

電業工人
學習文選

15



舒 正 芳編著

电动机 的轉速控制

電力工業出版社

2000

2000



2000

电动机 的调速控制

2000

內 容 提 要

本書着重地說明了直流并激电动机、直流串激电动机、直流复激电动机以及交流感应电动机的各种控制轉速方法。并介紹了电动机轉速調整的一般常識。

本書可供使用电动机的技工同志們在进行控制电动机轉速时参考和学习用。

电动机的轉速控制

舒 正 芳編著

*

784D291

电力工業出版社出版(北京复兴門外教場路)

北京市書刊出版業營業許可證出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

*

787 × 1092 1/32 开本 * 1 1/4 印張 * 30 千字

1958年4月北京第1版

1958年4月北京第1次印刷(0001—9,100册)

統一書号: T15036·79 A 定价(第9类)0.17元.

目 录

第一章 电动机轉速調整的一般常識	2
第二章 直流并激电动机的轉速控制	10
第一节 改变电动机的电源电压	11
第二节 改变电动机的磁場	15
第三节 电动机电樞串联外电阻	18
第四节 电动机电樞并联电阻	21
第三章 直流串激电动机的轉速控制	25
第一节 改变电动机的电源电压	26
第二节 串联外电阻	28
第三节 磁場并联电阻	30
第四节 电樞并联电阻	32
第四章 直流复激电动机的轉速控制	34
第五章 交流感应电动机的轉速控制	35
第一节 改变供电的頻率	36
第二节 改变电动机的極数	37
第三节 繞綫式感应电动机轉子中接入变速电阻	41

第一章 电动机轉速調整的一般常識

随着生产的不断发展，对生产设备进行轉速控制已經越来越重要了。因为提高产品质量，增加产量，轉速的控制是担负着很重要的职责的。

譬如，金属切削机床的速度，必需随被加工物的材料、尺寸、切削工具的性质等等进行調速。如在旋床上車制一根圓軸，假使轉速不能随着被切削軸徑的变細而提高，切削速度也將随着减小，因而将会浪费大量的加工时间，降低产量。表1是表示旋床在各种調速范围(調速范围是指最大轉速与最小轉速之比)时的試驗結果。

表 1

調速范围	1	2	3	4	5	6	∞
节省时间%	0	37.5	44.5	46.9	48.0	48.6	50
产量增加%	0	60	80	88.2	92.3	94.6	100

由此可見：加大調速范围就会縮短加工时间，增加产量。如果提高龙门刨床的回程的速度，也可以得到上述效果。

起重设备在停車之前降低速度，可以使車停在准确的位置，同样也可以利用速度的降低使被吊的工作物作輕微移动，这一性能在某些运转场合是十分必要的。

轧鋼机中的合适的轉速对于增加产量和提高質量有很重

要的作用。当轉速过低时，就会使被加工的金屬冷却加快，能量損耗增加，因而減少产量；当轉速过高时，就会使被加工的金屬来不及填滿滾槽，因而产品质量低劣，有时甚至出廢品，所以軋鋼机对于被加工物的断面应有合适的轉速。

轉速的調整可以采用机械的方法，如利用变速箱調換牙輪或皮帶輪来进行。但是現在大都是采用調整電動机的轉速来满足生产过程的要求的。它有下列优点：

1. 利用机械方法調整速度时，只能得到有阶段的速度調整，一般前后級速度都采用大于 1.12 的調速比；而電動机的調整速度則可以在很小的範圍内进行。例如前后級速度采用 1.12、1.06……的速度比，有时甚至可以得到非常平滑的調速，因为平滑的調速对于金屬切削机床的生产效率和運轉的經濟程度有很大关系。

2. 利用电动机进行調速时，可以使机床結構大为簡化，因而降低了机床的重量和成本。例如要使旋床的主軸得到 18 个不同的轉速，应用不調速的电动机时，变速箱中需要 9 对牙輪；应用双速感应电动机时，变速箱中只需要 7 对牙輪；应用可以广泛調速的直流电动机时，則变速箱中只需要 4 对牙輪。除此之外，由于机床結構簡化，它还可以使机床的設计、制造、維護和修理变得簡單、便利。

