

可控硅-感应电机型电极升降 自动控制系统

袁刚之

(洛阳钢厂)

摘 要

本文介绍了一种以相轨迹法为基础的电极升降自动控制系统(简称 KZJ 系统),求出了便于应用的相轨迹转换曲线,使一些用频率法无法研究的现象皆能用相轨迹进行研究。同时给出了系统特点、电机的最佳运行方式及系统各环节参数的整定方法。

一、概 述

我国用于炼钢的电弧炉容量多在 30 吨以下,因此电炉电极控制系统仍然以采用电气传动系统为宜。能源资源缺乏的日本和西德六十年代末期开始研制性能优良的 KZJ 系统。七十年代中期 KZJ 系统在国外逐渐进入实用阶段。

洛阳钢厂 1973 年开始研制国内第一套 KZJ 系统,1975 年初一次试炼成功,1977 年移交生产。至今累计炼钢炉数已超过 3400 炉¹⁾。

KZJ 电炉电极控制系统是位置调节系统,其原理见图 1 所示,系统的调节任务是维持炉内电弧功率不变。系统采用动态性能好的鼠笼电机作传动电机。速度调节采用可控硅定子调压调速法。电机为正、反转可逆运转方式。系统采用串电抗和带整流桥的阻容保护接线及抗干扰强的封锁装置,成功地解决了可控硅的寿命问题。为使电极在 5.55 米/分的高速下稳定工作,增设了工作点制动力矩加大环节,使制动时间只有 0.02—0.06 秒,系统采用转动惯量小、启动力矩大(达 9.5 公斤-米)的杯形实铁芯作电机转子启动时间仅 0.12 秒。电机为水冷外壳,电机正、反转启动次数虽达每分钟二百余次,仍能可靠运行。

