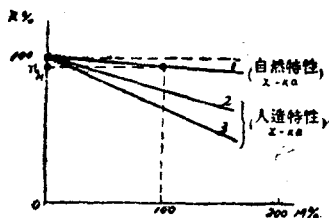


圖2b 并激电动机的机械特性

N = 电枢繞組中有效导体数;

a = 电枢繞組的并联支路对数。

当电枢旋轉时，电枢繞組中产生的应电势为，

$$E = C_e \phi n, \text{ 伏} \quad (5)$$

式中: $C_e = PN \cdot 10^{-8} / 60a$ —— 应电势常数。

在电动机中，此应电势和电枢电流 I_a 的方向相反，根据电势平衡律得，

$$U - E = I_a R_a, \text{ 或 } I_a = (U - E) / R_a, \text{ 安} \quad (6)$$

式中: R_a = 电枢电阻，欧。

將(4)和(5)式得出的 I_a 和 E 值代入(6)式中，可得，

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e \phi} I_a = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \phi^2} M \\ &= \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C \phi^2} M \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $C = C_e C_M$ = 常数。

式(7)表示并激电动机自然特性的方程式, $n = f(I_a)$, 或 $n = f(M)$ 。在有换向极的电机中, 当正常運轉时, 可認為 ϕ 和 R_a 都不变, 就是說, 忽略电枢反应对 ϕ 的影响和温度对 R_a 的影响时不致引起很大誤差, 所以

公式(7)代表一條直線，見圖26中的直線1。

在式(7)中， $R_A/C\phi^2$ 表示直線的斜率，叫做軟性系數； $M=C_M\phi U/R_A = M_K$ 是直線和橫軸的交點，表示 $n=0$ 時的力矩，叫做堵轉力矩；注意此時電樞電流 I_A 達最大值； $n=U/C_e\phi=n_0$ 是直線和縱軸的交點，表示 $M=0$ 時，或 $I_A=0$ 時的轉速，叫做臨界轉速；注意這是一個理想的空載轉速，實際上，電動機空載時還需要克服軸上的摩擦和風阻等損耗力矩， I_A 和 M 並不等於零； $MR_A/C\phi^2$ 是電動機在某力矩 M 和某一電樞電阻 R_A 時的轉速降。

如果電樞電路中具有附加電阻 R'_A ，則公式(7)變成，

$$n = U/C_e\phi + \frac{R_A + R'_A}{C\phi^2} M \quad (8)$$

上式表示並激電動機的人造機械特性。 R'_A 值愈大，直線的斜率愈大，即機械特性變得愈軟，見圖26中直線2和3。

電動機的自然機械特性，決定於臨界轉速和堵轉力矩。這兩個量值可根據名牌上的額定值 U_H 、 I_H 、 M_H 和 η_H 求出。

a) 計算 n_0 值：

$$\text{因} \quad E_H = U_H - I_{AH}R_A = C_e n_H \phi_H \quad (9)$$

$$\text{理想空載時} \quad E_0 = U_H = C_e n_0 \phi_0 \quad (10)$$

將(10)式除以(9)式，得，

$$n_0 = \frac{U_H}{U_H - I_{AH}R_A} \cdot \frac{\phi_H}{\phi_0} \cdot n_H \quad (11)$$

如果忽略電樞反應的影響，可假定 $\phi_0 = \phi_H$ ，公式(11)簡化為，

$$n_0 = \frac{U_H n_H}{U_H - I_{AH}R_A} \quad (12)$$

式(12)中右邊各量值除 R_A 外，都可從電動機名牌中直接讀出， R_A 值應該用測量法測定，但也可近似地計算出來。

假設電動機的電樞銅損耗等於全部損耗的一半，那麼，

$$I_{AH}^2 R_A = 0.5 (1 - \eta_H) U_H I_{AH},$$

$$\text{或} R_A = 0.5 (1 - \eta_H) U_H / I_{AH} \quad (13)$$

式中: η_H = 电动机額定負載下的效率, 可从名牌上查出。

6) 計算 M_K 值:

