

具有SCR逆变器异步电 牵引的自动控制系统

韶能仁

铁道部北京工程机械厂

1978年9月

具有 SCR 逆变器异步电

牵引的自动控制系统

北京工程机械厂 高蔚仁

摘要——本文对具有 SCR 逆变器异步电牵引的自动控制系统进行了理论探讨，提出了控制系统方框图，并对该系统的一些环节进行了初步定性定量分析。运用状态空间分析法列出了异步电牵引控制系统的状态变量方程，求定系统的传递矩阵。这样，既可分析研究单干扰对列车速度的影响，也可分析研究多干扰对列车速度的综合影响。由于采用了与逆变器可调频率同步旋转的空间坐标系，并用小信号线性化的方法围绕运行点将非线性方程线性化，因此至下分析研究都是按线性定常系统进行的。通过几种传递函数极点和零点的计算，分析了系统的稳定性问题。与此同时，还对系统的渐近稳定性作了初步探讨。通过对系统动态品质和稳定性分析，提出了对系统计算和选择系统参数的一些看法。全文可供理论研究、科学试验和设计研制新型机车自动控制系统参考。

引言

世界科学技术正以惊人的速度前进着，我国也不例外。我

同铁路要为中国现代化当好先行，必需要求高速度。而实现铁路高速度的关键则是电气化加自动化。

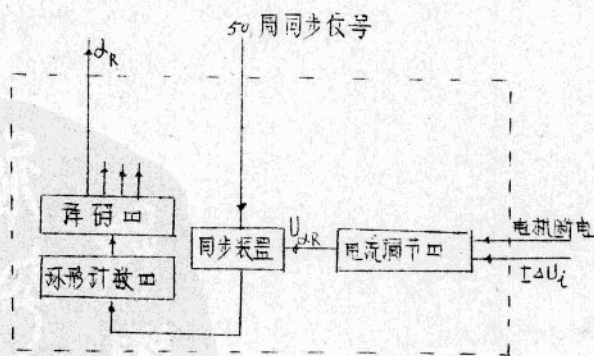
异步电牵引是70年代牵引动力发展的方向，其所以是这样，理由有三：① 60年代晶闸管的产生，为克服异步电牵引调速困难的致命弱点奠定了新的可信的基础；② 异步电牵引有着许多优点，诸如调速平滑，调速范围广，起动转矩均匀恒定，再生制动简单易行，异步牵引机制造工艺简单，成本低廉等等。这些优点在上述新的基础上已得到充分表现出来；③ SCR逆变器的采用，使异步电牵引的自动控制易于与电子计算机技术结合起来，特别对将表微处理机的广泛采用更是前途无量。从以上三点看，异步电牵引是有利于加速实现铁路电气化自动化的。因此，它的自动控制系统的研究无疑是一个很有价值的新课题。

我国铁路目前还没有异步电牵引，全世界从1965年到1977年底止总共只有异步电传动机车46台（其中不少还是试验型或样机），在这屈指可数的台数中，研究其自动控制系统的工作是不够的。我国这方面的资料较少见到，国外的信息也很有限⁽¹⁾⁽²⁾。我们是以世界先进水平作为科学技术发展的起点，在铁路上针对异步电牵引自动控制系统进行理论研究就是一项十分必要的工作。本文从下面四个方面进行的研究：第一节为建立控制系统前方程组和结构图并进行适当的分析。第二节以车速和列车电流（用定变中轨入端的电流）为状态变量，以列车速度作为轨出量，导出异步电牵引控制系统的状态变量方程，求出系统的传递矩阵，并提供一套计算公式。第三节是用实际数据代入到两种参考轨入和一种抗干扰轨入对车速的传递函数公式中去进行核算和有关的计算。第四节是对动态品质和稳定性问题进行分析。