系统工作过程如下:电极短路时, B_1 副边电压升高, B_2 副边电压降低,使 AMP 输出端 S 电位为负, T_1, T_3 导通;触发电路输入移相

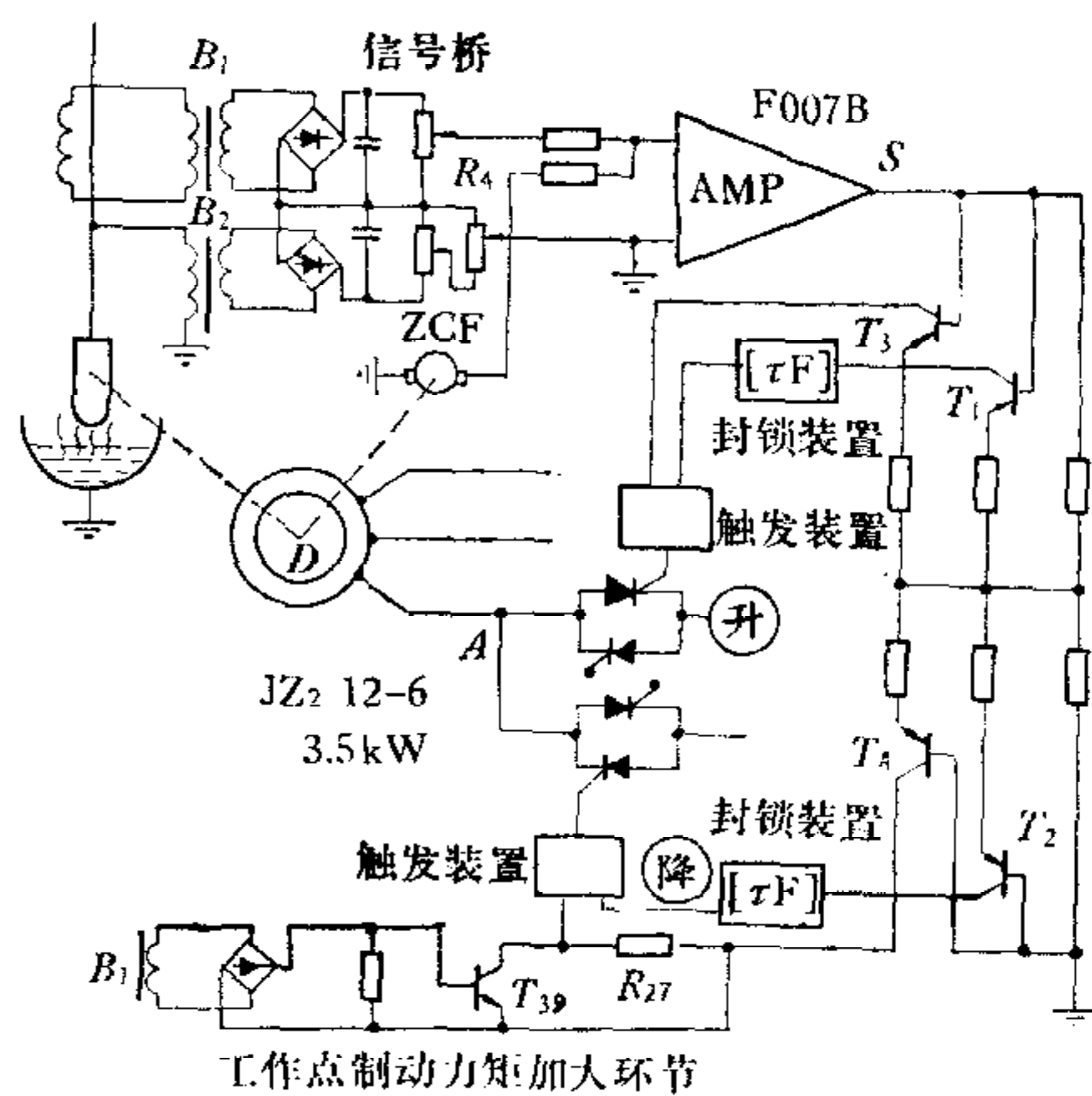


图1 KZJ系统原理示意图

本文原稿于 1980 年 6 月 1 日收到,1982 年 11 月收到最后修改稿。

1) 截止到 1982 年 6 月底。

信号,但需等延时 14 毫秒解除封锁后,触发脉冲才送往上升侧可控硅。电机端电压升高,将电极提升,弧流 I_f 、信号 U_x 随之减小,当信号桥输出的正信号小于测速发电机电压 U_r 时,AMP 输出极性翻转 (S 为正), T_2, T_4 导通。同理需经 14 毫秒延时后,下降侧可控硅才导通。由于短路后的调节过程 I_f 由大变小, T_{39} 早已导通 (短接 R_{27}), 使下降侧可控硅能够全导通。而断弧引起的电极下降调节,因 $I_f = 0$, B_1 无电压, T_{39} 关断, R_{27} 使下降侧可控硅不能全导通。加给电机的电压较低,电极触及炉料时堵转力矩较小。

多年生产实践证明 KZJ 系统具有提升速度快、熔化时间短、电耗低、能熔化大块料、电极消耗低等优点。

二、高性能电极控制系统的特点

为节约电能,电极自控系统应设计成为最速控制系统。根据最佳控制理论,控制功率受限制的最速控制系统是继电型的。某一控制对象的传递函数为:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = bu, \quad (1)$$

$$\text{或} \quad Y(S)/U(S) = b/(S^n + a_1 S^{n-1} + \cdots + a_{n-1} S + a_n). \quad (2)$$

式中 u 的幅度是受限制的,即

$$-u_0 \leq u \leq u_0. \quad (3)$$

这种对象的最速控制规律是:保持控制信号为最大值,而信号的符号最多转换 $n - 1$ 次。由于不可能构制 n 维状态空间的转换曲面,实际系统只有在调节过程中,高阶导数被饱和的前置放大器滤掉时,才可降为 $n = 2$ 的系统。这时可应用继电原理进行系统设计。实践证明,只要合理应用非线性元件和反馈控制,就能得到接近于最速控制的高性能系统。

这种近似最速系统的调节特点为^[1]: 当大扰动出现后,电机加速度 (端电压) 立即达到极限值,使电机速度迅速上升,在速度达到极限值以前,加速度一直保持最大;速度达到极限值后,加速度回到零值。只要电机以极限速度向目标运动,加速度就一直为零,运放和可控硅放大器处于饱和状态,即系统处于开环控制,在非线性的状态下工作,这时系统的高阶导数不起作用。只有当接近转换点 (或零误差位置) 时,系统才进入线性工作状态。在速度反馈电压大于信号电压时,控制放大器反号使电机产生最大反向力矩,电机以最大减速度制动,直到误差为零。(系统在这一段的行为,视整定参数间的不同关系,而显得十分不同。) 只要转换时刻选择适当,系统的调节过程可以做到既无超调又是最速的。因此非常小的线性区是现代高性能系统的重要特点。

三、电机的最佳运行方式

制动段弧长 L_f 的大小和能达到的提升速度,主要由制动力矩决定。因此加大制动力矩是提高调节品质的根本措施,产生最大启、制动加速度的运行方式,就是电机的最佳运行方式。

KZJ 系统的电机运行方式分为可逆运转方式和升靠电机力矩、降靠自重的对拖方式两种。下面对这两种运行方式进行分析。

设同一台电炉的电极用同样的交流电机作传动电机。由机械特性图 2 可见，对拖方式仅在一、四象限内运行，而可逆方式则可在四个象限内运行。显见对拖方式 $M_x < M_0$ ，且 $M_s + M_x < M_0$ 。可逆方式有 $M_x \gg M_0$ ， $M_x + M_s \approx 2M_0$ 。因此可逆方式的制动加速度 A_{i1} 将远大于对拖方式的 A_{i2} 。但两种方式的启动加速度 A_q 可认为相同。这样当

$$L = \frac{V^2}{2A_q} + \frac{V^2}{2A_i}$$

和
$$V^2 = 2LA_q \frac{A_i}{A_q + A_i} \tag{4}$$

可见，系统所能达到的最高速度只与 A_i 的大小有关。将实际数据 $A_{i1} \approx A_q$ ， $A_{i2} = 0.0987A_q$ 代入 (4) 式。得 $V_1/V_2 = 2.358$ 。即当稳定程度相同时，可逆方式的允许速度是对拖方式的 2.358 倍。

本系统反接过程的示波图见图 3，波形图表明降压制动时间比全压制动时间长 3—10 倍，而对拖方式的制动时间比降压制动还要长得得多。由图 3(a) 可见制动时间仅有 20—60 毫秒，这表明全压反接制动力矩远远大于从机械特性得到的制动力矩。由文献 [2] 可知，用可控硅控制的感应电机，在发生反接制动后的第一个周波内，反接制动力矩往往达额定力矩的 9—10 倍。可见反接制动力矩大是异步电机的优点，进行系统设计时应充分利用这个优点。但触及炉料时电机堵转力矩不能过大（堵转力矩过大一则容易损坏设备，二则产生过大的空行程），又不允许电极下降时全力矩运行。为解决此矛盾，作者设计了一工作点制动力矩加大环节，该环节的原理示意图见图 1。其工作过

