

东北大学
硕士学位论文
高速线机轧机活套与级联调控制系统研究
姓名：尹华
申请学位级别：硕士
专业：控制理论与控制工程
指导教师：秦树凯
2000. 1. 1

内容摘要

现代高速线、棒材轧机控制系统中，大都采用微张力和自动活套控制的方法改善产品的尺寸与精度。本文结合首钢第三线材厂高速线材轧机的情况，详细介绍了高速线材轧机粗、中轧区域的微张力控制系统及精轧区的自动活套控制系统。深入研究了其控制原理及控制过程，并对系统运行中的常见故障及系统稳定性作了详尽的剖析。

另外，在高速线材轧制中，由于精轧机速度高，动态响应快，活套调节造成精轧机轧制速度的波动，使得精轧机和夹送辊之间的速度控制成了能否高速轧制出优质线材的关键问题。对此，本文结合调试情况对粗、中轧区域的微张力控制系统、夹送辊的张力控制系统作了详尽的分析与研究。

关键词：活套控制、张力控制、稳定性分析

ABSTRACT

In modern control systems of high-speed wire and bar mills, control methods of micro-tension and auto-loop are in most cases employed to improve product's size and precision. This paper describes in detail, in the light of the high-speed wire mill of Shougang No. 3 Wire Rolling Plant, micro-tension control systems separately in crude and medium rolling zones, and auto-loop control system in fine rolling zone of the mill. The paper also deeply researches the control principle and the control process, and analyses common troubles and stability of the system's operation.

In addition, for fine rolling mill's high speed and quick dynamic response, loop adjusting causes rolling speed fluctuation of fine mill. Thus the speed control between fine mill and clamp rolls becomes a key problem whether high quality wire can be made by high-speed rolling mill. To deal with the problem, this paper thoroughly analyses and researches the micro-tension control systems, in crude and medium rolling zones, and tension control system of clamp rolls with reference to the actual commissioning situation.

Key words: Loop control. Tension control. Analysis of stability

第一章 高速线材轧机活套控制系统综述

本章论述了高速线材轧机活套控制系统在轧钢生产中的地位和作用,综述了活套控制系统的发展概况。

§ 1 活套控制系统在整个线材轧机中的地位和作用

几十年来,线材轧机的发展趋势是高速、连续、无扭、单线、组合传动、机械化、自动化。在高速线材轧机中,不论单线还是双线轧机,为保证轧出优质线材,其主要因素之一是要保证预精轧各机架之间以及预精轧和精轧机之间实行无张力轧制。由于轧制速度快以及其他方面原因的影响,要完全靠两机架本身的调速控制系统来保证无张力轧制而又不堆钢是难以实现的。因此,在这些机架之间各设一活套控制环节,一线中的各活套通过级联关系构成一活套控制系统,保证轧件在这些机架间在一定的套量下进行轧制,以实现无张力轧制的要求。

所谓活套自动控制就是以某一设定的活套高度为基准,用调节主机速度来维持活套量恒定,即在由主传动速度控制系统及活套装置的套量信号所组成的活套闭环控制系统中,当实际活套高度与基准值不等时,用其差值控制上游或下游机架主传动的速度,纠正秒流量偏差,以保持活套量恒定。

活套装置布置在各架精轧机之间的台架上。活套的型式根据工艺布置分为两种。一种是水平活套,即活套构成的平面与水平面平行,它的套的形成是靠调节相应机架的速度自由形成的,它对套量的存贮相对要大些;另一种是立活套,即活套构成的平面与水平面垂直,立活套有一推套杆帮助起套。

如图 1 是一个比较典型的高速线材机组的轧线设备布置图,在图中,1~4 号机架为粗轧机;5~9 号机架为中轧机;10~15 号机架为预精轧机;16~25 号机架是组合结构的精轧机。在 12~16 号机架之间,共有四个活套。

每一个活套的控制系统,实际上由三个部分组成。一部分是活套的逻辑控制部分,它负责产生起套、收套等动作,另一部分是活套的模拟量调节部分,它负责纠正活套的位置偏差。还有一部分是活套扫描仪,它是活套套量的检测元件,它的灵敏度和精度直接影响活套控制能否正常工作。

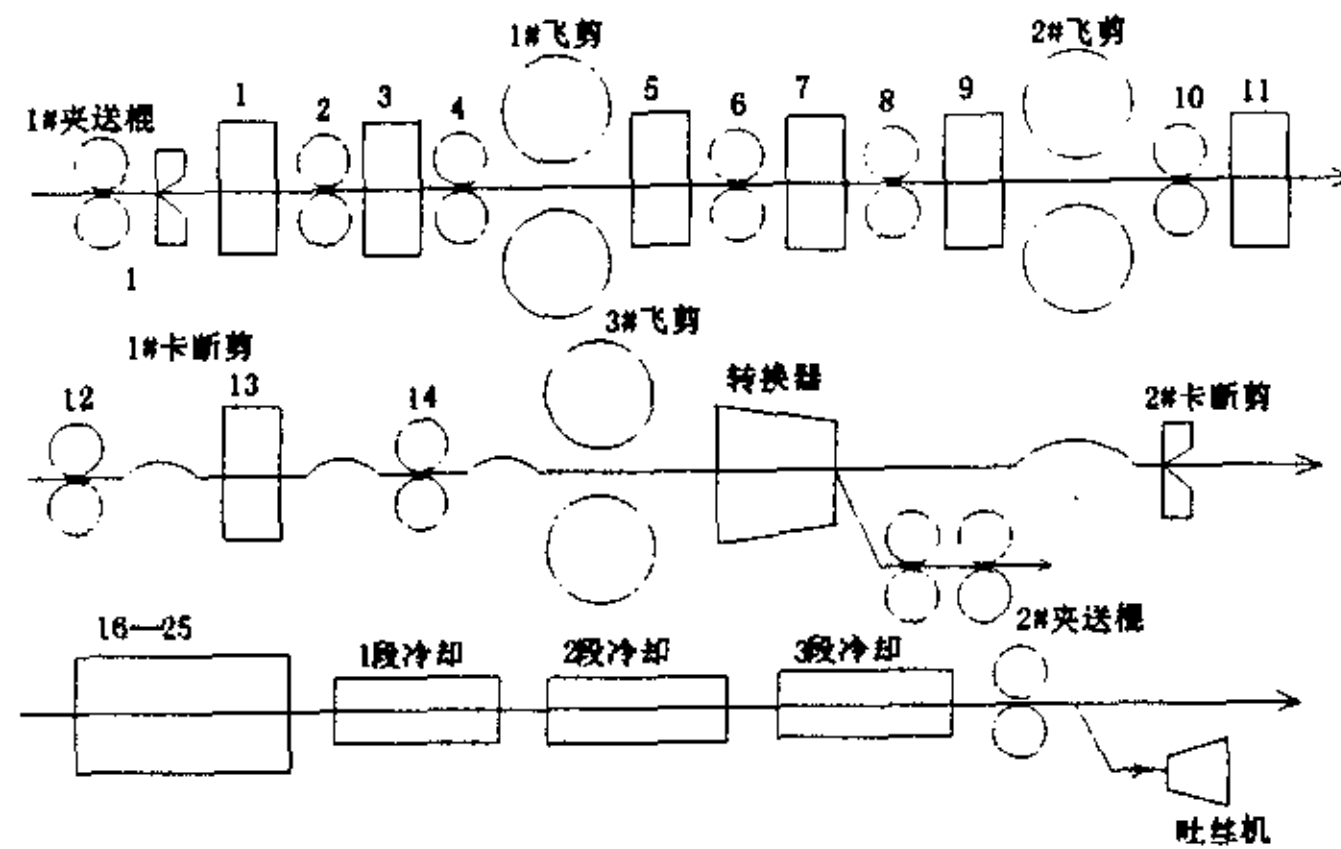


图 1 高速线材轧机轧线设备布置图

从图 1 中，我们可以看出：活套系统位于中轧机和精轧机之间。1 号立活套、2 号立活套、3 号立活套、侧活套分别在 12、13、14、15 号机架之后。这四个机架，与 10、11 号机架一起构成预精轧机。它的前面是粗轧机、中轧机。粗轧机、中轧机机架的轧速调节，一般采用“头部微张力”控制，它相当于一种开环控制，在外界干扰的情况下，极易产生波动。预精轧机后面是精轧机，精轧机轧制后的线材，经过热处理后，就是成品，精轧机轧制是线材生产的最后一道工序。精轧机工作得好坏，直接影响到产品质量。为了使精轧机能够稳定地工作，要求精轧机的入口速度稳定。由此可知，活套系统的主要作用有两点：

(1) 吸收轧线上的速度波动；

(2) 稳定精轧机的入口速度。它与产品的质量有直接的关系。

因此，活套控制系统在整个轧机系统中的地位极为重要，对活套的有效控制是必须解决的问题，也是轧机系统中一个很难解决的问题。

§ 2 现有活套控制系统综述

轧机的自控系统可分为两大类：

一种是基于 PID 古典控制理论的系统。这是八十年代国内外典型系统，绝大多数线材厂都归于此类。从系统控制上讲，是一对一的离散型 PID 系统，以每一机架为独立单元，通过级联调配合；在调速方法上是开环给定，闭环调速；在控制技术上，是数字技术与模拟技术相结合；在调速装置上，是由模拟电子线路构成的。

另一种是基于现代控制理论的自适应系统。这是九十年代最新开发的系统。典型代表是西德 AEG 公司。它在为德国新汉堡线材厂改造工程的设计中，首次采用了自适应系统；在为我国攀钢线材厂提供的设备中，也部分地增设了自适应功能。这种系统的基础是建立两级分布式计算机网络控制系统，尤其是作为上位机的过程控制机，承担着轧线数学模型的计算，采用实时多变量自适应解耦的控制算法，引入现代智能控制，将系统分层协调工作，在线辨识特征参数，自动校正调节特性，完成人机对话和自学习功能，构成了一个智能控制器。

现介绍两个比较典型的线材轧机活套控制系统。

一、马鞍山钢铁公司高速线材厂活套控制系统

图 2 是马钢高速线材活套控制系统示意图。

在图 2 中，1~4 为四架预精轧机；5 为活套扫描器；6 为活套模拟调节部分；7 为主传动调速系统；8、9 为控制上、下游调节的电子开关；10 为水平活套；11 为立活套；M 为主传动马达； U_{gn} 为主传动速度给定值。

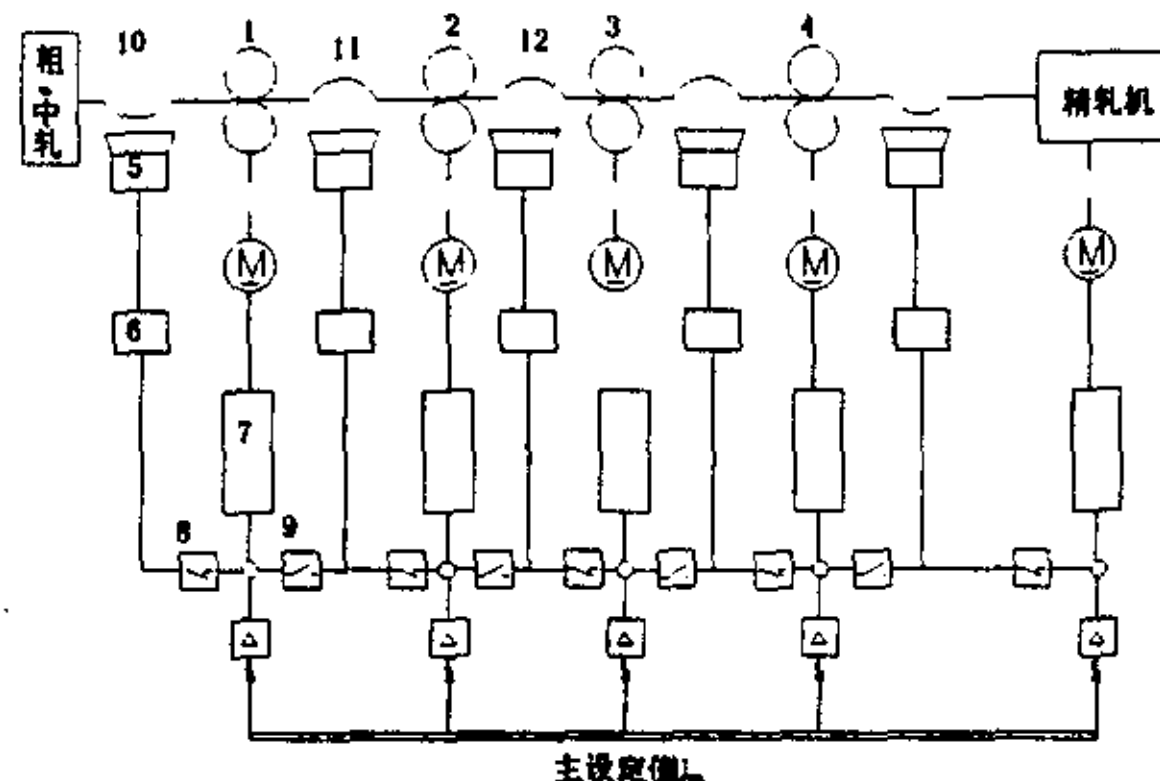


图2 马钢高速线材活套控制系统示意图

图 3 是五个活套控制环节之一的系统框图。

在图 3 中， U_{gp} 为套量的给定值，LP 为活套调节器， U_{gn} 为轧机转速的主设定值。

从图 2 和图 3 中不难看出：两机架之间的活套控制环节，实质上是一个三环位置调节系统，包括内环中调速系统的电流环、速度环和外环位置控制环。如果图 3 中，1 和 2 号机架间套量过大，活套扫描器检测到偏大的套量后，通过活套调节器给出相应的模拟调节量，再由两电子开关控制，可使下游机架 2 加速或使上游机架 1 减速，以保证套量维持在所要求的值上。不论上游调节（逆调）和下

游调节（顺调），总有一个轧机传动系统——可控硅直流调速系统，包含在活套控制环内。活套扫描器检测活套高度后，产生反馈信号，来调节活套系统。

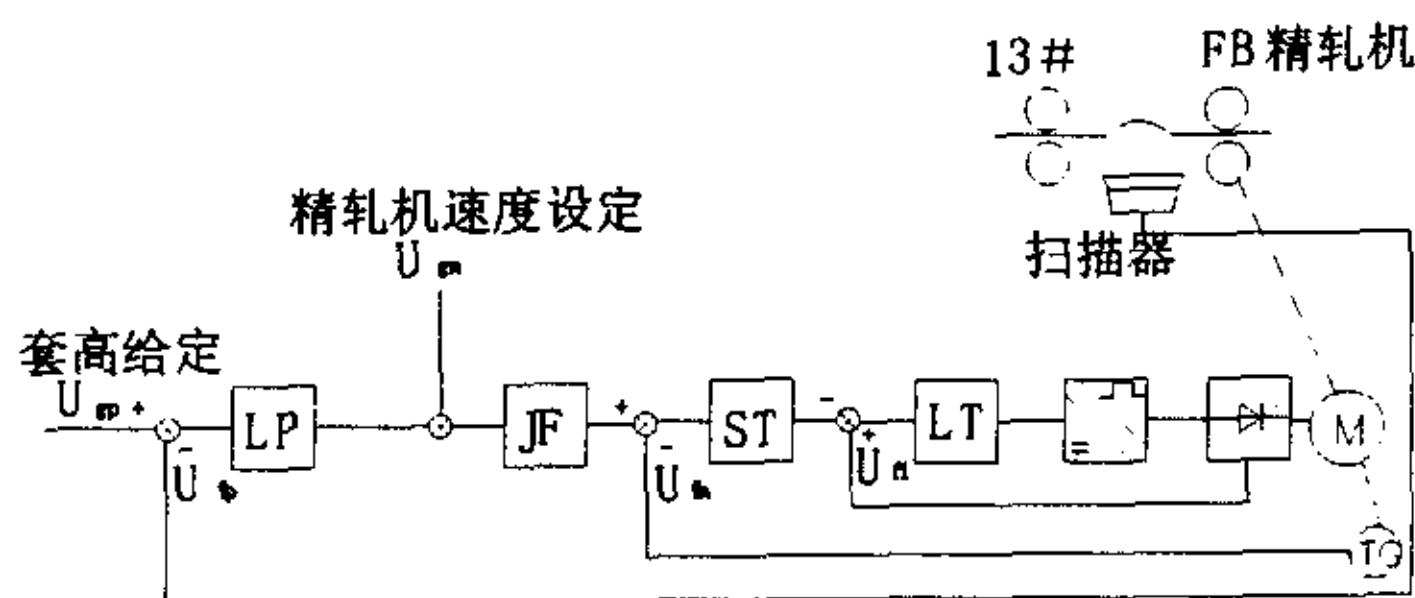


图3 活套控制环节系统框图

马钢高速线材控制系统的特点是：

- (1) 采用传统的模拟电子线路 PID 调节器。
- (2) 每一个反馈信号控制一个机架，机架与机架之间只通过级联来联系。

二、攀枝花钢铁公司线材厂活套控制系统

图 4 是攀钢线材厂活套控制系统示意图。

图 5 是控制方案示意图。其中： H_m 是参考模型输出； H_p 是被控对象的输出； e 是系统输出； U_r 是参考模型的输入； U_p 是控制对象输入； $D(Z^{-1})$ 是线形补偿器； $G(Z^{-1})$ 、 $Q(Z^{-1})$ 分别是参数可调的前馈和反馈控制器。

由这两个图中我们可以看出，攀钢的活套控制系统，采用模型参考自适应控制算法，取代了外环传统 PID 控制算法，将两个内环作为控制对象。攀钢这套系统具有以下特点：

- (1) 将现代控制理论引入活套控制系统，力图改善系统的控制性能。
- (2) 控制算法已无法用模拟电子线路来实现，只能依靠电子计算机来实现这种比较复杂的控制算法。

图 5 虚线以下部分由计算机实现。

近年来，国内外新建的高速线材厂很多，尤其是在国内，八三年以来，先后有首钢、鞍钢等十个厂先后从六个国家引进了高速线材生产线，这些生产线包括了当今世界上流行的四种主要机型：美国摩根公司侧交 45 度轧机；德国迪马克公司 15/75 度轧机；意大利