因

$$C_e \phi = U_H - I_{яH} R_{я} / n_H$$

$$C_e = PN \cdot 10^{-8} / 60a; \quad C_m = PN \cdot 10^{-8} / 9.81 \cdot 2\pi a$$

所以

$$C_e / C_m = 2\pi \cdot 9.81 / 60 = 1.03; \quad C_m \phi = C_e \phi / 1.03$$

$$M_K = C_m \phi U_H / R_{я} = (U_H - I_{яH} R_{я}) U_H / 1.03 n_H \quad (14)$$

決定 n_0 和 M_K 后, 联接这两点所得的直綫, 就代表电动机的自然机械特性。

(2) 启动 由于电枢电流 $I_{я} = U_H - E / R_{я} = U_H - C_e \phi n / R_{я}$, 在启动瞬間, 电机尚未轉动, $n=0$, $I_{я} = U_H / R_{я}$; 又因电枢电阻 $R_{я}$ 一般都很小, 如果电动机直接加上額定电压 U_H 启动时, 电流 $I_{я}$ 就很大。

巨大的启动电流, 在电气和机械方面都有害处。例如电动机繞組的絕緣可能因过热而损坏; 巨大的冲击电流引起电压振盪, 影响隣近負載; 巨大的旋轉力矩使驅動机械搖摆等等。

启动电流一般規定不得大于 1.5~2.5 倍額定电流。

启动方法有兩種:

a) 增大电枢电阻——在电枢电路中串联一只启动变阻器, 用以限制电流。由于启动变阻器中将有很大的电能損耗, 很不經濟, 是此法的主要缺点, 但操作簡單, 仍广泛地采用。

并激电动机在启动期間的物理过程, 可用图 3 来解釋。

图中 $M_{\text{макс}}$ 表示相应于最大启动电流时电动机的轉矩, $M_{\text{мин}}$ 表示在启动期間电动机的最小轉矩, 这轉矩应大于电机軸上受到的阻力矩 M_c 。

启动时, 启动变阻器的全部电阻 R_1 接入电枢电路, R_1 的量值可由下式決定,

$$R_1 = U / I_{\text{макс}} - R_{я}$$

因 $M_{\text{макс}} > M_c$, 电动机按人造特性 1 加速启动。当轉速由零增大,

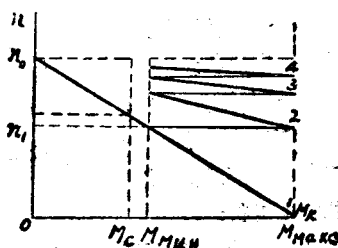


圖 3 并激电动机的启动过程

应电势 E 随之增大, I_a 减小, 转矩 M 也相应地减小。当 n 增大到 n_1 时, 如果相应的应电势和转矩分别为 E_1 和 $M_{\min}$, 割去变阻器第一段电阻, 使 R_1 改为 R_2 , 并使,

$$R_2 = U - E_1 / I_{\max} - R_a$$

这时电动机过渡到人造特性2上工作, 并按此特性加速, 直到转矩 M 再度减小到 $M_{\min}$ 时, 割去变阻器第二段电阻, 电动机过渡到特性3上工作。用同样的方法进行下去, 当电机达到或接近额定转速时, 割出全部启动变阻器, 电动机最后按自然特性运转。

6) 改变端电压—利用专用发电机来供给电动机以低电压, 减小启动电流。此法比较复杂昂贵。

(3) 调速 按并激电动机的机械特性方程式,

$$n = U / C_e \phi - R_a + R'_a / C \phi^2 \cdot M$$

显然, 在 $M = \text{恒值}$ 时, 变更端电压 U , 电枢附加电阻 R'_a 或磁通 ϕ , 都可调节电动机的转速。

a) 调节端电压—此法是采用发电机—电动机体制来供给电动机以可变的端电压, 并激磁场绕组的端电压则应维持不变。发电机—电动机体制的型式很多, 现举一例来说明。

图4中各符号的意

义如下:

