

第 1 章

电力拖动基础

1.1 电力拖动系统运行的基本概念

电动机在电力拖动系统中作为原动机驱动生产机械工作。最简单的电力拖动系统是电动机与生产机械直接联轴，如通风机、离心泵等机械，称为单轴电力拖动系统；而在更多的场合中，电动机是经传动机构与生产机械相连的，如起货机等，称为多轴系统。生产机械所拖动的负载也有旋转、直线和往复等不同的运动形式。无论系统为单轴还是多轴、负载的运动形式为直线或旋转，为了分析的方便，通常都把实际多轴传动的拖动系统通过折算的方法等效成单轴系统，对于电动机而言，负载最终是以阻转矩的形式作用于电动机转轴上的，这一阻转矩称为负载转矩。

电力拖动系统有两种运行状态：一是相对稳定状态，此时电动机以恒速旋转或静止不动；二是过渡状态，如电动机启动、制动及转向改变时的转速处于加速或减速的显著变动状态。决定这两种运行状态的因素是电动机的电磁转矩 T 和加于电动机轴上的负载转矩 T_L 。因此，分析、研究电力拖动系统运行状态的主要依据是：1) 电动机的机械特性 $n=f(T)$ ，即电动机的转速随电磁转矩变化的规律；2) 生产机械的负载转矩特性 $n=f(T_L)$ ，即生产机械的转速与负载转矩之间的关系。

1.1.1 生产机械的负载转矩特性

电动机拖动生产机械运行时，它所产生的电磁转矩 T 必须克服生产机械加在它的轴上的负载转矩 T_L 。生产机械作用在电动机轴上的负载转矩就其性质（转矩方向）而言，可分为反抗性负载转矩和位能性负载转矩。

反抗性负载转矩的特点是，不论电动机是正转还是反转，它总是起着阻碍电动机旋转的作用。当电动机改变旋转方向时，反抗性负载转矩的方向也随之改变。各类泵、通风机等均属于这一类。

位能性负载转矩的特点是，负载转矩总是保持一个固定的作用方向，而与电动机旋转方向的改变无关。因此，当电动机以正方向旋转时，它起着阻碍电动机运动的作用，而当电动机反方向旋转时，则推动电动机转动。起货机、起锚机等属于这一类负载。

当生产机械的转速变化时，它加在电动机轴上的负载转矩的大小也会按一定规律变化，即 $n=f(T_L)$ 或 $T_L=f(n)$ 。船舶生产机械的负载转矩一般可分为以下三种主要类型。

1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性中，负载转矩与转速无关。即

$$T_L = \text{定值}$$

恒转矩负载特性具有反抗性，例如机床的平移机构；也有位能性的，如起货机械等，其负载特性曲线如图 1-1 所示。

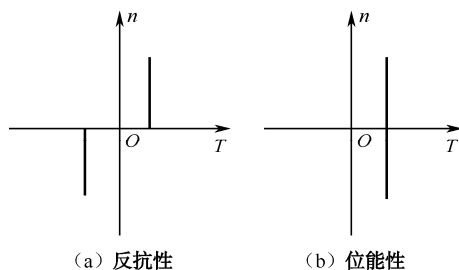


图 1-1 恒转矩负载特性曲线

2. 通风机负载特性

通风机类型的负载转矩大致与转速的二次方成正比，即

$$T_L = kn^2$$

式中， k 为比例系数，它的特性曲线是一抛物线。通风机负载特性一般都是反抗性的，如图 1-2 所示，其第 3 象限内的曲线（反转时）与第 1 象限的曲线是对称的。船舶上的通风机、离心泵、螺旋桨等生产机械都具有这类特性。

3. 恒功率负载特性

恒功率负载特性的负载转矩与其角速度的乘积基本保持不变，即

$$T_L n = \text{定值}$$

或

$$T_L = \frac{k}{n}$$

式中， k 为比例系数，其特性曲线是一双曲线，如图 1-3 所示。工程救捞拖轮上的“自动收缆机”具有这种特性。收缆时，缆绳的张力与线速度的乘积基本保持不变。

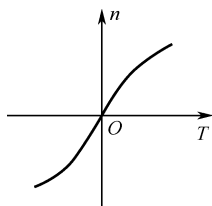


图 1-2 通风机负载特性

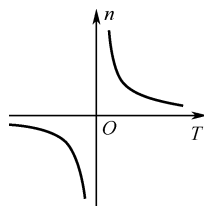


图 1-3 恒功率负载特性

1.1.2 电动机的工作状态及电力拖动系统运行方程式

1. 电动机的工作状态

电动机的运行状态根据其电磁转矩与转速方向的关系，分为电动运行和制动运行状态。电动机的电磁转矩方向与转速方向相同时，电磁转矩为克服其轴上的负载转矩而驱动转轴旋转的

动力矩, 电动机为电动运行状态; 而当电动机的电磁转矩方向与转速方向相反时, 电磁转矩为阻止其轴上负载运动的阻转矩, 电动机处于制动运行状态。

就机械特性曲线而言, 当电动机处于电动运行状态时, n 与 T 同为正值或同为负值, 曲线位于 n - T 坐标平面的第 1、3 象限; 而制动运行时, n 总与 T 的方向相反, 曲线位于第 2 与第 4 象限。

对于由电动机及生产机械构成的电力拖动系统, 通常将电动机的机械特性曲线与生产机械的负载特性曲线放在同一 n - T 坐标平面上。由于生产机械与电动机同轴旋转, 当设定电动机的转速和转矩以逆时针转向为正值时, 则生产机械的负载转矩顺时针方向取正值。因此, 对于反抗性负载, 因负载转矩总与转速的方向相反, 故负载特性曲线在坐标的第 1、3 象限; 而对于位能性负载, 则特性曲线也可能出现在第 2 或第 4 象限。

2. 电力拖动系统运动方程式

根据刚体运动定律, 电力拖动系统运行的任何瞬间, 作用于电动机轴上的转矩必须保持平衡, 即

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-1)$$

式中, J 是拖动系统中折算到电动机轴上的总转动惯量, $J \frac{d\Omega}{dt}$ 是系统的转动惯量储存的动能所产生的加速转矩 (或称动态转矩); 而 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 则是以飞轮矩 GD^2 作为系统转动惯量的量度时的加速转矩的另一种表达式。若以 ΔT 简单表示加速转矩, 则电力拖动系统的运动方程式为

$$T - T_L = \Delta T \quad (1-2)$$

式中, T 及 T_L 的正负取值由它们与设定转速的正方向关系决定。即假定 n 以逆时针方向为正方向时, 则电动机的电磁转矩 T 逆时针时取正, 顺时针时取负; 而负载转矩 T_L 逆时针时取负, 顺时针时取正。加速转矩 ΔT 的正负则由 T 和 T_L 的代数和来确定。

当 $T=T_L$ 时, $\Delta T=0$ ($dn/dt=0$), 则 $n=0$ 或 n =定值, 拖动系统处于静止状态或恒速运行, 为稳定运行状态;

当 $T>T_L$ 时, $\Delta T>0$ ($dn/dt>0$), 拖动系统处于加速的过渡过程中;

当 $T<T_L$ 时, $\Delta T<0$ ($dn/dt<0$), 拖动系统处于减速的过渡过程中。

3. 电力拖动系统维持稳定运行的条件

当电力拖动系统由于受到外界干扰 (如生产机械负载的变化或电动机外加电压的波动等) 时, 系统的转速将发生变化而离开原来平衡状态。当干扰消失以后, 若系统能自动恢复到原来的工作点上, 则系统就具备维持稳定运行的条件。