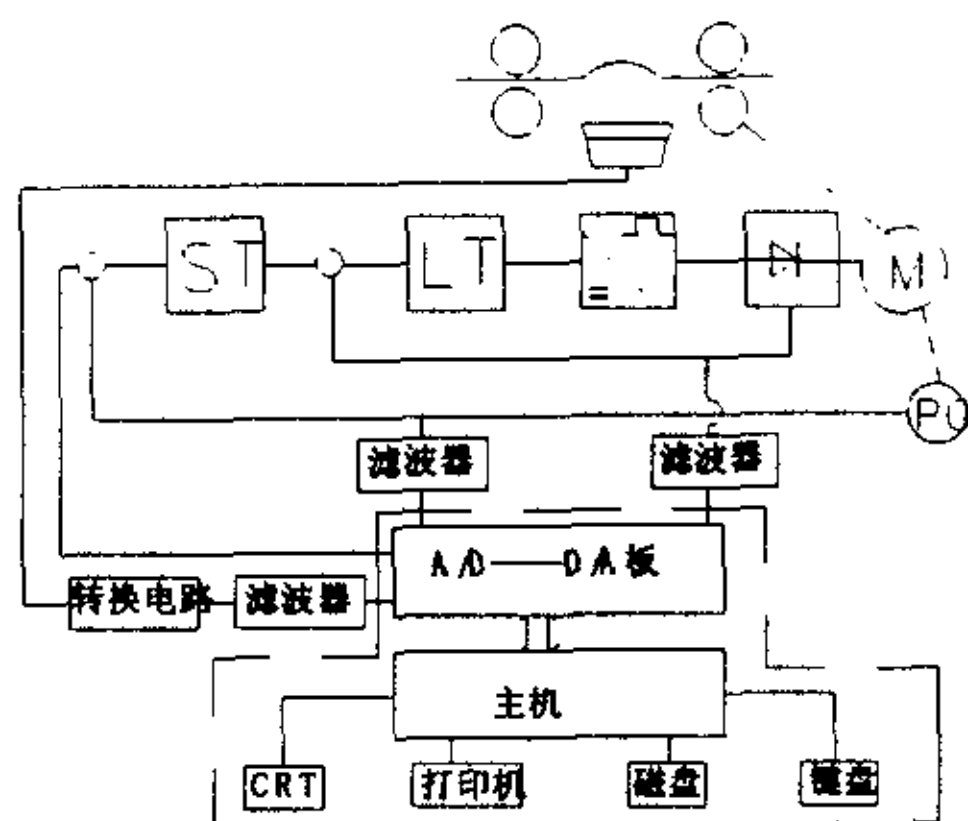


图4 攀钢线材厂活套控制系统示意图

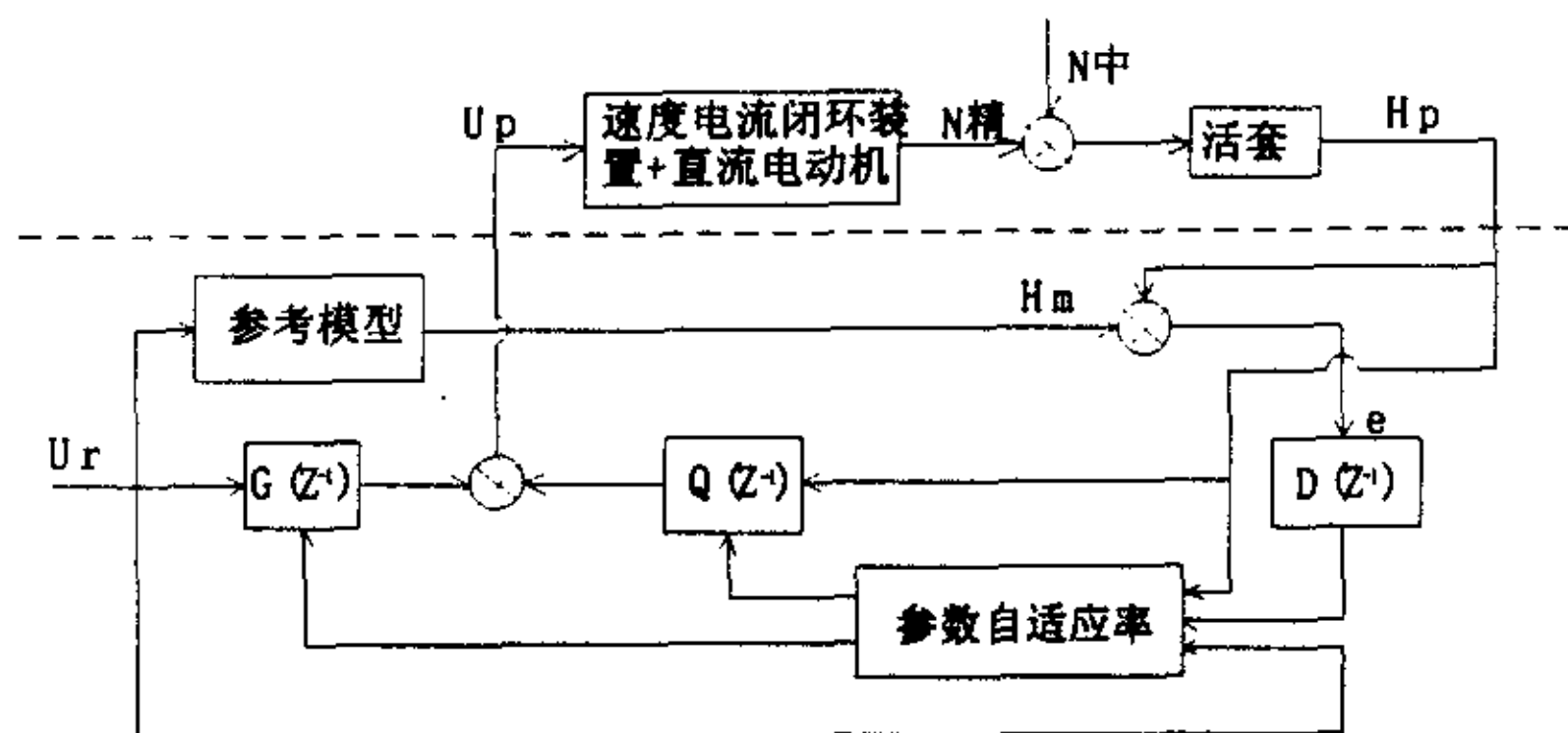


图5 攀钢线材厂活套控制方案示意图

达涅利公司平立交替轧机；英国阿希洛公司顶交 45 度轧机。这些轧机生产线一般在轧线上设置 1~4 个活套。

在国外，现有的高速线材轧机，如意大利阿尔法线材厂线材轧机，德国新汉堡厂线材轧机，西班牙阿维莱斯厂线材轧机，奥地利多维茨厂线材轧机等八十年代投产或改造的线材轧机，其装备水平与国内这些引进的线材生产线基本一致。这些轧机机组，一般也是在预精轧机（二中轧机）设立活套，在精轧机组之前设侧活套，整个轧机机组，由计算机分级控制，由设备控制级的计算机直接控制活套。

尽管活套控制系统种类繁多，但就其控制原理来说，都大同小异。这些活套控制系统大致可分为两大类：

（1）马钢型活套控制系统。采用传统的 PID 控制算法，以一个活套扫描器的输出作为反馈量，控制上游或下游的一个机架的升速

或减速，从而使活套套量保持一定。每一个活套控制环节，都是一个三环位置调节系统，PID 算法由电子线路来实现。

近年来，由于计算机技术的发展，高速线材轧机普遍采用计算机控制，这种控制系统的发展趋势是：外环的 PID 算法，由直接设备控制级的计算机来实现，而两个内环，依然由模拟电子线路来实现。这种趋势，在近年来引进的几套高速线材生产线上，表现得比较典型，它们全部采用了这种结构。

马钢型活套控制系统具有悠久的历史，其设计和调节都有一套比较成熟的经验。

(2) 攀钢型活套控制系统。这种系统代表了一种将现代控制理论引入活套控制系统，以改善系统的控制品质的一种尝试，它的算法比较复杂，只有在计算机上，才能实现。它是计算机控制技术应用于轧钢生产的结果。

攀钢型活套控制系统，现在还只是一种尝试，目前尚未见到其应用情况的详细报道。

第二章 活套控制的方式及其基本思想

在高速线材轧制中根据工艺要求,为了满足预精轧各架之间以及预精轧和中轧、精轧之间的无张力轧制,均采用了活套控制。用适量的高度转换成的套量,调整上、下游机架电机的转速,补偿由于各种原因所造成的主传动速差,使轧件在机架间形成满足控制设定的自由套量,以保证轧制过程的稳定和线材成品的精度。

活套控制综合了速度控制和相应的逻辑控制,构成了轧制过程中的中心控制环节,是线材轧机自动控制最精彩的部分之一,活套控制的水平决定了整套轧机的技术装备水平,现根据马钢高速线材轧机的活套控制对活套的控制方法及其基本思想作一简要介绍。

§1 R 因子的定义和级联控制方向

一、R 因子的定义和级联控制方向

对于任一机架,设其入口轧件截面积为 A_1 ,线速度为 V_1 ,出口处轧件截面积为 A_2 ,线速度为 V_2 ,则按照金属秒流量相等的原则,有

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_2}{V_1} = R$$

这里把 R 叫做减面率或 R 因子,它表示某一机架的轧件变形比,同时也反映出两相邻机架出口侧轧件线速度之比。

因此,从某种意义上讲,只要我们修改某机架的 R 因子,即可改变速度关系。控制系统中通常是保持某个机架(如精轧机组)的速度不变,通过改变其他各机架的 R 因子来按某一方向进行速度修正。若此方向为按自下游而上游的方向进行,则叫做逆流方向;反之,称为顺流方向。

二、活套控制的基本原理

自动活套控制是在对两相邻机架间产生的“多余”的轧件进行测量的基础上进行的。而各机架间“多余”的轧件由专门的起套装置(在控制系统的控制下)引导使其在活套台上形成活套。用位于活套台上方(或一侧)的活套扫描器,通过测量活套的高度来间接地测量活

套的长度。控制系统则通过比较设定的活套高度和实际测到的活套高度，自动连续地修正与此轧件有关的各机架的速度来保持活套的高度为设定的值。

这里所述的自动活套控制是建立在下列各项的基础上的：

(1) 活套的高度由一光电扫描器检测，结果变换成数字信号送控制系统中。

(2) 轧件进入下游机架前，下游机架的速度要稍稍降低，以便快速、安全起套。

(3) 起套时，仅调节下游机架的速度，以防止对活套前方机架产生干扰。

(4) 一旦起套完毕，正常的活套控制按设定的级联方向(逆流)进行速度调节。

(5) 收套时，要先降低活套高度，以防止由于突然落套可能引起的“甩尾”。

(6) 为了准确地进行控制，由专用的控制程序进行精确的轧件位置跟踪。

§ 2 活套的测量

通常由一光电式活套扫描器来检测活套的高度。该扫描器的检测角固定，其扫描范围靠调节其距活套台的距离来改变。扫描器的输出为脉冲信号，经一专门的转换电路转换后，可得一数字信号。

如图 1 所示， L 为扫描器距活套台的距离， B 为其扫描范围， α 为检测角。由图 1 可得：

$$B = 2 \times L \times \lg(\alpha/2) \dots \dots \dots (1)$$

设对应于 B 的转换后的最大数字量值为 $D_{\max}$ ，对应于某活套高度由脉冲 / 数字转换器输出的数字值为 d ，则实际活套高度(高于轧件进入活套台时的活套高度) H 为

$$H = \frac{2 \times L \times \lg(\alpha/2)}{D_{\max}} d - H_0 \quad (2)$$

式中， H_0 为轧件进入活套台时的活套高度值。

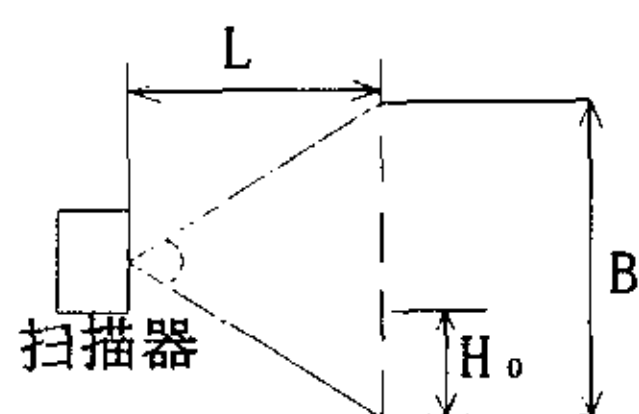


图1 扫描器的扫描范围

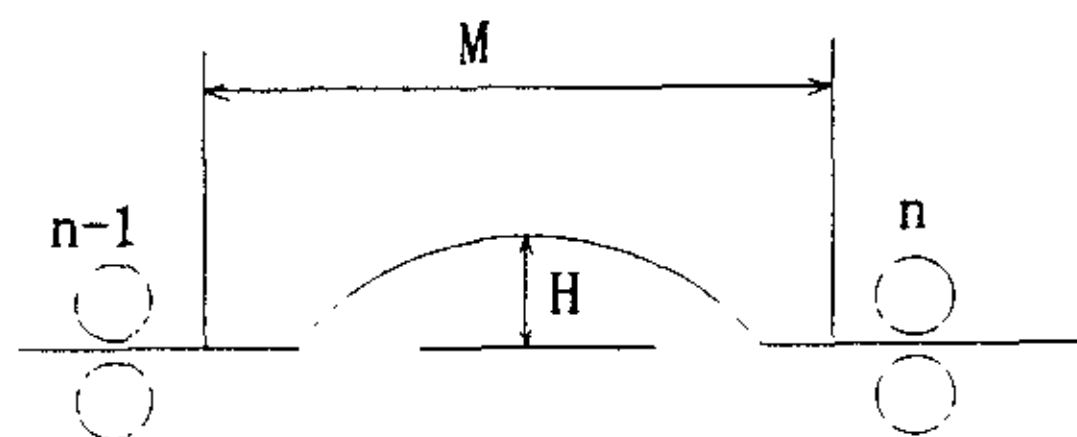


图2 活套长度的计算

在测得活套高度后，可用下面的算式求出相应的活套长度 S 。

如图 2，设活套弧曲线近似为一段圆弧，则

$$S = \frac{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + H^2}{H} \times \arcsin\left(\frac{M \times H}{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + H^2}\right) \quad (3)$$

按傅氏级数展开反正弦函数，并取前两项得：

$$S \approx \frac{4}{3} \times \frac{H^2 \times \left(\frac{M}{2}\right)^3}{\left[H^2 + \left(\frac{M}{2}\right)^2\right]^2} + M$$

因 $H \ll \frac{M}{2}$ ，故有

$$S \approx \frac{8}{3} \times \frac{H^2}{M} + M \quad (4)$$

式中， H 为控制高度，

M 为活套台的长度，即两支撑辊之间的距离。

§ 3 主设定控制方式

线材轧机根据各种不同的要求，主设定控制可分为上游调节、下游调节或者上、下游调节等三种方式。该厂高速线材轧机根据工艺要求和设备布局，主设定控制采用了上、下游调节的方式。（如图 3 所示）。

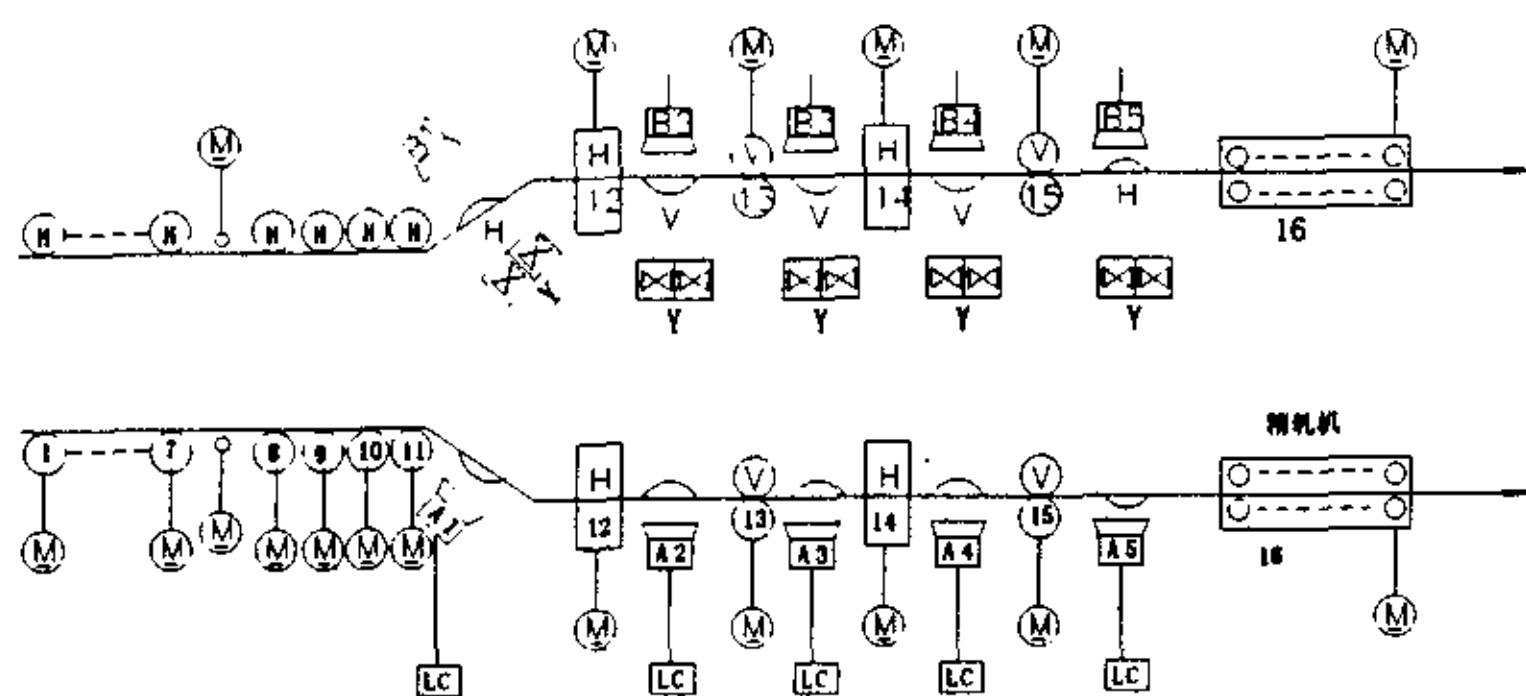


图3 主设备布置示意图

图中：H：表示水平安装；A1-A5：表示 A 线 5 个活套检测器

LC：表示活套控制器；V：表示垂直安装

B1-B5：表示 B 线 5 个活套检测器；Y：表示启、落套电磁阀

在整个轧制过程中，以 11 号机架为基准机架。粗、中轧机架进行上游调节（逆调），预精轧、精轧机进行下游调节（顺调）。分别具有单机和级联两种调速方法。粗、中轧的速度发生变化，产生速差，造成张力波动时，可以通过改变上游机架的速度进行单级或级联校正。使波动影响向上游调整，逐步清除。

预精轧、精轧的速度发生变化时，由于有活套产生不了速差。但速度的变化，使活套偏离了所设定的高度值。造成活套波动时，可以通过改变下游机架的速度进行单级或级联校正，使波动的影响向下游调整，逐步消除。