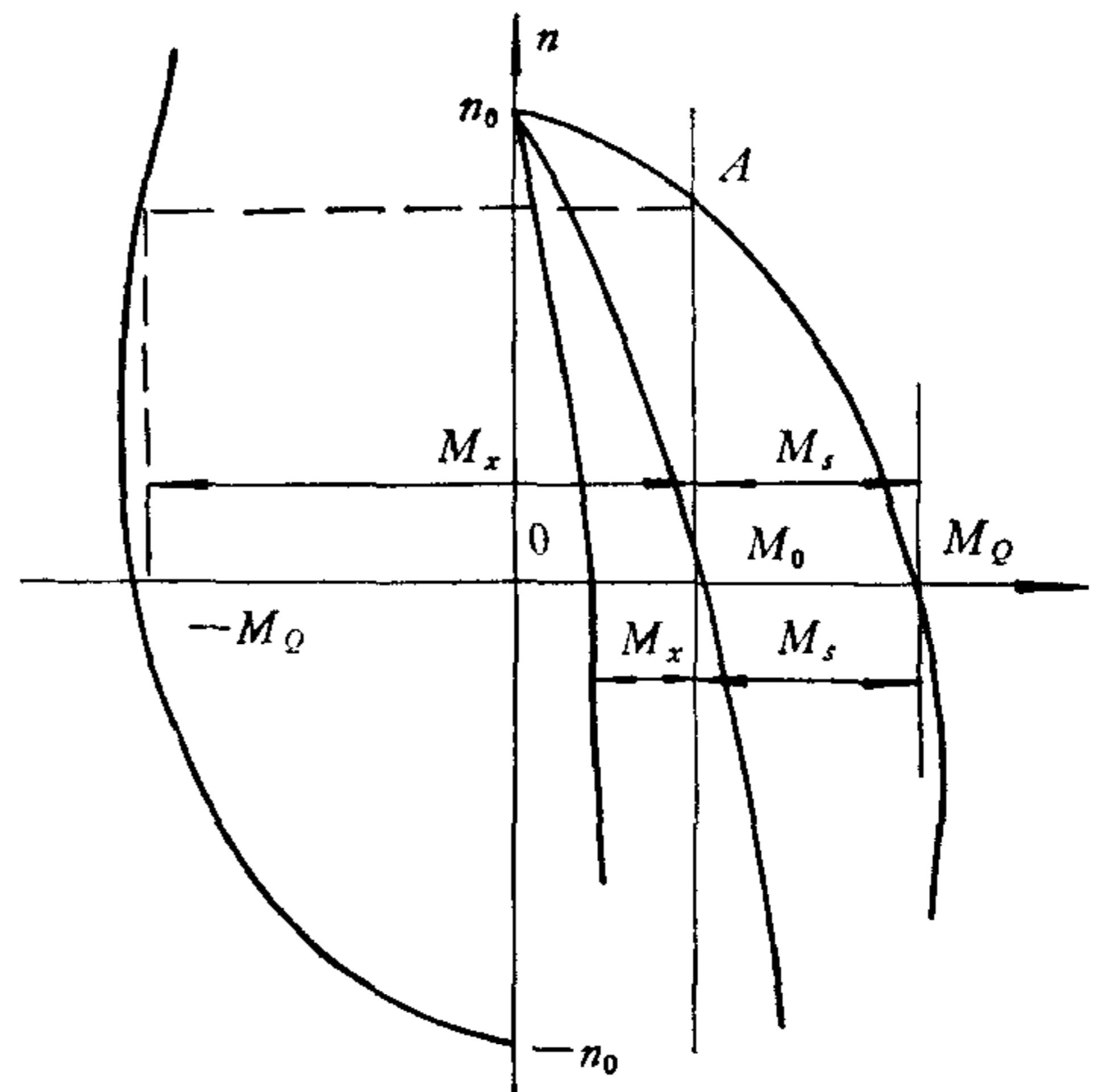


图 2 交流电机两种运行方式的机械特性

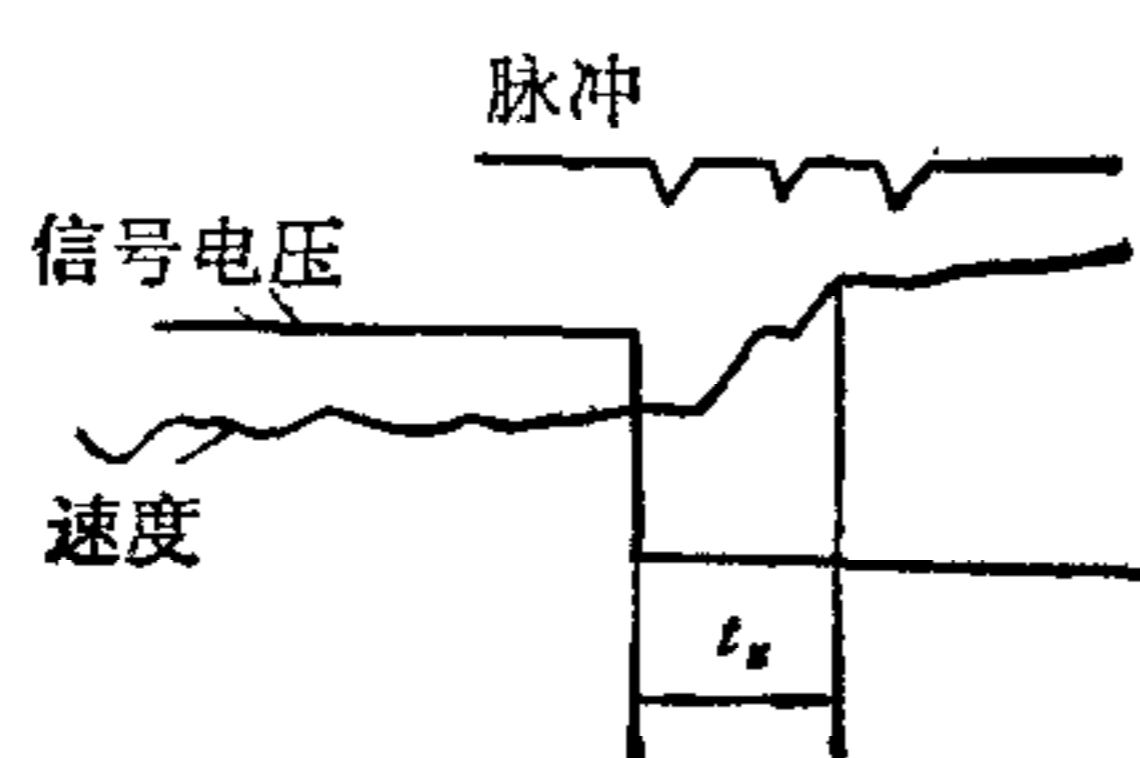


图 3(a) 全压制动波形
($t_s = 0.04$ 秒)