图 1-4 (a) 所示的是置于同一 n - T 坐标平面上异步电动机的机械特性曲线和恒转矩负载特性曲线的配合, 即电动机带一转矩值为 T_L 的恒转矩负载运行。两条曲线有一交点 A , 在 A 点上, $T=T_L$ 。由电力拖动系统运动方程式可知, 动态转矩 $\Delta T=0$, 所以在 A 点上该系统能保持一个恒定的转速 n_1 运行, 是系统的一个静态工作点。但系统能否在 A 点维持稳定运行, 则需进一步分析。

如果拖动系统原来运行在 A 点上, 突然出现瞬时扰动, 比如电动机端电压升高, 则电动机的电磁转矩 T 瞬时增大, 故 $T>T_L$, $\Delta T>0$, 从而使系统加速, 在转速上升过程中, 电动机转矩

随之减小。到达 A' 点后，电磁转矩和负载转矩又达到新的平衡，系统以新的恒定转速 n'_1 运行。当扰动消除后， $T < T_L$ 时，转速下降，系统恢复到原来的工作点上。同理，如瞬时扰动引起转速稍有降低，当扰动消失后，则由于 $T > T_L$ ，将使转速恢复到原来的数值。因此系统在 A 点具备维持稳定运行的条件。

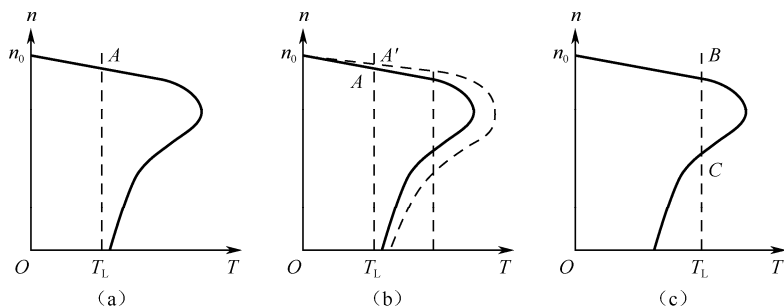


图 1-4 电力拖动系统工作点的稳定性判别

但是，两条特性曲线的交点并非都是系统的稳定工作点。图 1-4 (c) 所示为异步电动机驱动较重的恒转矩负载，此时特性曲线出现两个交点 B 和 C 。如果系统运行在 B 点上，显然它能够稳定工作（稳定性判别跟前面 A 点讨论的情况一样）。如果系统在 C 点上运行，当突然出现瞬时扰动（如端电压增大）时，电磁转矩 T 瞬时增大，使电动机加速， n 的上升导致 T 进一步增大，又使电动机进一步加速，直到 B 点为止才进入恒速运行 ($T = T_L$)。反之，如果端电压瞬时下降，导致 $T < T_L$ 时，电动机将从 C 点减速，转速的降低又使 T 下降，进一步使电动机减速，直到转速 $n=0$ 为止。所以选择在 C 点上工作，拖动系统没有自动恢复稳定运行的能力，即 C 点是系统运行的不稳定工作点。由此可见对恒转矩负载来说，异步电动机机械特性曲线在临界转差率以下部分为不稳定工作区。

以上的分析可以推广到一般情况下电力拖动系统的稳定性判别：系统在电动机机械特性曲线与负载特性曲线的交点能保持恒速运行；如果在该交点所对应的转速之上有 $T < T_L$ ，而在交点所对应的转速之下有 $T > T_L$ ，那么系统就具有恢复稳定工作的能力，该点即为稳定工作点，反之则为不稳定工作点。

1.2 三相异步电动机的启动、制动与调速

1.2.1 异步电动机的启动

电动机的启动，是指电动机接通电源后，转速由零上升到稳定转速的整个动态过程。电动机启动时的电磁转矩 T 必须大于生产机械加在电动机轴上的负载转矩 T_L ，否则电动机将无法启动，甚至可能反被生产机械的负载转矩倒拉导致反转。

电动机启动过程的时间不长，但对电动机本身和电力系统的影响却很大。特别是船舶电站的容量有限，船上有些辅机拖动系统所采用的电动机的功率接近电站发电机的单机功率，若直接启动，其启动电流将引起电网电压的很大波动，从而影响其他用电设备的正常运行。所以对启动频繁和大容量电动机的启动，必须设法缩短启动时间，减小或限制启动电流。

实际生产过程中，对异步电动机的启动有一定的要求。为了缩短启动时间、提高生产效率，

一般要求异步电动机有足够大的启动转矩，但启动转矩的加大，必然导致启动电流增大；为了保证电动机以及生产机械的安全运行和减小对电网的冲击，通常又要求限制启动电流以及启动转矩。所以电动机的启动必须根据拖动系统的具体情况统筹兼顾这两方面的因素。实际应用中异步电动机有着多种启动方法。

1. 鼠笼式三相交流异步电动机全电压直接启动

全电压直接启动就是将电动机的定子绕组经开关设备直接与三相额定电源接通。电动机直接启动具有设备简单、操作方便等优点。

图 1-5 所示为一台鼠笼式三相异步电动机带一通风机电机的特性曲线。启动时电动机的电磁转矩 $T=T_{st}$ ， $T_L=T_{Lst}$ ，根据拖动系统运动方程式，此时 $\Delta T>0$ ，拖动系统由静止开始加速启动。在加速过程中 T 的变化规律是从 a 点沿曲线①变化到 b 点， T_L 的变化规律是从 C 点沿曲线②变化到 b 点。在转速从零加速到 n_b 的过程中， T 始终大于 T_L 直到 b 点， $T=T_L$ ， $\Delta T=0$ ，启动过程结束，拖动系统以转速 n_b 稳定运行于 b 点。

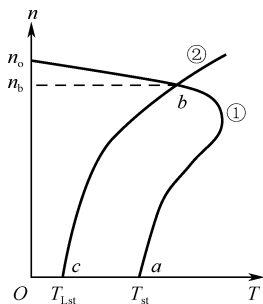


图 1-5 三相异步电动机特性曲线

在全电压直接启动时，电动机定子绕组接通电源瞬间，转子由于惯性不能立即转动，此时转子电势和电流较大，因而定子电流也较大，通常启动电流 $I_{st}=(5\sim 8)I_N$ 。由于鼠笼式异步电动机的结构简单，过载能力较强，且一般启动过程时间都较短，启动电流一般不会对电动机造成直接的损害，因此就电动机本身来说，是允许直接启动的。但另一方面，对于大容量的鼠笼式电动机直接启动，由于启动电流大和功率因数低，会引起较大的船舶电网电压降落，影响其他用电设备的正常工作。因此，从我国《钢质海船建造入级规范》（以下简称《入级规范》）所限定的电网电压降的角度来确定船舶上的鼠笼式异步电动机能否直接启动。目前的交流船舶电站容量较大，并装有性能良好的自动电压调整器，机舱中各类容量在发电机单机容量 60% 以下的鼠笼式异步电动机几乎都采用全电压直接启动。

2. 改善启动性能的特殊三相异步电动机

普通鼠笼式异步电动机虽然启动时电流很大，但启动时功率因数较低，启动转矩并不很大。异步电动机可通过采用如图 1-6 所示的双鼠笼式或如图 1-7 所示的深槽式等特殊结构的转子，以改善全电压直接启动性能。这两种类型的异步电动机特点是启动转矩大，而启动电流较小。