3. 由于电动机的調速可以采用自动化綫路进行远距离控制，因而操作方便，动作正确，同时还能縮短調速時間，提高劳动生产率，降低产品成本。

4. 可以配合机械的調速进行混合調速来满足生产上所需要的調速範圍和調速級数的要求。

電動机的調速範圍通常比机械調速的範圍小很多。在机

械調速的每級速度之間，利用電動機的整個調速級數，可以得到很多的速度級數。例如某旋床的主軸採用混合調速，其中機械調速是4級，電動機調速是19級，在機械調速的每級速度之間都利用電動機整個調速級數，因此可以得到 $4 \times 19 = 76$ 級速度，這就大大地增加了旋床的速度級數。

由於速度級數的增加，在同一調速範圍時，它的前後級速度差值就較小，因而調速的平滑性就較好。當在同一調速平滑性時，則速度級數越多，調速範圍也就越大。這些優點促使了電動機的調速越來越佔有重要的地位。但是在考慮電動機的調速時，必需注意：“除了滿足所要求的速度外，還應該滿足被驅動機械工作特性上的要求”。這些要求有：

1. 在改變速度過程中應該平穩，否則將會嚴重地影響加工的质量和机床的壽命。

2. 轉速的調整範圍應該滿足要求。所謂轉速的調整範圍是指最大轉速與最小轉速之比。例如某机床的電動機最大轉速為1000轉/分，最小轉速為250轉/分，那麼它的調速範圍是 $1000:250=4:1$ 。

不同的工作機需要不同的調速範圍：金屬切削机床調速範圍在 $(4-40):1$ ；万能机床的調速範圍可能更高。某些冶金用的軋鋼機調速範圍是 $(100-120):1$ 。

3. 滿足所需要的調速平滑性，因為調速的平滑性對提高產品的質量有決定性的作用。調速平滑性是指電動機轉速在調整階段中兩個鄰近轉速的比由一個轉速調整到最近的轉速，變速越小，平滑性就越高。

在實際使用的電動機中，雙速鼠籠型電動機的調速平滑性最差。例如1500/750轉/分的雙速鼠籠型電動機的調速平

滑性为:

$$\frac{1500}{750} = 2:1.$$

而 1500/1000/750/500 轉/分的四速鼠籠型電動機的調速平滑性分別为:

$$\frac{1500}{1000} = 1.5:1; \quad \frac{1000}{750} = 1.335:1; \quad \frac{750}{500} = 1.5:1.$$

因而四速鼠籠型電動機的平滑性較雙速鼠籠型電動機好。

利用改变直流電動機的磁場或者电源电压, 可以得到很高的平滑性能。如果將調速磁場變阻器制成很多級, 可以得到从一个轉速变到附近的另一个轉速, 变速非常小; 或者可以得到非常平滑的变速(即平滑性接近于 1)。

4. 調速方法的选择还决定于把轉速提高到額定轉速之上或降低到額定轉速之下, 从以后各种調速方法的說明中可以知道, 有許多方法只能使電動機的轉速升高。例如改变直流電動機的磁場强度。有些方法只能在降低電動機的轉速場合下才能采用, 如在直流電動機的电樞中加入外电阻或者在繞綫式電動機的轉子中接入电阻等。

5. 調速方法的选择还应该考虑到运行的經濟程度。由于各种不同的調速方法所造成的能量損失是不同的, 有的很大, 例如直流電動機的电樞接入外电阻或者在繞綫式電動機的轉子中接入电阻等; 有的很小, 例如改变直流電動機的磁場强度。

这些不同的能量損失决定了它使用于不同的場合, 在間断工作制的地方, 例如起重設備等就允許采用能量損失較大的調速方法, 因为能量損失運轉的时间很短, 对于整个運轉

時間內所佔的能量比重不大；相反的在長期調速的場合下，應該盡量避免採用能量損失大的調速方法。

6. 在調速範圍內，電動機的速度與轉矩的關係應該滿足負載的要求，這一點是很基本的。

電動機在作穩定狀態運轉時，它必需產生與負載相等的轉矩，來保證穩定狀態不被破壞。

電動機的容量是用功率來表示的，即用在單位時間內作功的大小來表示。當電動機產生的轉矩為 M 公斤·公尺，轉速為 n 轉/分時，電動機所輸出的功率 P (瓩) 可用下式來表示：

$$M = 975 \cdot \frac{P}{n} \text{ 公斤·公尺} \quad (1)$$

例如，知道轉矩 M 、轉速 n 時，就可從 (1) 式中算出所需的功率 P 。當知道功率 P 、轉速 n 時，就可從 (1) 式中算出電動機所產生的轉矩 M 是多少。