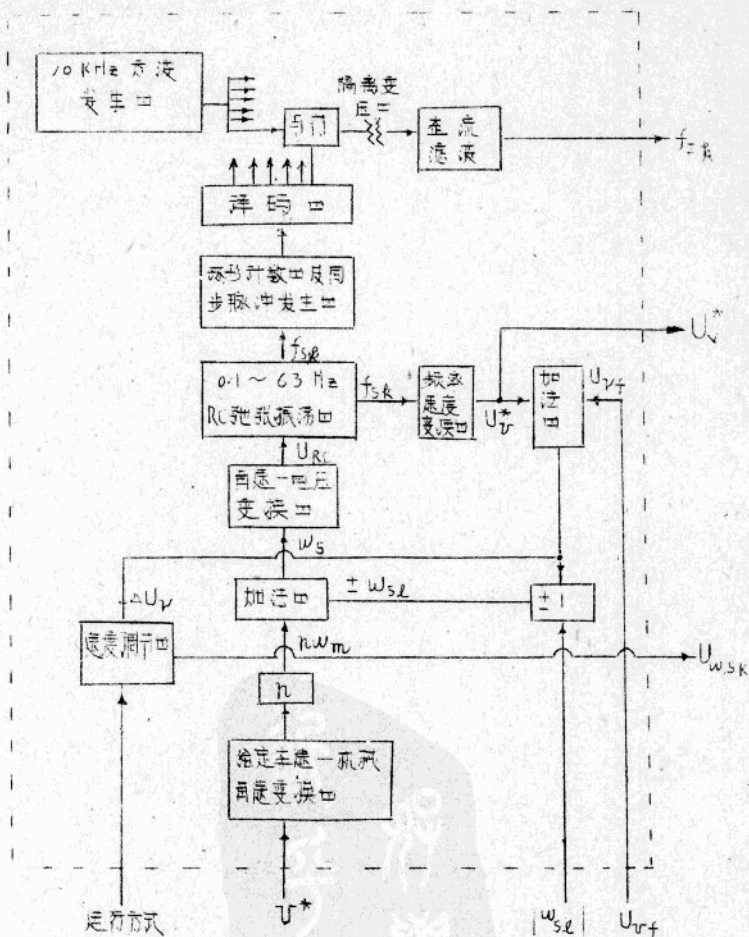
（一）自动控制系统的前方程组和简化框图

具有 SCR 整流异步电牵引的自动控制系统是研变频调速方式运行的。变频流的主振荡器是采用 RC 弛张振荡器，而载频流的辅助振荡器则采用 10 KHz 的矩形波振荡器。这些振荡器包括在方框图的速度调节器中。至于调节系统的方框图示于图一 1。速度调节器的单元方框图和电流调节器的单元方框图示于图一 2 与图一 3。

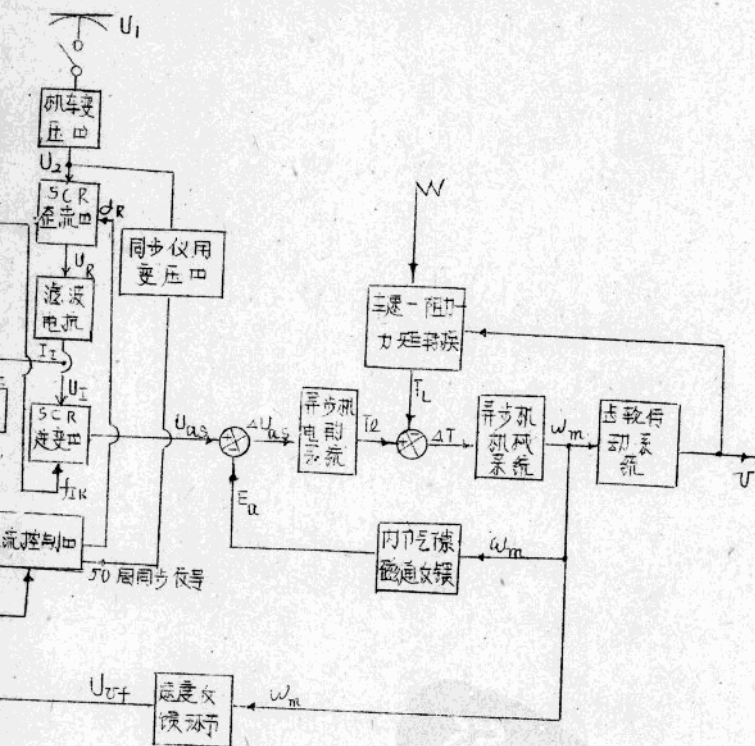
图一 1 中的函数发送器，将模拟值列车在区间内运行的速度曲线，作为自动调节系统的给定值 U^* 。速度曲线可以通过优秀司机在区间内驾驶列车获得，或由牵引计算得出。运行方式指令调节器主要用于列车起动前、停车后，以及事故状态下将速度调节器中的速度调节器置“0”，并在电流调节器中的电流调节器固定在这一 $U_{GR}(2)$ ，即又可以使得