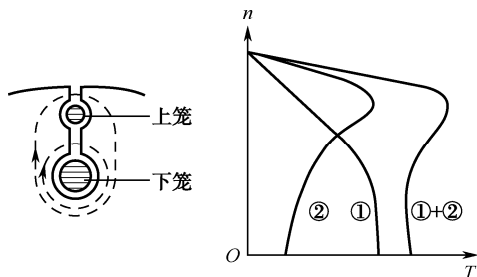


图 1-6 双鼠笼式异步电动机的转子槽形及机械特性

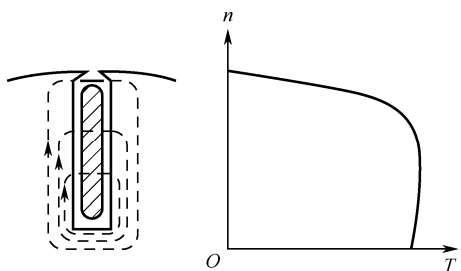


图 1-7 深槽式异步电动机的转子槽形及机械特性

双鼠笼式异步电动机的转子上有两套笼型导条，分上笼与下笼。两笼间由狭长的缝隙隔开。与下笼相较链的漏磁通（即下笼的漏抗）比上笼的大得多。上笼通常用电阻系数较大的黄铜或

铝青铜制成，且导条截面较小，故电阻较大；下笼导条截面较大，用紫铜等电阻系数较小的材料制成，故电阻较小；而深槽式转子的槽形窄而深，深槽中的导条可以看作是很多根导线并联嵌在槽内。槽漏磁的分布在槽底较密，而在槽口较疏，因此导条靠近槽底部分的漏电抗要比槽口部分的漏电抗大。启动时，转子频率较高，电流的“趋肤效应”使转子电流大部分集中在双鼠笼式的上笼，或深槽式转子的槽口部分，使得转子绕组呈现出较大的电阻值，而相比普通电动机具有较大的启动转矩；启动过程结束，电动机进入正常运行后，转子频率变得很小，电流的“趋肤效应”消失，转子绕组所呈现的电阻值与普通电动机相仿。因此，双鼠笼式和深槽式异步电动机既有转子电阻增大所带来的启动转矩增大、启动电流减小的优点，又可避免正常运行时因转子电阻增大而导致电动机的特性曲线变软。

3. 鼠笼式三相交流异步电动机的降压启动

异步电动机采用降低电源电压启动是限制启动电流的一种常用方法。船舶上通常用于大容量异步电动机的启动。异步电动机在电源电压频率以及其他参数不变的情况下，其电磁转矩与外施电压的平方成正比，所以降压启动时启动转矩大大减小，启动时间较长，它一般用在轻载启动的场合。

1) 星形—三角形 (Y- Δ) 换接降压启动

此方法适用于正常运行时电动机定子绕组为三角形连接（即定子每相绕组额定电压为电网线电压）的异步电动机，且负载为轻载或空载启动的拖动系统。启动时先将电动机的定子绕组星形连接后与电源接通，待电动机转速升高、电流减小后，再通过继电器接触器等开关装置将绕组改为三角形连接，进入正常运行。图 1-8 所示为星形—三角形两种方式连接时电压、电流的比较。

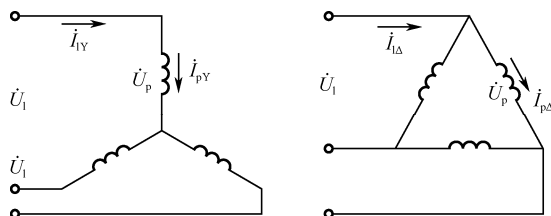


图 1-8 定子绕组 Y 形连接和 Δ 形连接时电压、电流的比较

设电源线电压为 U_1 ，电动机每相绕组的等效阻抗为 Z 。比较星形连接和三角形连接时定子每相绕组上的电压、绕组中的电流以及电动机的线电流可得：

Y 形连接降压启动时

$$\left. \begin{aligned} U_Y &= U_p = \frac{1}{\sqrt{3}} U_1 \\ I_{pY} &= \frac{U_p}{Z} = \frac{U_1}{\sqrt{3}Z} \\ I_{IV} &= I_{pY} = \frac{U_1}{\sqrt{3}Z} \end{aligned} \right\}$$

而 Δ 形连接直接启动时

$$\left. \begin{aligned} U_{\Delta} &= U_1 \\ I_{p\Delta} &= \frac{U_{\Delta}}{Z} = \frac{U_1}{Z} \\ I_{l\Delta} &= \sqrt{3}I_{p\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_1}{Z} \end{aligned} \right\}$$

由此可得

$$U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{\Delta} \quad (1-3)$$

$$I_{lY} = \frac{1}{3}I_{l\Delta} \quad (1-4)$$

因此, 采用 Y 形连接降压启动, 定子每相绕组上电压降低为 Δ 形连接直接启动时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$; 而电动机的线电流为直接启动时的 $\frac{1}{3}$ 。另一方面, 由于异步电动机的启动转矩与电源电压的平方成正比, 所以在定子绕组降压 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 的情况下启动, 电动机的启动转矩也将减小为直接启动时的 $\frac{1}{3}$ 。

2) 自耦变压器降压启动

正常运行时星形连接的大容量异步电动机, 可采用自耦变压器实现降压启动。启动时三相自耦变压器的原边绕组接电源, 而副边与电动机的定子绕组相连, 电动机在经过变压器降压的电压下启动。其降压幅度为变压器的变比 K 。若设电动机全电压直接启动时的电流 (即电网提供的线电流) 为 I_{st} , 则降压启动时电动机的启动电流为 I_{st}/K , 该电流也是变压器副边绕组中的电流; 而此时电网提供的线电流, 即变压器原边绕组中的电流为

$$I'_{st} = \frac{1}{K} \frac{I_{st}}{K} = \frac{I_{st}}{K^2} \quad (1-5)$$

由此可见, 对采用变比为 K 的自耦变压器降压启动, 启动时电网提供的电流是直接启动时的 $1/K^2$ 。同理, 由于降压启动, 启动转矩将为直接启动时的 $1/K^2$ 。实际应用中, 自耦变压器的副边绕组一般有三个不同变比的抽头 (如 $K=0.55$ 、 0.64 、 0.73 等) 以满足不同负载对不同降压幅度的启动要求。

4. 绕线式异步电动机转子串电阻启动

绕线式异步电动机转子串电阻不仅可以增大启动转矩, 同时还可以减小启动电流, 这是改善电动机启动性能的一种有效方法。启动时, 转子回路中串入三相对称电阻, 随着转速的升高, 通过继电器接触器或频敏变阻器等自动装置逐级切除外部串接电阻, 进入正常运行后应将所串电阻全部切除。

1.2.2 异步电动机的制动

当电动机在运行过程中, 若其电磁转矩的方向与转子转速的方向相反, 则为电动机的制动运行状态。对电力拖动系统而言, 此时电磁转矩成了制动转矩, 其产生的制动作用称为电气制动。与机械制动相比, 电气制动具有无机械磨损、制动平稳、容易实现自动控制等优点。电气制动可用于拖动系统减速或加速停车、起货机等位能性负载的匀速下降等场合。

