

冶金生产机械电力装备讲义

电力拖动教研室

东北工学院

1964.8

第三章 不可逆軋鋼机的电力装备

3—1 不可逆軋鋼机的电力拖动方案

根据軋鋼机的工作制度，不可逆軋鋼机可分为不可逆不調速軋机和不可逆調速軋机两类。对于不可逆不調速軋机，可用交流同步电动机或異步电动机拖动。至于采用哪一种比較合理，則与电动机容量和軋机的負載图有关，需要作具体的技术經濟比較。一般的說，不可逆不調速軋机的負載图可以分成具有不同特点的两类：1) 第一类如圖 3—1 所示。它的特点是：負載轉矩尖峯值很大，同时軋件在軋輥中的軋制時間很短并且两个軋次之間的空載時間比較长。这时可以采用異步电动机帶飞輪的拖动装置，在尖峯負載时，利用飞輪放出一部分能量，以減輕尖峯負載对电網的冲击所引起的电網电压的剧烈波动，也可以减小所需电动机的容量。如能满足下列条件，則采用異步电动机帶飞輪的拖动装置一般是合适的

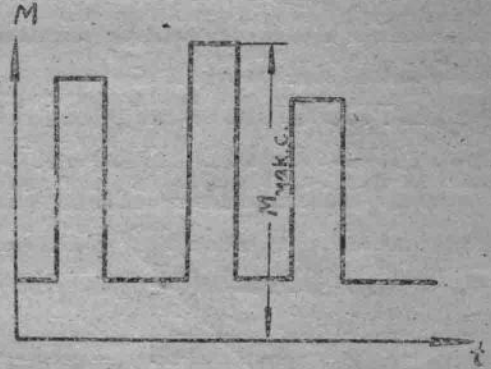


图 3—1 不可逆不調速軋鋼机負載图

$$t_{np} \leq 2 \sim 4 \text{ 秒}$$

$$\text{和} \quad \frac{M_{\text{макс.с}}}{M_{\text{KB.с}}} > 2.5 \sim 3$$

式中 t_{np} ——軋制負載轉矩較大的任一个軋次持續的時間；

$M_{\text{макс.с}}$ ——靜負載轉矩最大尖峯值；

$M_{\text{KB.с}}$ ——靜負載图的均方根轉矩。

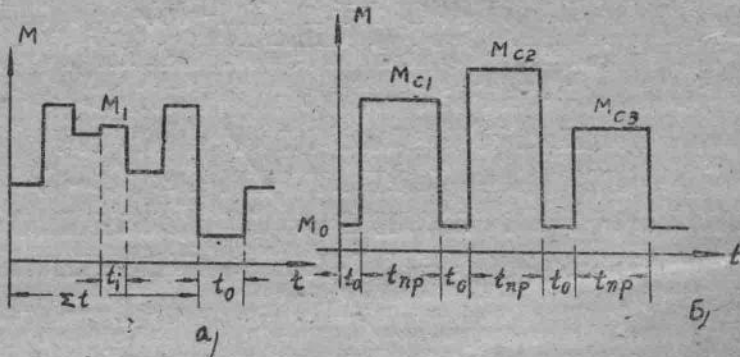


图 3—2 不可逆不調速軋鋼机負載图

2) 第二类负载图的特点是静负载转矩的变化不剧烈(图3-2a), 或者是轧件在轧辊中的轧制时间较长, 而轧次之间的空载时间较短(图3-2b)。在这种情况下就无法利用飞轮的能量来减轻负载对电网电压的影响, 也不能减小所需电动机的容量。这时, 如果轧钢机容量比较大, 则一般以采用同步电动机拖动比较合适, 如果轧钢机容量比较小, 则以采用不带飞轮的异步电动机拖动比较合适。

采用同步电动机拖动与异步电动机拖动比较, 具有下列优点:

- 1) 同步电动机定子与转子间的气隙较大, 故其运转可靠性较高;
- 2) 在容量相同时, 同步电动机的效率高 $1.5\sim 3\%$, 在容量大时, 每年可以节省大量电能;
- 3) 同步电动机可以补偿电网的无功功率, 改善电网的功率因素, 减小电网的损耗。低速的异步电动机功率因数低, 而一般的轧钢电动机都做成低速的, 这就更显示了同步电动机拖动装置的这一优点;
- 4) 由于同步电动机的转矩与电网电压的一次方成比例, 而异步电动机的转矩与电网电压的平方成比例, 故在电网电压有波动时, 同步电动机工作较稳定。

采用同步电动机的缺点是, 在容量小时, 价格比异步电动机贵, 起动比较复杂一些; 并且需要直流励磁电源。同步电动机系以鼠笼式异步电动机的方式起动, 在容量大时, 很大的起动电流可能引起电网电压剧烈下降, 甚至影响系统的稳定性, 因此只有在电网容量允许条件下, 才能应用同步电动机。

随着近年来电网容量的增大, 同步电动机越来越多的应用于轧钢机的电力拖动装置。对于巨型初轧机的Г-Д組的原动机也开始用同步电动机代替异步电动机。但是在轧钢机容量或电网容量小时, 特别是在我国各中小型轧钢厂中, 仍普遍应用异步电动机拖动。

对于不可逆调速轧钢机, 如第二章所述, 一般有两类调节速度的要求:

1) 在轧制过程中调速。这种轧钢机电力拖动和控制的特点和可逆轧钢机相似, 在下章中介绍。

2) 在轧制某种钢材时, 轧制前预先调整好速度, 而在轧制过程中不改变速度, 但可能校正速度。这种不可逆调速轧钢机是我们在本章中所要研究的*。要求调速的原因有很多。例如对于某些合金钢材的轧机, 由于在轧制某一化学成分和品种的合金钢时要求一定的轧制速度, 因此在同一轧机上轧制不同品种的合金钢材时, 需要有不同的速度。又如在某些型钢轧机中, 由于在同一轧钢机上轧制的钢材成品的品种很多, 在轧制不同品种时负载的差异也很大, 如果在负载小时提高轧制速度, 就可以显著提高产量。

在要求调速的不可逆轧钢机中, 如果要求调速范围在 $1:(1.5\sim 2)$, 同时在车间里的轧钢电动机台数为 $1\sim 2$ 台时, 以采用异步电动机串级的拖动装置所装设的电机总容量最省; 在轧钢电动机台数比较多, 并且轧钢机要求的调速范围更宽时, 以采用直流

* 在本章中所说的“调速”除非特别说明, 都指的是在轧制前将速度调整到给定值和轧制过程中对速度的校正。

Γ - Π 組系統的拖动裝置比較有利。近年來，用可控汞弧整流器供電的 $\text{YPB}-\Pi$ 系統得到了廣泛的應用，在不可逆調速軋鋼機中，有取代 Γ - Π 系統的趨勢。