M —拖动发电机用的
并激电动机;

Γ —他激发电机;

$ДН$ —被调速的电动机, 即驱动机械用的
执行电动机;

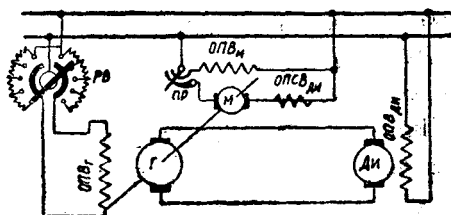


图4 发电机—电动机体制

$ПР$ —电动机 M 用的启动变阻器;

$РВ$ —发电机 Γ 用的激磁变阻器;

$ОПВ_M$ —电动机 M 的并激绕组;

$ОПВ_\Gamma$ —发电机 Γ 的他激绕组;

ОПВ_{дн}—电动机ДН的并激繞組;

ОПСВ_{дн}—ДН的串激繞組。

执行电动机的并激繞組直接接到直流供电綫上, 激磁电压不变。

調节变阻器РВ, 变更发电机的激磁电流, 从而变更电机的端电压。电压增大, 执行电动机轉速加快, 反之則变慢。

此法的优点有: 調速平滑; 机械特性的軟性系数在調速中不变; 变阻器РВ中的能量損耗很小。缺点是設備复杂; 价格昂貴; 組合机械中增多附加損耗。

6) 調节附加电阻 $R'_я$ —变更串联在电樞电路中的調速变阻器 $R'_я$ 值可变更电动机的轉速。

此法的优点是結構簡單, 調节便利。缺点是变阻器中能量損耗大; 調速中机械特性斜率增大, 工作不稳定; 調速变阻器笨重昂貴; 調速不平滑。

起重机械要求軟机械特性, 常用此法調速, 但調速范围不大, 一般为2:1。

а) 調节磁通 ϕ —調节电动机激磁电路中的变阻器, 变更激磁电流, 从而变更磁通 ϕ 和电机的轉速。

此法的优点是变阻器中能量損耗小; 激磁变阻器輕便价廉; 調速比較平滑; 能在輸出功率不变下調速。缺点是只能增大轉速; 在低速时电动机的額定容量不能利用; 高速时則过载能力减小, 换向情况恶化, 电刷容易发生火花。

注意! 应用此調速法时, 电动机必須特制的, 名牌上要規定出最小和最大轉速值, 普通电动机不允許超过120%額定轉速, 否則机械方面有危險。

(4) 制动 电气制动是电动机本身产生反向轉矩, 使轉速迅速减低。并激电动机可用三种电气制动法:

а) 电力制动—將电樞脱离电源后, 短接于制动电阻 R_M , 同时激磁繞組仍維持通电。

此时电樞电流由应电势 E 产生, 其值为,

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я} + R_M} = \frac{0 - E}{R_{я} + R_M} = -\frac{E}{R_{я} + R_M}, \text{ 安 (15)}$$

式中, $I_{\text{Я}}$ = 負值表示电机原向旋轉时, 电樞电流已反向, 产生的轉矩亦反向, 变为制动力矩。

开始制动时, 电樞轉速最大, 应电势 E 最大, $I_{\text{Я}}$ 最大, 和 $I_{\text{Я}}$ 成正比的制动力矩,

$$M_{\text{T}} = C_{\text{M}} \phi I_{\text{Я}} = C_{\text{M}} \phi E / R_{\text{Я}} + R_{\text{M}} = C_{\text{M}} C_{\phi} \phi^2 n / R_{\text{Я}} + R_{\text{M}} \quad (16)$$