从能量转换观点看,处于制动状态的电动机,其作用是将拖动系统的机械能转变为电能消耗在电动机内部或反馈至电网。

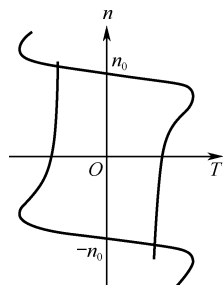


图 1-9 三相交流异步电动机运行和制动运行时的机械特性

如果把电动机的正转运行 ($n > 0, T > 0$) 和反转运行 ($n < 0, T < 0$) 时的机械特性曲线分别定义在 $n-T$ 坐标平面的第 1、3 象限,则特性曲线向 2、4 象限的延伸部分分别为电动机的正转制动运行 ($n > 0, T < 0$) 和反转制动运行 ($n < 0, T > 0$)。图 1-9 展示了三相交流异步电动机运行和制动运行时的机械特性。

电气制动根据其产生的条件和方法的不同,可分为反接制动、能耗制动和回馈制动三种。

1. 反接制动

异步电动机反接制动分为电源反接制动和倒拉反接制动两种。反接制动时,转子的转向与定子旋转磁场的转向相反,即 n 与 n_0 的符号相反,因此电动机分别运行于正转电动机特性曲线向第 4 象限的延伸段或反转电动机特性曲线向第 2 象限的延伸段。

1) 电源反接制动

当交流异步电动机运行在电动状态时 ($n < n_0, 0 < s < 1$),将电动机三相电源的任意两相对调使其相序改变,气隙旋转磁场的方向随即改变,而转子因惯性仍保持着原来的转向不变。结果使转子绕组切割气隙磁场的方向改变,从而转子中感应电势和电流的相位变反,产生的电磁转矩 T 方向亦变反,成为制动转矩。图 1-10 的曲线②是鼠笼式异步电动机的反接制动特性,曲线③为绕线式异步电动机转子串制动电阻时的反接制动特性。

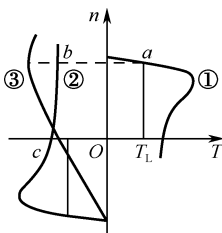


图 1-10 交流异步电动机的电源反接制动

设鼠笼式异步电动机带一负载 T_L 在 a 点上正向稳定运行。现将三相电源的任意两相对调,则电动机所运行的机械特性将由曲线①变为曲线②。由于转子的惯性作用,其转速不能突变,因此电动机将由曲线①的 a 点切换到曲线②的 b 点运行。此时电动机的电磁转矩 T 因旋转磁场的方向变反而变为负值,成为制动转矩。根据拖动系统运动方程式,此时 $T - T_L = \Delta T < 0$,电动机在 T 和 T_L 的共同作用下,沿曲线②迅速减速,直到 c 点 ($n=0$)。如果制动的目的是为了使电动机迅速反转,则到 c 点后,电动机会自行反向启动(因为在 c 点处,电磁转矩 T 不为零,而等于反向运行时的启动转矩);如果制动的目的是为了迅速停车,则在接近 c 点时,应立即切断电动机的电源,以防止电动机反向启动。

在电源反接制动时,电动机的转差率为

$$s = \frac{-n_0 - n}{-n_0} = \frac{n_0 + n}{n_0} > 1 \quad (1-6)$$

此时转子感应电势 $E_{2s} = sE_2$ 很大,因而电流转子及定子电流也很大(比启动时还大)。故对绕线式异步电动机,在电源反接制动时,必须在转子回路中串入足够大的制动电阻,以限制冲击电流,同时也起到增大制动转矩的效果。而对于大容量或频繁启动的鼠笼式异步电动机,应避免其运行于电源反接制动状态。

2) 倒拉反接制动

电动机因外力矩作用而形成转子的转向与旋转磁场的转向相反的制动运行称为倒拉反接

制动。图 1-11 为绕线式异步电动机带位能性负载的特性曲线。若电动机原来带负载正转，电动状态稳定运行于曲线①的 a 点，转子回路中串入足够大的电阻，以使电动机的特性曲线变软，其工作点由曲线①的 a 点转移到曲线②的 b 点。由于在 b 点电动机的电磁转矩小于负载转矩，转子将减速至零 (c 点)。由于此时电磁转矩仍小于负载转矩，故转子继续被负载拉着转动，从而进入倒拉反接制动。随着电动机反转速度的增大，其制动性质的电磁转矩也随之增大 (与转速方向相反)，直到 d 点时， $T=T_L$ ， $\Delta T=0$ ，系统稳定运行。如果电动机原来处于静止状态，在转子串入足够大的电阻的情况下启动，则由于其启动转矩小于位能性负载转矩 (c 点)，转子将被负载倒拉直接进入倒拉反接制动状态，最后同样稳定运行于 d 点。

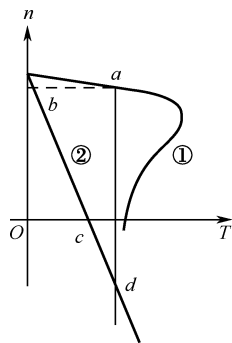


图 1-11 绕线式异步电动机的特性曲线

交流异步电动机的倒拉反接制动通常是在增大转子回路电阻的情况下才能实现，故只适用于绕线式异步电动机，船舶中应用较少。

倒拉反接制动时，电动机的转差率为

$$s = \frac{n_0 - (-n)}{n_0} = \frac{n_0 + n}{n_0} > 1 \quad (1-7)$$

由此可见，无论是电源反接制动还是倒拉反接制动，其特点是 $s > 1$ 。故电动机等效电路中附加电阻的阻值 $\frac{1-s}{s}r_2'$ 为负值，这说明异步电动机不仅从轴上吸取拖动系统的机械功率转换成电功率，同时又从电网吸取电功率，两者都消耗在转子回路的电阻中。

2. 回馈制动

当异步电动机的转子转速高于其定子旋转磁场的转速 (即 $|n| > |n_0|$) 时，因转子导体切割定子磁场的方向改变而使得电磁转矩的方向与转子转速方向转变，电动机进入回馈制动运行状态。回馈制动时，因 $|n| > |n_0|$ ，故电动机的转差率

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} < 0 \quad (1-8)$$

转子感应电势 $E_{2s} = sE_2$ 改变了方向，因而电机处于发电机运行状态，将轴上输入的机械能转换成电能回馈给电网。

回馈制动时，异步电动机将运行于第 1 象限正向电动特性曲线向第 2 象限的延伸部分，或第 3 象限反向电动特性曲线向第 4 象限的延伸部分。

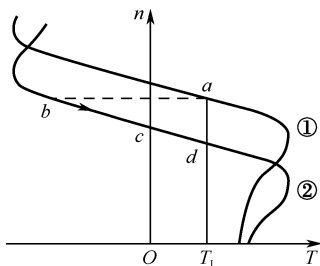


图 1-12 异步电动机调速过程中的回馈制动

异步电动机在下列两种情况下将会因 $|n| > |n_0|$ 而进入回馈制动运行。

1) 调速过程中出现的回馈制动

异步电动机在运行过程中，当电源频率降低或磁极对数增加而使得定子旋转磁场的同步转速突然下降，而转子转速因惯性不能突变，从而导致 $n > n_0$ 。

设电动机稳定运行在图 1-12 所示负载特性曲线①的 a 点，同步转速突然下降使电动机运行的特性变为曲

线②。此时,电动机由 a 点瞬时转移到曲线②上的 b 点运行,使得 $n > n_0$, 电磁转矩 T 变为负值,电动机进入回馈制动状态。 T 与 T_L 共同作用使电动机由 b 点沿曲线②减速。到达 c 点时, $n = n_0$, $T = 0$, 但由于 T_L 的作用,使电动机继续减速,进入电动状态。这样电磁转矩方向重新变正,并逐渐增大,到达 d 点时, $T = T_L$, $\Delta T = 0$, 于是电动机在 d 点稳定运行。