對於各種不可逆軋鋼機的電力拖动方案，應根據其技術經濟指標，慎重地加以研究和選擇。

3-2 軋鋼機的異步電動機帶飛輪的電力拖动裝置

1. 帶飛輪的異步電動機電力拖动的基本原理

在三輥式鋼板軋鋼機、舊式的二輥薄板軋鋼機等軋制中，負載的特點是尖峯靜負載轉矩大，而持續的時間很短。

在軋鋼的每一軋次中，負載吸收的能量取決於軋制負載轉矩，電動機供給的能量取決於電磁轉矩。而電動機的電磁轉矩取決於電動機內部的變化規律，這個規律以電勢和磁勢平衡來表征。在沖擊負載下，拖动裝置的機械運動仍舊服從於能量守恆定律。如果電動機所產生的電磁轉矩比負載轉矩大，則使系統加速。這時在單位時間內，電動機產生的能量比負載吸收的部分大，而剩餘的部分就儲藏在系統中而使動能增加，這表現為轉速的升高。如果電動機所產生的轉矩比負載轉矩小，則系統減速。這時在單位時間內，電動機產生的能量小於負載吸收的能量，而不足的部分就由系統原來儲藏的動能中放出來補償，這表現為轉速的下降。這種轉速的變化反過來影響電動機電氣量的變化，並且通過電動機電磁轉矩的變化而使電動機單位時間供給的能量變化。

如果電動機原始運轉於空載狀態（圖 3-3 中 M_0 ）。當軋鋼機沖擊負載突加於電動機軸上時，由於拖动系統的慣性，拖动裝置的轉速不能突變，因而電動機的電氣量不能突變，於是負載轉矩瞬時大大超過電動機的電磁轉矩，根據牛頓第二定律，拖动裝置將減速，電動機與負載的機械能量，差額由動能來補充，這時，系統的動態過程的進行

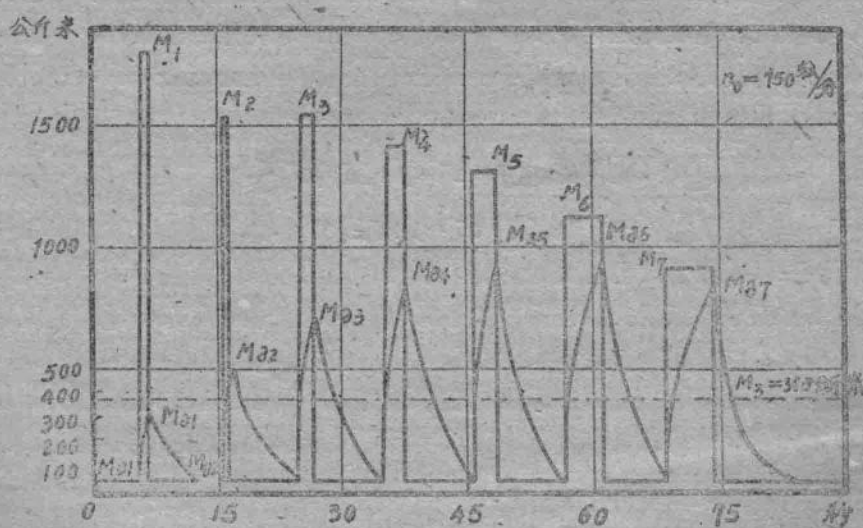


圖 3-3 帶飛輪拖动裝置的負載圖

服从如下运动方程式

$$M = M_{c1} + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (3-1)$$

式中 M_{c1} — 第 i 軋次的負載轉矩；

GD^2 — 归算于电动机軸上的拖动裝置的总飞輪矩。

由于拖动裝置速度的降低，異步电动机轉子电势增加，轉子电流和电流与气隙磁通作用下产生的电磁轉矩也相应增加。在开始时，由于电动机轉矩很小，因之拖动系統減速度 $\frac{dn}{dt}$ 大，拖动系統单位時間供給的动能和动态轉矩也大。以后随着电动机轉矩的增加，由于負載轉矩不变，故拖动系統的动态轉矩相应减小，減速度 $\frac{dn}{dt}$ 也相应减小。当电动机机械特性为直綫时，电动机轉矩和轉速（或轉差率）按指数曲綫变化

$$M = M_{c1}(1 - e^{-\frac{t}{B}}) + M_{o1}e^{-\frac{t}{B}}, \quad (3-2)$$

$$S = S_{c1}(1 - e^{-\frac{t}{B}}) + S_{o1}e^{-\frac{t}{B}}, \quad (3-3)$$

式中 $B = \frac{GD^2 n_0 S'_{H}}{375 M_H}$ — 拖动裝置电气机械時間常数；

S'_{H} — 拖动裝置額定轉差率；

n_0 — 拖动裝置的同步轉速；

M_{o1} — 第 i 軋次开始时的电动机轉矩；

S_{c1}, S_{o1} — 相应于电动机轉矩等于 M_{c1} 和 M_{o1} 时的轉差率。

当軋鋼冲击負載突然消失时，同样，由于拖动系統的慣性，拖动裝置的轉速不能突变，因而电动机的电气量不能突变，于是电动机轉矩大于負載轉矩，电动机除克服負載轉矩外，还供給拖动系統动态轉矩，使拖动裝置加速。在开始时，由于电动机轉矩与負載轉矩的差值大，因而拖动裝置的加速度大；随着拖动裝置速度的增加，电动机轉子电势减小，轉子电流和电磁轉矩也减小，电动机轉矩和負載轉矩的差值减小，供給拖动系統的动态轉矩和系統的加速度相应减小。当电动机机械特性为直綫时，电动机轉矩和轉速（或轉差率）也按指数曲綫变化。

$$M = M_{o1}(1 - e^{-\frac{t}{B}}) + M_{\kappa 1}e^{-\frac{t}{B}}, \quad (3-4)$$

$$S = S_{o1}(1 - e^{-\frac{t}{B}}) + S_{\kappa 1}e^{-\frac{t}{B}}, \quad (3-5)$$

式中， $M_{\kappa 1}, S_{\kappa 1}$ — 冲击負載消失的瞬間电动机轉矩和相应的轉差率。

由上述工作原理可以看出：在具有尖峯負載的軋鋼机中，如果軋次時間短而軋次之間間歇時間較长，則采用帶飞輪的拖动裝置可以在尖峯負載时暂时利用拖动系統供給負載一部分动能，因而减小电动机所承受的尖峯轉矩和电动机由電網吸取的尖峯功率，而在两个軋次之間，利用負載較小的这一段間隙時間，再將功能重新儲存于拖动系統。