图一 3 电流控制器方框图



图一 2 速度控制框图



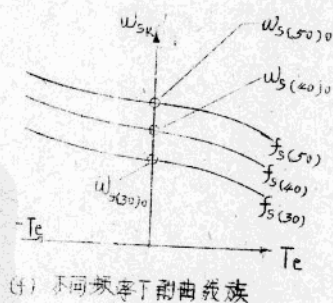
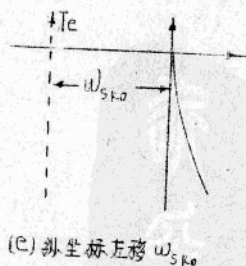
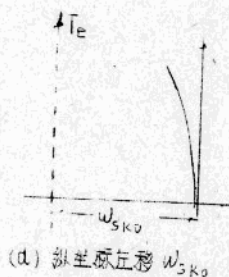
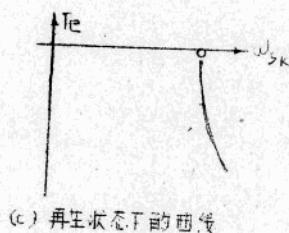
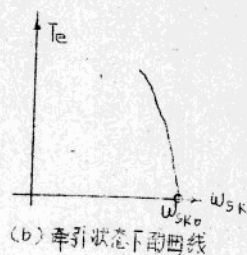
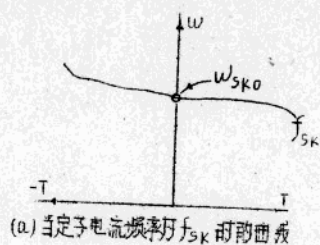
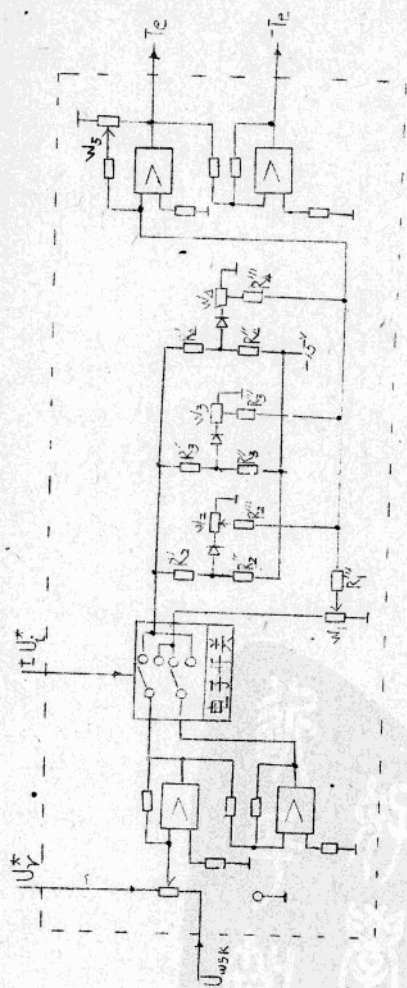