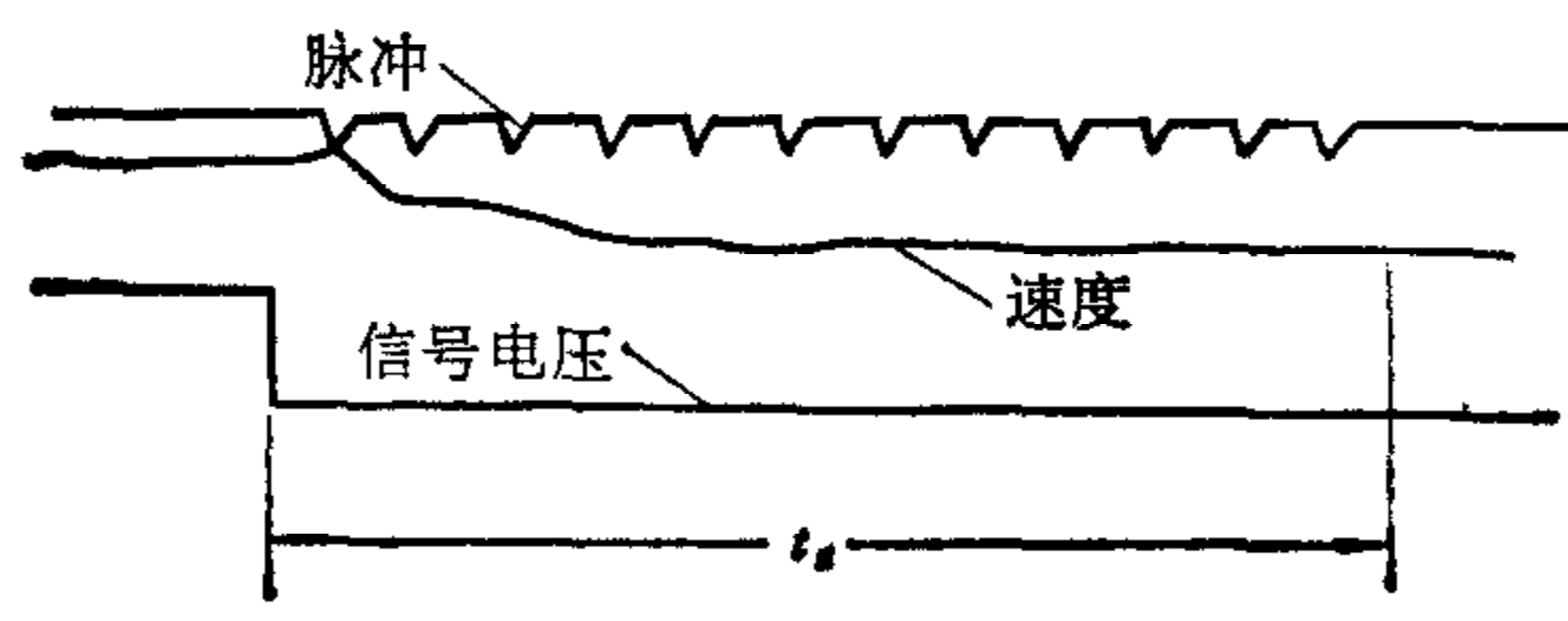


图 3(b) 降压制动波形
(线电压 220 伏, $t_s = 0.26$ 秒)

程已在概述中叙述。仅指出该环节只有当电极正向上升运动时才会使下降侧可控硅全导通，电机以全压制动。此时电机的大制动力矩不会产生任何危害，却可使 L_i 缩至最短。洛钢一号五吨电炉增设这个环节后，电极提升速度高达 5.55 米/分仍能稳定工作。文献 [3] 认为小电炉提升速度只能低于 5 米/分的说法有一定局限性。

四、自持振荡与应用非线性控制理论的必要性

可控硅-较差离合器式电弧炉电极自动调节系统动态计算¹⁾中用乃奎斯特向量轨迹讨论 KZL (转差离合器) 系统的稳定性, 认为 KZL 系统本身是不稳定的, 必须加超前器才能使系统稳定工作. 事实并非如此, 如 KZL 系统当调整正常, 有速度反馈但不加超前器时, 系统完全可以做到稳定, 且超调不大. 笔者认为由于存在库伦摩擦, 电极控制系统必然是渐近稳定的. 自持振荡是由于参数配合不当引起, 只要参数配合得当, 没有超前器只有速度反馈校正也足以使系统稳定. 现有的各种电极升降控制系统中稳定条件与输入信号大小无关的性质并不存在. 为搞清电极控制系统的稳定条件及找出参数配合关系, 本文采用平面相轨迹法讨论电极控制系统的行为. 不用频率法的原因见文献 [4].