在軋制中，电动机所达到的最大轉矩与拖动系統放出能量的特征及电动机本身电气量的变化規律有关。当系統飞輪矩 GD^2 一定时，电动机机械特性較硬，則拖动系統有不大的轉速降落就能引起电动机电气量較大的变化，而电动机轉矩变化也較大。但是拖

动系統所供給出来的动能却不多，于是动能不能充分利用，电动机将达到較大峯值轉矩。电动机机械特性較軟，在拖动系統轉速降落相同时，所引起电动机电气量的变化較小，电动机轉矩变化也較小，故拖动系統单位時間所供給的动能則較多，而电动机将达到較小峯值轉矩。但当电动机机械特性較軟时，即使不大的冲击負載也將引起拖动裝置較大的速度降落，这将降低軋制的生产率。

利用可控的电动机机械特性在达到电动机最大允許轉矩之前，保持較硬的机械特性，以保証提高生产率而当达到之后，則自动地过渡到軟化的人工特性，从而充分利用拖动系統儲存的动能。

2. 軋鋼电动机容量和飞輪的飞輪矩的选择

在已知軋制的靜負載图，要求計算帶飞輪的电力拖动裝置的电动机容量时，首先要预选电动机和飞輪，根据预选的数据，作出电动机的負載图。然后才能对预选的电动机作发热和过载的校驗。

然而，由图 3—3 可以看出，电动机的容量和飞輪矩是互相依賴的。在飞輪矩大时，由于机电時間常数的增加，則所需的电动机容量可以小一些。采用各种不同的飞輪矩和电动机容量的配合，都能满足拖动裝置的要求。在各种具体情况中，应作詳細的技术經濟比較。一般可以根据如下步骤进行計算：

1) 预选电动机容量。电动机的功率可以根据下式预选：

$$P_H = (1.2 \sim 1.3) P_{cp.c}, \quad (3-6)$$

式中， $P_{cp.c}$ ——靜負載图的平均功率；

$$P_{cp.c} = \frac{\Sigma Pt}{T_H} \quad \text{—— 其中 } \Sigma Pt \text{ 为靜負載功率图形的面积，} T_H \text{ 为周期時間。如果已知}$$

軋鋼机的生产率 (C_{TH} 吨/小时) 和軋制时的总能量消耗 (W ，
仟瓦小时/吨)，則 $P_{cp.c} = WG_H$ 仟瓦。

也可以用如下方法预选电动机容量：

$$P_H \approx \sqrt{P_{KB.c} \times P_{cp.c}} \quad (3-7)$$

$$\text{或} \quad P_H \approx \sqrt[3]{P_{KB.c} \times P_{cp.c}^2} \quad (3-8)$$

式中， $P_{KB.c}$ ——靜負載功率的均方根值。

2) 预选飞輪的飞輪矩。预选飞輪有两种方法：

(i) 根据經驗数据。对于各种帶飞輪的拖动裝置的軋鋼机，在拖动裝置最大轉速

时飞輪儲存的能量 A_a 和电动机的額定功率 P_H 間存在下列近似比值 $\frac{A_a}{P_H}$ ：

型钢和鋼板軋鋼机	20~30
帶轉差率調節器的上述軋鋼机	15~25
二輥式薄板軋鋼机	10~20
变流机組的原动机	30~40

故可预选的电动机容量 P_H ，近似地决定飞輪在拖动裝置最大轉速时所需儲存的动能 A_a 。由于

$$A_a = \frac{GD_{\Sigma n_0}^2}{729} \quad \text{仟瓦-秒}, \quad (3-9)$$

則可由拖动裝置的最大轉速，根據式(3-9)求出所需的 GD_{Σ}^2 ，其中， GD_{Σ}^2 為飛輪的飛輪矩，以噸·米²表示。

(ii) 根據電動機的允許的過載能力在預選電動機額定容量以後，也可以根據軋鋼機在最嚴重的軋次中電動機所允許達到的過載來預選飛輪的飛輪矩。即我們可以選擇一個飛輪矩，使在最嚴重的軋次中電動機承受的最大轉矩仍不超過其過載允許值。最嚴重的軋次一般是發生在靜負載轉矩最大、或者是靜負載轉矩雖不是最大但其軋制時間較長的軋次中。如在此軋次中軋制時間為 t_{np} ，則在 $t = t_{np}$ 時，電動機轉矩將增長到其過載允許值 λM_H ，根據式(3-2)可得：

$$\lambda M = M_{\text{макс.с}}(1 - e^{-\frac{t_{np}}{B}}) + M_{0\text{макс}}e^{-\frac{t_{np}}{B}}, \quad (3-10)$$

式中 $M_{\text{макс.с}}$ ——最嚴重軋次的靜轉矩；

$M_{0\text{макс}}$ ——最嚴重軋次中軋制開始時電動機的轉矩。

由式(3-10)，得

$$B = \frac{t_{np}}{\ln \frac{M_{\text{макс.с}} - M_{0\text{макс}}}{M_{\text{макс.с}} - \lambda M_H}}$$

$$\text{或} \quad GD^2 = \frac{375 t_{np} M_H}{n_0 S'_H} \cdot \frac{1}{\ln \frac{M_{\text{макс.с}} - M_{0\text{макс}}}{M_{\text{макс.с}} - \lambda M_H}}, \quad (3-11)$$

考慮到 $(M_{\text{макс.с}} - M_{0\text{макс}}) \approx (M_{\text{макс.с}} - M_0)$ ，故可得

$$GD^2 \approx \frac{375 t_{np} M_H}{n_0 S'_H} \cdot \frac{1}{\ln \frac{M_{\text{макс.с}} - M_0}{M_{\text{макс.с}} - \lambda M_H}}. \quad (3-12)$$

由式(3-12)可以看出，在最嚴重軋次中，比值

$$\frac{t_{np}}{\ln \frac{M_{\text{макс.с}} - M_0}{M_{\text{макс.с}} - \lambda M_H}}$$

最大。在難於立即確定哪一個軋次是最嚴重的軋次時，可以先粗略計算比較哪一個軋次的上述比值最大，然後根據此軋次預選所需的飛輪矩。

根據式(3-12)求出拖动裝置總的飛輪矩以後，減去電動機的飛輪矩，就可以求得所需飛輪的飛輪矩。

3) 電動機發熱校驗。拖动裝置的電動機容量和飛輪的飛輪矩預選得是否合適，需要對電機進行發熱和過載的校驗加以驗證。在校驗時，須繪制電動機的負載圖 $M=f(t)$ ，然後將此電動機負載曲線分成很多直線段。在每一段時間內視轉矩不變、或沿直線變化，用等效轉矩的計算公式計算一個周期中電動機的等效轉矩 M_{KB} 。如果滿足 $M_{KB} \leq M_H$ ，並且電動機所承受最大轉矩 $M_{H\text{макс}} \leq M_d$ ，則所選電動機容量及飛輪的飛輪矩能滿足拖动裝置的要求。如果計算所得 M_{KB} 與 M_H 相差甚多，或 $M_{H\text{макс}} > \lambda M_H$ ，則需重