也最大。

制动力矩愈大, 降速愈快。当轉速很小时, 制动电阻可全部割出, 电樞接成短路。

选用 R_{M} 时, 一方面应考虑制动时间的長短, 另外要使 $I_{\text{Я}}$ 值 不可过大以致烧坏电樞繞組。

此法缺点是制动时间較長。起重机下吊貨物时可利用此法获得額定下降速率。

6) 反饋电能制动—利用被驅动机械的动能來轉动电动机, 使后者变成发电机工作, 反饋电能到供电线路中去, 因此最为經濟。显然这时应电势 E 必須大于电樞端电压 U , 电樞电流 $I_{\text{Я}}$ 才反向。增大磁通 或 轉速可增大制动力矩。反饋法不能使电动机停轉, 因 $n=0$ 时, E 也将为零。

6) 反接制动—此法又叫反电流制动。調換电樞繞組和激磁繞組間联接, 使主磁場反向(見圖 5), 力矩反向, 当电樞未反向旋轉前, 应电势將反向, 电樞电流为,

$$I_{\text{Я}} = U + E / R_{\text{Я}}$$

就非常人。要限制 $I_{\text{Я}}$ 值, 电樞中必須串联附加电阻。因制动力矩正比于 $I_{\text{Я}}$, 附加电阻愈小, 制动就愈快。

反接制动应用于紧急时期, 即要求快速制动的場合。起重机吊下重物时, 也可用此法达到恆速下降, 但須注意, 当电机一停轉, 应立即切断电源, 否则电机將反轉。用手控制时, 要有熟練技巧, 避免在激磁繞組換接瞬間, 产生巨大的冲击电流, 造成危險。

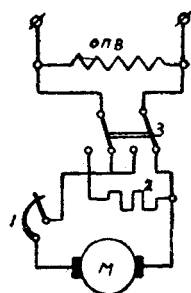


圖 5 反接制动线路圖:
1-启动电阻; 2-阻加电阻; 3-轉換开关;
OHB——并激繞組

(5) 改变转向 改变并激电动机的转向，只要改变激磁电流或电枢电流的方向。但前一法有下列缺点，一般不采用：

- a) 改变激磁使磁极反向磁化，增加操作时间。
- b) 改变激磁前，应先切断电源，增加设备复杂性。
- c) 激磁绕组在断路时可产生很大自感电势，有击穿绝缘危险。

(6) 应用范围 由于并激电动机具有硬机械特性、调速和制动容易，船舶水泵、鼓风机、变流机等都用它作驱动。

§ 3 直流串激电动机的机械特性和运用

(1) 机械特性 串激电动机具有软机械特性。接线图见图6a。

串激机在磁极未饱和时 $\phi = C'' I_A$ (17)

或 $M = C_M \phi I_A = C_M C'' I_A^2 = C' I_A^2$ ，公斤公尺 (18)

式中 C' 、 C'' = 常数。

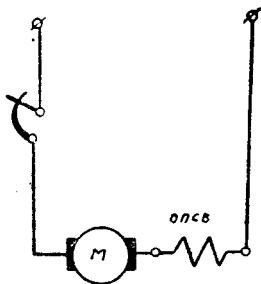


图6a 串激电动机接线图

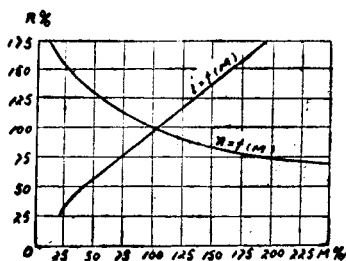


图6b 串激电动机的机械特性

和并激机相似，可导出串激电动机的自然机械特性为，

$$n = \frac{U}{C_{\phi} \phi} - \frac{R_A + R_B}{C_{\phi} \phi} I_A \quad (19)$$

或
$$n = \frac{U}{C_{\phi} \phi} - \frac{R_A + R_B}{C \phi^2} M \quad (20)$$

式中 R_B = 串激绕组的电阻。

同样，串激电动机的人造机械特性为，

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_A + R'_A + R_B}{C_e \phi} I_A \quad (21)$$

或

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_A + R'_A + R_B}{C_e \phi} M \quad (22)$$