图-4 异步机的转矩-速度特性曲线



图一-5 特性曲线族发生回

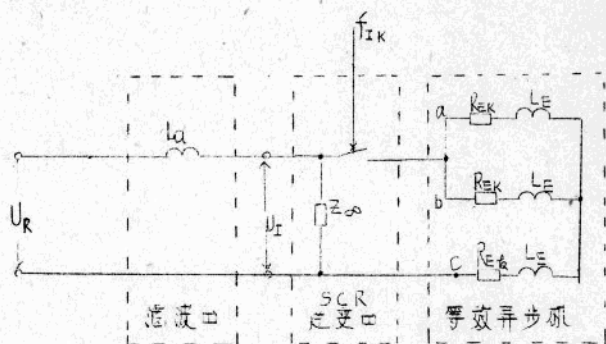
$\omega_k = \omega$ 。因为同步装置本身是一个 50 周可移相的脉冲发生器，当相移达到 π 时，电机呈现断电状态。实际上就是把系统封锁了，这种封锁信号是通过信号发送口发出的。而在正常的列车启动和调速时，则藉自动解除这种封锁。列车调速指令控制口主要用于正常运行状态下发出恒流启动和调速运行两种信号，当恒流启动时，信号发送口有模拟启动电流给定值 U_c^* 输出，调速运行时 $U_c^* = 0$ ，再生时 U_c^* 为负值。当调速运行时，列车将自动地按函数发送口的速度曲线作调速运行，函数发送口可采用通用的函数发生器。至于特性曲线族发生口，则是一种专用的函数发生口，它是以模拟异步机的转矩—速度曲线 $T = T(\omega)$ 的。如图一4所示，(a) 组出了当电机定子电流频率为 f_{sk} 时的一条曲线，这条曲线可以分解成 (b)、(c) 两个部分，它们都是以电机定子电流的角频率 ω_{sk} 为横坐标，这是特性曲线族发生口的轨入量，这个轨入量若用电压来模拟，则可写成 $U_{\omega sk}$ ，这就是图一1 上所表现的形成。图一4 上的纵坐标分两种状态，牵引状态为 T_e ，再生状态为 $-T_e$ ，它们表现为曲线类型是不同的。(b)、(c) 上的曲线实际是 (d)、(e) 上的曲线经坐标移位后获得。图一5 即表示特性曲线族发生口的原理电路。在该电路上，用 U_c^* 作为坐标移位信号，它正比于 ω_{sk} ，即当频率 f_{sk} 改变时， U_c^* 也随之变化。 $I U_c^*$ 用以控制电子开关，牵引时 $U_c^* = +$ 或 0（即包括恒流启动和调速运行），“ T_e ”端有轨出；再生时 $U_c^* = -$ ，“ $-T_e$ ”端有轨出。图中 ω_1 用以调整特性曲线在 ω_{sk0} 处切线的斜率， $\omega_2 \sim \omega_4$ 用以调整曲线在小范围线性化时各段直线的斜率，有时为了用一段直线来近似表示（因异步机的特性非常硬），那么就可以去掉两个调节分支而只保留一个调节分支。 R'_1 和 R'_2 ， R'_3 和 R'_4 ， R'_5 和 R'_6 用以改变频失位置， $R''_1 \sim R''_6$ 用以增大 $\omega_1 \sim \omega_6$ 的调节范围。这样

一、特性曲线可以适应不同牵引级的需求。当 $f_s = 50 \text{ Hz}$ 时，对应于 $\omega_s(50)$ 的 U^* 可定为 4 伏。最后输出电压与 ω_s 之比例由 ω_s 调定。如果变频调速的频率变化范围为 $0.1 \sim 63 \text{ Hz}$ (2)，由于已假定 $f_s = 50 \text{ Hz} \rightarrow \omega_s(50)$ ，此处的 $U^* = 4$ 伏，则每 Hz 之伏数 $= \frac{4}{50} = 80 \text{ mV}$ ，即在增加 0.1 Hz 坐标移位应增加之伏数为 8 mV 。