新予选电动机容量和飞轮的飞轮矩，重新进行校驗。

但用这种方法校驗电动机的发热，非常繁复，为简化計算可以根据所制作的电动机負載图，用分析法計算电动机的等效轉矩。

由运动方程式

$$M - M_c = -\frac{GD^2}{375} n_0 \frac{ds}{dt}, \quad (3-13)$$

对于軋鋼机負載图的任一个軋次，我們有

$$M^2 dt = M_c^2 dt - 2 \frac{GD^2}{375} n_0 M_c ds + \left(\frac{GD^2}{375} n_0 \right)^2 \frac{ds}{dt} ds。$$

再將式(3-13)代入，得

$$M^2 dt = M_c^2 dt - \frac{GD^2}{375} n_0 (M_c + M) ds。$$

对于一个周期积分，我們有

$$M_{KB}^2 T = M_{KB.c}^2 T - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{GD^2}{375} n_0 \int (M_{c,i} + M) ds。$$

在一个周期的末了，仍旧应当回到起始时在电动机机械特性的工作点上，于是有：

$$\sum \frac{GD^2}{375} n_0 \int M ds = 0$$

故得

$$M_{KB}^2 = M_{KB.c}^2 - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{GD^2}{375} n_0 \int M_{c,i} ds。$$

考虑电动机机械特性为直綫，由 $\frac{M}{M_B} = \frac{s}{s_B}$ 。我們有 $ds = \frac{s_B}{M_B} dM$ 代入上式，得

$$M_{KB}^2 = M_{KB.c}^2 - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{GD^2}{375} n_0 \frac{s_B}{M_B} \int M_{c,i} dM。$$

于是对于任意阶梯形靜負載图，我們代入各阶梯時間內电动机轉矩的变化，得

$$M_{KB} = \sqrt{M_{KB.c}^2 - \frac{B}{T} \sum_{i=1}^{i=n} M_{c,i} (M_{\pi i} - M_{0,i})} \quad (3-14)$$

式中 $M_{\pi i}$ ——第 i 段終了时电机的轉矩；

$M_{0,i}$ ——第 i 段开始时电动机的轉矩。

对于如图 4-1 所示，負載与空載相間每个循环有 n 个軋次的靜負載图，如果取一个軋次（包括一个負載和一个空載）作为一段，則对于第一軋次，我們有

$$\begin{aligned} \int M_{c,i} dM &= M_{c,i} (M_{\pi i} - M_{0,i}) + M_0 (M_{0,i+1} - M_{\pi i}) \\ &= M_{c,i} M_{\pi i} - M_{c,i} M_{0,i} + M_0 M_{0,i+1} - M_0 M_{\pi i}。 \end{aligned}$$

对于第 i 軋次，

$$\int M_{c,i} dM = M_{c,i} M_{\pi i} - M_{c,i} M_{0,i} + M_0 M_{0,(i+1)} - M_0 M_{\pi i}。$$

对于第 n 軋次, 考虑到 $M_{o(n+1)} = M_{o1}$ 我們有

$$\int M_{c1} dM = M_{cn} M_{n1} - M_{cn} M_{on} + M_o M_{o1} - M_o M_{n1}$$

各积分式相加, 可得

$$\sum_{i=1}^{i=n} \int M_{c1} dM = \sum_{i=1}^{i=n} (M_{ci} - M_o)(M_{n1} - M_{oi})$$

故

$$M_{KB} = \sqrt{M_{KB.c}^2 - \frac{B}{T} \sum_{i=1}^{i=n} (M_{ci} - M_o)(M_{n1} - M_{oi})} \quad (3-15)$$

当电动机负载图已经繪出以后, 將各段负载图中电动机的初始轉矩和終了轉矩代入式(3-14)或(3-15)即可得出电动机的等效轉矩。

[例] 520 厘米三軋式軋鋼机的靜负载图示于图 3-3。它由 7 个軋次組成一个周期, 电动机的负载图和靜负载图的数据列于表 3-1 中。

表 3-1

軋次	M_{c1} 公斤·米	M_o 公斤·米	M_{n1} 公斤·米	M_{o1} 公斤·米	t_1 秒	t_{o1} 秒
1	1800	50	340	50	0.6	8.4
2	1560	50	550	50	0.9	9.0
3	1560	50	760	50	1.2	8.7
4	1420	50	850	50	2.1	8.4
5	1310	50	970	70	3	8.1
6	1150	50	980	70	4.2	7.8
7	930	50	850	80	6	21.6
					18	72

周期时间为 $T = 18 + 72 = 90$ 秒, 按式(3-11)

$$s = \left\{ \begin{array}{l} 1800^2 \times 0.6 + 50^2 \times 72 + \\ + 1560^2 \times 0.9 \\ + 1560^2 \times 1.2 \\ + 1420^2 \times 2.1 \\ + 1310^2 \times 3.0 \\ + 1150^2 \times 4.2 \\ + 930^2 \times 6.0 \end{array} \right\} - \frac{1}{0.427} \times \left\{ \begin{array}{l} (1800-50)(340-50) \\ (1560-50)(550-50) \\ (1560-50)(760-50) \\ (1420-50)(850-50) \\ (1310-50)(970-70) \\ (1150-50)(980-70) \\ (930-50)(850-80) \end{array} \right\}$$

$$= 27370000 - \frac{1}{0.427} \times 6266500 = 12690000$$

$$M_{KB} = \sqrt{\frac{12690000}{90}} = 375 \text{ 公斤/米。}$$

3. 充分利用电动机的容量时电动机的額定功率和拖动装置机电时间常数的选择。

按照上述方法预选电动机容量和拖动系统的电气机械时间常数，制作电动机的负载图，然后进行发热校验，非常复杂，尤其是当选择几种电动机容量和飞轮的飞轮矩的不同配合方案比较时，更是需要经过复杂的计算，在这种情况下，能找到电动机的等效转矩 M_{KB} 和电气机械时间常数 B 之间的关系式 $M_{KB}=f(B)$ ，则将使计算大为简化。

在轧钢机静负载图一定时， B 的大小对于电动机的等效转矩是有影响的，在电动机机械特性为直线时， M_{KB} 和 B 的准确关系由式(3-14)或(3-15)所表述，但式(3-14)或(3-15)不能直接表述 M_{KB} 和 B 的关系。