式中 R'_A = 电枢电路中的附加电阻。

事实上，串激机都在磁饱和状态下运转，上面公式只能作理论分析用，实际计算中，应根据产品目录中数据来绘制自然特性。有了自然特性，并知各绕组的电阻后，就可作出不同附加电阻下的人造特性。

例如苏联“吉纳莫”工厂出品的 $KПД$ 型串激电动机就具有万用特性的资料。所谓万用特性是用转速或转矩对额定转速或转矩的百分率或么标值作纵坐标，和电流对额定电流的百分率或么标值作横坐标绘制成的曲线。有了万用特性（如图7），并知某一电动机的额定值后，就可求出不同转矩时的不同转速，从而绘制 $n=f(M)$ 曲线。

例：已知， $n_H = 1000$ 转/分钟；

$M_H = 29.5$ 公斤公尺；

根据万用特性，可得，

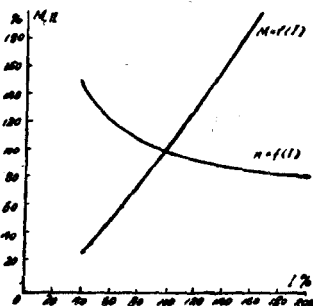


圖7 串激电动机的万用特性

$I = 80\% I_H$ 时， $n = 107.5\% n_H = 1.075 \cdot 1000 = 1075$ 转/分钟

$M = 74.5\% M_H = 0.745 \cdot 29.5 = 21.98$ 公斤公尺

同样求出其它电流值时的相应转速和转矩，因此就可绘出该电动机的 $n=f(M)$ 曲线。

为分析便利起见，将(17)和(18)式的关系代入(19)和(20)式，得

$$n = \frac{U}{C_1 I_A} - \frac{R_A + R_B}{C_1} \quad (23)$$

和

$$n = \frac{U}{C_2 \sqrt{M}} - \frac{R_A + R_B}{C_2} \quad (24)$$

式中 C_1 和 C_2 = 常数。

可見当負載增大，即 M 或 I_A 增大时， n 降低很快；当 I_A 或 M 很小时， n 就非常小，造成飞轉，发生危險。因此串激电动机不准空載启动和輕載運轉。串激机不允许用皮帶傳动。

由于串激电动机的轉矩和电樞电流平方成正比，启动轉矩比并激机大得多。

(2) 启动 和并激电动机一样，启动时，电樞电路中应串联一只变阻器。变阻器应限止启动电流不超过額定值的1.5~2.5倍。变阻器档数愈多，启动愈平滑而迅速。

(3) 調速 串激电动机也有三种調速法，即改变端电压、調节附加

电樞电阻和調节磁通，其步驟同并激机，不过調节激磁电流而变更磁通时，在串激机中，是将串激繞組并联一分流器，如图8中的 $R_{\text{ш}}$ 。 $R_{\text{ш}}$ 愈小，激磁电流和磁通愈小，轉速增大。

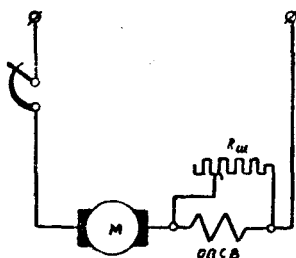


圖8 用調节激磁电流法調节串激电动机轉速

(4) 制動 串激电动机一般采用电力制動法。此法又可分为两种型式：

a) 自激制動—将电樞脱离电源，經激磁繞組短接于一电阻，由剩磁产生应电势，使环路中流通电流。如果这电流經激磁繞組时产生的磁通和剩磁同向，那么应电势将增大，电流和制動力矩随之增大。为此，在制動过程中，当电动机未反轉前，激磁繞組或电樞繞組应改变接向（图9）。

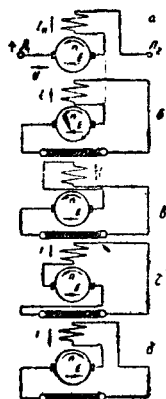


圖9 自激制動法：a-串激电动机正常運轉时情况，即开始制動前情况；б-串激磁場反向，不能得到制動；в、г-改接电樞或激磁繞組，產生制動作用；д-轉向改变，產生制動作用