在整个轧制过程中，上、下游调节可同时进行，这样的调速方式，基本保证了两线预精轧的速度调节相互独立，有效地解决了两线轧制时，中轧和预精轧的速度配合问题。然而，在实际轧制过程中，由于上游机架速度的波动，造成的活套波动，对下游机架间活套的影响将始终存在。轧机速度波动是客观存在的，其原因大体上可归纳为：

(1)主传动转速变化的影响。包括各种随机调节（手动调节、自动调节）的影响和主传动转速受各种干扰（电网频率、电压波动，负荷变化）的影响。

(2)粗中轧轧件尺寸变化大的影响。

(3)辊缝调节的影响。

(4)辊径变化的影响（温度膨胀、磨损）。

(5)轧件温差的影响。

(5) 轧件温差的影响。

这些影响因素变化导致预精轧、精轧的下游调速，造成活套的波动，致使精轧机组的频繁调速，给精轧机组和夹送辊之间的速度匹配带来困难。同时也给产品的最终尺寸带来影响。为解决这一问题，在控制方式上，电控部分可作如下改进：

(1) 精轧机和夹送辊的速度配合，由于夹送辊的动态响应慢，在轧制过程中采用了夹送辊速度开环，用电流环响应快的特点，控制夹送辊电流限幅值的方法，形成夹送辊张力控制方式。

(2) 在活套控制中，采用了对精轧机速度变化率的控制，使之和夹送辊速度变化率接近一致。

(3) 在活套控制中，当 11 号机架抛钢后，以该线精轧机为基准机架，精轧机、预精轧机从下游调速改为上游调速。使线材尾部顺利、稳定地通过预精轧机、精轧机。

根据工艺要求所设计的主设定方式，基本上决定了活套的控制方式。严格的说活套控制是主设定控制的一部分，或者说是主设定控制过程中的一种补偿。

§ 4 活套控制的基本思想及方式

活套控制是通过改变相应机架的速度主设定基准值实现的，为对于前述客观存在的影响因素而产生的速度偏差，经过活套控制的消化，缓解在自由套量中，这样把对影响产品质量的速差控制转变为对轧件的套量控制 ($\Delta L \propto \Delta V$) 利用设定和实际的套量偏差进行比较，检测偏差，纠正偏差，这是活套控制的基本思想。

活套控制的方式按控制方式分：有速度控制、逻辑控制；速度控制又包括了模拟量控制和数字量控制。按控制过程分：有头部启套控制、中间轧制的套量控制、尾部收套控制。如图 4 所示。

图 4 中 W_{n12} 、 W_{n13} 、 W_{n14} 、 W_{n15} 、 W_{n16} 分别是主设定控制计算机给出的主传动速度基准值。 $W_{LC12} \sim W_{LC16}$ 是通过活套扫描器检测到的轧件信号与设定的套量高度比较，经过活套调节器处理后，再叠加到主传动控制系统基准值回路中的活套模拟调节值，达到转速调整，控制套量的目的。在轧制程序中主基准值基本保证了正常的轧制关系后，活套控制的模拟调节部分应能保证套量控制在设定的套量高度上。10% 的模拟调节量用以改变相应机架的转速即可满足正常起套和套量高速控制的范围。为了保证相邻机架间的速比关系，

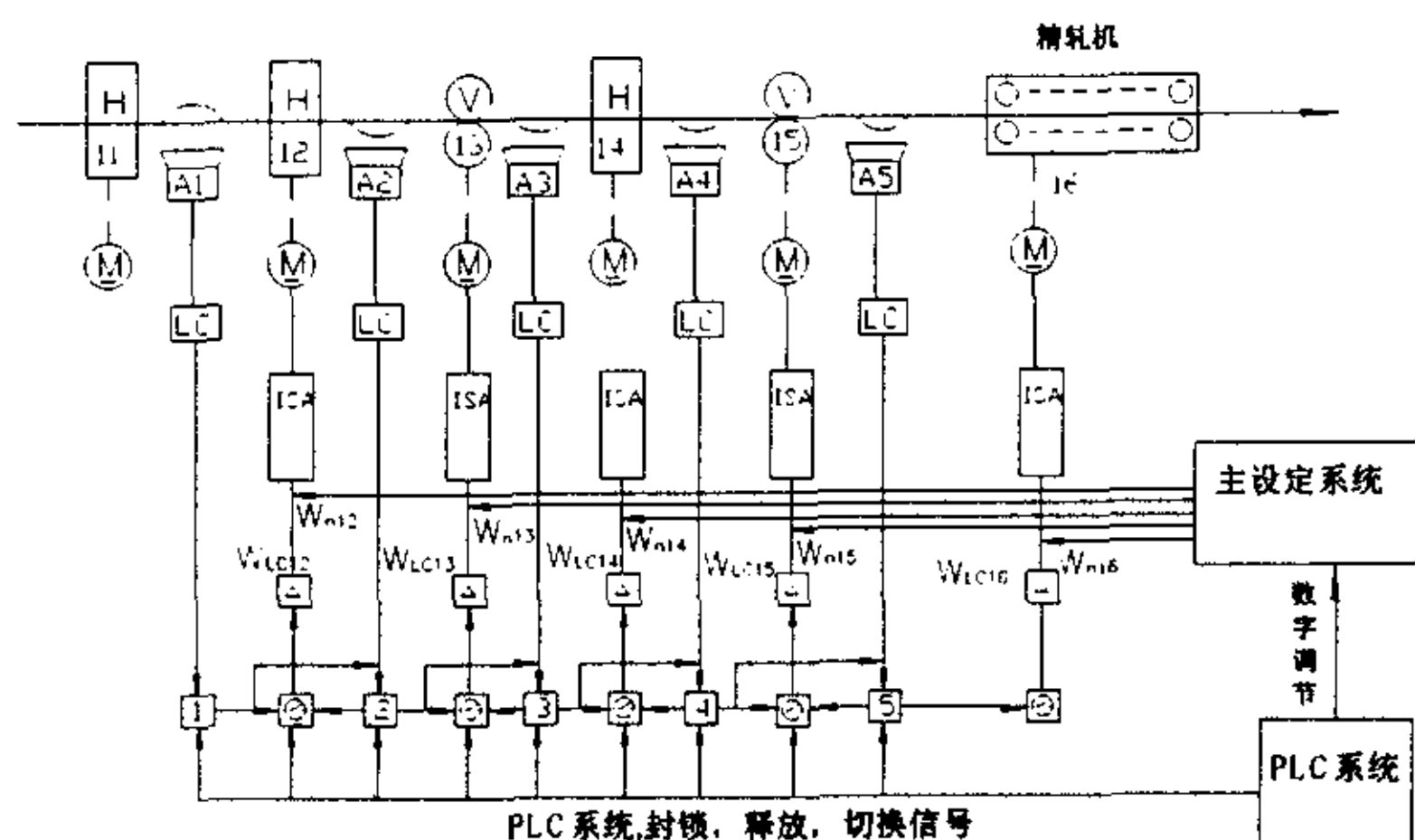


图 4 活套控制结构图

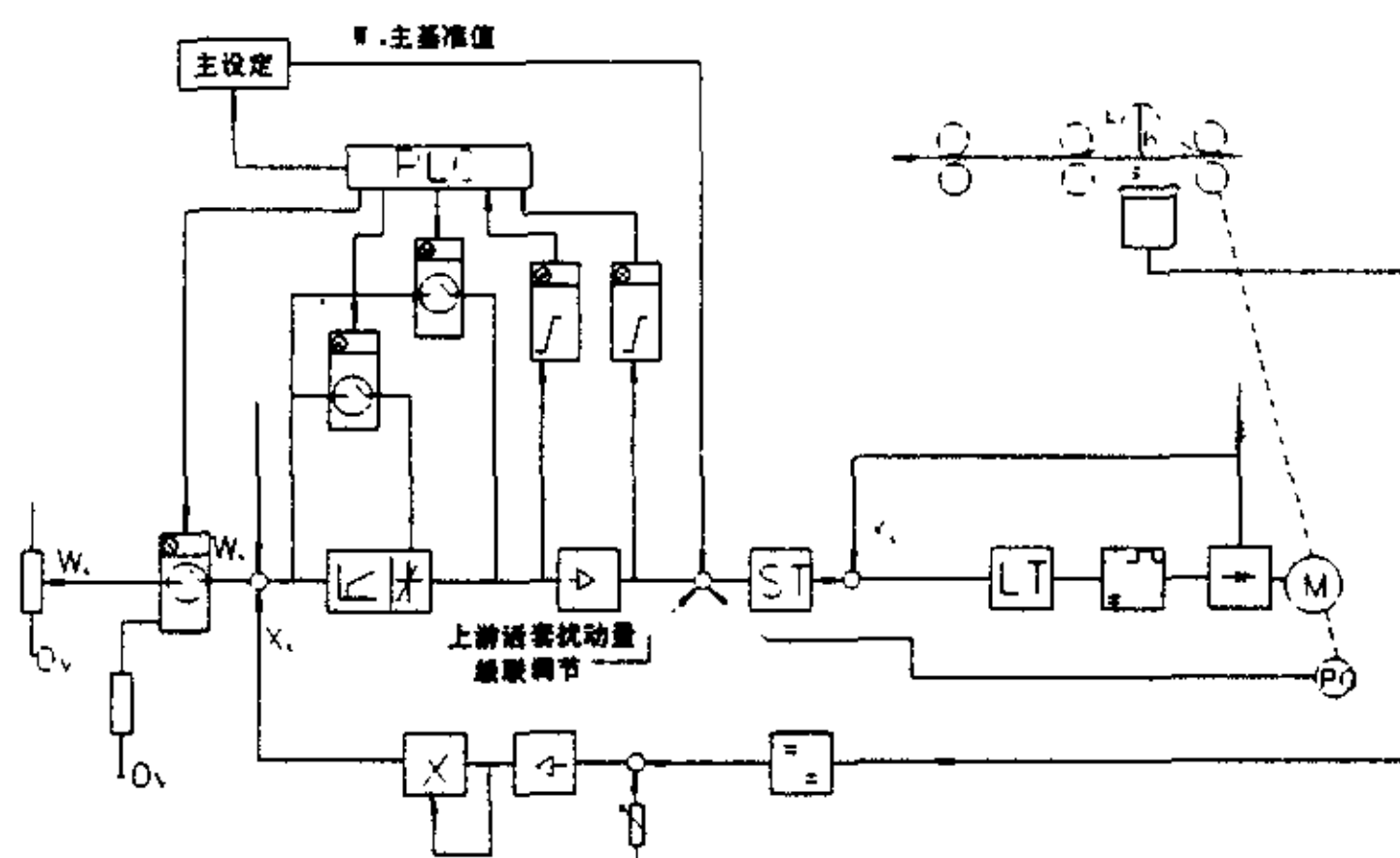


图 5 单个活套控制图

在以 11 机架为基准机架下游级联调节方式中, 通过 2、3、4、5 放大器同时向下游级联。A1 活套的调节量不但改变 12 号机架电机的转速, 且同时按同样的值改变 13、14、15、16 号机架电机的转速。保持了各机架间的速比不变。与此同时, A2 活套以同样的方式向下游级联, 同时改变 14、15、16 号机架电机的转速, 以此类推直到 A5 活套, 这样的模拟量调节方式, 主控制原则上保证了连轧中五个活套的相对独立。

在以精轧机为基准机架，向上游调节的方式中，活套的调节是单机逐个进行的。当 11 号机架前光电管检测到轧件尾部时，活套的逻辑控制将五个活套调节器的输出封锁（即暂时不进行调节）。同时，记忆环节保持封锁前的活套调节值，维持切换过程，然后逻辑

控制部分将五个下游调节的活套控制，同时切换成上游逐个调节。A5 活套的套量高度控制 15 号电机转速。由于 15 号电机的转速变化造成的活套套量高度发生变化，又通过 A4 活套的偏差控制 14 号电机的转速。以此类推，12 号机架前的水平活套，由于 11 号机架已抛钢，成为自由收套。

在活套控制过程的上游调节方式中，主设定系统仍是采用下游级联调速方式，因为级联保证了机架间的相对速比不变，所以和活套控制的上游调节是相对独立的。

以上的调节均是活套模拟量的调节。

在模拟量的调节过程中，根据活套套量高度设定值和实际值比较，在活套控制中有“过大”“过小”控制。即通过活套控制调节器输出的大偏差信号（“过大”，“过小”）。通过主设定控制计算机直接改变相应机架的主设定基准值，主设定的调速方式是以步长为单位，每一步长是 5 转/秒，用这样的速率改变相应机架的主基准值，使套量高度大偏差（“过大”，“过小”）信号向减小的方向调节。整个调节过程的结束，直到套量高度大偏差（“过大”，“过小”）信号不再出现为止。由于主设定系统是根据活套控制中的“过大”，“过小”信号，通过逻辑控制部分的计算机用输出脉冲长、短进行调节转速的。活套的“过大”，“过小”相当于主设定系统的给定。所以称这部分为活套控制中的数字量调节部分。数字调节的这种幅值小，调节慢的特点，是活套控制系统中的累积校正。

数字量调节部分还有一个功能，即在整个轧制过程中，如果五个活套套高大偏差信号（“过大”，“过小”）在规定的时间内都不出现。通过逻辑判断，可以认为轧制速度是合理的。故主设定系统将现在的机架主基准固定。保证下一根轧件通过时，有良好的轧制速度配合（最佳记忆）。

活套的启套控制：包括活套的头部控制，即每个活套扫描器检测到轧件头部到来后，进行头部计时控制。相应的活套调节器躲过咬钢动态速降后，即时释放和起套辊的即时启套（考虑到电磁滞后死区）的动作配合控制。以及五个活套的联锁控制。

活套的尾部控制：即 11 号机架检测到轧件尾部后，同时存贮五个活套调节器的调节值，五个活套调节器同时封锁，将下游调节切换成上游调节。同时进行逐个活套尾部计时控制。进行相应地启套辊落套控制。

以上是活套控制的方式及基本思想。为实现这样的控制方式，

必须具备有性能可靠、稳定的活套位置检测装置，稳定的活套位置控制环节，高性能的传动调速系统，以及与之相配合的逻辑控制系统。

第三章 首钢三线材精轧机级联调的全数字控制系统

§1 首钢第三线材厂的系统构成

首钢第三线材厂设计投产四条轧线，选用摩根轧机，主传动为七台粗轧机、六台中轧机和有十个机架的精轧机组。主轧线设备如图一所示。

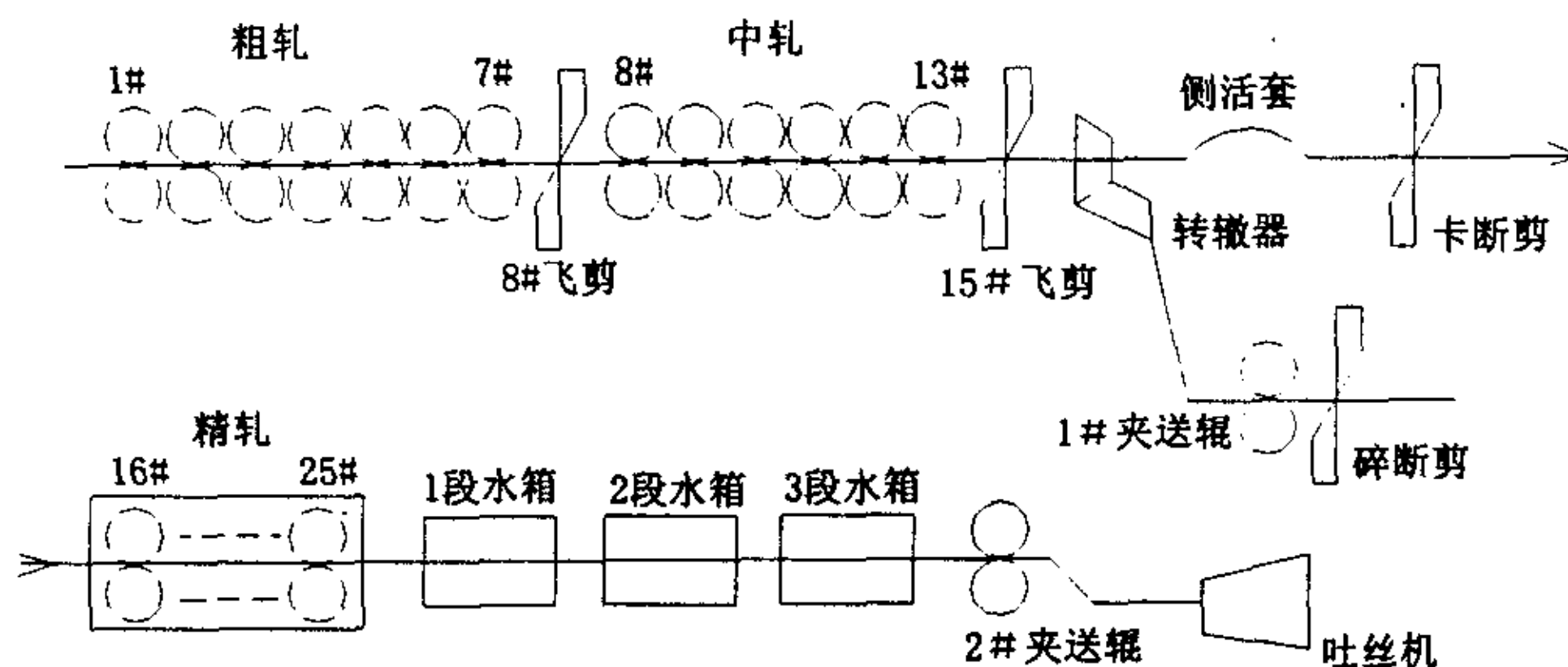


图1 主轧线设备布置图

如前所述，高速线材的控制重心在主轧线上，而主轧线的速度控制又是控制的核心。由于轧机的出口速度高达 80 米/秒，故而要求各机架的速度必须精确匹配，以保证机架间的金属秒流量相等，以实现微张力和无张力轧制。设 $V_{1出}$ 为 1# 机架的出口线速度， $V_{2入}$ 为 2# 机架的入口线速度，即应使 $V_{1出} = V_{2入}$ 。但在实际轧钢中，轧件受多种因素影响而使这两个速度不相等，金属秒流量差引起两机架间的张力波动，将导致轧线上出现堆钢、拉钢和断钢的现象。决定金属秒流量大小的两大要素是轧机的孔型和速度。一旦孔型调好后即为常量，只有调整全线轧速才能达到秒流量的平衡关系。其控制方法是：单机架主设定调整和级联调节相配合。以 13# 机架作为全线的基准速度，采取“逆调”方式，根据金属秒流量相等原则，逐一从下游向上游方向推算各个机架的速度，并在级联调节中保持各机架间的速比不变。而对单机架则采用前张力控制，即当钢材咬入下一机架后，根据本机架与下机架间的推拉关系来调整本机架的速度设定，使这两机架间的张力维持在设定值。这样，全线通过级联