研究飞轮拖动装置的特点，我们注意到，当 $B=0$ 时， $M_{KB}=M_{KB.c}$ ，而当 $B=\infty$ 时， $M_{KB}=M_{cp.c}$ ，故可知 M_{KB} 和 B 的关系近似地可以用一个指数曲线来表示：

$$M_{KB}=M_{cp.c}+(M_{KB.c}-M_{cp.c})e^{-CB} \quad (3-16)$$

式中 C ——与轧钢机静负载图有关的系数，它决定指数曲线衰减的快慢。系数 C 可以由式(3-14)或(3-15)求出。

在 B 值很小，趋近于零时，即在 $M_{KB}=f(B)$ 曲线的开始部分，由式(3-14)或(3-15)，曲线可近似地用下式表示：

$$M_{KB}^2 \approx M_{KB.c}^2 - \frac{B}{T} \sum M_{c,i} (M_{c,i} - M_{c,i-1}) \quad (3-17)$$

$$\text{或} \quad M_{KB}^2 \approx M_{KB.c}^2 - \frac{B}{T} \sum (M_{c,i-1} - M_0)^2 \quad (3-18)$$

式(3-16)和式(3-17)或(3-18)所表示的曲线在 $B=0$ 这一点应有共同的切线，并且这时 $M_{KB}=M_{KB.c}$ 。由这个关系，我们求式(3-16)的微分，并令 $B=0$ ，得

$$\begin{aligned} \frac{dM_{KB}}{dB} &= -C(M_{KB.c} - M_{cp.c})e^{-CB}, \\ \left(\frac{dM_{KB}}{dB} \right)_{B=0} &= -C(M_{KB.c} - M_{cp.c}). \end{aligned} \quad (3-19)$$

另一方面，由式(3-17)或(3-18)也可以得到这个切线，由

$$\frac{dM_{KB}}{dB} = -\frac{1}{2T} \frac{\sum M_{c,i} (M_{c,i} - M_{c,i-1})}{M_{KB}}$$

$$\text{或} \quad \frac{dM_{KB}}{dB} = -\frac{1}{2T} \frac{\sum (M_{c,i-1} - M_0)^2}{M_{KB}}$$

$$\text{得} \quad \left(\frac{dM_{KB}}{dB} \right)_{B=0} = -\frac{1}{2T} \frac{\sum M_{c,i} (M_{c,i} - M_{c,i-1})}{M_{KB.c}} \quad (3-20)$$

$$\text{或} \quad \left(\frac{dM_{KB}}{dB} \right)_{B=0} = -\frac{1}{2T} \frac{\sum (M_{c,i-1} - M_0)^2}{M_{KB.c}} \quad (3-21)$$

令式(3-19)和式(3-20)或式(3-21)相等，则可求出

$$C = \frac{1}{2T} \frac{\sum M_{c,i} (M_{c,i} - M_{c,i-1})}{M_{KB.c} (M_{KB.c} - M_{cp.c})} \quad (3-22)$$

$$C = \frac{1}{2T} \frac{\Sigma(M_{c.i} - M_0)^2}{M_{KB.C}(M_{KB.C} - M_{CP.C})} \quad (3-23)$$

对于具体的静负载图，可以根据其数据计算 $M_{KB.C} \cdot M_{CP.C}$ 和系数 C ，由之可以制作 $M_{KB} = f(B)$ 曲线如图 3-5 所示，在图 3-5 中也给出准确计算所得 $M_{KB} = f(B)$ 的曲线，可以看出；由上述方法所决定的 $M_{KB} = f(B)$ 曲线一般与实际曲线是接近的。

根据 $M_{KB} = f(B)$ 曲线，可以决定使电动机发热充分利用时拖动装置的主要参数。例

如我們已經給定电动机的額定轉矩 M_H ，則令 $M_H = M_{KB}$ ，可以由图 3-5 的 $M_{KB} = f(B)$ 曲线，求出所需拖动装置的电气机械时间常数 B 。如果拖动装置的参数 $S'_H GD^2$ 已经给定；

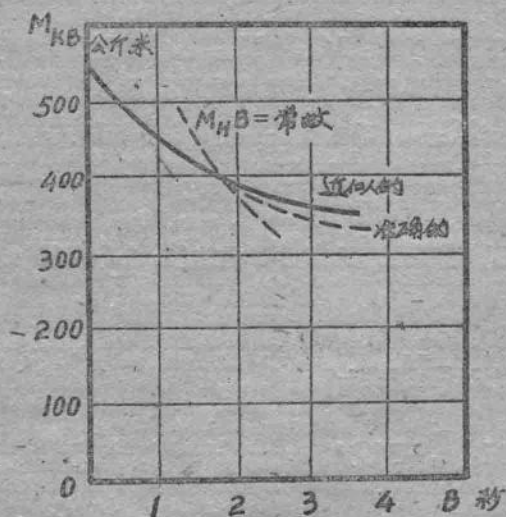


图 3-4 $M_{KB} = f(B)$ 的曲线

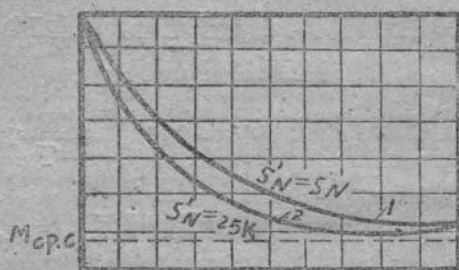


图 3-5 不同轉差率 S'_H 时的 $M_{KB} = f(GD^2)$

則可以根据一个假設的 B ，由 $B = \frac{GD^2}{375} \times \frac{n_0 S'_H}{M_H}$ 求出 M_H ，如果求出的 M_H 与由图 3-4 曲线 $M_{KB} = f(B)$ 查出的 M_{KB} 相等，则表示所选择的参数能使电动机发热充分利用，否則，应重新假設 B 值，重新計算；为了避免重复計算，在 $S'_H GD^2$ 給定时，使电动机按发热充分利用的拖动装置主要参数可如下求出：根据 $q = S'_H GD^2 = \text{常数}$ ，制作曲线。

$$M_H B = \frac{GD^2}{375} n_0 S'_H = \text{常数} \quad (3-24)$$

示于图 3-5，此曲线与 $M_{KB} = f(B)$ 曲线的交点，决定出电动机按发热充分利用时的 M_H 和 B 。

4. 电动机額定轉差率 S'_H 的选择。在电动机的額定轉矩和拖动装置的电气机械时间 B 决定以后，可以选用不同的 GD^2 和 S'_H 的配合，都能满足拖动装置对电气机械时间常数 B 的要求；如果增大 S'_H ，則可以减小 GD^2 ，在异步电动机中，可以在轉子回路中串入恒定的电阻以增大 S'_H 。利用曲线 $M_{KB} = f(B)$ ，可以容易的决定在不同的 S'_H 时， M_{KB} 和 GD^2 之间的关系，如图 3-5 的曲线所示，由图 3-5 可以看出，若电动机額定轉矩給定 $M_H = M_{KB}$ ，則在 GD^2 比較小时， S'_H 的变化对于 GD^2 的影响較小，而在 GD^2 比較大时， S'_H 的数值的选择对于 GD^2 的数值有很大的影响。