2) 位能性负载作用下产生的回馈制动

图 1-13 中,对于一位能性负载 T_L (设转矩方向为顺时针,则负载特性曲线位于第 1、4 象限),将电动机反向启动,则其机械特性为图中曲线②。此时电动机的电磁转矩 $T < 0$ (为顺时针方向),电动机在 T 与 T_L 的共同作用下反向启动并加速,运行于反向电动状态。当转速达到反向的同步转速时, $T = 0$, 但 $T - T_L = \Delta T < 0$, 使电动机继续反向加速,使得转子的转速高于旋转磁场的同步转速,电动机进入反向的回馈制动状态。此时电磁转矩也由原来的顺时针方向变为逆时针方向,并逐渐增大;到达 a 点时, $T = T_L$, $\Delta T = 0$, 至此电动机在 a 点稳定运行于回馈制动状态,其转速绝对值高于同步转速。这时的负载起着原动机作用,拖着异步电动机作发电机运行;而电动机则对位能性负载起着制动作用,限制它的速度。交流异步电动机这种回馈制动的方法较为简单,又极为经济。船舶甲板机械的电力拖动中广泛使用回馈制动来实现对位能性负载的“等速下降”,如起货机的等速落货、锚机深水等速抛锚等。

3. 能耗制动

异步电动机的能耗制动有他激和自激两种形式。所谓他激能耗制动,是在电动机运行运行时,将定子绕组与三相电源断开,并同时定子三相绕组的任意两端加上一个直流激磁电源,使定子绕组在空间产生一静止磁场。转子在此磁场中旋转时,感应出交流电势并形成转子电流,转子电流与此磁场相互作用产生与转速方向相反的电磁转矩,从而使电动机进入制动运行状态。

异步电动机能耗制动时的机械特性如图 1-14 所示。因为能耗制动时,定子磁场是一直流恒定磁场,同步转速 $n_0 = 0$, 所以特性曲线通过原点;又因 $T \propto U_2$, 当直流激磁电压的数值不同时,在同样转速情况下产生的电磁制动转矩大小也不同,图中曲线①的激磁电压小于曲线②的激磁电压。从图中还可看到,转速越低制动电磁转矩越小,转速降至零时制动转矩亦为零。对于绕线式异步电动机的能耗制动,可在转子回路串接电阻以限制制动电流,但特性曲线硬度将下降,如图 1-14 曲线③所示。

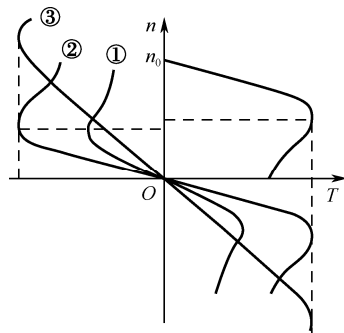
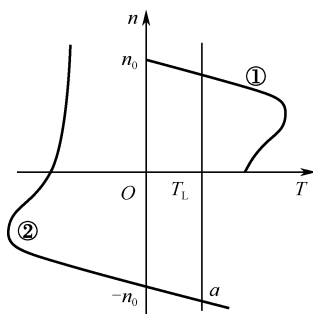


图 1-13 异步电动机在位能性负载作用下产生的回馈制动 图 1-14 异步电动机能耗制动时的机械特性曲线

异步电动机能耗制动时相当于一台他励发电机,电动机依靠拖动系统储存的动能或位能发电,电能消耗在转子回路的总电阻上。

异步电动机自激能耗制动的办法是在定子绕组与三相电源断开的同时将三相绕组接上三相对称电容器,这时电动机可看作一台单独运行的异步发电机,电容器是用来供给电机无功功

率的，以建立磁场。

异步电动机的能耗制动有两种用途：可以用于实现拖动系统的加速停车；实现位能性负载的匀速运行。

1.2.3 异步电动机的调速

根据异步电动机的转差率 s 和同步转速 n_0 的定义，可导出其转速的表达式：

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知，对异步电动机的调速可分别通过改变转差率 s 、定子绕组磁极对数 p 以及电源频率 f 来实现。

1. 改变转差率 s 的调速

电动机运行时，在同步转速以及负载转矩均不变的情况下，当电动机机械特性曲线硬度变化时，其转速也将随之改变，因而转差率也就不同。由此可见，改变转差率的调速，其实质就是通过改变电动机机械特性曲线硬度进行调速。

1) 转子串电阻调速

这种方法只适用于绕线式异步电动机。当转子串入电阻后，电动机的最大转矩 T_{\max} 不变，而临界转差率 s_m 增大，因而特性曲线变软。由图 1-15 可见，在同样的负载转矩 T_L 下，转子电路串入电阻值不同，电动机的转速也就不同，由此达到调速的目的。转子串电阻调速方法简单，可实现多级调速；但在轻载或空载时调速范围小，调速效果不明显。

2) 改变定子电压的调速

当改变电动机定子电压时（从额定电压往下调），机械特性如图 1-16 所示。由图可知，对于通风机性质负载，调速范围较大；而对于恒转矩性质的负载，变压调速所得到的调速范围很小。如果对恒转矩负载进行变压调速，可通过增加异步电动机的转子电阻（绕线式异步电动机串电阻，或采用转子电阻较大的高转差率笼型转子异步电动机），以便改变定子电压可得到较宽的调速范围，如图 1-17 所示。但是此时机械特性太软，而且低压时的过载能力较低，负载的波动稍大，电动机就有可能停转，即转速的稳定性较差。

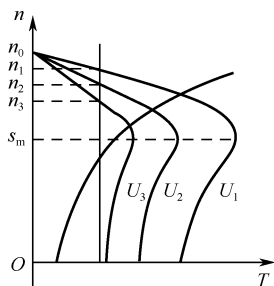


图 1-15 异步电动机转子串电阻调速时的机械特性曲线

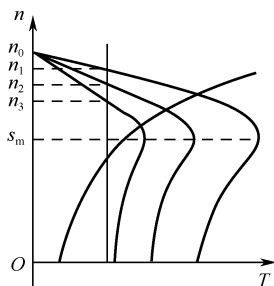


图 1-16 异步电动机改变定子电压调速时的机械特性曲线

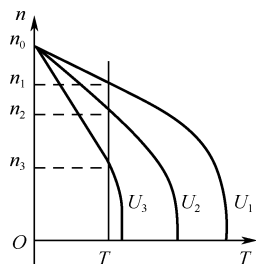


图 1-17 高转子电阻异步电动机的变压调速特性

2. 改变磁极对数 p 的调速

正常运行时异步电动机转子转速总是略低于旋转磁场的同步转速，由式 $n_0 = \frac{60f}{p}$ 可知，改

变磁极对数 p ，则同步转速 n_0 改变，电动机的转速也将随之变化。磁极对数只能按整数倍增减，所以异步电动机的变极调速属于有级调速。异步电动机运行时其定、转子绕组的磁极对数必须保持一致，而鼠笼式转子的磁极对数能自动追随定子绕组的磁极对数的变化，因此变极调速一般只适用于鼠笼式异步电动机。异步电动机定子绕组磁极对数的改变可通过以下两种方法实现。