调的控制，使轧材在微张力作用下进行轧制，以保证轧钢的顺利和钢材的质量。

实现上述思想的控制方式有两种：模拟式和数字式。首钢中小型厂属于全模拟式；首钢第二线材厂属于数、模混合式，即数字设定、模拟线路调节；首钢第三线材厂采用了全数字式。这在国外高速线材中也属于最先进的控制方式。下面即对此作一简要介绍。

§2 首钢第三线材厂的全数字级联调控制系统简介

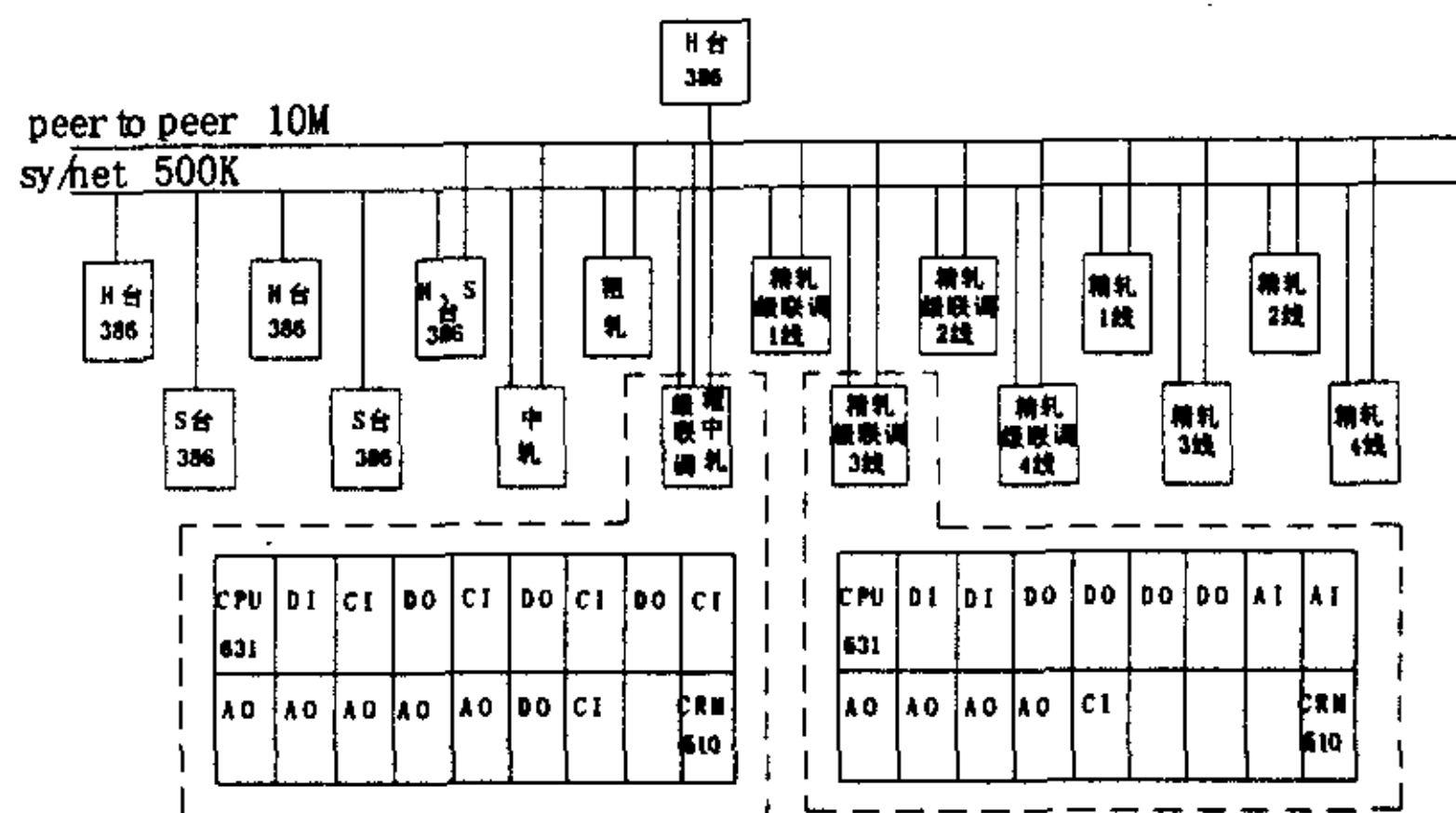


图 2 首钢第三线材厂计算机系统配置图

首钢第三线材厂计算机系统配置如图二所示。

精轧级联调所管理的范围涉及到整个主轧线，而主要控制的对象是从精轧机到吐丝机这段精轧区。我们采用美国的 square-d 可编程机，每条轧线控制开关量 I/O 点 192 个，模拟量 I/O 点 24 个。与计算机联网的 I/O 点 120 个。四条轧线总计有 I/O 点 1344 个。主要控制内容如下：

1、轧材跟踪

在主轧线上,从初轧机到夹送辊,共设十个红外检测光头,作为红钢信号的检测仪。它不仅为本系统提供轧材跟踪的依据,分析判断初、中精轧区及全线是否空转;精轧机入口、精轧机内部及水箱段是否憋钢,以便进行相应的处理,而且还为飞剪可编程机和精轧可编程机提供所需光头信号。同时,将光头信息经 SY/NET 通讯网传送到 H 操作台,由大屏幕显示出动态轧钢画面。

2、轧机速度监控

引自测速机的速度反馈信号，经过电压隔离器转变后输入可编机，经过比例运算，转化为线速度，再经 SY/NET 网传送到 H 台和 S 台，由屏幕显示出有关精轧机、吐丝机和夹送辊的动态轧机速度。对精轧机而言，当检测到转速大于 200 转/分时，则发出“电流外限幅解封”指令和“精轧机轧辊油雾润滑”指令。当转速大于 95%ne 时，则发出“超速报警”信号。

3、大盘盖与故障处理

在连轧机架后面，紧接着大盘盖装置。当根据光头判断为“精轧机入口跑钢”或“精轧机内部憋钢”事故时，应使转撇器倒向，将轧材转入地下进行碎断处理。此时，若第 20[#]光头仍不感光，则控制大盘盖自动抬起，将后续红钢倒出。

4、风阀自动调控

斯泰尔摩风冷线每线各有五台风阀，四线共有二十台风阀。风阀的开启选通由 S 台设置，四线并列的一组风阀则有相同的一组开度设定，其开度的检测是经伺服电机传动的电阻器而获得的，风量的调节靠给定值与反馈值进行比较、运算，从而控制通风电机的正转或反转，即阀门翻板的开或关。

如当 $ug-uf > 1^v$ 时，风阀开；

当 $ug-uf < -1^v$ 时，风阀关；

当 $-1^v < ug-uf < 1^v$ 时，风阀不调节，维持动态平衡。

在 S 台的屏幕上，有风阀开度及反馈的参数显示。

5、水箱自动调控

水冷区有三段水箱，将终轧后温度为 950—1050℃ 的线材急冷至 750—850℃，以获得冷奥氏体组织。这次除保留了首钢第二线材厂的“手动”控制外，还增加了对头部和尾部不冷却长度的“自动”控制，与二线材相比，使每卷头尾部废钢由各三十多米减至二十米以内，从而有效地提高了控制精度。由于控制精度与线速度相关，为此，程序中设置了灵活的参数修改方法，使操作工可根据钢材规格品种的变化来修改头/尾部延时时间，以获得最佳控制精度。

6、夹送辊压辊和速度控制

夹送辊距前一轧辊——精轧机出口机架约 40.91 米长，对于出口段同步性控制、轧制张力控制、解决轧制中的堆、拉钢现象及吐丝成品的规格、质量等，都起着十分重要的作用。

夹送辊的压下或抬起都是由三种工作制确定的，即头部校正、尾部校正或间歇校正，根据工艺任选一种。轧钢时，程序将根据光

头所跟踪的轧材位置的不同而确定夹送辊的抬与落。例如,若选“头部校正”工作制,则当夹送辊咬钢开始直至线材尾部出精轧机,一直压辊轧制。

对于每根钢的轧制,夹送辊在自动调速方面又可分为三种工作状态,即同步、尾部和连续。“同步”状态即轧材尾部穿过精轧机组。“尾部”即轧材尾部出精轧机组,直到夹送辊抛钢。“连续”即除“同步”与“尾部”之外的状态。在不同的状态下,不仅夹送辊要有变速切换,而且作为速度调节器外限幅的电流给定也将根据精轧机出口机架的不同选择而有相应的变化,以满足工艺对恒张力控制的要求。

7、吐丝机的速度给定与调节

吐丝机的速度,决定着吐丝圈是否大小一致,是否堆钢,直接影响到产品的规格和质量,因此在设计中,我们把重点放在使 S 操作台上具备监控功能和微调功能上。在 S 台的屏幕上,有关于四线吐丝机速度的动态参数显示画面,在操作台上,还设有带刻度盘的手动微调旋钮,为操作工提供了便利的工作条件。除此之外,还修改了原 BBC 公司设计的联动启停车方式,实现了吐丝机可以独立于精轧机启停的功能。

8、精轧机的速度控制

精轧机作为成品机组,共有十个机架,由 6.3m/S 的入口线速度陡升到 64m/S 的出口速度,是高速线材中对动态响应的快速性、对调速精度和稳定性等动态指标要求最高的。首先, H 操作台需按照工艺要求,向 PC 机输入精轧机线速度 V 、齿轮传动比 i 和出口机架的辊径 d , 可编程机根据公式 $n=60 \cdot i \cdot v / \pi \cdot d$ 计算出电机转速设定值,再由 PC 机根据转速给定值的变化实时地计算出线速度的给定值。然后与活套调节量进行迭加,经比例积分器进行计算,再输送到精轧机的调速装置。这次设计对原 BBC 图纸作了修改,克服了当轧机事故停车后易出现的带负荷突加给定的弊病,在积分器前增设了当停车后将积分器放电回零的功能,保证了每次启车均带积分器的平稳启动。

9、活套自动调节

活套盘设在精轧机之前。有一气动推套器帮助起套,形成与水平面下斜 15 度的活套。活套控制环节主要由三部组成:活套调节的逻辑控制、活套的模拟量调节和作为套量检测用的活套扫描器。其中,逻辑联锁主要是对推套器的控制。当精轧机咬钢后即推套。当

连轧机末机架吐出钢尾时, 则收套。重要的是根据计算线速度准确掌握推套器动作的时间, 还要把握好活套模拟量调节解零和锁零的时刻, 解决好速度级联调动态响应快速性的问题。而模拟量调节主要将 H 操作台的套高设定与现场检测的套量反馈进行比较, 其偏差经 PI 调节器的运算, 再取 $\pm 10\%$ 迭加到精轧机的给定上, 参与调节精轧机的速度, 进而控制轧件在连轧机与精轧机首尾两机架间有一定套量下进行轧制, 以实现无张力轧制的工艺要求。

10、计算机联网

三线材主轧线计算机通讯网络, 是首钢首次在如此大规模的重大工程中实现了计算机联网。我们级联调系统配置了 square-d 系列最先进的通讯模块, 即 SY/PEER 高速网 (通讯波特率为 10Mbits/s) 和 SY/NET-CRM510 型低速网 (通讯波特率为 500Kbits/s), 将主机 SY/MAXsep631 型可编程机挂在由这两种通讯模件支持的通讯网络上, 使大量的在线信息实现了资源共享, 避免了信号的重复性。该系统每线有 24 个 I/O 点并入高速网, 有 96 个 I/O 点并入低速网, 四线共有 480 个 I/O 点。联网后, 削减了大量的输入输出点, 这不仅节省了 I/O 模块, 也节省了大量的电缆和施工量。同时, 用无触点代替有触点输出, 增长了设备的使用寿命, 免除了繁重的检修维护量, 提高了系统运行的可靠性。

第四章 活套的数字化自动调节

§ 1 活套控制系统的组成

一个活套控制环节主要由三大部分组成：（1）活套的模拟量调节部分；（2）活套调节的逻辑控制部分；（3）活套扫描器。模拟量调节部分主要是由活套调节器和一些辅助电子线路构成，其作用是对实际套量进行调节。活套的逻辑控制部分是用于处理活套调节的逻辑连锁关系和顺序控制，它可由一台微机来完成其功能。活套扫描器是套量的检测元件，它的灵敏度和精度直接影响着活套的控制能否正常工作。活套控制系统由一线中各活套控制环节所组成，它们之间的顺序控制关系由逻辑控制部分来完成。

组成一个完整的活套控制系统，通常有如下几个环节。

一、活套位置检测装置

该装置的作用是将轧件在机架间的位置转换成电压的形成，并输送给后面有关的控制环节，其基本工作原理是利用轧件的红外光和扫描器内的标准光，通过旋转的棱镜和电子线路处理产生不同相位的两组脉冲，经放大处理得到一个和不同相位对应的电压信号。这样就可以把轧件在机架间每一瞬间的位置用连续的电压信号表示出来。输入和输出应具有良好的线性关系，该装置灵敏度的调节应服从稳定性的要求。

二、活套控制中的模拟控制部分

该部分的作用是将活套扫描器检测到的位置信号先处理成 ΔL 套量与给定的套量值进行比较，（ $\Delta L = L - S$ 近似看成等腰三角形后有 $h^2 \approx \Delta L$ 的关系）。经 PI 调节器输出的偏差信号作为相应机架电机主基准值的附加值，根据上、下游调节方向，分别进行调节。（如第二章图 3 所示）由于活套控制模拟部分控制的对象是直流调速系统，所以直流调速性能的好坏，直接影响活套调节环节。根据第二章图 5 可得出简化后的活套控制系统的动态结构图。（图 1）

由于调速系统本身是稳定的，活套调节器的输出不会影响系统的稳定性。但由于活套调节是通过调速系统实现的，故活套调节量的动态响应必然低于调速系统的动态响应。单个活套控制环节的抗扰能力是低的，级联套量调节在整个调节过程中，对于单个活套

控制环节相当于扰动作用。由于响应慢、恢复时间长，系统的抗扰能力差，级联套量对相邻机架的调节作用影响很大，当往上游的某一活套套量有一小的偏差时，下游级联调节使下游位置环的偏差控制平衡破坏，出现较大的波动。然而，从五个活套控制整体分析，级联调节又有着预调节的优点，使整体的调节快速性增加，起到了稳定整个系统的作用。只有在头部控制时，容易出现和五个活套控制调节相反的调节，造成头部活套控制不稳。

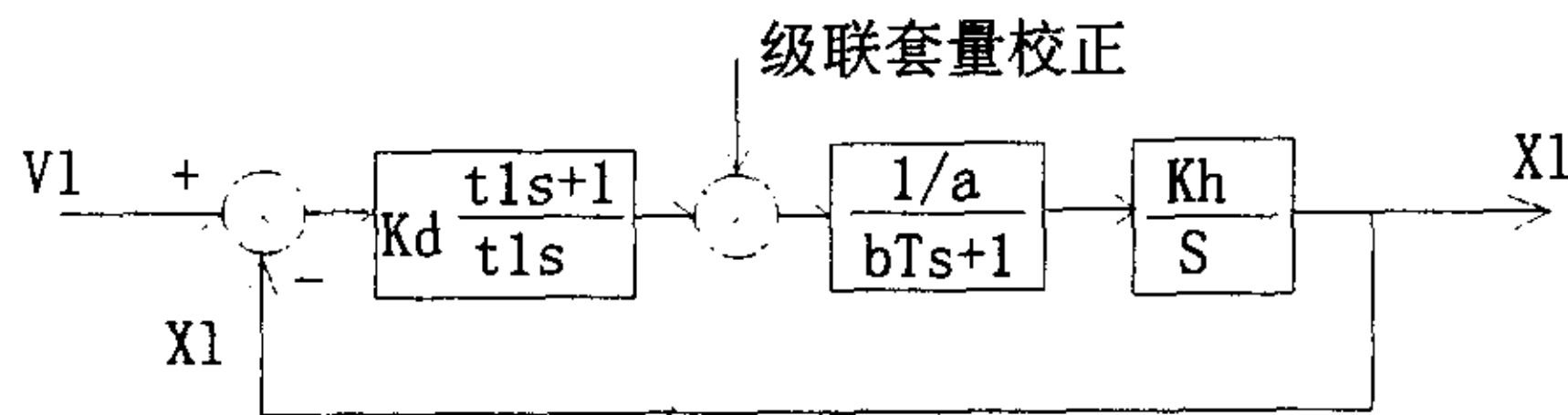


图1 系统动态结构图

其中： $T\Sigma n$ 为速度环的等效时间常数

a 为速度反馈系数

Kn 为速度和套量的转换系数

三、活套控制中的数字量控制部分

该部分的作用是将活套控制中的过偏差信号，在活套模拟控制调节的同时，由主控计算机对相应的主传动系统进行调速控制，根据过偏差信号存在的长度决定调节的范围和控制的时间。该部分包括在主设定系统中。

在模拟量的调节过程中，根据活套套量高度设定值和实际值比较，在活套控制中有“过大”、“过小”控制。即通过活套控制调节器输出的大偏差信号（“过大”，“过小”）。通过主设定控制计算机直接改变相应机架的主设定基准值，主设定的调速方式是以步长为单位的，每一步长是 5 转/秒，用这样的速率改变相应机架的主基准值，使套量高度大偏差（“过大”，“过小”）信号向减小偏差的方向调节。整个调节过程结束，直到套量高度大偏差（“过大”，“过小”）信号不再出现为止。由于主设定系统是根据活套

控制中的“过大”，“过小”信号，通过逻辑控制部分的计算机用输出脉冲长、短进行调节转速的。活套的“过大”，“过小”相当于主设定系统的给定。所以称这部分为活套控制中的数字量调节部分。数字调节的这种幅值小，调节慢的特点，是活套控制系统中的累积校正。

数字量调节部分还有一个功能，即在整个轧制过程中，如果五个活套套高大偏差（“过大”，“过小”）信号在规定的时间内都不出现。通过逻辑判断，可以认为轧制速度是合理的。故主设定系统将现在的机架主基准固定。保证下一根轧件通过时，有良好的轧制速度配合（最佳记忆）。

四、主传动控制系统

主传动系统是一种采用微型计算机技术进行直流传动的控制系统。该系统将逻辑控制、状态监视、脉冲切换和模拟电路的封锁控制，通过微处理器以程序的方式处理。连续量信号的调节仍以模拟量方式进行，把数字计算机处理的灵活性和模拟量调节的瞬时性有机地结合在一起，可用一终端对程序中的逻辑作用位、时间常数，各种限幅值等进行和修改，在线显示和记录，程序设计是按传动系统中最佳的品质指标设计，这种带微机的集成传动控制系统其主要功能有：

1、逻辑功能

- (1) 传动和辅助设备的正常启停顺序控制。
- (2) 故障时的最佳时间停车
- (3) 可控硅的正确触发和正反向适时切换
- (4) 基准值、调节器的正确切换和封锁。