明確了轉矩與功率間的關係後，我們進一步來認識，在不同的轉速下，被驅動機械所需要的轉矩與功率因裝置不同而不同，通常可分為下列四種：

(1) 轉矩一定而所需功率是可變的。這一類裝置有運輸裝置（如運輸帶、輓道等），不反向和反向的軋鋼機以及許多旋轉運動的金屬切削機床，起重機等。

這類負載的特性是：不管電動機的速度如何改變，負載（也就是被驅動機械）所要求的轉矩是不變的。由 (1) 式得：

$$P = \frac{M \cdot n}{975}$$

上式中 M 不變，當轉速 n 改變時，所需的功率跟着成正比例變化；轉速昇高，所需的功率隨着提高；反之當轉速降低時，所需的功率也跟着減少。例如起重機所需要的轉

矩，等于起重机掛鈎上的重物和起重鼓輪半徑的乘积，它不随轉速改变。当轉速升高 1 倍时，所需功率也要加大 1 倍；反之当轉速降为原来的 $\frac{1}{2}$ 时，所需的功率也只要原来的 $\frac{1}{2}$ 。

从原則上來說，如选择足够容量的电动机，就可以适应各种轉速下工作机械的要求，但是它在運轉时的济經性能大大的降低了。在某些情况下，电动机是在極輕的負載下運轉，电动机的效率也大大降低。对于交流感应电动机來說，还使功率因数迅速下降。現在試以 ΓAM-114-8 型 60 瓩，720 轉/分，380 伏的三相交流感应电动机为例，在各种不同負載下的电动机的功率因数与效率如表 2。

表 2'

負 載 (以額定負載为准)	功率因数	效率, %
$\frac{1}{4}$	0.52	86.5
$\frac{1}{2}$	0.72	90.0
$\frac{3}{4}$	0.81	91.0
1	0.84	90.5
$1 - \frac{1}{4}$	0.85	89.5

由表 2 中可知：当負

載为額定值 $\frac{1}{4}$ 时，功率因

数只有額定值的 $\frac{0.52}{0.84} =$

61.8%；效率为額定值的

$\frac{86.5}{90.5} = 95.5\%$ 。

为了要得到济經的運轉性能，應該使电动机在各种不同的轉速下都通过額定电流，也就是說电动

机在各种不同的轉速下都保持滿載，所以这类負載應該保持磁場不变，而利用改变电动机主回路中的电阻或者电压来进行調速。如果磁場不变，而要得到不因轉速的改变而变动轉矩，那就需要保持一定的电樞电流（因为轉矩是由磁場与电

極電流的乘積所決定的)，所以電動機在各種轉速下，不會發生輕載運轉的情況。

(2) 功率一定而所需轉矩是可變的。這一類負載最常見的有金屬切削機床。例如當旋床工作和吃刀量深時，所容許的切削速度應該越低，因為吃刀量越深，電動機所需的轉矩就越大，要保持一定功率那只有降低速度。

這類負載適宜採用改變磁場的調速方法，以保證電動機的電流不變。

(3) 混合情況。這一類負載有龍門鉋床等。它所需的轉矩、功率與轉速的關係是上面兩種情況的混合運用。如果轉速在額定轉速以下時，它所需要的轉矩一定，而功率可以變；如果轉速在額定轉速以上時，它所需要的功率一定，而轉矩可以變。

用於上述負載的電動機，當要求在額定轉速以下運轉時，通常採用改變電源電壓的方法來實現。為了保證一定的轉矩，電動機是在額定電流下工作的；當要求在額定轉速以上運轉時，通常採用改變磁場的方法來調速。為了保持所需的功率，電動機也通過額定電流。所以在各種轉速下，電動機都是在滿載情況下工作，並能達到經濟運轉的要求。

(4) 所需的轉矩與轉速的平方成正比，功率與轉速的三次方成正比。這一類負載有通風機和離心水泵等。它的轉矩隨着轉速的昇高而增加。這類負載的電動機只有在最大轉速時是滿載運轉，在其他各種低速下，都不是滿載運轉。

7. 應根據工作要求選用適宜的電動機

電動機的類別很多，有各種交流電動機和直流電動機。因此必須根據工作要求來選用適宜的電動機，這樣才能使被

采用的电动机的固有特性满足运转要求。例如，不需调速的电动机，如水泵、空气压缩机、通风机、鼓风机以及球磨机等，可以选用三相感应电动机。容量在 150—200 瓩或者 200 瓩以上的电动机，如果需要较好的系统功率因数时，则可采用同期电动机。