拖动装置的 GD^2 选得过大，則将使飞輪的投資很大；如果电动机的 S'_H 选得过大，

則將使電動機的轉子損耗大為增加，並且由於軋制時速度的過分降低而使生產率大大降低，使軋制時間延長，由於軋件的軋制溫度降低，增加了軋制時的能量消耗。

正確的選擇電動機的 S'_H 和拖动裝置的 GD^2 具有很大的經濟意義。選擇 S'_H ，可以根據兩種觀點出發，一種是使拖动裝置年維護費用最小，另一種是使拖动裝置能量損耗最小。下面我們將介紹根據拖动裝置年維護費用最小的觀點選擇電動機的 S'_H 和拖动裝置 GD^2 的方法。

帶飛輪的電力拖动裝置的年維護費用可以表示為：

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (3-25)$$

式中 F ——年維護費用；

F_1 ——年飛輪維護費用，包括飛輪的潤滑，修理等費用，一般，

$$F_1 = Grk; \quad (3-26)$$

G ——飛輪重量；

r ——飛輪單位重量的成本，與飛輪材料有關，一般，對於鑄鋼飛輪 $r=2000$ 元/噸，對於鑄鐵飛輪 $r=700$ 元/噸；

k ——飛輪年維護費用的係數，以飛輪成本的百分數表示，一般取 $K=0.1$ ；

F_2 ——飛輪每年消耗電能的費用，如假設飛輪的損耗與其重量成比例，則

$$F_2 = Gmhq; \quad (3-27)$$

m ——飛輪損耗的係數，以仟瓦/噸表示，對於低速鑄鐵飛輪，一般 $m=0.5 \sim 1$ 仟瓦/噸；對於高速的鋼制飛輪， $m=2 \sim 2.5$ 仟瓦/噸；

h ——每年運轉小時數；

q ——單位電能的費用，以元/仟瓦·小時表示；

F_3 ——電動機轉子回路電能損耗的費用；如以 P_2 表示轉子回路平均損耗功率，則

$$F_3 = p_2 h q. \quad (3-28)$$

由於

$$P_2 = \frac{Q}{T} = \frac{\int_0^T p_2 dt}{T},$$

式中 P_2 ——異步電動機的電磁功率

$$p_2 = \frac{n_0}{975T} \int_0^T M s dt.$$

假設電動機機械特性為直線，則

$$p_2 = \frac{n_0 S'_H}{975T} \int_0^T \frac{M^2}{M_H} dt = \frac{n_0 S'_H}{975 M_H} M_{H2}^2, \quad (3-29)$$

如果按發熱充分利用選擇電動機容量，則由於 $M_H = M_{KB}$ ，故

$$p_2 = \frac{n_0 S'_H}{975 M_H} M_H^2 = P_H S'_H. \quad (3-30)$$

由式(3-25)、(3-26)、(3-27)、(3-28)和(3-30)得

$$F = G(rk + mhq) + P_H S'_H h q = f(G, S'_H). \quad (3-25a)$$

因此，年維持費用為 S'_H 和 G 的函數， S'_H 和 G 是互相依賴的，其關係由已經選擇的電

气机械时间常数和电动机額定轉矩決定:

$$B = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0 S'_H}{M_H}。$$

由于拖动装置儲藏的动能为:

$$A_a = \frac{GD^2 n_0^2}{729000} \text{ 仟瓦-秒},$$

取

$$M_H = 975 \frac{P_H}{n_0(1-S'_H)} \approx 1000 \frac{P'_H}{n_0},$$

于是有

$$B = \frac{2A_a S'_H}{P_H} = \frac{2GwS'_H}{P_H}, \quad (3-31)$$

式中 w ——飞輪单位数量儲藏的动能, 对于每种材料的飞輪有一个极限值, 它是一个常数; 对于鑄鉄, $w=380\sim480$ 仟瓦-秒/吨, 对于鑄鋼, $w=2570\sim3200$ 仟瓦-秒/吨。由式(3-31)

$$G = \frac{P_H B}{2w} \frac{1}{S'_H} = \frac{C}{S'_H}, \quad (3-31a)$$

代入式(3-25a), 得

$$F = C \left(\frac{rk}{S'_H} + \frac{mhq}{S'_H} \right) + S'_H P_H hq。 \quad (3-25b)$$

由式(3-25b)微分, 并令其等于另, 可求得年維護費用最小时的 S'_H 值 $(S'_H)_{onm}$:

$$(S'_H)_{onm} = \frac{1}{\sqrt{2w}} \sqrt{\left(\frac{rk}{hq} + m \right) \sqrt{B}}。 \quad (3-32)$$

將式(3-32)代入(3-31a), 得年維護費用最小时的 G 值 $(G)_{onm}$:

$$(G)_{onm} = \frac{P_H \sqrt{B}}{\sqrt{2w} \sqrt{\frac{rk}{hq} + m}}。 \quad (3-33)$$

根据式(3-32)和(3-33)决定的电动机 S'_H 和飞輪的 G 可以使拖动装置年維護費用最小, 但在推导式(3-32)和(3-33)时, 沒有考虑上述参数对工艺等其他方面的影响, 因此选择以及还需要校核所选 S'_H 和 G 是否过大, S'_H 的数值可由允許速度降校核, 如果

$$S_k = (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})(S'_H)_{onm} > S_{npeH},$$

式中 S_{npeH} ——允許极限轉差率。則所选 S'_H 在技术上將認為是不合理的。在所选 $(S'_H)_{onm}$ 和 $(G)_{onm}$ 过大时, 則应考虑应用轉差率調节器的拖动装置。

3-3 軋鋼机的異步电动机帶轉差率調节器的电力拖动装置

采用帶飞輪的电力拖动装置是依靠飞輪放出一部分所儲存的动能, 帮助电动机克服尖峯負載。此放出的动能为 $\Delta A = \frac{GD^2(n_0^2 - n^2)}{729000}$ 仟瓦-秒。在軋制中速度降 $n_0 - n$ 越大, 則放出的动能越多。在采用硬的电动机机械特性, 即 S'_H 很小时 (如图 3-6 中的机械特性 a), 要求放出一定的动能, 必須有很大的飞輪矩。在繞綫式異步电动机轉子回