1) 采用可变极双速绕组

这种绕组每相均有两个“半绕组”组成。图 1-18 所示为其中一相绕组在定子铁心中的分布示意图（分别设为 a_1 、 x_1 和 a_2 、 x_2 ）。当把 a_1 、 x_1 和 a_2 、 x_2 两个绕组正向串联时，可得到四极的磁场分布；而两个绕组若为反向串联或反向并联时，则为两极的磁场分布。若将各相的每两个半绕组正向串联的三相绕组再按星形或三角形连接，分别记为 Y 和 Δ 连接，其磁极对数分别为 p_Y 和 p_Δ ，则 $p_Y = p_\Delta = p$ ；而每两个半绕组反向并联后再按星形连接，为 YY 连接（称为双星形），则可得

$$p_{YY} = \frac{p_Y}{2} = \frac{p_\Delta}{2} \quad (1-10)$$

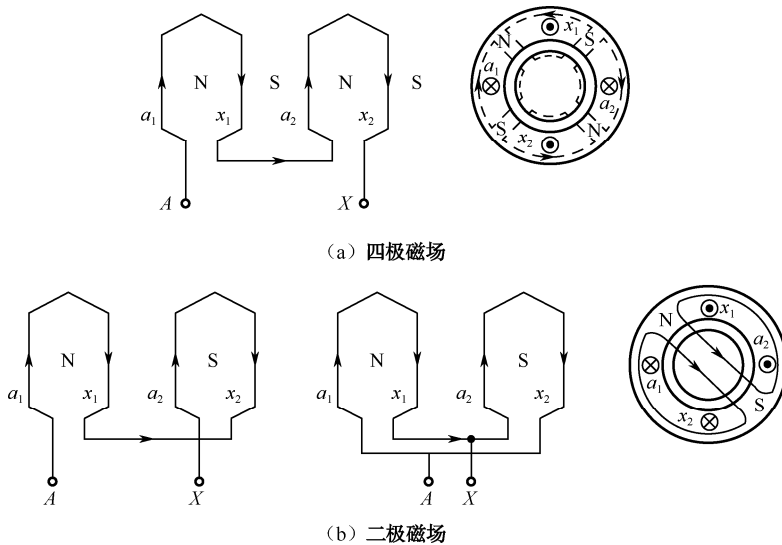


图 1-18 异步电动机双速绕组的变极原理

因此当电动机采用 Y—YY 换接调速时（即由 Y 换接成 YY），或 Δ —YY 换接调速时，则定子绕组磁极对数由 p 变为 $p/2$ ，因而同步转速提高一倍，即 $n_{0YY} = 2n_{0Y} = 2n_{0\Delta}$ ，转子转速也近似提高一倍。图 1-19 为异步电动机双速绕组的 Y、 Δ 以及 YY 的接线原理图。

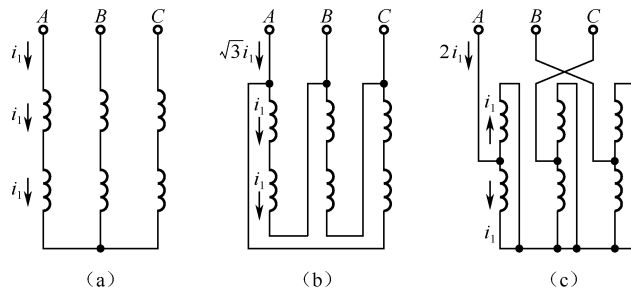


图 1-19 异步电动机双速绕组的 Y、 Δ 以及 YY 的接线

可见，对于双速定子绕组的异步电动机，改变其定子绕组的接线方式，即可使定子磁极对

数成倍地变化,从而达到调速的目的。

异步电动机变极调速时,必须考虑电动机在变速前后转矩及功率的允许输出。

假定异步电动机变极调速前后电动机的功率因数 $\cos\varphi_1$ 及效率 η 均保持不变,且定子每相绕组中允许流过的最大电流均为额定电流 I_{1N} 。则对于 Y—YY 变极调速,电动机的允许输出功率与转矩分别为:

Y 接法时

$$\left. \begin{aligned} P_Y &= \sqrt{3}U_N I_{1N} \eta \cos\varphi_1 \\ T_Y &= 9550 \frac{P_Y}{n_Y} \approx 9550 \frac{P_Y}{n_{0Y}} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

YY 接法时

$$\left. \begin{aligned} P_{YY} &= \sqrt{3}U_N (2I_{1N}) \eta \cos\varphi_1 = 2P_Y \\ T_{YY} &\approx 9550 \frac{P_{YY}}{n_{0YY}} = 9550 \frac{2P_Y}{2n_{0Y}} = T_Y \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

由 $T_{YY} \approx T_Y$ 可知,电动机的 Y—YY 变极调速属于恒转矩调速。即当定子绕组由 Y 变为 YY 时,尽管电动机转速提高了近一倍,但由于允许输出功率也增加了一倍,故电动机的输出转矩可保持不变。

而对于 Δ —YY 变极调速,电动机的输出功率与转矩分别为:

Δ 接法时

$$\left. \begin{aligned} P_\Delta &= \sqrt{3}U_N (\sqrt{3}I_{1N}) \eta \cos\varphi_1 \\ T_\Delta &\approx 9550 \frac{P_\Delta}{n_{0\Delta}} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

YY 接法时

$$\begin{aligned} P_{YY} &= \sqrt{3}U_N (2I_{1N}) \eta \cos\varphi_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} P_\Delta = 1.155 P_\Delta \approx P_\Delta \\ T_{YY} &\approx 9550 \frac{P_{YY}}{2n_{0\Delta}} = 9550 \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} P_\Delta}{2n_{0\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}} T_\Delta = 0.577 T_\Delta \end{aligned}$$

即

$$\left. \begin{aligned} P_{YY} &\approx P_\Delta \\ T_{YY} &\approx 0.577 T_\Delta \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

可见 Δ —YY 变极调速前后电动机可输出的功率基本不变,为近似恒功率调速。因此随着定子绕组由 Δ 变为 YY 连接,转速升高的同时,其输出转矩也应相应减小近一半。

2) 采用多套不同极对数的定子绕组

电动机的定子铁心槽内嵌放两套(或多套)不同极数的绕组,运行时根据需要,将其中一套与电源相接。这样就可通过两套绕组间的换接,实现两种转速的变极调速。如果这两套绕组本身就是双速绕组,则电动机便可实现四速变极调速。

3. 变频调速

变频调速与变极调速相似,都是通过改变定子旋转磁场的同步转速来实现的。在电源频率可连续、大范围变化的前提下,可以实现对电动机平滑、大范围的调速。

异步电动机的定子感应电势为

$$E_1 = 4.44k_1N_1f_1\Phi = kf_1\Phi$$

式中, $k=4.44k_1N_1$, 为一常数。若忽略定子阻抗压降, 则定子绕组感应电势与电源电压近似相等, 即

$$U_1 \approx E_1$$

由此可知, 如果在降低频率调速时保持 U_1 不变, 则主磁通 Φ 将增加, 从而可能使磁路饱和而导致励磁电流大大增加, 铁心过热。因此通常要求在保持 Φ 不变的情况下进行变频调速, 即在降低频率的同时电源电压也按比例下调, 其比例关系为

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} = \text{常数} \quad (1-15)$$