2、调节功能：

- (1) 具有弱磁升速自适应的速度调节。
- (2) 具有电流自适应的电流调节。

3、设定功能：

- (1) 正常式点动的基准值设定
- (2) 电流限幅值的设定（编程方式）
- (3) 时间常数、逻辑作用位的设定（编程方式）

4、诊断监视功能：

- (1) 系统的上电自测试功能,包括各种指令、存贮区和功能块的功能测试。
- (2) 通过基准值、限幅值的检测查询、测试调节器。

- (3) 传动启动条件的检测与显示
- (4) 正常运行时的标准检测 (包括量值和状态检测)
- (5) 系统故障的报警动作与屏幕显示。
- (6) 具有第一故障的鉴别与指示功能。

高性能、高精度的传动系统使动态精度达到 2‰, 静态精度达到 1‰, 这样给活套控制的最佳状态提供了可靠的基础。

五、活套控制中的逻辑控制部分

对于每一个活套都具有如下功能:

- (1) 启动活套头部控制的计时功能。
- (2) 接收活套头部计时完毕的功能。
- (3) 释放活套调节器功能。
- (4) 释放活套调节器基准值功能。
- (5) 启动活套尾部控制的计时功能。
- (6) 接收活套尾部计时完毕的功能。
- (7) 调节器封锁功能。
- (8) 调节器存贮功能。
- (9) 接收调节器的过大、过小信号, 向主控计算机传送的功能
- (10) 在逻辑判断处理上具有很强的联锁性。
- (11) 通过 XT3 (轧机状态显示计算机) 有活套实际偏差显示功能。

由以上五个部分组成的活套控制系统, 反映出了线材轧机中活套控制涉及面广, 层次多的特点。从而使活套的控制也成了线材轧机中最关键的控制。

§2 活套控制过程的分析

一、活套的头部控制

轧件头部进入活套台后, 下游机架的速度要先适当地降低, 以便当轧件咬入该架后, 能产生一定量的“多余”的轧件, 这些“多余”的轧件在起套器的作用下形成活套。下游机架的速度修正量与活套的起套高度 H_s (人工设定) 有关。通常, 起套时不是一步就把活套升到设定的正常活套高度 H_n , 而是先升到 H_s , 继而再调节到 H_n 上, H_s 的设定要小于或等于 H_n 。

系统要精确地控制起套器动作, 使其在轧件咬入下游机架时,

恰好它已开始动作。若其动作过早，则可能造成轧件咬不进下游机架而导致起套失败；反之，如果动作太迟，一旦轧件咬入了下游机架，起套器的动作就相当困难了。这就需要跟踪系统准确地跟踪轧件的头部位置。

在起套阶段，对下游机架的速度修正仅限于下游机架本身，此时要封锁该部分的级联控制，否则会对其它机架产生干扰。

以上是头部控制的基本原则，下面举例说明。

12 号机架前的活套扫描器，检测到轧件头部后，即由逻辑控制部分给 12 号活套控制系统发出头部计时信号。如图 2 所示。

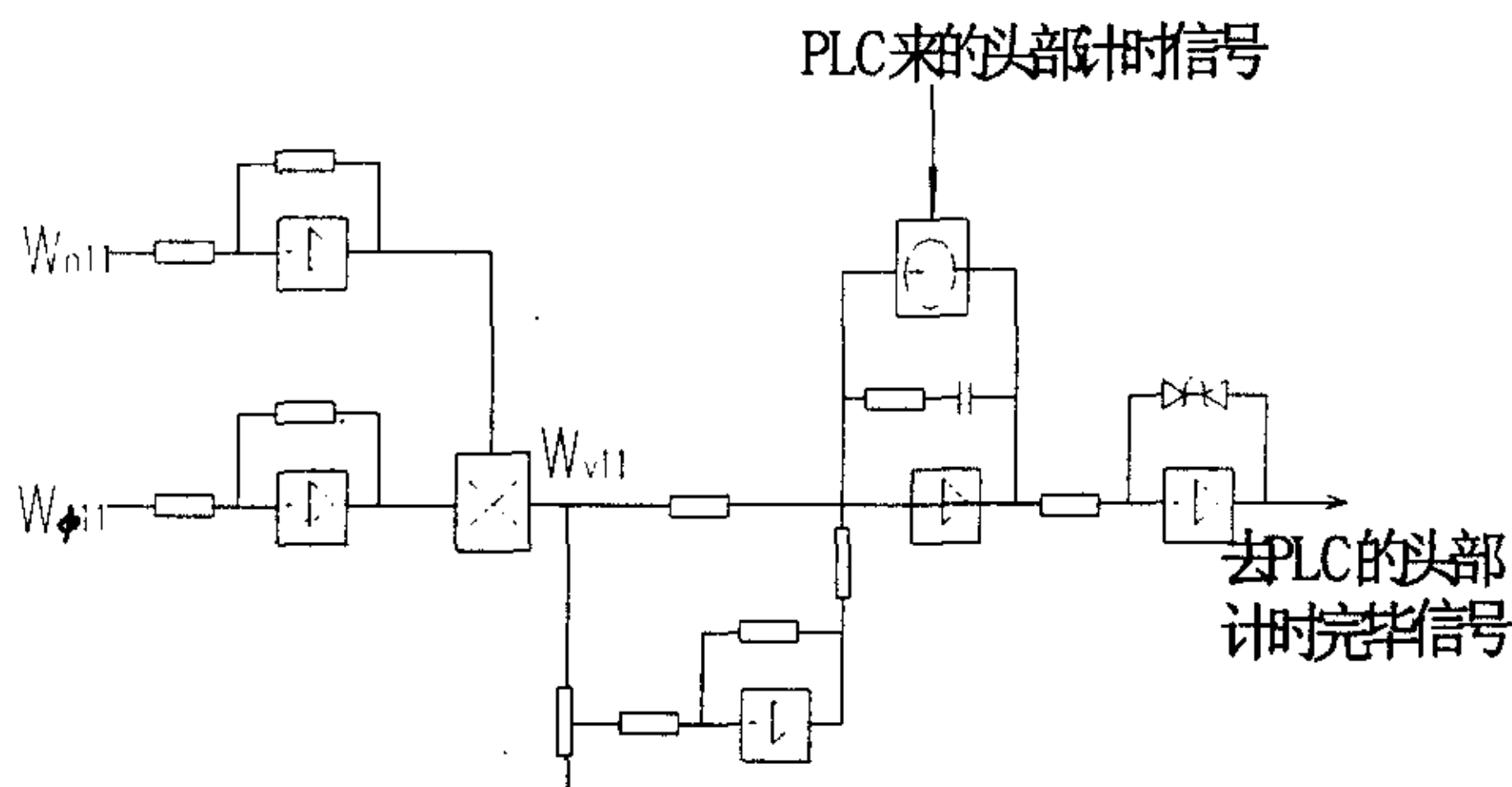


图 2

图中：Wn11 是主设定系统给 11 号机架的基准值

Wφ11 是主设定系统的实际辊径值

$$Wv11 = |Wn| * |Wφ| / 10$$

在计算时间时，应考虑电磁阀的死区时间，即设定下一提前启套时间 t ，用来补偿电磁死区时间 t_{Σ} 。可通过 PLC 输出和输入的关系，实际测得。

$$t = \frac{s}{v} - t_{\Sigma}$$

头部计时调节器得到 PLC 来的释放信号（头部计时）后，立即对现行的轧件基准速度进行延时处理。如图 3（下图）

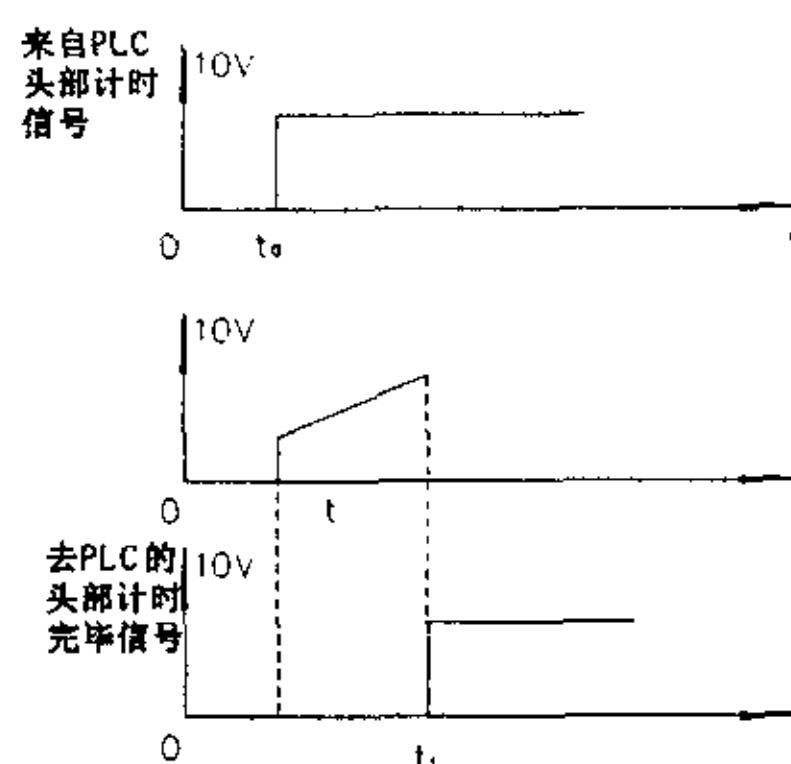


图 3

这样选择不同的 R 、 C 可以得到不同的延时时间，满足 $t = s/v - t_2$ 的要求。

一般选择 R 、 C 原则：

$$C = \frac{S(M)}{W_{v\max}(v)} \cdot 10(\mu F)$$

因为： $W_{v\max} = 10v$ 则：

$$C = S(\mu F)$$

$$R = \frac{t_2(ms)}{C(\mu F)} (K\Omega)$$

这样，距离长，选的 C 大，延时时间长，电磁死区时间长；选的 R 大，延时时间短，提前启套信号早，可以更有效地补偿死区时间。

因为计时结束后，该信号去 PLC，由逻辑控制部分向挑套杆及活套调节器发出信号。如图 4 所示。

在逻辑控制部分对活套调节器的释放又增加了 100ms 的延时，这主要是考虑减少轧机咬钢后的动态降速的影响。有意的让活套调节器释放延时躲过动态速降对整个活套的影响。同时，延时释放，又有效地防止了挑套杆死区过长，挑套杆未动作，而下游机架开始降速所造成的活套波动或打结拉断的事故。但该时间设定要适当，最理想的起套控制状态是躲过电机动态后的电机控制降速和挑套杆的动作几乎同时发生。

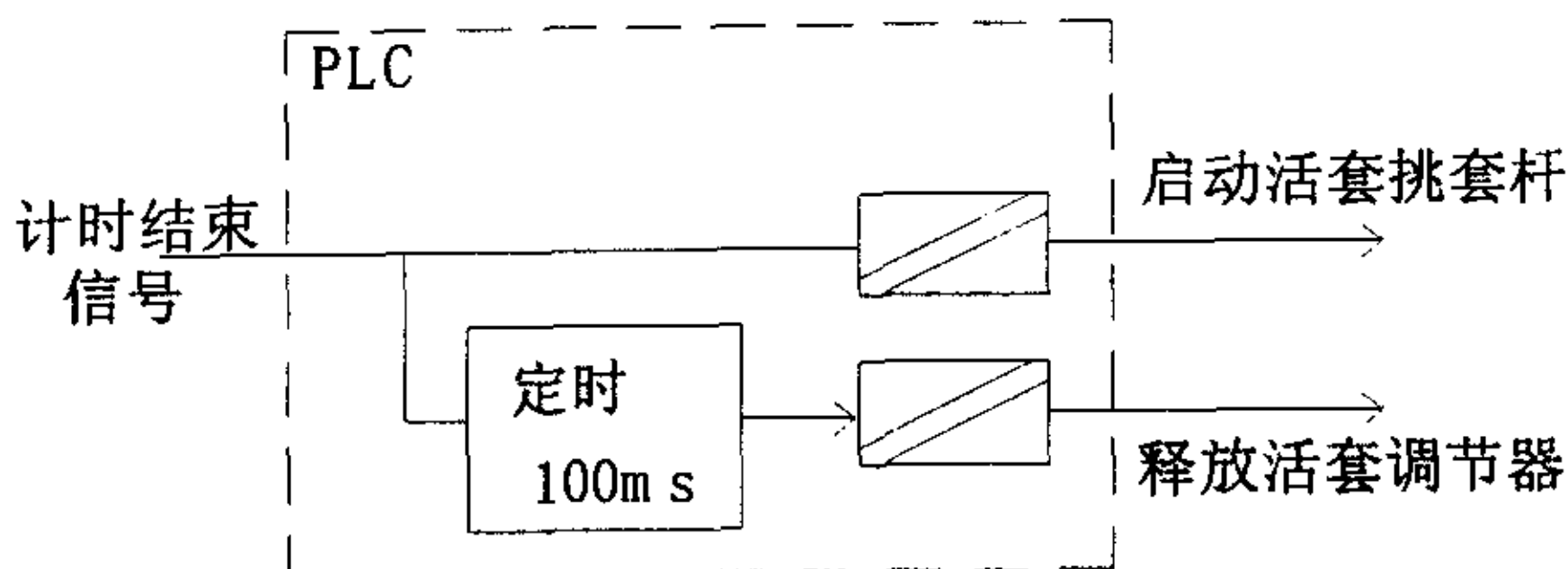


图 4

在电路中还设计了可随时调节的电位器，根据机械动作的非正常性，可适当进行延长或缩短挑套杆计时时间的调节。但对于机械启套慢应结合逻辑控制部分，配合进行适当调整，如果仅仅调节电位器，使延时缩补，尽管使启套的信号早发了，来补偿电磁死区的时间，但如果逻辑控制中的 100ms 不改，容易造成活套调节器提前释放。使下游电机过早降速，严重时会造成下游机架尚未咬钢而启套，使轧件堆钢。

以上是一个活套头部控制过程的分析。在整个活套部控制过程中，由于级联的影响，以及控制降速和启套动作的不协调，使得轧件头部控制很难一下达到理想的控制状态。有时，存在着张力轧制，使轧件头部尺寸有可能超差。

二、活套的中间轧制控制

起套完成后，即进入活套控制阶段。此时，系统按正常的级联方向，对所有与此轧件有关的机架进行实时速度修正。活套控制是采用一个 PI 调节器进行控制的。系统按主级联控制的方向把 PI 调节器的输出叠加在上游机架的速度给定值上，这就相当于连续地修正上游机架的速度来保证活套的高度与设定值一致，并且通过上游机架和主级联控制相应地改变与此轧件有关的上游其他机架的速度关系。从级联控制的角度看，活套的 PI 调节相当于不断地修改下游机架的 R 因子来改变上游机架的速度。下游机架的 R 因子的变化又可理解为该架的轧制能力发生了变化，而致使其轧制能力发生变化的原因又可能是上游机架送来的轧件的尺寸或温度发生了变化。

活套建立起来后，活套进入稳定的中间轧制控制。根据设定的套量高度，按下游调节的方向，活套控制系统通过不断地改变相应机架的主基准值进行调节（如图 5 所示）。

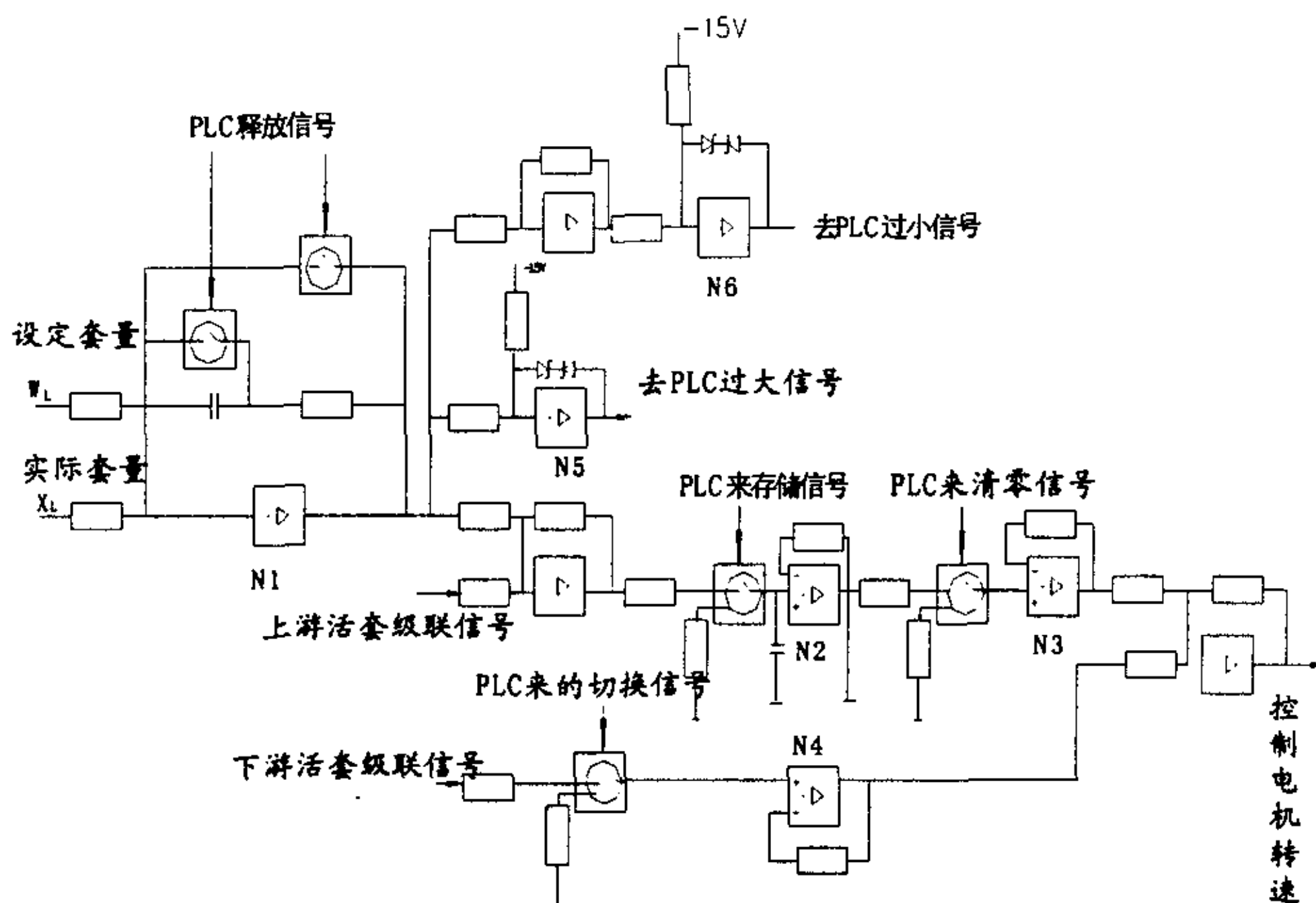


图 5

图中：N1 活套调节器
N2 存贮器
N3、N4 下游切换装置
N5、N6 比较器

这里活套调节器的积分部分可以单独封锁，系统的响应和稳定性等综合因素，可以通过 PLC 进行程序设定。过快的改变主基准值对于活套的稳定性有一定的影响，活套控制的超调，也是造成活套波动的主要因素之一。对于活套调节器参数 RC 的选择，根据水平活套和立活套的特点，应进行分别处理。