五、电极控制系统的相轨迹

1. 信号电压与弧长间的函数关系

电极控制系统是以调节弧长来调节功率的. 作为系统输入的信号桥输出电压 U_x 与弧长 L 间是一复杂的函数关系, 经过推导得到下列表达式:

$$U_x = U_{pe} \left\{ \frac{\sqrt{I_d^2 - \frac{X^2}{Z^4} (a + bL)^2 - \frac{R}{Z^2} (a + bL)}}{I_e} \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{X_M \left[\sqrt{I_d^2 - \frac{X^2}{Z^4} (a + bL)^2 - \frac{R}{Z^2} (a + bL)} \right]^2 + \left[U_f + R_M \left(\sqrt{I_d^2 - \frac{X^2}{Z^4} (a + bL)^2 - \frac{RU_f}{Z^2}} \right) \right]^2}}{k_u U_e} \right\} \\ = U_{pe} f(L) \quad (5)$$

式中 I_e 为电炉额定工作电流(安), U_e 为电炉额定工作电压(伏), U_{pe} 为对应于 I_e , U_e 的桥臂电压(伏), K_u 为考虑换压开关位置的系数, I_d 为电极短路时的电流(安), X , Z , R , X_M , R_M 为电炉变压器和短网的有关参数. a , b 为电弧参数. 将弧长用相对值 l 表示, 可用 (5) 式画出 $U_x = \varphi(l)$ 曲线或表格以便使用.

2. 画相轨迹图的两个假定

1) 系统的线性区很窄, 可不考虑高阶导数. 即认为系统阶数 $n = 2$.

2) 为作图简便, 用等值匀加速运动代替实际运动. 为使 t_q 时间内的行程与实际行程

相等, 取平均加速度 $A_p = \frac{V_m}{2 \left(t_q - \frac{S}{V_m} \right)}$. 式中 S 为按实拍速度曲线计算出来的行程.

1) 该文系一机部电炉研究所资料, 1969 年.

3. 画电极控制系统相轨迹需作的变通

以速度反馈作校正时，通常求相轨迹转换点的方法见图 4 (a)。本系统弧长与信号电压间是 (5) 式所示的复杂函数关系。求转换点 Z 不能再用通常的方法，应改变画图方法，即用相轨迹 $l = \sqrt{2a_{\rho}l}$ 乘以 ξ 表示测速发电机等值电压；同时将 $U_x = \varphi(l)$ 也画在同一坐标平面上(图 4 (b))，由转换线方程 $\xi l + \varphi(l) = 0$ 可以看出，乘以 ξ 后的相轨迹与 $\varphi(l)$ 的交点确定了转换点 Z。为了通用，在 $l-l$ 相平面上画图，这时相轨迹与 $-\frac{\varphi(l)}{\xi}$ 的交点就是转换点 Z。 $-\frac{\varphi(l)}{\xi}$ 就是转换线（或最优开关函数）。图 5 的相轨迹就是采用上述方法并参照文献 [6] 画出的。