图 1-20 为异步电动机变频调速时的机械特性曲线。在额定频率之下, 以保持 U/f 恒定进行变频调速。当频率在较高范围时, 因主磁通 Φ 基本不变, 故电动机的最大转矩 T_m 不变, 为恒转矩的调速方式; 但当频率较低时, 因定子绕组的阻抗压降的存在, 按 U/f 恒定的控制将使电动机的主磁通略有减小, 从而导致电动机的电磁转矩有所减小。

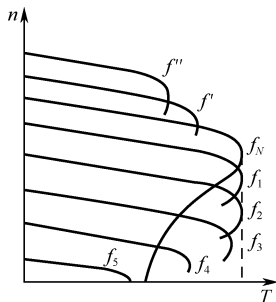


图 1-20 异步电动机变频调速时的机械特性曲线 ($f''' > f'' > f_N > f_1 > f_2 > f_3 > f_4 > f_5$)

在额定频率之上进行升频调速时, 若要保持主磁通 Φ 基本不变, U_1 应随 f_1 上升。由于电源电压的上升将受制于电机的绝缘强度等诸多因素影响, 故一般保持 U_1 不变。此时, 随着 f_1 的升高, Φ 将减弱, 电动机的电磁

转矩也将减小。升频调速属于恒功率的调速方式, 一般只在小范围进行。

1.3 直流电动机的启动、制动与调速

对于直流电动机的启动、制动与调速的定义与交流异步电动机相同。他励式直流电动机在主磁极磁场不变的情况下, 其机械特性方程为一线性方程, 特性曲线为一条直线, 且电磁转矩与电枢电流成正比。因而对他励式直流电动机的启动、制动、调速的具体分析, 可简化为利用数学的方法, 直接得出一些相关的结论, 这些结论同样适用于并励或复励直流电动机。

1.3.1 直流电动机的启动

由直流电动机的电势平衡方程式 $U=E_a+I_aR_a$ 可知, 电动机的电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \quad (1-16)$$

在电动机接通电源的启动瞬间, 转子因惯性不能立即转动, $n=0$, 电枢反电势 E_a 也为 0, 故直流电动机启动时, 其电枢电流

$$I_{ast} = \frac{U}{R_a} \quad (1-17)$$

直流电动机的电枢电阻 R_a 很小, 因此启动电流 I_{ast} 很大。如果在全电压下直接启动, 则启动电流 I_{ast} 可达额定电流 I_{aN} 的 10~20 倍, 而普通直流电动机允许的瞬时过载电流按规定不得超过 $(2\sim 2.5)I_{aN}$, 这么大的启动电流是电动机过载能力所不允许的; 此外, 由于电动机的启动

转矩与电枢电流成正比, 过大的启动电流产生过大的启动转矩而引起强烈的机械冲击。一般直流电动机在全电压下启动时, 都必须采取措施, 限制启动电流和其相应的启动转矩。

根据启动电流 I_{ast} 的表达式可以看出, 直流电动机限制启动电流的方法可分别采用电枢回路串电阻分级启动或电枢降压启动。而电枢回路串电阻启动由于设备简单、经济而被广泛使用。

当电枢回路串入启动电阻 R_{st} 后, 按 $I_{ast} \leq (2 \sim 2.5)I_{aN}$ 的要求, 有

$$I_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \leq (2 \sim 2.5)I_{aN} \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 可求得启动电阻 R_{st} 的大小。

电动机串电阻启动后, 随着转速的上升, 电枢电流逐渐减小接近于额定电流值, 在此情况下可将启动电阻切除。启动电阻的切除一般分段进行, 以避免切换过程中引起过大的电枢冲激电流。根据启动电阻的分段数, 直流电动机的串电阻启动通常可分为二级启动和三级启动两种。二级启动时第一次和第二次切除的电阻的值一般为 $\frac{2}{3}R_{st}$ 和 $\frac{1}{3}R_{st}$; 而三级启动时依次切除的三段电阻则分别为 $0.5R_{st}$ 、 $0.3R_{st}$ 和 $0.2R_{st}$ 。每次切换通常是在 $I_a = 1.1I_{aN}$ 时进行。

1.3.2 直流电动机的制动

直流电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{K_E \Phi} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-19)$$

特性曲线是一条斜率为 $-\frac{R_a}{K_E K_T \Phi^2}$, 与纵轴截距 (理想空载转) 为 $n_0 = \frac{U}{K_E \Phi}$ 的直线。当电动机因某些参数改变或受外转矩的作用而运行于机械特性曲线的第 2、4 象限时, 其电磁转矩方向与转速方向相反, 电动机便进入了制动运行状态。

1. 反接制动

当直流电动机的电枢电势 E_a 与电源电压 U 方向相同时, 电动机处于反接制动状态。直流电动机同样有电源反接制动和倒拉反接制动两种情况。

1) 电源反接制动

电动机在电动状态下运行时, 将其电枢电压反接, 同时在电枢回路中串入电阻, 以限制换接时的电枢电流。其特性方程为

$$n = \frac{-U}{K_E \Phi} - \frac{R_a + R_B}{K_E K_T \Phi^2} T \quad (1-20)$$

此时电动机便由正向的电动运行 (见图 1-21 (a) 曲线①的 a 点) 过渡到电源反接制动运行状态 (见图 1-21 (a) 曲线②的 b 点), 即为反向运行机械特性曲线向第 2 象限的延伸段。

2) 倒拉反接制动

电动机带一位能性负载 T_L 运行于电动状态 (图 1-21 (b) 特性曲线①的 a 点), 若在电枢回路中串入足够大的电阻 R_B , 使其电磁转矩减小 ($T'_{ST} < T_L$), 以致电动机在负载转矩拖动下进入反转, 即机械特性曲线②向第 4 象限的延伸段, 此时电动机便进入了倒拉反接制动运行状态。

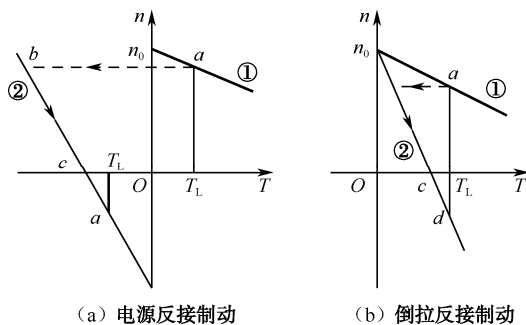


图 1-21 他励直流电动机的反接制动

2. 回馈制动

直流电动机运行时，因外转矩的作用或电源电压的改变使得其转速高于理想空载转速，即 $n > n_0 = \frac{U}{K_E \Phi}$ （或 $|n| > |n_0|$ ），电动机便进入回馈制动运行状态。

1) 调速过程中出现的回馈制动

电动机在电动状态下运行时，若对电动机进行降压调速，则降压后的特性曲线的理想空载转速 n_0 降低，而电动机的转速 n 因惯性而不能突变，因而电动机便由特性曲线①的 a 点过渡到曲线②的 b 点而进入制动运行，即降压后的机械特性曲线②向第 2 象限的延伸段，如图 1-22 (a) 所示。

2) 位能性负载作用下产生的回馈制动

电动机带一位能性负载反向启动（参考方向的设定参见异步电动机回馈制动一节），则电动机将在负载转矩和电磁转矩共同作用下反转并加速直至机械特性曲线②的 d 点，即为反向运行机械特性曲线②向第 4 象限的延伸段，如图 1-22 (b) 所示，电动机最后稳定运行于回馈制动状态。