力矩—电流变换器，角速度—电压变换器，频率—速度变换器等均可用积分器和乘法器组成，只是不同量值的比例系数不同。同样的环节，但其输入量分别可以做成力矩、角速度或者频率的模拟量 U_T 、 ω_s 或 f_{sK} ，输出则分别为电流的模拟量 U_{ic} 、 R_c 反馈的输入电压 U_{Rc} 或速度给定值的模拟量 U^* 。这些环节都可当作比例环节来处理。电流反馈环节与速度反馈环节均具有惯性环节的特征，它们的时间常数分别用反馈滤波的时间常数 T_{if} 与 T_{vf} 表示之，通常均为几毫秒。调速调节器可以采用 PI 型调节器，但实际标标时我们可以把它当作一丁等效惯性环节来处理。

SCR 整流器和 SCR 逆变器均具有滞后环节的特征，其传递函数都可用 Ke^{-st} 的型式来表示，近似也可用惯性环节来表示。它们的时间常数随着各不同线路而有所不同，但其最大极限值不至超过 10 ms (3)，而且在实际线路上常常远小于此值。所以我们在作电路分析时也可把它们当作一丁瞬时开关装置。至于在计算速度调节器和电流调节器的参数时，上述两种环节的滞后时间影响将被考虑进去。关于逆变器整流器的电路和波形，篇幅所限就不作介绍了。滤波电感这丁环节的传递函数是与负载有关的，它通过 SCR 逆变器这丁瞬时开关装置与驱动列车等效异步机电路相联，如果滤波电感的电感量为 L_d ，则用以求定其传递函数的等效电路在忽略电阻的

条件下如图一6所示。如果还有滤波电容，那么也可在整流口输入端再加上滤波电容。既有电流又有电容的滤波口在感性负载下的传递函数也是可以利用这个等效电路求得的。

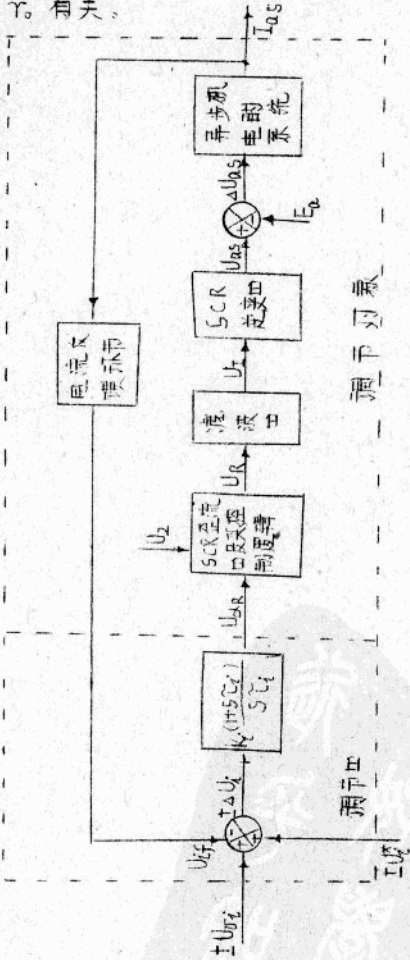


图一6 带负载的滤波口等效电路

通常电容对时间常数的影响较小，虽然我们也应该给出其传递函数，但在第三章中的实际例子中我们暂不考虑电容的影响。

电流调节和速度调节中的电流调节和速度调节本身都是PI型调节器，它们的调节对象是好几环节的综合，其中有惯性环节，也有小惯性环节，如图一7和图一8所示。从图一1的方框图中我们已经看到电流反馈的闭环调节是作为速度反馈的闭环调节的一个内环，而速度闭环则是外环，因此，至于图一7实际上是包括在图一8之中，电流调节器系统等效于一个惯性环节的传递函数在图一8中是用 $K_c \frac{1}{1+s\tau_c}$ 表示。至于图一1上的齿轮传动系统也是一个大惯性环节，它不仅包括齿轮，也包括机车上全部传动装置，但它的时延常数将通过列车质标质量 $m(1+\gamma)$ 与旋转电机一起反映在总的列车质标