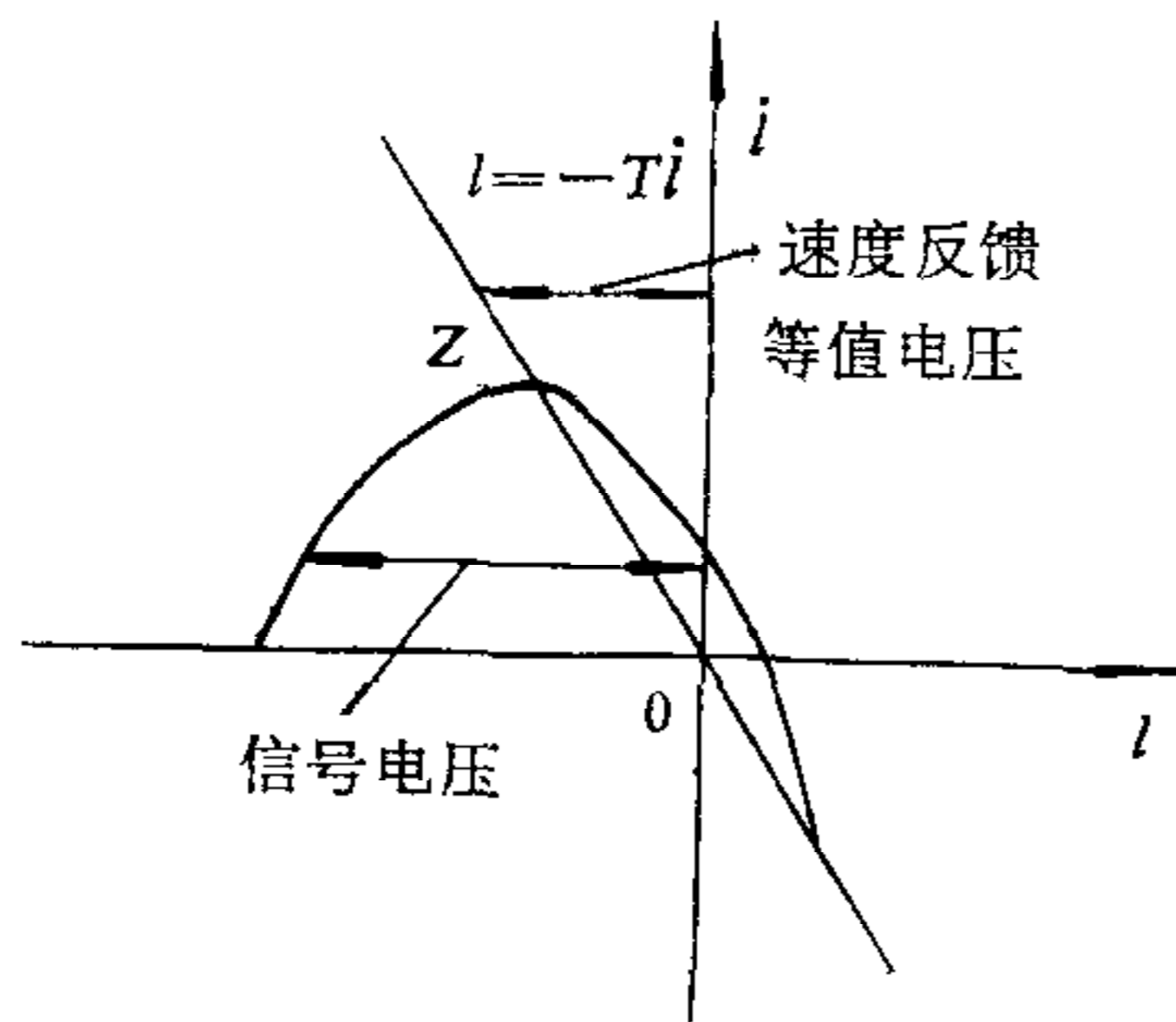


图 4 (a) 信号电压与位置偏差成正比时相轨迹转换点

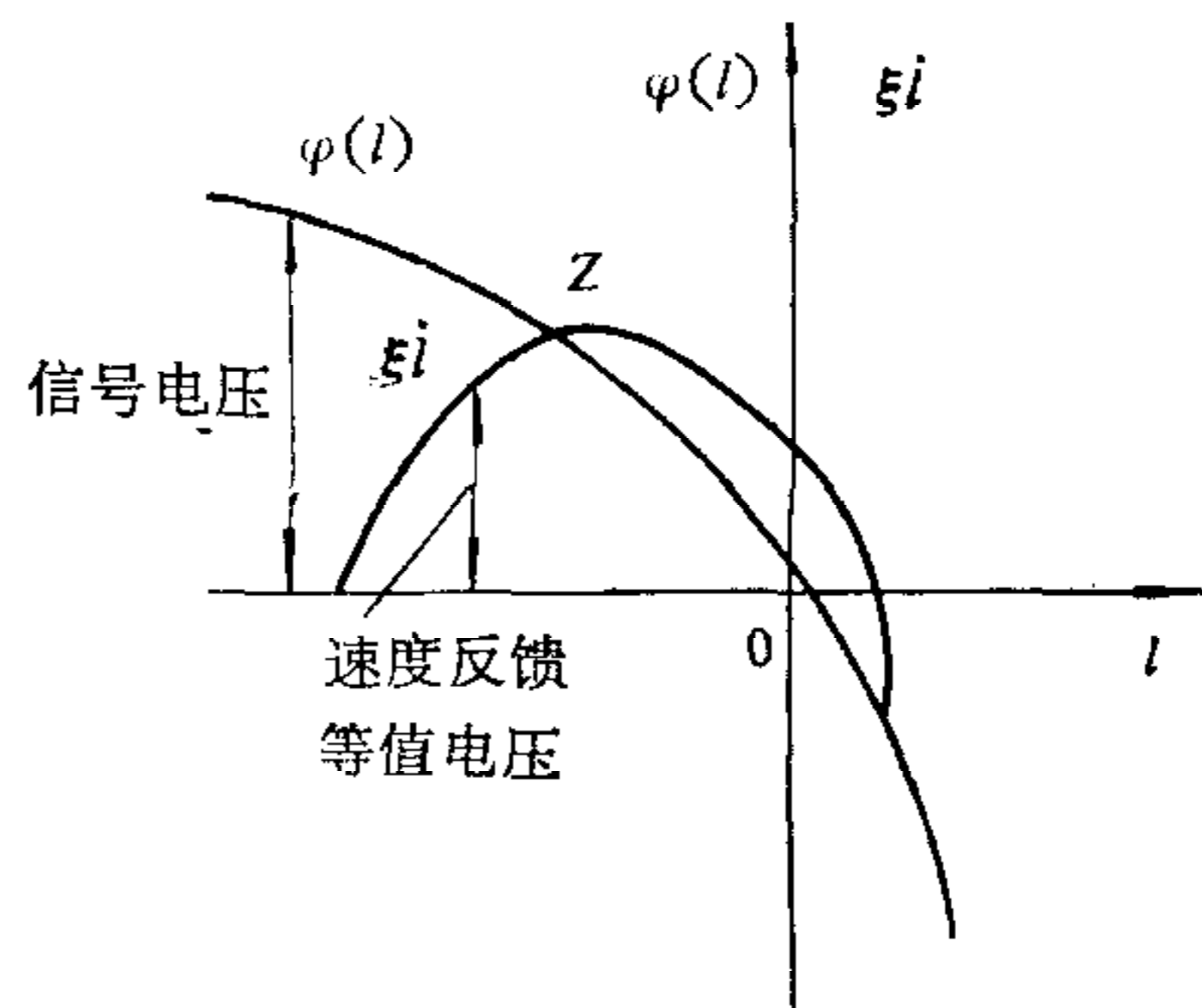


图 4 (b) 本系统的相轨迹转换点

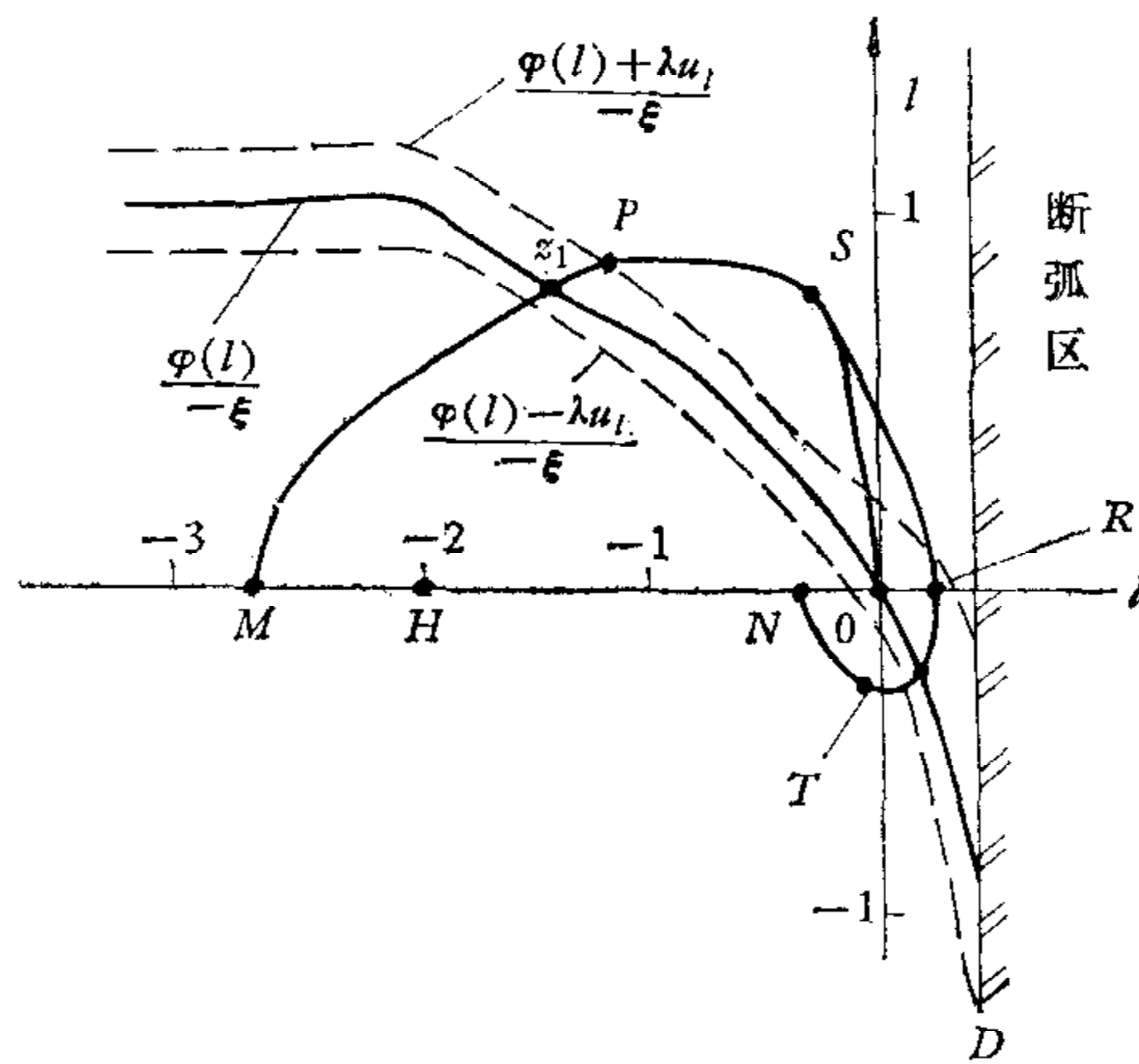


图 5 $u_L = 0, \xi \neq 0, \tau \neq 0, \mu \neq 0$ 时的相轨迹与转换点

u_L 为放大器(即系统)的不灵敏区； $\mu = \frac{M_{KN}}{M_{dQ}}$ 为库伦摩擦力矩 M_{KN} 的相对值； ξ 为 $i=1$ (速度最高)时，速度反馈电压折算到信号桥的等值电压(伏)； $\tau_d = \frac{T_d}{T_m}$ 为可控硅关断延时 T_d 的相对值； $\tau_f = \frac{T_f}{T_m}$ 为封锁延时 T_f 的相对值；HM 为空行程(齿隙、横臂挠度产生的)；MZ₁ 为启动段轨迹；Z₁P 为 T_d 延时时内轨迹；PS 为 T_f 延时时内轨迹；OR 为超调量；RZ₂ 为反向启动段轨迹； λ 为放大器线性区宽度。

图 5 表示 $u_L = 0$ 时的相轨迹，由图可见，即使系统放大系数为无穷大，只要 ξ 与 U_{pc}

配合得当,系统仍然可以稳定甚至无超调。

也可用类似方法给出 $u_L \approx 0$ 并考虑放大器线性区时的相轨迹。

4. 相轨迹表达的信息

电极控制系统的参数对品质的影响,以及系统中一些用频率法无法表示的现象皆能用相轨迹表示出来,见表 1。

表 1 相轨迹表达的信息

参数 项目	ξ			A_{pz}		U_{pe}		T_d	T_f	齿隙、挠度产生的空行程
	变大	变小	为零	变大	变小	变大	变小			
相轨迹的表示或变化	Z 点左移	Z 点右移	Z 点在纵轴上	l_t 变小	l_t 变大	Z 点右移	Z 点左移	用 Z_1P 表示	用 PS 表示	用 HM 线段表示