路中加入恒定电阻，增加其 S'_H ，使机械特性变软时，较小的飞轮矩就可以在轧制中放出要求的电能。但是在软的电动机机械特性上运转时（如图 3—6 的机械特性 δ ），即使轧钢机负载转矩比较小，拖动装置的速度也会降低很多，因而使生产率降低，电动机损耗增加，电动机的能力也不能充分利用。比较理想的电动机机械特性（如图 3—6 中的机械特性 a ）是当电动机转矩在允许过载范围以内时，电动机运转于较硬的机械特性上，不依靠飞轮动能的帮助，而在电动机转矩达到过载允许转矩时，拖动装置的速度才开始急速下降，使飞轮放出足够的能量帮助电动机克服静负载转矩。图 3—6 中所示的机械特性 δ 和 a ，具有相同的电动机速度降，因而飞轮放出的动能相同，但具有机械特性 a 的拖动装置给出较高的生产率，损耗也比较小。

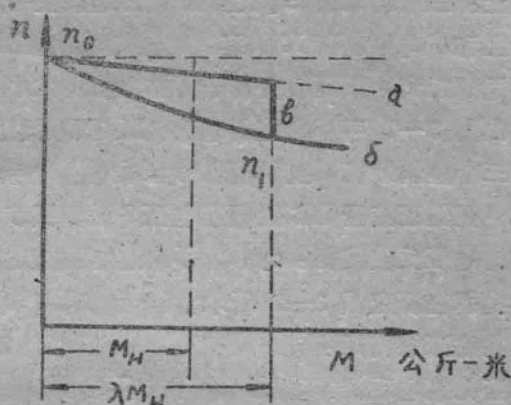


图 3—6 带飞轮的异步电动机机械特性

利用转差率调节器控制异步电动机转子回路的电阻，可以近似地得到上述理想的人工机械特性。有两种型式转差率调节器：一种是接触器式转差率调节器，另一种是液体转差率调节器。今就液体转差率调节器来分析其拖动原理。

液体转差率调节器拖动装置示意于图 3—7 中。图中 δ 为液体电阻槽。槽中装有 1

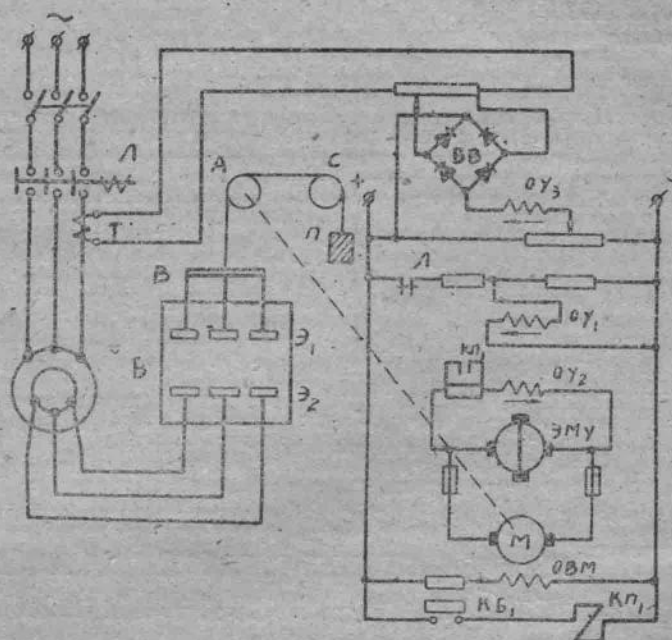


图 3—7 液体转差率调节器拖动装置示意图

~2% 碳酸鈉水溶液，槽的下部有三個靜電極 Θ_2 ，靜電極連接於軋鋼異步電動機的轉子滑環上。三個動電極 Θ_1 用金屬板 B 連接在一起，構成轉子回路的中點。金屬板 B 經過滑輪 A 和 C 與平衡錘 Π 相連，由控制電動機 M 控制動電極 Θ_1 上下移動。這樣就改變了電極間的距離，因而改變轉子附加電阻的大小。

由圖 3—7 可看出控制電動機 M 是采用直流電動機，並由交磁放大機來供電。放大機有三個控制繞組，控制繞組 oy_2 由軋鋼電動機定子電流互感器次級繞組經正流器 BB 供電，顯然正流器 BB 的輸出電壓與軋鋼異步電動機的定子電流成比例。 oy_2 繞組為放大機的電壓反饋繞組。 oy_1 為手動控制的控制繞組。

我們在研究圖 3—7 所示控制系統的調節過程時，為簡單起見，我們忽略動電極提升機構的摩擦轉矩。

當軋鋼電動機起動後，油開關 $\mathcal{N}$ 已合閘，其輸出常閉觸頭 $\mathcal{N}$ 開斷，因而 oy_1 繞組不起作用。

當空載時，由於軋鋼電動機空載電流小，因而正流器 BB 輸出電壓小於比較電壓 u_{cp} ，故 oy_2 繞組中無電流，控制電動機 M 不產生轉矩，動電極在最下部位置。

當軋制加入沖擊負載時，則軋鋼電動機減速，電動機轉矩沿機械特性 HA 增加（圖 3—8 6）。隨軋鋼電動機轉矩的增加，正流器 BB 輸出電壓也相應增加。當軋鋼電動機轉矩增加到正定值 M_y 時（圖 3—8 中 A 點），繞組 oy_2 中流過電流，放大機產生電勢，使控制電動機建立起動轉矩，其大小：

$$M_{y\pi} = M_g - M_{\pi} \quad (3-34)$$

式中： M_g —動電極重力矩

M_{π} —平衡錘重力矩

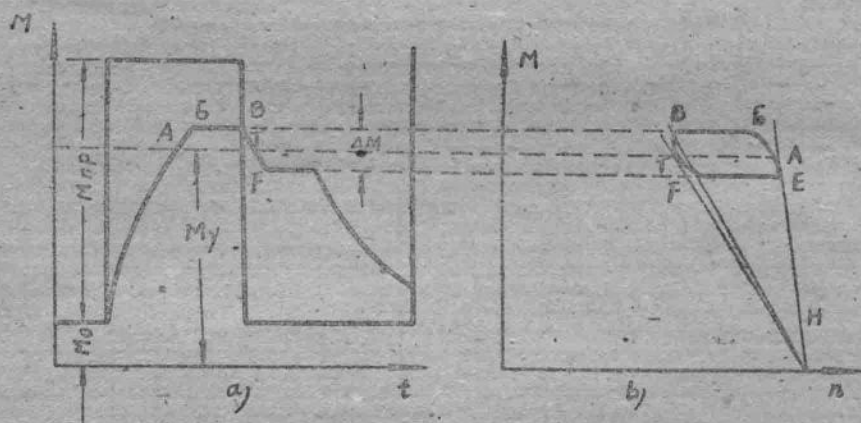


圖 3—8 考慮調節差額時帶液體轉差率調節器的異步電動機機械特性和負載圖

於是控制電動機開始提升動電極，使軋鋼電動機轉子電阻增加。理想是電動機轉矩達到 A 點（圖 3—8）後保持不變，這樣既充分利用電機又有效利用飛輪。

怎样才能使電動機轉矩達到 A 點（圖 3—8）後保持一定呢？由運動方程式可知：

$$M_{\pi} = M_g + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3-35)$$

式中 M_{π} ——軋鋼电动机所產生的轉矩，

M_c ——电动机負載靜轉矩，

GD^2 ——拖动系統總飛輪矩（歸算到电动机軸）。

由式(3-35)可看出，当电动机轉矩 $M_{\pi} = M_y$ 时， M_c 是不變的，若使 $M_{\pi} = \text{const}$ ，則系統的動態轉矩 $\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ 必須是不變的，即 $\frac{dn}{dt}$ 應是恒定的。為此我們可求解上運動方程式。