电时间常数 T_m 中。因此齿轮传动系统这个环节只剩下了比例系数 K 。它既与齿轮传动比 i 有关，也与列车动轮半径 r 有关。

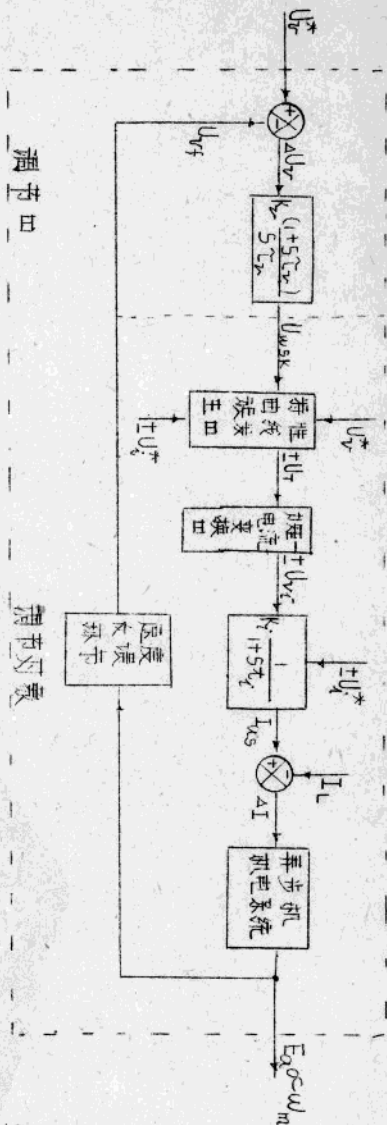


图一7 电流调节器及反馈调节系统

为了进行计算，我们将图-1的控制系统进行适当简化后，用图-9上的简化结构图表示出来。图中凡用K表示者均为放大环节。 n 为异步机的磁对数。对于交流电和直流电，由于我们在作系统的分析与计算时都把它们看成是瞬时开关装置，因此相当于近似认为是放大环节，但在计算调节中的参数时我们是考虑了它们的时间常数的，实际上它们的时间常数起的作用甚微。 $\frac{U_T}{U_{WSK}}$ 是一种特殊的放大环节，它是以曲线族的形式表达出来的。至于其它环节，则有的是比例积分环节，有的是惯性环节，有的是微分环节，这已由结构图上反映出来，在此就不赘述了。

从图-9可见，我们认为牵引网电压基本不变

图-8 速度调节日及电压调节日



那么 U_2 也就可以看成是常数。显然，对于这样一丁系统，有两个参考轨入 V^* 和 U_2^* ，它们是车速给定值和列车电流给定值，还有一个扰动轨入 w ，它是列车运行阻力。系统的轨出量则是列车速度 V 。

(二) 列车状态变量方程和系统的传递矩阵

由上节中我们已经看到，对于这样一丁自动控制系统，列车速度 V 为轨出量已是比较明显的了。但我们将选什么量值作为状态变量呢？作为独立的列车状态变量我们将选择两个，一丁是列车电流 I_1 （取 I_{as} ），一丁是车速 V 。因此，车速既是状态变量，也是轨出量。

我们知道， V 是电机旋转角速度 ω_m （以弧度/秒表示）通过齿轨传动系统折算到车轮上的。因此可以写成

$$V = K_0 \omega_m \quad (1)$$

式中 $K_0 = \frac{3.6 r_0}{\mu}$ —— 比例系数，它相当于一丁放大环节的传递函数；

μ —— 齿轨传动比；

r_0 —— 列车轮对半径（米）。

通常每台机车上装有 4 台异步机。假定每台异步机所取相电流为 I_{as1} ，如果把 4 台异步机用 1 台等效异步机来代替，则等效异步机取电流 $I_{as} = 4 I_{as1}$ 。因此，等效电机入端相电压的瞬时值可以写成