系统品质变化	超调变小	超调变大	多发生持续振荡	超调变小	超调变大	超调变大	超调变小	使转换速度增大超调变大	超调变大	使调节弧长大调节时间变长。

六、主要环节参数的整定

1. 信号桥平衡电压 U_{pe} 的选择

假定电极以最高速度向上运动,为了使信号偏差和速度在平衡位置同时等于零,转换点距平衡点的距离 L_t 可由下式算出

$$L_t = -\frac{V_m^2}{2A_{pz}} + T_f \left(V_m - \frac{A_{pK}T_f}{2} \right) + 2\theta_L, \quad (6)$$

转换点的信号电压

$$\varphi(l_t) = U_{pe}f(l_t). \quad (7)$$

由转换线方程求得

$$\varphi(l_t) = -\xi V_m^0 + u_L. \quad (8)$$

式中 V_m^0 为最高速度的相对值。式 (8) 右方的 ξ 值可用实验或计算方法求得, u_L 由实验求出。由 (7), (8) 两式得到

$$U_{pe} = \frac{-\xi V_m^0 + u_L}{f(l_t)}. \quad (9)$$

由 (9) 式看出, U_{pe} 不能像文献 [4] 那样随意指定为 6 伏, 而必须根据 ξ , L_t , u_L 等参数确定, 并按计算值整定。

以本系统参数为例: $A_{pz}=920$ 毫米/秒², $V_m=92$ 毫米/秒, $A_{pK}=40.55$ 毫米/秒², $\xi=5.1$ 伏, $u_L=0.35$ 伏。取不灵敏区滑行距离为 $0.41L_b^{1)}$, 则 $L_t=7.24$ 毫米。又由式 (5) 求得 $f(l_t)=1.765$, 故 $U_{pe}=3.094$ 伏。取 $U_{pe}=3$ 伏, 实践证明 $U_{pe}=3$ 伏可使本