12 号机架前的水平活套，为使向下游级联的扰动作用减弱，选择动态响应慢的 RC 参数，即增大电容值，减小电阻值。对于立活套，考虑到两机架间的距离近，要求调节快，可选择动态响应快的 RC 参数，即增大电阻值，减小电容值。对于精轧机前的水平活套，考虑

到最终机架的调节应尽量减少波动,并考虑到夹送辊/吐丝机动态响应慢的特点,选择动态响应慢的 RC 参数,并尽量和夹送辊/吐丝机的速度变化相吻合。对于“过大”“过小”信号,可以设定比较器的门坎值。当门坎值为 1V 时,PLC 就得到“过大”“过小”信号,并通过主设定系统进行修改相应主基准值调节,直到调节到输出小于绝对值 1V。改变门坎值的大小,可以改变数字量调节的干预范围。在进行数字量调节的同时,仍进行着模拟量的调节。数字量的过大、过小调节是不级联的。仅对相应出现“过大”“过小”的活套起作用。模拟量的调节是级联的。这样,在活套控制中,就有可能出现 1 号活套要求下游轧机降速,由于级联使下游其它轧机也降速。而 2 号活套要求它的下游机架升速,使它的下游其它轧机也升速。在 2 号活套的调节上就会出现不同方向的调节量。尽管级联是保证速比不变的,但实际中,仍会造成活套较大的波动和长时间的调节。所以主设定的数字量调节增加了系统抗扰动能力。主设定系统在操作台上还有手动干预功能。通过 XT3 显示活套偏差大小和根据主轧制程度显示的轧机实际转速,把设定值向实际值上调节,加快该相应活套的调节功能。这种非级联的调节,都使活套系统抗扰功能加强。(手动干预时要注意调节的方向)。

在活套的中间轧控制过程中,最难控制的就是这种调节上出现的五个活套的调节方向不一致性,首先应将调节方向一致后,再进行同方向的调节,对于组成活套控制的主轧机直流传动系统最好有一致的动态、静态精度,使整个活套的调节增加准确性和可靠性。

三、活套的尾部控制

当轧制的尾部接近上游机架时,即进入了收套阶段。为了安全收套并防止突然收套可能引起的甩尾,在收套阶段,要首先通过调节上游机架的速度来降低活套的高度到 H_t 位。 H_t 的值由人工设定,一般在 100mm 左右。同时,起套器回落到底部位置。收套时用调节上游机架的速度来降低活套高度的方法也是为了避免对其它机架产生速度干扰。

活套的尾部控制分调节方向的切换控制和落套控制。

1、调节方向的切换控制

如第二章图 3 所示,当 11 号机架前光电管检测到轧件尾部时,活套系统进行下游转上游的切换控制。整个切换过程分析如下:

PLC 同时向五个活套控制系统发出存贮信号,利用 N2 前的电容,保持现行五个活套的调节关系。PLC 同时向五个活套控制系统发出

下游调节转上游调节的切换信号，将下游活套的调节量引入控制上游电机转速。

在给出切换信号的同时，PLC 同时向五个活套系统给出清零信号，把上游调节量切除（清掉）。

在活套上游控制调节的过程中，主设定系统仍是下游级联方式。故在尾部控制时，不允许用手动级联的方式干预活套调节。在切换的过程中、活套控制不可避免地要发生波动，这主要是因为：

(1) 每个活套的设定值不一样，当切换时，每个活套设定值的控制对象发生变化。

(2) 上、下游调节同时存在。

(3) 封锁和释放以及动态响应的配合无法取得良好的协调。

2、活套的落套控制

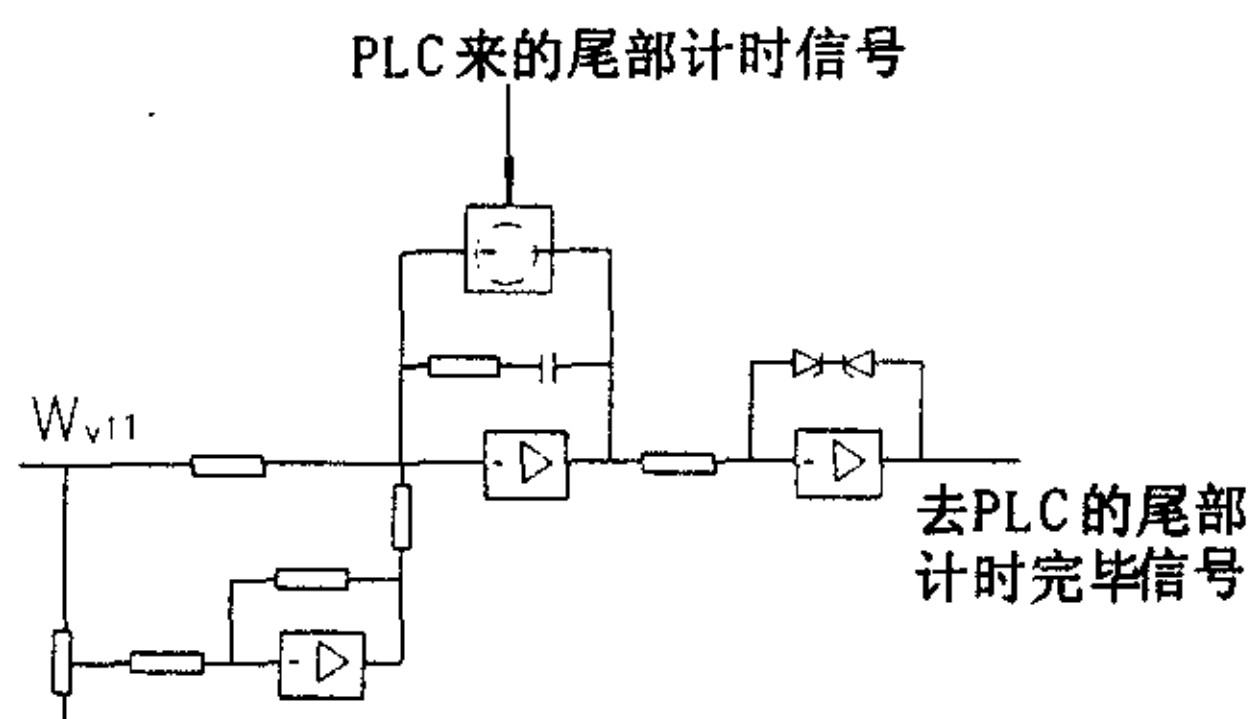


图6

当 12 号机架前活套扫描器检测到轧件尾部时，PLC 发送出 12 号活套盖板落下信号，同时发出尾部计时信号，因为是上游调节，通过 12 号机架的控制可以控制 2 号活套的收套。（1 号活套由于 11 号机架的抛钢和无启套杆，所以是自然收套）如图 6。

R、C 的选择和启套控制时类似：

$$t = \frac{S}{W_{v11}} - t_2$$

t_2 是 2 号活套的电磁死区时间， S 应是从 1 号活套到 2 号活套的距离。如图 7。（下图）。

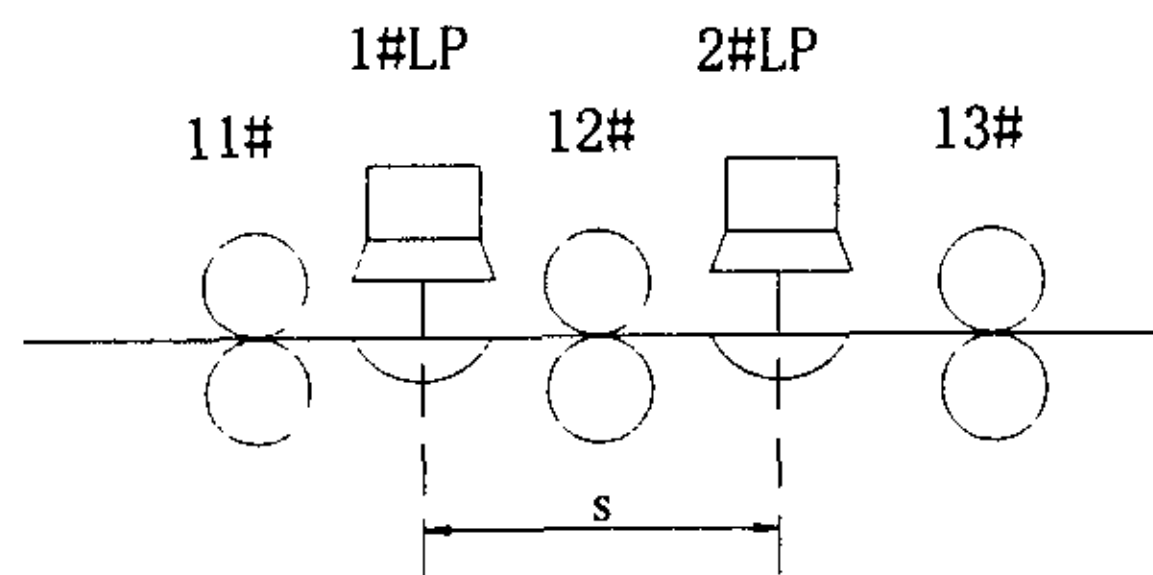


图7

理想的控制是轧件尾部到达 2 号活套时，正好挑套杆落下（挑套杆落早了，容易造成尾部打结，落晚了容易造成尾部甩打）。

选：

$$C = S \text{ (uf)}$$

$$R = \frac{t_2(ms)}{C(\mu F)} (K\Omega)$$

是能满足以上要求的。

在给出尾部计时信号的同时，PLC 给出 2 号活套调节器封锁，设定值清零信号，对上游 12 号电机进行降速控制。尾部计时结束后，PLC 立即进行 2 号活套的挑杆落下控制。在收套控制过程中，由于挑套杆的落下控制上要比上游机架降速晚，所以存在着张力，但这种张力仅仅可能影响尾部尺寸的变化，不会出现尾部打结拉断事故。

在电路中，设计了随时可调的电位器。克服机械动作的非正常值（动作慢），可适当进行缩补计时时间的调节，以保证可靠的收尾。

由于尾部控制是逐个收套，无级联调节，所以比启套时的调节困难大。尾部控制结束，所有的活套调节单元保持封锁，直到下一根轧件的到来进入头部控制。

四、精轧机前的活套控制

关于精轧机前的活套控制，除了在选择积分调节器的 R、C 参数，考虑到选择响应慢的特点外，还在调节器的最终输出增加了一个积分环节。如图 8。

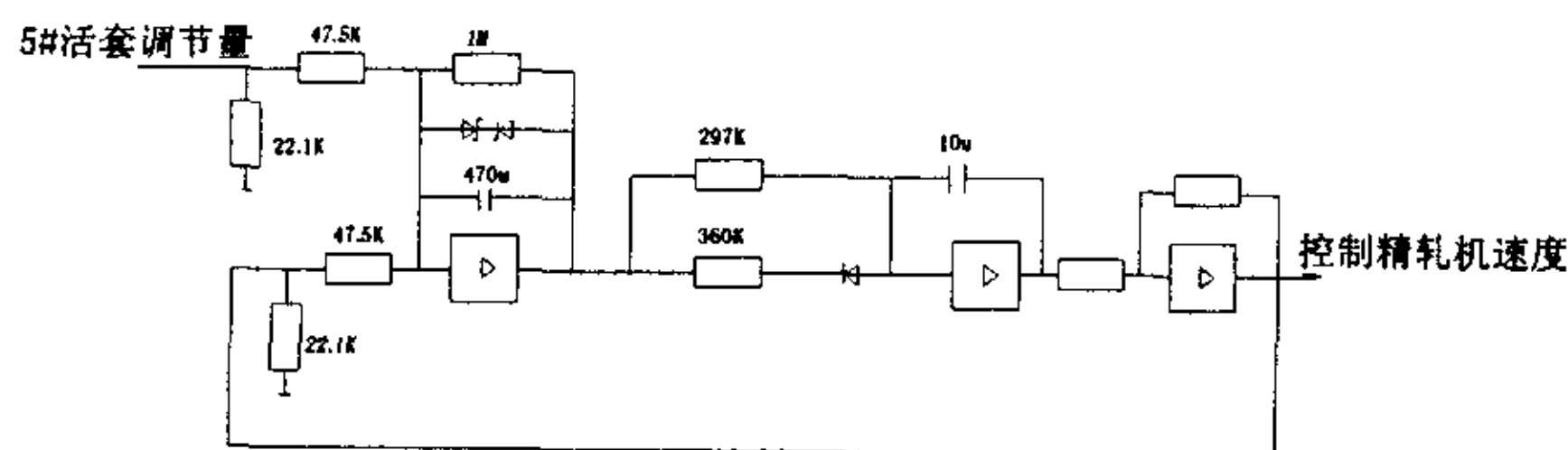


图 8

因为主设定的调节方式是 1#—11# 机架为上游调节, 12# 机架至夹送辊/吐丝机为下游调节。这样给整个速度级联带来了许多问题:

(1) 1#—11# 机架间的张力变化, 带来轧件尺寸的变化, 将导致活套的波动。

(2) 预精轧区, 由于各种不可避免的原因, 造成活套波动。

这些波动都最终会造成精轧机的速度变化。

活套的作用是通过速度的调节消除机架间的速差, 利用速度调节产生的波动, 纠正套量的波动, 使整个控制环节向清除波动的方面努力。然而精轧机的波动, 必然带来夹送辊与吐丝机的配合问题。尽管夹送辊采用了使速度调节器起着饱和限幅的控制作用, 利用控制电流限幅值作为电流环的给定, 形成夹送辊和精轧机之间的合理匹配。如图 9 所示。

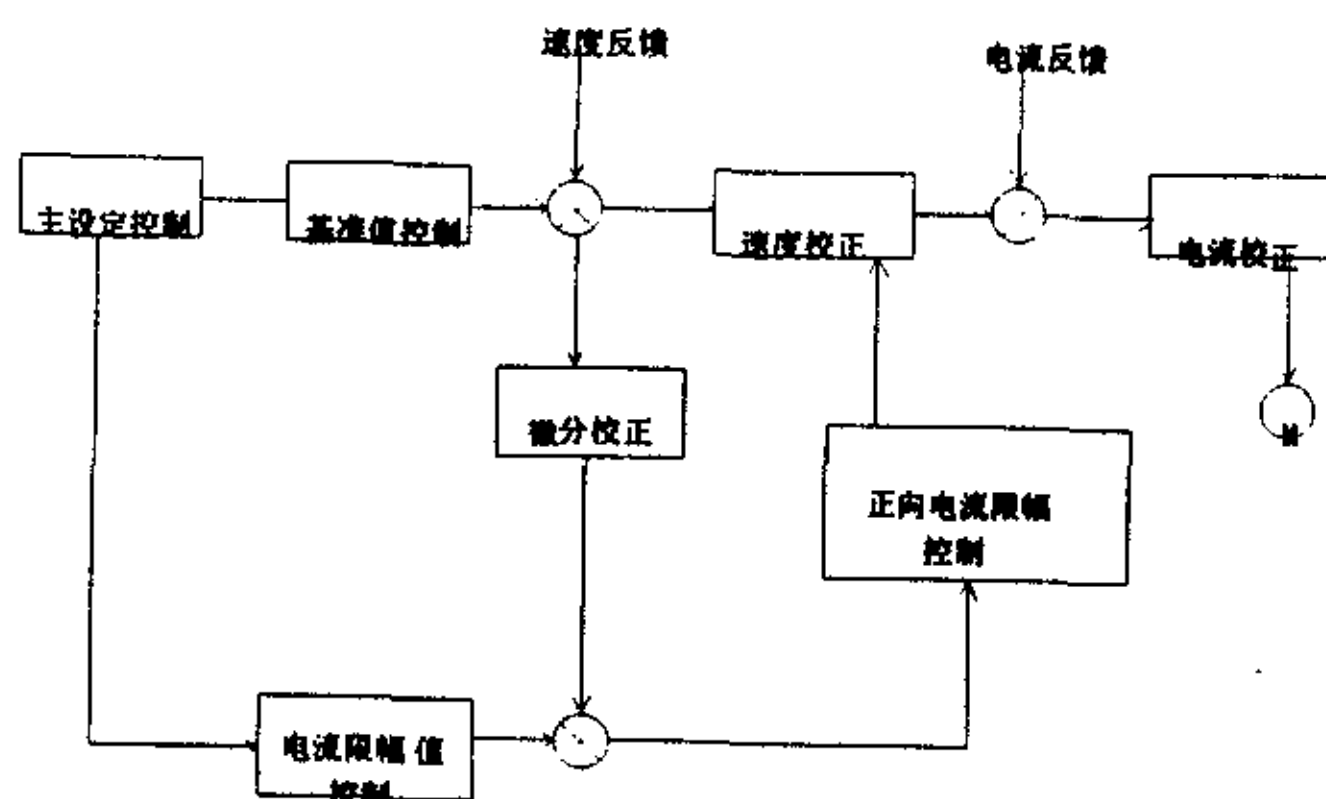


图 9

这里增加了对速度变化进行微分处理的功能，以提高夹送辊的响应和随动性，这对于夹送辊控制是必不可少的环节。如果精轧机速度波动大，会造成系统的不稳定。所以我们在提高夹送辊快速性的同时，力求精轧机的稳定性。在精轧机前活套控制上增加积分环节。基本上能满足这方面的要求。

考虑到夹送辊的加、减速的变化率不一样，图 10（下图）采用了不同的上、下积分斜率，当活套调节量为正信号时， $T_1=R_1C$ ；当活套调节量为负信号时 $T_2=R_2C$ 。