在起动设备中如所需要的调速范围不大时，多采用交流感应电动机，但为了使转速满足负载变化时的要求，使吊重活时电动机的速度慢，吊轻活时电动机的速度快，来达到保证安全的作用，通常可以采用直流串激电动机。

对于需要经常调速，调速范围又是很大的重型金属切削机床，大多采用并激或复激直流电动机和多速交流感应电动机。

但是必需指出：电动机的固有特性与转速调整是有区别的。后者是指采用人工方法（或附属设备）来使电动机变速；固有特性是不用人工方法，电动机本身所具有的转速与转矩间的关系。根据转速随转矩变动的程度不同，分为：

（1）超硬特性——当转矩改变时，转速始终保持不变。如同期电动机。

（2）硬特性——转矩增加时，转速降低很小。如直流并激电动机、某些整流子交流电动机，在临界转差率以前运转的感应电动机等。

（3）软特性——转矩增加时，转速降低较大。如直流串激电动机，在电枢内串入大电阻的直流并激电动机以及在转子内接入大电阻运转的交流感应电动机等。

（4）上升特性——转矩增加时，转速反而上升。如具有强烈电枢反应的直流并激电动机，直流差复激电动机等。它

在实用上用得非常少。

第二章 直流并激电动机的转速控制

直流并激电动机的原理接线，如图 1 所示。如果忽略电

枢反应等不必要的部分（在实用上完全许可这种忽略），那么我们从原理图中可以得到直流并激电动机的基本公式：

$$U = E + IR_a \text{ 伏。} \quad (2)$$

式中 U = 电源电压(伏)，

E = 电动机感应电势(伏)，

I = 电动机电枢电流(安)，

R_a = 电动机电枢电阻(欧)。

图 1 直流并激电动机原理接线图

U —电源电压； I —电枢电流；

R_a —电枢。

这公式是根据克希可夫定律推演出来的。外供的电源电压用来克服电动机的感应电势和电枢回路中的电压降。电动机的感应电势的产生是由于电动机转动后，电枢导线切割磁力线而感应出一个电势来。它的方向与电源电压的方向相反，所以又称反电势。感应电势的大小可用下式来表示：

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot n \text{ 伏。} \quad (3)$$

式中 K_e = 比例常数，

Φ = 磁力线数，

n = 电动机的转速。

公式(3)中已明显地指出：感应电势与磁力线数、电动机转速成正比。这是很容易理解的，因为磁力线数越多，或

者轉速越大，切割磁力綫的数量就加多，因此所产生的电势也就加大。这是电磁感应的基本定律。

將(3)式代入(2)式，整理后可以得到：

$$n = \frac{U - I R_a}{K_e \Phi} \quad (4)$$

上式是說明直流并激电动机轉速与电源电压、电樞电阻、电樞电流以及磁力綫数之間的关系。要控制它的轉速，只要改变它們之間任何一种关系就可以了。現在分別說明如下：

第一节 改变电动机的电源电压

根据公式(4)可知，当电动机的磁場和电樞电阻不变时，电动机的轉速將随电源电压来改变。如以 n' 、 U' 和 I' 分别表示改变电源电压后的相应轉速、电源电压以及电樞电流，那么它仍应满足(4)式的关系，即：

$$n' = \frac{U' - I' R_a}{K_e \Phi}$$

將上式与(4)式相除，可以得到：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U' - I' R_a}{U - I R_a} \quad (5)$$

假如电樞的电压降部分較电源电压为很小时，(5)式可以简化为：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U'}{U} \quad (6)$$

从此可以看出轉速与电压成正比的关系。如果要把轉速降低，只要降低电源电压就可以。

現在举一个例子來說明电源电压改变时，电动机轉速改变的計算方法。

例1. 某 18 瓩的直流并激电动机，额定电压为 220 伏，电枢电流为 94 安，额定转速为 1000 转/分，电枢电阻 $R_a = 0.15$ 欧，问在额定电枢电流时电源电压改变为 110 伏，转速是多少？