首先我們將 $\frac{dn}{dt} = -n_0 \frac{dS}{dt}$ 代入式(3-35)中，于是

$$M_{\pi} = M_c - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \frac{dS}{dt} \quad (3-36)$$

將 $M_{\pi} = M_y$ 代入式(3-36)中，并积分后得：

$$S = \int_0^t \frac{M_c - M_y}{\frac{GD^2}{375} \cdot n_0} \cdot dt = \frac{M_c - M_y}{\frac{GD^2}{375} \cdot n_0} \cdot t + S_0 \quad (3-37)$$

式中 S_0 ——調節器开始工作时軋鋼电动机的轉差率。

由上式看出要使 $M_{\pi} = M_y = \text{常数}$ ，必須使轉差率 S 随時間按直綫規律变化。另外我們知道，軋鋼电动机轉矩的变化决定于电机內部电气量变化的規律，当异步电动机運轉于机械特性的稳定区域时，电动机轉矩，轉差率和轉子电阻間的关系，近似的可以表示为：

$$M_{\pi} = C \frac{S}{R'_p} \quad (3-38)$$

式中 C ——与軋鋼电动机有关的常数。

由式(3-36)和(3-38)可知，当拖动裝置承受冲击負載时，一方面表现为轉速的下降，这个速度的变率决定于 M_{π} 和 M_c 的差值；另一方面由于轉速的变化必引起电动机电气量的变化，并表现为电动机轉矩的变化。如果在轉速变化的同时，以相应的变化率改变轉子电阻，則电动机轉矩就能保持恒定。

由式(3-38)对時間 t 微分，可求得

$$\frac{dS}{dt} = \frac{R'_p}{C} \frac{dM_{\pi}}{dt} + \frac{M_{\pi}}{C} \frac{dR'_p}{dt} \quad (3-38a)$$

代入式(3-36)，得

$$-\frac{GD^2}{375} n_0 \frac{R'_p}{C} \cdot \frac{dM_{\pi}}{dt} + \frac{GD^2}{375} n_0 \frac{M_{\pi}}{C} \frac{dR'_p}{dt} + M_{\pi} = M_c \quad (3-38b)$$

如果要使在轉差率調節器工作时，軋鋼电动机轉矩保持恒定，即 $M_{\pi} = M_y = \text{常数}$ ，則軋鋼电动机轉子电阻应有的变化規律，可由下式求出：

$$\frac{GD^2}{375} n_0 \frac{M_y}{C} \frac{dR'_p}{dt} + M_y = M_c \quad (3-38c)$$

积分后，得到軋鋼电动机轉子电阻应有的变化規律为：

$$R'_p = R'_{p0} + \frac{375C}{GD^2 n_0 M_y} (M_c - M_y) t, \quad (3-39)$$

式中 R'_{p0} ——轉差率調節器動電極在最下位置時，軋鋼電動機的轉子電阻（折算于定子的數值）。

由分析式(3-39)可以看出：1)在轉差率調節器工作時，若軋鋼電動機轉矩保持恒定，則其轉子電阻與時間成直線變化；2)在靜負載轉矩 M_c 為定值時，軋鋼電動機轉矩整定值越大，則其轉子電阻隨時間的變化越慢（如圖 3-9 所示），3)在 M_y 為定值時，靜負載轉矩越大，則軋鋼電動機轉子電阻隨時間的變化越快，在軋鋼機各軋次的靜負載轉矩不同時， R'_p 的變化速度也不同。從拖动裝置運動的物理過程也很容易說明上述結論。在靜負載轉矩 M_c 為定值時，電動機轉矩的整定值 M_y 越大，則在轉差率調節器工作時，單位時間內電動機由電網吸收的能量越大。因之，飛輪單位時間放出的能量越小，故要求 R'_p 的變化越慢。在電動機轉矩整定值為定值時，靜負載轉矩 M_c 越大，則在轉差率調節器工作時，要求飛輪單位時間放出的能量就越大，故 R'_p 的變化應越快。

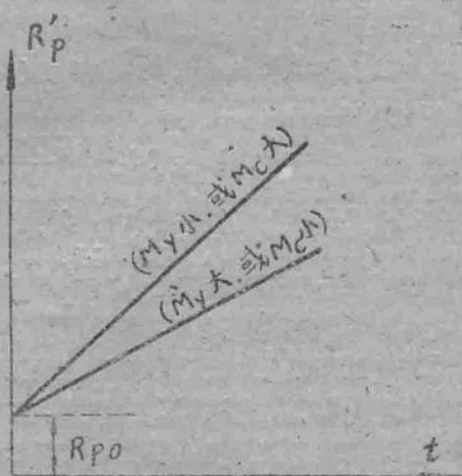


圖 3-9 R'_p 的變化曲線

在液體轉差率調節器中，電極間的電阻與其間的距離近似地成比例。如以 L 表示在任一瞬間電極間的距離， a 為電極間距離與電阻的比例係數，則有：

$$R'_p = R'_{p0} + aL \quad (3-40)$$

比較式(3-39)和(3-40)，可以得到在轉差率調節器工作時，要保持電動機轉矩為恒值所要求的電極間距離的變化規律為：

$$L = \frac{375C}{GD^2 a n_0 M_y} (M_c - M_y) t. \quad (3-41)$$

實際上，電極間距離的改變是藉控制電動機的轉動實現的，如控制電動機的轉速以 $n_{y\pi}$ 表示，則

$$L = m \int_0^t n_{y\pi} dt \quad (3-42)$$

式中 m ——比例係數。比較式(3-41)和(3-42)可以看出，在 M_c 和 M_y 為定值時，要使 L 與時間成直線變化，必須使 $n_{y\pi}$ 為常數，且其值為

$$n_{y\pi} = \frac{375C}{GD^2 a m M_y} (M_c - M_y) = \text{常數} \quad (3-43)$$

即為與 $\frac{M_c - M_y}{M_y}$ 成比例的常數。