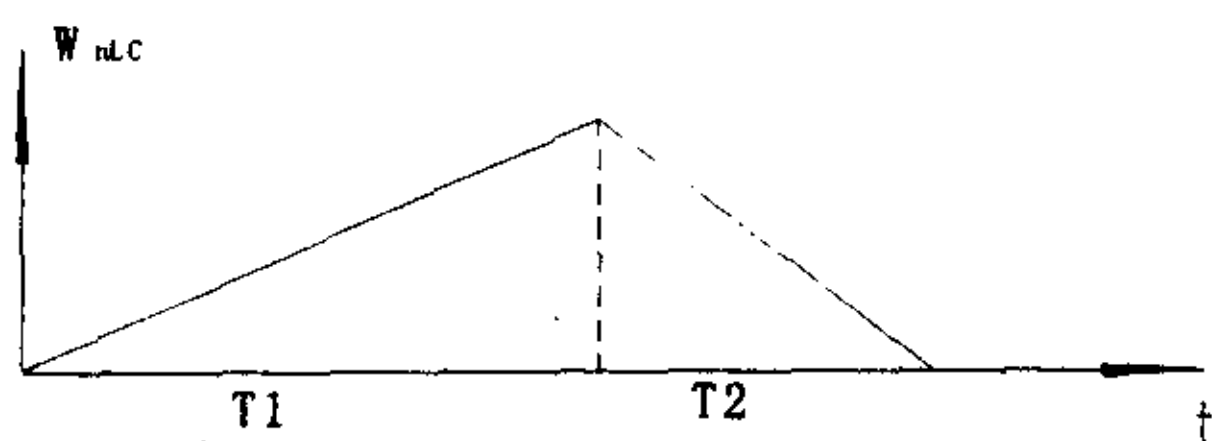


图10

图 10 的曲线应和夹送辊的起、制动曲线一致。

RC 的选择可以从夹送辊起、制动曲线中计算出来。并应和夹送辊给定速度由于上游波动而波动产生的微分电流调节作用相适应。

在系统设计中，最终给主传动基准值的修正量一般是图 10 的波形。在活套控制中，由于级联的影响和套量偏差的调节，修正量有时会出现较大幅度的上、下波动。在预精轧区，较大的波动一般是不会引起堆钢的。因为各机架间均有活套存在，但在精轧区接受到这样的调节量，尤其是在拐点处，会造成电流变化率大，电流波动大。对于成品机架，大的速度波动会带来产品质量问题。在轧制小规格线材时（如 $\Phi 5.5$ ），由于速度快，轧件的动能大，线材头部尚未到达夹送辊时，由于活套的波动造成精轧机速度的变化，以响应活套的波动，这时轧件头部本身的动能变化有可能使线材拉断。

实际上，活套调节器本身是比例积分环节，再增加一个积分环节，可以近似看成：

$$W_{n_L}c(s)=K/S^2 \{ W_L(s)X_L(s_L) \}$$

$$W_{n_L}c(t)=Kt^2[W_L(t)-X_L(t)]$$

同时，在电路中还采用了把输出再反馈到输入的控制，用输出的变化，补偿输入的变化，以抑制输出的变化。采用了这些方法，使最终的输出可以得到一个近似于抛物线，没有拐点的调节量。比较可靠地解决上面所提出的问题。

五、活套的事故保护控制

在轧制过程中，为使轧件在活套控制区内出现堆钢事故的影响降低到最小，在该区域中设计了废品监视功能，即根据轧件的速度和距离，计算出轧件到达下一个活套扫描器械的距离。如图 11。

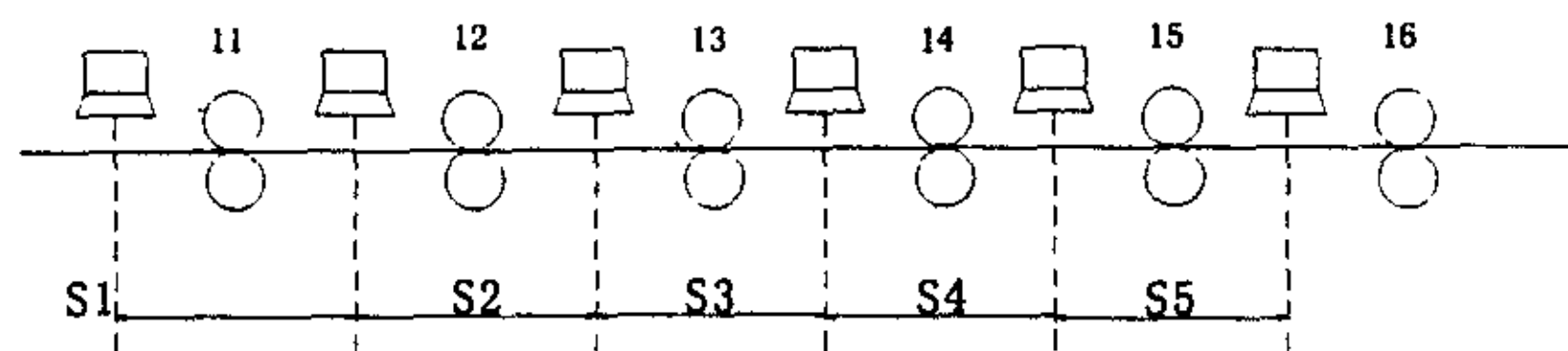


图 11

这里： $T1=S1/W_{v11}$

$T2=S2/W_{v12}$

$T3=S3/W_{v13}$

$T4=S4/W_{v14}$

$T5=S5/W_{v15}$

这样分别设定 5 个时间区域，在相应的时间区域内，活套扫描器应检测到轧件。如果在设定的时间内，没有检测到轧件，则认为发生了堆钢事故，立即进行必要的事故联锁处理。12 号机架前卡断剪自动闭合，粗轧飞剪自动碎断。这样最大限度地减少了堆钢数量。

在收套过程中，考虑到机械故障使起套杆无法落下。当 11 号光栅检测到轧件头部信号后，有进行再次收套的功能，并对 5 个起套杆的起落顺序进行逻辑判断。如果逻辑关系不对粗轧飞剪有自动碎断的功能。同样最大限度地减少了堆钢数量。

§ 3、活套的数字化自动调节

一般国内设计的活套系统，多采用模拟控制方案。首钢第二线材厂即使用了计算机，也仅仅为逻辑联锁控制，而活套量的调节仍为模拟控制。首钢第三线材厂则从逻辑到模拟系统全部实现了数字化。

按照生产工艺，设置在精轧机前面的是一个水平活套。当线速度发生变化时，引起的活套高度变化量 Δh 和精轧机速度变化量 ΔV 与相应调节时间 t 的乘积成正比。现场活套扫描器将检测范围设置在 $0-800\text{mm}$ 对应 $0-10^V$ 。若操作台设定套高给定 u_g 为 500mm ，则在过钢时，套高的偏差值 $\Delta h = u_g - u_f$ (u_f 为套高反馈)。

当 $\Delta h > 0$ 时，控制精轧机降速 ΔV ；当 $\Delta h < 0$ 时，则控制精轧机升速 ΔV 。一般在 t 时间内完成这一过渡过程的调节，使 Δh 趋于 0，维持活套在设定的高度上，达到动态平衡。程序正是基于这一控制思想编制的。

一、起套棍的起、落套控制

由于起套棍升起和落下的时刻，直接决定着是否能正常轧制并影响到线材头尾的质量与成材率，尤其是起套棍的升起时刻必须准确，若起早了会使头部不能咬入下一机架，结果导致飞钢，造成生产事故。为了保证起、落套动作信号的绝对可靠，系统中采用了三个起套控制信号和三个落套控制信号，这些信号按逻辑“或”关系工作。如图 12 所示。

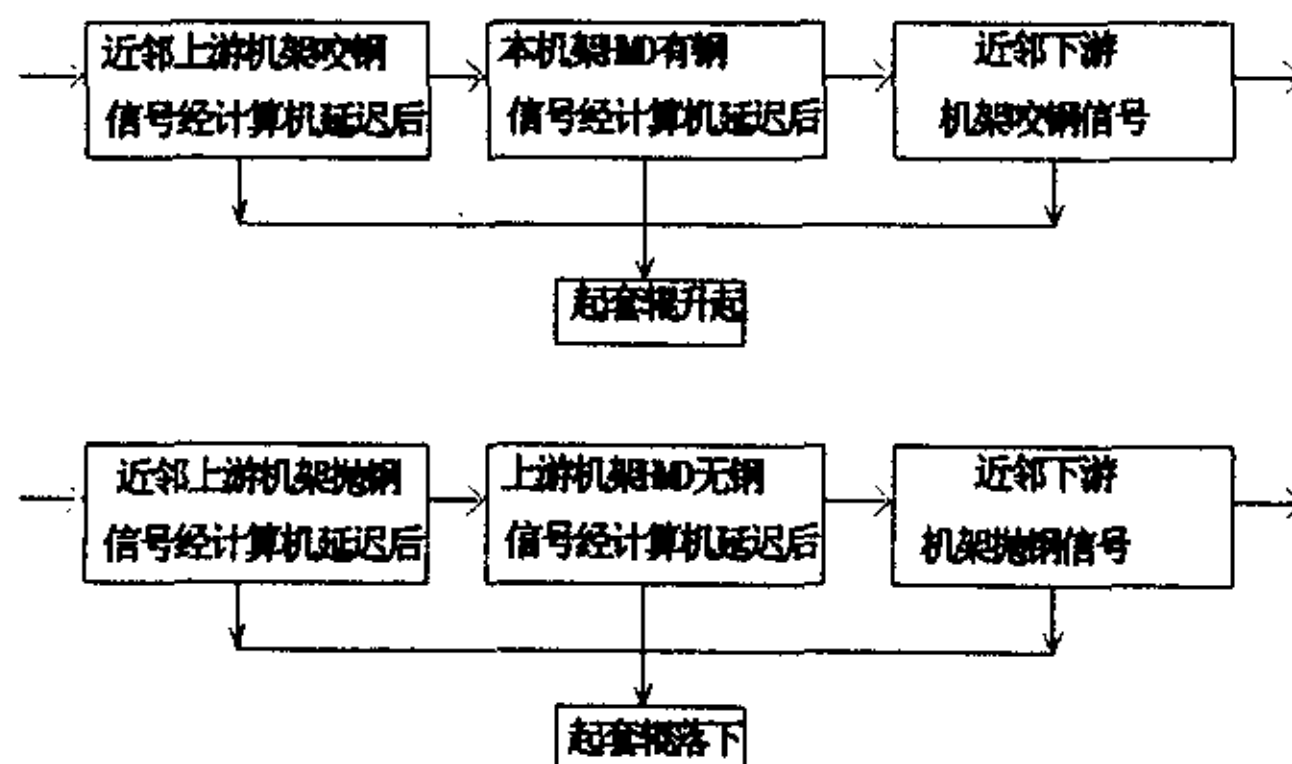


图12 起套棍的起、落套控制方框图

计算机在延时时间处理中采用了长度系数补偿的办法,即对起套和落套中使用的延时定时器的长度参数(如两机架间的距离、机架与检测器之间的距离等)乘上一个百分数。这样做的好处是:可以消除由于软件系统本身运行周期较长而造成的定时器计算误差以及可灵活地适应电气开关和机械气阀等的动作滞后时间的不一致性。对此,只要在调试时根据现场实际工况来调整百分数,便可选择出最佳的起套和落套时刻。

二、活套的位置控制

由于活套控制是保证稳定轧制的前提,同时决定着线材质量的好坏,因此,活套控制也就成了人们极为关注的问题。我们在系统中采用了如下控制处理技术。

1. 套量值的求法

如前所述,根据扫描器测得的夹角必须经过多次三角函数的计算,方能求得套量值。若由 PLC 进行三角函数的运算,一方面程序设计复杂,另一方面会增加运算时间,难以满足系统对控制周期的要求。在实际应用中采用了列表查值的方法,将扫描角度按一定大小分隔作为步长,离线计算出相对应的套量值,并制作成表,储存在计算机中。当计算机采样到活套扫描器的角度值后,通过简洁的查表指令运算即可得到相对应的套量值。当然,根据实际情况和需要的控制精度,表格的疏密可以有所不同,表格越密,计算精度越高,控制精度也相应提高。另外,当读到的套位角度信号在表格的步长之间时利用求整舍位指令(四舍五入)将该角度信号向上一步长或下一步长靠拢。

2. 控制信号的处理

针对线材形成的活套总有一定幅值大小的抖动,对采样的角度信号进行了数字滤波处理,具体而言,采用了加权求平均的技术。为了保证信号的可靠性,系统中考虑了活套工作角度的极限值检查和对两个相邻采样控制周期内最大套量变化值的检查,从而剔除了不合实际情况的虚假信号。

3. 控制量的计算及调节

活套的工作零点位置是我们所期望的活套高度,活套零位时的套量值即为基准套量值。活套控制就是为了使活套稳定地保持在工作零位。当套量发生变化时,将调节上游侧机架的速度;控制系统将根据下式计算出套量偏差值:

$$\Delta Li = Li - Lo$$

式中 L_i ，——某一时刻的套量值
 L_0 。——基准套量值。

考虑到选择合适的比例因子及当量变化的需要，则比例输出为

$$\Delta Y_{pi} = \Delta L_i \times \frac{x_1}{100}$$

其中： x_1 为比例运算系数，
 ΔY_{pi} 为比例输出项。

首钢三线材的活套环节采用比例调节器，属于有差调节。为了保证动态响应的快速性，又能消除系统的静态偏差，预精轧活套系统应设计成 PI 调节器，并采用数字积分技术，对偏差进行数字积分。

PI 计算式为：

$$\Delta L_i = L_i - L_0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\Delta Y_{pi} = \Delta L_i \times X_p / 100 \quad \dots\dots (2)$$

$$\Delta Y_{Ii} = \sum \Delta L_i \times X_I / 100 \quad \dots\dots (3)$$

其中： L_i ——某时刻套量值。

L_0 ——基准套量值。

ΔL_i ——套量偏差值。

X_p ——比例系统。

X_I ——积分系统。

ΔY_{pi} ——比例输出项。

ΔY_{Ii} ——积分输出项。

活套控制的程序框图如图 13 所示。

对三线材活套的最后一个改进措施是增加即时纠偏校正。将比例调节量作一门坎，当量值低于下限时，只调节上一机架的速度，而不进入上游侧其它机架的级联调，以减少套量波动的影响。当量值高于上限时，自动地直接修正本机架的主设定基准值，使系统快速响应偏差，即时纠偏，该调节直到套量的大偏差信号消失为止。而且，当五个活套在规定时间内均未出现大偏差信号时，则认为轧速设置合理，作为活套最佳值存贮记忆，以在线学习的方式来保证下根钢到来时，有良好的速度匹配。

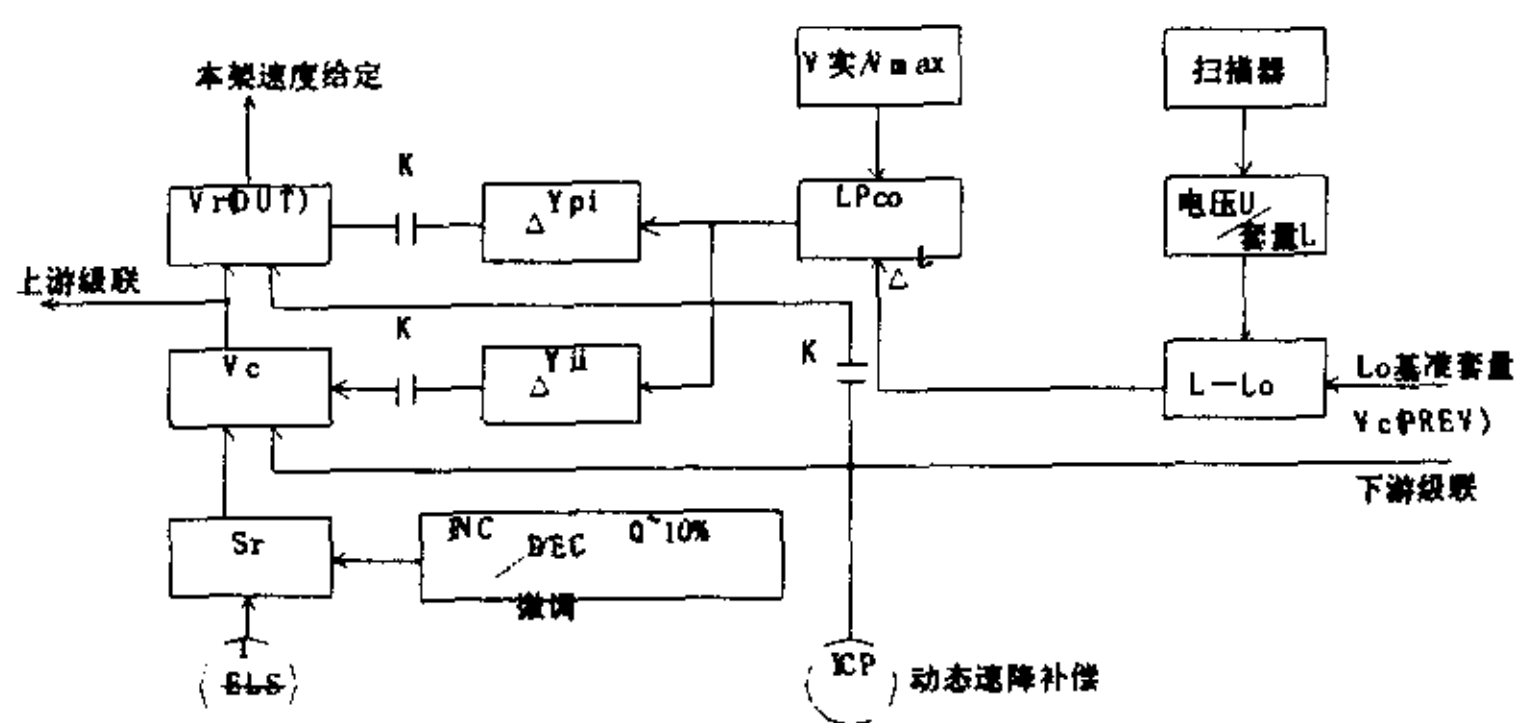


图13 活套控制程序框图

注：K--开关。

S_r -- $1/ELS+INC/DEC$ 。 $1/ELS$ 是本设备常数。

V_c -- $V_c(PREV) \times S_r + \Delta Y_{ii}$

$V_r(OUT)$ -- $V_c + ICP + \Delta Y_{pi}$

LP_{co} -- $\Delta L \times \text{实际速度 } V_{\text{实}} / \text{最大速度 } V_{\text{max}}$ 。

实际上，套高时常是波动的。其主要原因是：

(1)、轧件的温度和材质等不可能是很均匀的，负载的变化将影响到处于活套两端机架的金属秒流量不相等，引起线速度发生变化，导致活套套量的变化。

(2)、精轧机系统本身速度设定不合适，主轧线速度级联调不协调，以及精轧机的速度调节器，电流调节器动态指标和抗扰性能不好，都将反映到活套的波动上来。

(3)、由于现场高温和水蒸汽等恶劣环境影响，常使扫描器工作不稳定，而扫描器的灵敏度，线性度和精度又会直接影响到活套的控制。

由于上述原因，使我们在调试初期遇到了活套波动大的难题。经过不断的分析、摸索、改进，终于获得了成效。我们主要采取了以下措施：

1、内外环综合考虑。

一开始遇到“波动”问题时，我们只是孤立地调活套环节，误认为是动态响应跟不上，从而把比例放大倍数调到 8 倍。经过分析得知，活套扫描器检测套高，是作为位置控制的反馈信号，活套控制环节实际上是对轧件形成的活套在某一设定高度上的位置控制。