1) 滑行距离 L_f 较难求, 其近似值 $L_f \approx \frac{2 \times 1.1 U_{pe} u_L f(l_t)}{a_{pq} \xi^2}$, L_b 代入本系统数据后, 求得 $L_f \approx 0.405 L_b \approx 1.65$ 毫米。

系统稳定工作。

2. 可控硅放大器不灵敏区 u_L 的选取

因 u_L 是信号电压 U_x 的一个值,故

$$u_L = U_x^0 U_{pc} = (I^0 - U^0) U_{pc} = \Delta I U_{pc}. \quad (10)$$

式中 U_x^0 , I^0 , U^0 为信号电压、弧流、弧压的标么值。如取 $U_{pc} = 3$ 伏, $\Delta I = 12\%$, 则 $u_L = 12\% \times 3 = 0.36$ 伏。

3. 速度反馈等值电压 ξ 的计算

根据具体电路,求出测速发电机最高电压,折算至信号桥的等值电压 ξ 即可。本系统当 1K 闭合时, $\xi = 5.11$ 伏, 1K 断开时 $\xi = 2.25$ 伏。

4. 放大器饱和倍数 ν 的计算

信号桥在电极短路时产生的最大电压 U_{xm} 与全力矩电压 U_{xftv} (使电机端电压为全压的最小信号电压)之比,即为放大器的饱和倍数 ν , 即

$$\nu = \frac{U_{xm}}{U_{xftv}}. \quad (11)$$

$\nu \gg 1$ 的系统调节时间短, 将本系统数据代入 (11) 式求得 $\nu = 11.76-15$ 。可见本系统线性区较窄。

七、结 论

(1) 电机最佳运行方式是全力矩正、反可逆运行方式。对拖方式和下降侧采用小容量绕组的方案都不可取。本文所述工作点制动力矩加大环节,能得到小的堵转力矩和大的制动力矩,系统在高速 (5.55 米/分) 下仍能稳定工作。

(2) 电极控制系统本身是渐近稳定的,自持振荡是由参数配合不当引起的;不加超前器只用速度反馈,系统仍能保持稳定运行并具有高灵敏度。

表 2 电极自动控制系统技术性能

型 式	比较项目	电极最大提升速度 (米/分)	不灵敏区 (%)	电机起动力矩 (公斤-米)	控制系统滞后时间 (毫秒)	机械系统滞后时间 (毫秒)	动作时间常数 (毫秒)	传动系统总滞后时间 (毫秒)
KZJ 型	洛钢	5.55 △	±6—12	9.5	12—16 △	30—40 △	150—160	160—184
	日本	5.0 (注 2)			20—50	50—150	100—400	120—450
KZL 型 (滑差离合器)		3—4	±9—25	2.0	12	115—280	225—380	281—392
KZD 型 (直流电机)		1.2—2.5	±10—15	2.5	12—16	120—180	245—300	247—312

注: 1. 有△符号者系该栏性能优于日本同类装置;

2. 5 米/分是日本大容量电炉的数据,对小型炉来说还要低些;

3. 日本 KZJ 型装置的数据摘自《电炉》杂志 1977 年第 2 期 43 页。

(3) 用等值匀加速运动代替实际运动而作出的相轨迹图是研究电极控制系统的—一个

有效的工程方法。实践证明下列结果是正确的：1) 窄线性区是现代高性能系统的重要特点。系统稳定与否，不取决于线性区的宽窄，而取决于转换时刻是否适当（参数配合是否适当）。为提高系统性能和灵敏度增设运算放大器是合理的；2) 电弧、变压器、短网参数及 U_{pc} , ξ , λ , u_L 等量对调节过程的影响，皆能简便地转换成曲线 $\frac{\varphi(l) \pm \lambda u_L}{-\xi}$ 表示；3) 相轨迹可清楚地表示 M_D , M_Z , M_{KN} , T_d , T_f 及挠度、齿隙诸量对调节过程的影响；4) 参数计算的新公式具有简单易算、误差小的优点。

(4) 理论和实践都证明 KZJ 系统是完全可行的，是电传系统中性能较好的一种。本系统的几项性能指标与日本同类装置的比较见表 2。

参 考 文 献

- [1] L. B., Fracesco, Optimun Synchronization of Some Saturated Control Systems *IEEE Transactions on Automatic Control*, 14(1969), 198—199.
- [2] Л. П. Петров, Модерирование Асинхррных Электроприводов С Тиристорным Управлением, М. Энергия, (1977), 72—75.
- [3] 最近电弧炉的电压电流调整装置及应用, 电炉 (1977 年), 第二期, 37—43.
- [4] [日]上滝致孝等, 自动控制理论, 国防工业出版社, (1979 年), 234.
- [5] А. А. Красовский и Г.С. Поспелов, Основы Автоматика и Технической Кибернетике, Госэнергоиздат (1962), 410—434.

AN AUTOMATIC ELECTRODE CONTROL SYSTEM USING THYRISTOR-INDUCTION MOTOR

YUAN GANGZHI

(Leyang Steel Works)

ABSTRACT

This paper introduces an automatic electrode control system (KZJ system) designed on the basis of analysing phase loci. System characteristics, optimal operation mode for the motor, and new methods for regulating the parameters of the main links in the system are also given. Some phenomena which cannot be investigated by frequency method can be analysed by phase loci.