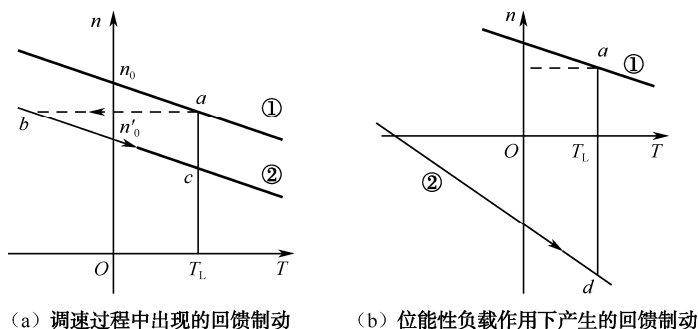


图 1-22 他励直流电动机的回馈制动

3. 能耗制动

直流电动机实现能耗制动的办法是，将运行于电动状态的电动机的电枢从电源断开，并接入一电阻（用以限流），此时电动机的机械特性为

$$n = -\frac{R_a + R_B}{K_E K_1 \Phi^2} T \quad (1-20)$$

其理想空载转速 $n_0 = \frac{U}{K_E \Phi} = 0$ ，即曲线为一条过原点、

位于第 2、4 象限的直线，如图 1-23 所示。能耗制动既可用于电动机的加速停车（曲线位于第 2 象限部分），也可用于位能性负载的匀速下降（曲线位于第 4 象限部分）。

1.3.3 直流电动机的调速

直流电动机的调速可分别通过电枢回路串电阻、改变电枢电压以及减弱磁通的方法来实现。

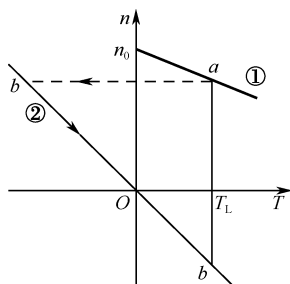


图 1-23 他励直流电动机的能耗制动

1. 电枢回路串电阻调速

电动机带负载运行时，保持电枢电压和磁通为额定值，在电枢回路中串入不同阻值的电阻，使得特性曲线的硬度改变而理想空载转速不变，在相同负载情况下电动机的转速降 Δn 增大，从而达到调速的目的。

直流电动机的这种调速方法与异步电动机变转差率调速相似，在轻载或空载的情况下调速效果不明显；此外，电枢回路所串电阻越大，其特性曲线就越软，转速的稳定性就越差。

2. 改变电枢电压的调速

考虑到电机的绝缘强度等因素，改变电压的调速一般只进行降压调速。在主磁通以及电枢回路电阻不变的情况下，降低电枢电压，则特性曲线的硬度不变而理想空载转速下降。因此，随着电枢电压的降低，曲线平行下移。在一定负载下，降低电压即可实现电动机的转速下调。

直流电动机的降压调速可实现平滑的无级调速，调速前后特性曲线硬度不变。它具有调速幅度大、稳定性好等一系列优点。但是需要专用的调压设备，如 G—M 系统（直流发电机—直流电动机系统）或 SCR—M 系统（晶闸管—直流电动机调速系统）。

3. 减弱磁通 Φ 的调速

在电动机的励磁绕组回路中，串入可变电阻，就可减小励磁电流，使主磁极磁通 Φ 减弱。从机械特性方程式看， Φ 减少后，理想空载转速 n_0 提高了，同时转速降 Δn 也大为增加。图 1-24 表示了不同 Φ 值时的机械特性曲线。因此在一定负载下减弱磁通 Φ 将使电动机的转速上升。

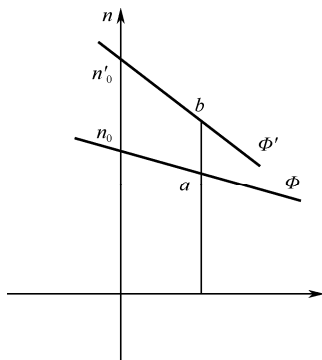


图 1-24 直流电动机不同 Φ 值时的机械特性曲线

弱磁调速可使电动机获得高于额定转速的转速，所以一般船舶直流起货机在空钩运行时常利用这种方法来获得高速，以提高生产效率。但是弱磁调速时，机械特性变软，给定转速下的

稳定性较差。而且动态电流要比额定电流大。由于换向器和机械强度的限制,转速调节也受到限制。普通电动机在弱磁调速时,转速可达到 $1.1\sim 1.2n_N$,但最高不允许超过 $1.2n_N$ 。正是由于它的调速范围窄,故一般与额定转速下的降压调速配合使用,以扩大调速范围。例如船舶起货机,重载低速时,用电枢串电阻调速等方法;而要空载高速时,用弱磁调速。

习题及思考题

1-1 电力拖动系统运行的稳定性是指什么?而拖动系统稳定运行的条件又是什么?

1-2 为了缩短启动过程,在电动机方面应采取哪些办法?常见船舶上的起货电动机转子为什么又细又长?

1-3 直流电动机采用电阻分级启动时,切换电阻时的电流要稍大于额定电流,为什么?为了使启动平稳,是否分级越多越好?

1-4 在空载和满载启动时,电动机的启动电流及启动转矩是否一样?对于同一交流异步电动机接成Y形(电源电压为380V)和接成 Δ 形(电源电压为220V),启动时的启动电流及启动转矩是否一样?

1-5 试比较异步电动机变转差率、变极和变频调速各自的优缺点。

1-6 有一台鼠笼式三相异步电动机,铭牌上标明:额定电压380V,Y形连接,出厂时绕组用Y形连接,今拟用Y- Δ 换接降压启动,是否可以?为什么?

1-7 电源反接制动和倒拉反接制动的区别是什么?鼠笼式异步电动机能否实现倒拉反接制动?

1-8 异步电动机带一位能性负载运行在电动状态,突然将其中两相电源反接,会出现什么情况?电动机最终稳定运行在何种状态?

1-9 一台直流他励直流电动机带一位能性负载运行在倒拉反接制动状态,此时突将电枢电源反接,并切除制动电阻,试问拖动系统将会发生什么情况?电动机最终将稳定运行在何种状态?画出机械特性曲线。

1-10 对恒转矩及恒功率的变极调速,分别配以何种负载特性比较合理?为什么?

1-11 异步电动机变频调速时,为什么希望在调速过程中保持磁通不变?在过载能力不变的前提下,要维持恒转矩或恒功率的变频调速,各自的条件是什么?

1-12 一台他励直流电动机的数据为: $P_N=40\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=207.5\text{A}$, $R_a=0.067\Omega$, $n_N=1000\text{r/m}$,试求:

(1) 若直接启动,则启动电流为额定电流的多少倍?

(2) 如采用三级启动,启动电流不超过 $2.5I_N$,则应串入多大的启动电阻?并估算各级的启动电阻值。

(3) 算出各级启动电阻切除时的瞬时转速(每次切换时的电流为 $1.2I_N$)。

1-13 一台鼠笼式三相异步电动机的数据为: $P_N=30\text{kW}$, $U_N=380\text{V}$, $I_N=57.5\text{A}$, $f_1=50\text{Hz}$, $p=2$, $s_N=0.02$, $\eta=90\%$, $T_{st}/T_N=1.2$, $I_{st}/I_N=7$,试求:

(1) 用Y- Δ 换接降压启动时的启动电流和启动转矩;如负载转矩分别为额定负载转矩的60%和25%时,电动机能否启动?

(2) 用自耦变压器降压启动,使电动机启动转矩为额定转矩的85%时,自耦变压器的变比应为多少?此时电动机的启动电流和线路上的启动电流各为多少?