解：将题中各值代入(5)式中，可得：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U' - I' R_a}{U - I R_a} = \frac{110 - 94 \times 0.15}{220 - 94 \times 0.15} = 0.465,$$

$$\therefore n' = 0.465 \times n = 0.465 \times 1000 = 465 \text{ 转/分}.$$

如果忽略电枢电压降部分，利用(6)式可得：

$$\frac{n'}{n} = \frac{U'}{U} = \frac{110}{220} = 0.5,$$

$$\therefore n' = 0.5 \times n = 0.5 \times 1000 = 500 \text{ 转/分}.$$

它的误差为
$$\frac{500 - 465}{465} = 7.52\%.$$

这一误差值在要求不高的情况下是允许的。

上述例子中假定电动机转速改变前后，电枢电流都是额定值没有改变。如果当电动机转速改变后，有不同的电枢电流时，仍旧可以利用上面的公式，但是应该分别将相应的电枢电流代入。

这种调速方法适用于负载转矩一定的场合，因为电动机的磁场没有改变，在各种不同的转速下要得到一定的转矩，电动机就必须通过不变的电枢电流，因而电动机在所有转速下都是满载运转的，所以它是比较经济的。

改变电动机的电源来进行调速时，通常都是改变电动机的转速使其在额定转速以下运转。要使电动机在额定转速以上运转时，就需要将电源电压增大到电动机的额定电压以上，但是根据电动机的换向性能和绝缘程度来看，除个别情况外，是不允许这样做的。

利用降低电源电压的办法来降低电动机的转速是有一定

范围的，因为电源电压的最低值是由发电机的剩磁所限制的，所以把通过磁场绕圈的电流降低得很小，但有剩磁存在，发电机的电压不可能作相应的降低。把发电机的电压降得太低，当电动机通过满载电枢电流，以致电枢回路的电压降与发电机电压相比较已佔很大比重时，如果负载稍有变更，电枢回路电压降的变化就会引起电动机的转速作大量的变动，因而严重的损害了运转的稳定性。

要改变电动机的电源电压，只有在电动机具有单独的电源时才有可能。电动机的电源电压可由单独的发电机供电。发电机的电压能在很大范围内进行调整，因此使电动机的调速范围很大，一般为(6—8):1。

它的原理接线如图2。由图可知，利用交流感应电动机

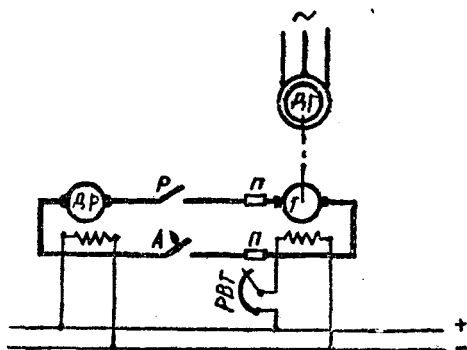


图2 发电机—电动机制

II—保险丝；P—刀开关；A—过电流自动开关；PBT—发电机的磁场变阻器；AT—交流感应电动机；Г—直流发电机；AP—直流电动机。

AT来拖动直流发电机Г，直流发电机的电压可以借改变它的磁场变阻器PBT来进行调整。当发电机的电压改变以后，外供给电动机的电源电压随着改变，电动机的转速也就跟着

改变。这种控制的方法称为發電机-电动机制。

發電机-电动机制只应用于需要在寬闊範圍内进行平滑調速的驅動裝置上。重型机床的主驅動裝置如大型軋鋼机、鉋床、龍門鉋床等，通常采用这种控制方法。

上述控制方法的主要优点有：

1. 电动机起動时，只需將發電机的磁場調整到最弱，就可以使發電机發出的电压很低，电动机在降压下起動，因而节省了起動电阻的設備（而起動电阻必須通过電樞电流，所以十分笨重）。

2. 改变电动机的轉动方向只需改变發電机磁場繞圈的極性就可以，这时發電机和电动机的电压極性就跟着改变过来，电动机的轉动方向也就改变。这种控制方法非常方便，因为它是在磁場回路中进行操作的，同时磁場回路通过的电流也很小，所以控制設備很輕便。

3. 利用降低电源电压使电动机轉速变低以后，它的轉速不会因轉矩的变动而有很大改变。

4. 电动机的磁場不变，它的額定轉矩也不变，所以在改变电源电压的調速範圍内，可以充分利用电动机。但是应该注意，單靠电动机本身裝設的冷却風扇来进行冷却的电动机，当轉速降低以后，冷却情况就会跟着变坏，所以电动机的負載應該适当減少，或者另加一强迫通風冷却設備。

5. 特別适用于許多电动机需要同时調速和調速範圍又很广的場合。

采用这种方法来控制轉速的主要缺点是因为它需要另加一組电动發電机来滿足改变电源电压的要求，所以成本很高。

公式(4)中沒有考虑發電机的內电阻，如需正确計算，电