$$u_{as} = L_E \frac{di_{as}}{dt} + R_E i_{as} + e_a \quad (2)$$

式中 L_E —— 等效异步机总电感（亨），它是各台电机电感总值的并联值；

R_E —— 等效异步机总电阻 (欧), 它是转子电阻总值的并联值。

在 (2) 式中, 电机的反电势 E_a 如果以有效值表示, 则有

$$\begin{aligned} E_a &= k_{in} \omega_m \\ &= n C_w \phi \omega_m \\ &= n C_w C_i I_{as} \omega_m \end{aligned}$$

式中 n —— 极对数, 若 N 为极数, 则 $n = \frac{N}{2}$;

$\phi = C_i I_{as}$ —— 气隙磁通, 随 I_{as} 而变,

C_w, C_i —— 均为常数。

令 $\alpha_w = C_w C_i$, 则反电势有效值的标量为

$$E_a = \frac{N}{2} \omega_m \alpha_w I_{as} \quad \dots \dots \dots 3,$$

假定变频调速的角频率为 ω_s 电弧度/秒, 电网角频率为 ω 电弧度/秒。为了使系统能够作为一个定常系统来运行并分析, 令假定有一个与变频可调频率 ω_s 同步旋转的空间坐标系, 在这个坐标系上, (2) 式可以近似地改写为

$$U_{as} e^{j\varphi_a} = (L_E p + R_E + \frac{N}{2} \omega_m \alpha_w e^{j\varphi_a}) I_{as}$$

式中 φ_a —— 功率因数角 (电弧度);

α_w —— 常数;

$p = \frac{d}{dt}$ —— 微分。

因此 $L_E p I_{as} = -R_E I_{as} - \frac{N e^{j\varphi_a}}{2 K_0 L_E} \omega \alpha_w I_{as} + U_{as} e^{j\varphi_a}$

或写成 $\dot{I}_{as} = -\frac{R_E}{L_E} I_{as} - \frac{N e^{j\varphi_a}}{2 K_0 L_E} \omega \alpha_w I_{as} + \frac{1}{L_E} U_{as} e^{j\varphi_a}$

此式是一个向量方程，实轴是沿 I_{as} 方向。如果我们把实轴反时针方向旋转 φ_a 角，则方程变成

$$\dot{I}_{as} e^{-j\varphi_a} = -\frac{R_s}{L_s} I_{as} e^{-j\varphi_a} - \frac{N\psi_m I_{as}}{2K_s L_s} + \frac{U_{as}}{L_s} \quad (4)$$

等效异步机取电流 I_{as} 后，它传给其机械系统的电磁功率用于三下开：① 列车的前进运动；② 电机、轮对和传动机构的旋转运动；③ 克服列车运行阻力 w 。后两项的作用力可用下式表示：

$$f = m(1+r) \frac{dv}{dx} \quad (5)$$

式中 $m = \frac{1000}{9.81} G$ —— 列车惯性质量 ($\text{吨} \cdot \text{秒}^2/\text{米}$)；

G —— 机车重量与车辆重量之和 (吨)；

$(1+r)$ —— 列车质量换算系数，通常可取为 1.06。

等效异步机三相电磁力矩可写成

$$\begin{aligned} T_e &= 3 T_{e0} \\ &= 3 C_T \phi I_{as} \cos \varphi_a \end{aligned}$$

式中 C_T —— 常数。

电磁功率为

$$\begin{aligned} \omega_m T_e &= \omega_m T_L + \omega_m \Delta T \\ &= v w + m(1+r) v \frac{dv}{dx} \end{aligned}$$

因此 $3 K_s^{-1} C_T C_i I_{as}^2 \cos \varphi_a = w + m(1+r) \frac{dv}{dx}$

令 $Q_T = C_T C_i$ 则有

$$3 K_s^{-1} Q_T I_{as}^2 \cos \varphi_a = w + m(1+r) p v \quad (6)$$