他激制动——在制动期間，將串激机改为并激机，但須注意一点，由于串激繞組电阻很小，必須串联一較大电阻后才可接到电源上，否則电流將过大。

(5) 改变轉向 和并激机一样，都采用改变电樞电流方向来完成。

(6) 应用范围 起錨机和起重机等可用串激电动机，它們需要較大的启动力矩和过载能力，并要求有柔軟机械特性，而且空載时机械中的摩擦力矩已够防止电动机飞轉。

§ 4 直流复激电动机的机械特性和运用

(1) 机械特性 复激电动机有兩組激磁繞組，即并激和串激。如果兩組繞組产生同向磁通，叫做增复激；产生反向磁通，叫差复激。

当負載增大时，增复激电动机的轉速下降，差复激則上升，后者对驱动是不利的，很少采用，因此我們只討論增复激机。

复激机的接綫图見图10a，机械特性見图10b。

复激机的机械特性用下列公式表示，

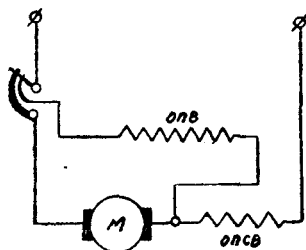


圖10a 复激电动机接綫圖

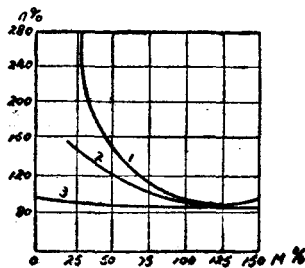


圖10b 复激电动机的机械特性：

1 - 串激机机械特性； 2 - 复激机机械特性； 3 - 并激机机械特性

$$n = \frac{U}{C_{\phi} \phi_1} - \frac{R_A + R'_A + R_B}{C_{\phi} \phi_1} I_A \quad (25)$$

$$n = \frac{U}{C_{\phi} \phi_1} - \frac{R_A + R + R'_A}{C_{\phi}^2 \phi_1^2} M \quad (26)$$

式中 ϕ_1 = 兩組激磁繞組產生的合成磁通;

R_B = 串激繞組的電阻。

當附加電阻 $R_A' = 0$ 時，上式代表自然特性。實際繪制時可利用萬用特性。

由於有并激磁通存在，復激機空載時有一定的臨界轉速，不致飛轉，因此可以輕載啟動或運轉。

根據并激和串激磁勢比值不同，復激機的機械特性分別接近于并激或串激。一般較串激要硬些，較并激則軟些。

(2) 調速、制動 改變轉向 和并激機用的方法相同。

(3) 應用範圍 船舶水泵、絞盤、絞車、舵機等常採用復激電動機來驅動。

§ 5 交流電動機的機械特性和運用

船舶電力驅動中使用的交流電動機主要是三相異步電動機。異步機的轉子轉速，以轉差率表示，

$$S = n_0 - n / n_0 \quad (27)$$

式中： n_0 = 旋轉磁場轉速，叫做同步轉速；

n = 轉子轉速。

當 $S = 0$ 時，轉子和旋轉磁場間無相對轉速，轉子中不產生感應電勢，轉子電流和旋轉力矩都為零。轉子制動時，則 $S = 1$ 。

同步轉速 n_0 用下式決定，

$$n_0 = 60f / p \quad (28)$$

式中： f = 定子電流的頻率；

p = 極對數。

(1) 機械特性 在電工學中，證明三相異步電動機的轉矩和轉差率關係為，

$$M = \frac{C}{\gamma_2'} \cdot \frac{S}{1 + S^2 \left(\frac{x_2' + x_1}{\gamma_2'} \right)^2} \quad (29)$$

式中： $C = mU^2 / 9.81\omega_0$ = 常數；