活套与精轧机实质上构成一个三环位置调节系统，内环是可控硅调速系统中的电流环和速度环，外环是活套控制环。这三环是不可分割的统一整体。在实际调试中，速度环是抑制负载扰动的关键环节，若在负载波动引起速度偏差不能尽快调节时，则必将带来活套的偏差，以致整个级联调节的过程较长，而在提高系统快速性的同时，活套调节又会出现超调和活套摆动现象，这对矛盾只能从内外环上综合考虑，即速度环抗扰性能要强、动态品质要高些；而活套环要稳定，超调量尽可能小些，动态品质要低些。在这个原则下，一方面适当增加速度调节器的比例放大倍数，并减小其积分时间常数。另一方面，将活套环的比例放大倍数由 8 降至 2，并把活套的模拟量输入采样频率由 16 改为 4。这样就保证了三环系统有较好的稳态和动态特性。

该三环系统控制框图如下：

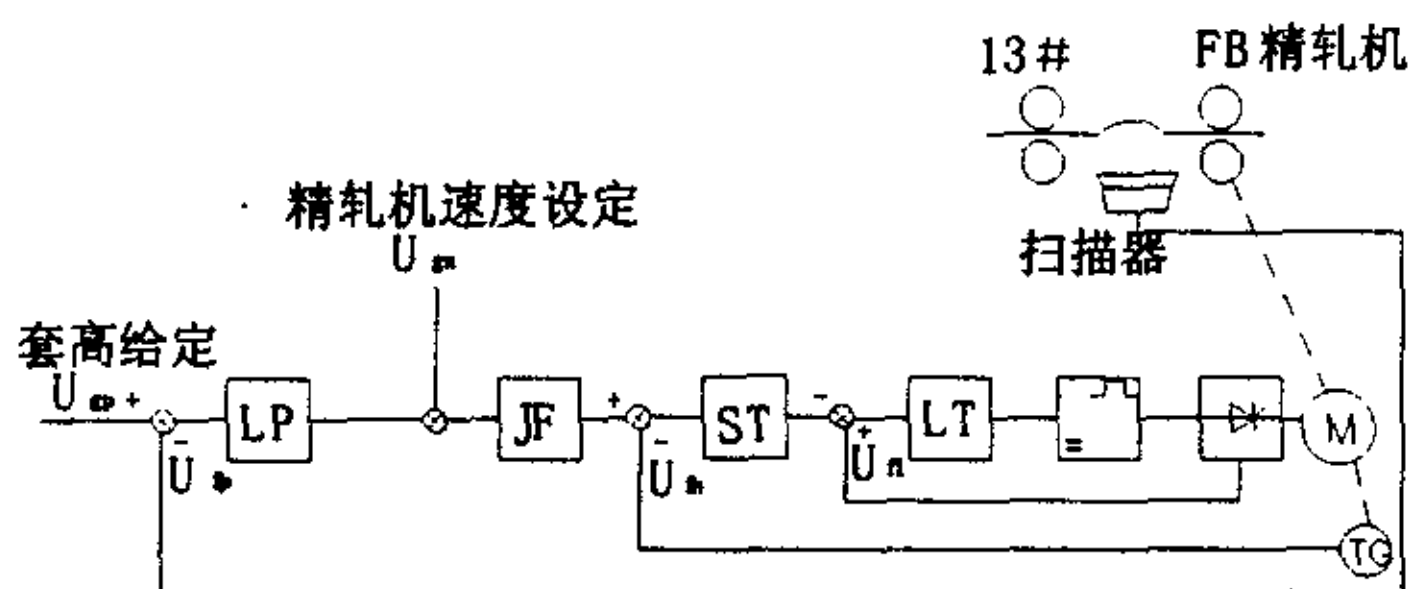


图14 活套控制环节系统框图

2、处理好活套与级联调的关系。

在整个系统调试中，还应考虑到活套调节对夹送辊和吐丝机速度的影响。按照工艺要求，轧件在精轧机和夹送辊之间应为恒张力轧制，以保证稳定的吐丝。故活套调节在改变精轧机速度的同时，应修改夹送辊和吐丝机的速度，还要注意到各个环节的响应时间，达到同步变速。考虑到吐丝机的响应时间远比精轧机要慢，因此首先测出吐丝机启、制动时间，然后据此在精轧机和夹送辊中增设一个 dn/dt 环节，使修正速度的活套调节量受到 dn/dt 的限制，即加一斜坡给定，使其响应时间基本一致，以尽量保持在活套调节过程中轧件应有的张力，消除推钢和拉钢的现象。在级联调给定中，为提高调速的同步性能，均取活套调节量的 10%。同时迭加到精轧机、吐丝机和夹送辊的给定积分器中，并设计成同一积分斜率，调整精度达到 0.01 秒。这里充分体现出数字控制比模拟调节优越得多。

第五章 活套控制常见故障与稳定性分析

§ 1 活套控制在轧制过程中常见的故障

由于活套控制是以通过速度控制来实现轧件套量高度控制的,所以速度的非正常波动,都会给活套控制带来影响,严重的将导致堆钢事故。然而,一切非正常的动作,最终都反映在速度波动上。所以造成活套控制的故障因素是很多的。

1、活套扫描器故障

在位置、速度、电流三环系统中,活套扫描器是套量高度实际量的检测装置,在位置环中起着反馈元件器件的作用。作为控制的最外环,如果该装置发生问题,直接影响活套的控制,常见的故障有:

(1) 扫描器输出抖动。因为是检测装置,故必须分清是轧件本身波动造成的输出抖动,还是扫描器本身工作不稳定而造成的输出抖动。这两种抖动都会使轧件抖动继续进行。如果是轧件本身的波动,随适当的调节和检查处理,会逐步消除。如果是扫描器本身工作不稳定,则必须根据调节的方向,把最先产生抖动的扫描器检查出,进行更换或进行适当的灵敏度调节。这种故障的判断往往需要有一定的经验积累。

(2) 扫描器输出线性度不好。这种情况在活套稳态过程没有什么影响,但在活套动态调节过程中,可能使调节时间加长、套量时间不一致、控制精度低。

(3) 扫描器数字量无输出或延时输出。这主要是由于扫描器上的继电器有粘连,在轧制过程中,会造成启动套杆不动作或延时动作。

2、活套控制调节器故障

(1) 活套调节器是位置环的主要调节元件,如果扫描器的输出是稳定的,但调节器的输出不稳定,也会直接影响轧件的稳定和其它活套的稳定,从而造成扫描器的输出也不稳定。由于扫描器输出的波动,调节器的输出也波动,这里同样存在一个必须先分析是什么原因造成不稳定的问题。

(2) 活套调节器的释放封锁,逻辑关系不对。造成这种原因多数是 PLC 引起的,反映在调节器上有提前释放或延时释放,提前锁

或延时封锁。这种非正常的逻辑控制，多数出现在活套控制的头部控制和尾部控制中，提前释放容易造成头部起套过大，轧件打结拉断。延时释放则容易造成头部张力过大，甚至拉断轧件。提前封锁，容易造成尾部控制张力大。延时封锁，容易造成尾部打结。

(3) 活套控制的头尾计时故障

由于头、尾计时是根据 PLC 来的信号，通过积分电路而产生的延时时间，再送给 PLC 作为调节器的释放和封锁控制。所以这一部分不好，也直接产生上面的故障。

3、主传动控制系统故障

主要指主传动速度环、电流环故障。常见的有速度反馈装置出现不稳定现象，造成电流环波动，从而使速度环出现非正常波动，引起活套波动，然后通过级联调节的功能，使级联方向上活套均不稳定。电流环的故障也会使速度环出现非正常的波动，引起活套波动。

4、轧制程序故障

轧制程序故障主要是由程序录入与实际情况不符造成的故障。例如：主设定的辊径值与实际装配的辊径值不符造成设定的线速度与实际不等。如果偏差不大，通过活套控制基本上能够轧制的。但是，在头部、尾部控制上可能出现波动。

§ 2 活套的稳定性分析

如前所述，有很多因素将引起活套的不稳定。

1、如果是活套扫描器引起的活套振荡，活套是无规则地跳动，其幅值和频率的变化无规律，甚至振荡时有时无。

2、如果是轧制过程本身引起的活套振荡，则具有如下特点：

(1) 振荡周期约 2-4s。

(2) 振荡幅值与频率变化规律。

(3) 把调节器中的比例系数降低，则振荡更为严重。

这种情况通常是由于导卫安装不当引起的。它使轧件在棍缝中有规律地摆动，使该机架的压延发生了变化。

3、由于机械调整及活套台原因引起的振荡，则具有如下特点：

(1) 振荡周期约 0.1-0.5s。

(2) 振荡从活套形成后即开始，且振幅沿着轧件长度方向有规律地变化。

这时可通过调整起套棍及支撑棍的位置来解决。如果活套向一侧倾斜, 则可通过降低活套高度和调节支撑棍来解决。

4、由于活套调节器比例系数调整不当引起的振荡, 则具有如下特点:

(1) 振荡周期约 2s。

(2) 由轧件的头部至尾部, 振荡的幅值和频率都是均匀的, 通过适当调整比例系数即可消除这种振荡。

通常一个调整好的活套不会不稳定, 所以, 不要轻易通过改变活套高度的办法来使活套稳定下来。活套的动态性能与有关机架传动装置的速度控制动态性能有关。

第六章 线材轧制中的张力控制

§ 1 微张力控制

一、概述

在轧速控制中，主要控制对象是单机架的速度设定和级联调的速度调整。而级联调的实质则是张力控制。在轧制过程中，张力的变化直接影响着前滑、宽展、压下量等参数，甚至影响轧件尺寸。反过来，这些工艺参数也决定着张力。所以说，张力的变化在连轧过程中是十分复杂和重要的，是保证连轧过程的一个重要控制量。

根据张力的“自调节”理论，只要速度差存在，张力就会以指数曲线变化，并在轧线上传导，尤其在粗轧段和中轧段，钢料材质和温度变化大，且这段因轧件断面较大又不宜于用活套控制，故一般都采取“头部”微张力（约 3%）控制。

二、工作原理与系统构成

1、轧制力矩检测

连轧机中，两机架间轧件所受张力的大小可以从两架主电机负载中得到反应。如果 1[#]、2[#]机架间有张力，则必然 1[#]电机的负荷相对要减少，2[#]电机负荷相对要增大。所以 1[#]、2[#]电机的轧制力矩可以反应轧件所受张力情况。

由电机动态方程：

$$M_D - M_f = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad \text{且} \quad M_f = M_w + M_R + M_\sigma$$

其中：M_D——电磁力矩

M_f——总负载力矩

M_w——轧制力矩

M_R——摩擦力矩

M_σ——下一机架张力引起本机架变形力矩

可知轧制力矩为：

$$M_w = M_D - \left(\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + M_R + M_\sigma \right)$$

$$\text{且：} \quad M_D = C_M \phi I_d \quad \phi = \frac{E}{n} \cdot K$$

由于轧机的主传动系统采用的是典型的直流双环调速系统，由上式即可间接测出轧制力矩 M_w。其原理如图 1 所示。

n 、 E 、 I_d 分别为电机的转速、反电势及电枢电流。

在轧制过程中，轧制力矩不只与张力大小有关，也受制于压下量（或辊缝）、材质等因素。不同的钢温、钢种，轧制力矩也不一样。所以，张力的设定是整个控制的关键。

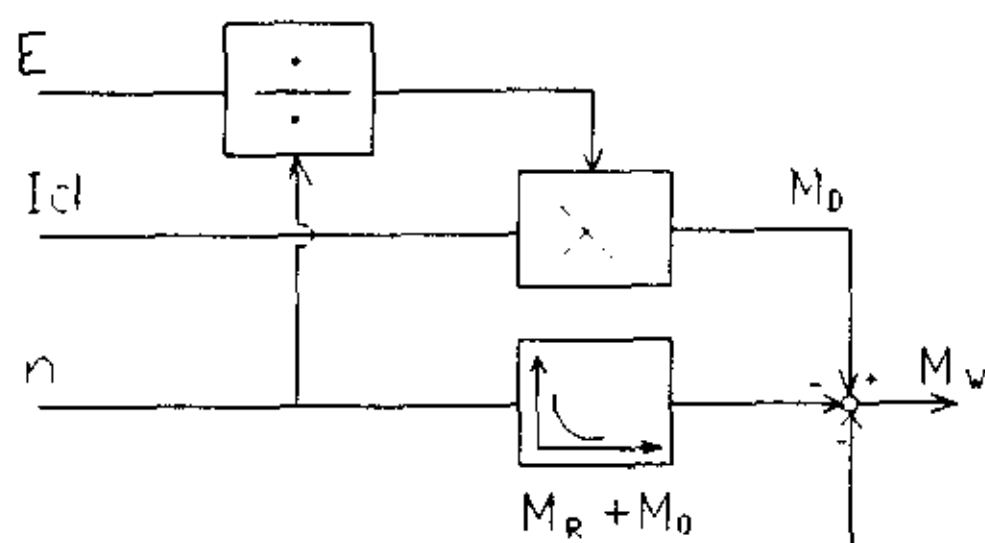


图 1 轧制力矩检测原理图

2、张力设定原理

当轧件咬入 1[#]机架但未进入 2[#]机架之前，此时 1[#]、2[#]机架之间的轧件不受任何张力（或堆力），可以说是无张力轧制。记忆此时的轧制力矩 M_w^* （由计算机进行采样、记忆），作为张力的设定值。当轧件咬入 2[#]机架后，调节上游机架（1[#]机架）或下游机架（2[#]机架）的速度，如果 1[#]机架能控制在所设定轧制力矩上，轧件基本是处于无张力状态下轧制的。但是因为这种控制在实际中很难保证顺利轧制，故在原设定值上要叠加一个量 σ ，使张力设定值为 $M_w^* + \sigma$ ，以实现张力控制，张力的的大小取决于 σ 的大小。

3、系统的构成

整个微张力控制系统由三个部分组成：轧制力矩的检测、张力调节部分、逻辑顺序控制部分。

轧制力矩检测部分即根据上述原理，在系统投入使用之前，计算出张力的设定值。系统投入后，检测实际的控制量，作为张力的反馈信号，这时它是系统的反馈环节。

张力调节部分主要是由普通的电子线路构成，与相应机架的调速系统构成一体，由调节其机架速度来实现张力控制。

逻辑顺序控制部分由一台微机来实现其顺序控制的要求。各机架间的张力控制环节，通过级联关系构成一个张力控制系统。

这样，由实际反馈的轧制力矩 M_w ，与设定值 $(M_w + \sigma)$ 相比较，通过张力调节器，来调节其相应机架的速度，使得 $M_w = M_w^* + \sigma$ ，以实现张力控制。

三、控制系统分析及计算原理

这种张力控制是采用检测轧制力矩，调节相关机架的速度，来保证轧件在一定的轧制力矩下进行轧制，从而间接地实现对张力的控制。从张力控制的角度分析，不论是上游调节还是下游调节，相关机架的调速系统，就是张力调节器的控制对象，即张力的控制是通过调节其速度来实现的。

现以上游调节的方式加以分析。当轧制轧件咬入 2#机架后，假设 1#机架、2#机架之间有一定的推力，这势必使 1#机架的轧制力矩偏大，于是通过张力调节器，给出调节信号，减小 1#机架的轧制速度，使得 1#机架的轧制力矩保持在设定值上。其控制系统框图如图 2 所示。

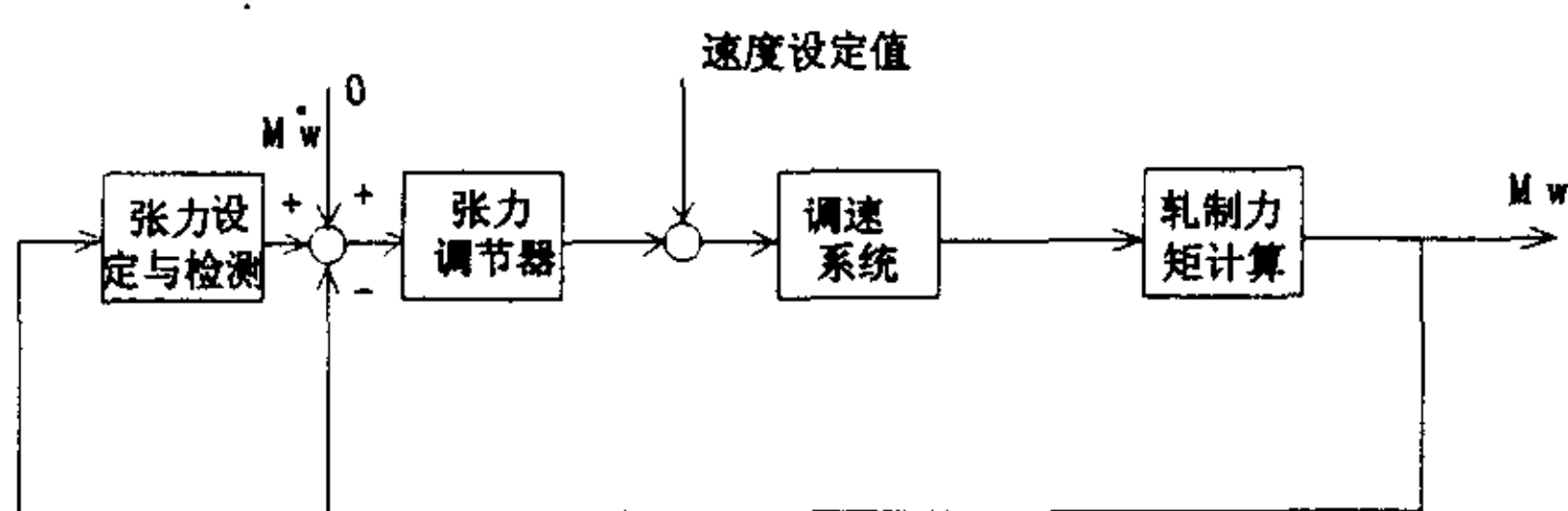


图2 张力控制系统框图

在动态过程中，速度设定值为常数；张力调节器投入后，张力设定 $(M_w^* + \sigma)$ 与轧制力矩无关，也是常数；调速系统为典型的双环调速系统。如忽略电动机的磁通 Φ 的变化，则由图 2 可得张力调节系统的动态结构图(图 3)。故张力控制系统可视为在双环调速系统的基础上构成的一个三环调节系统。

图 3 中 ZT 为张力调节器。与常规三环调节系统一样，张力调节特性好坏，要求内环(即电流环、速度环)有较高的动态品质和静态精度，并且各机架的调速性能应尽可能一致。这些既是张力调节、优化的前提，也是满足张力级联调节的需要。因级联调节信号，送到速度调节器 ST 前，调节其速度，对于张力控制系统来说，相当于

一扰动信号作用。所以整个系统应有较高的动态特性，即较强的抗扰能力，以满足整个系统的级联调节作用，否则级联调节作用难以得到理想的效果。

这种张力控制方式，实质上是对主电机负载进行控制。如把图 3

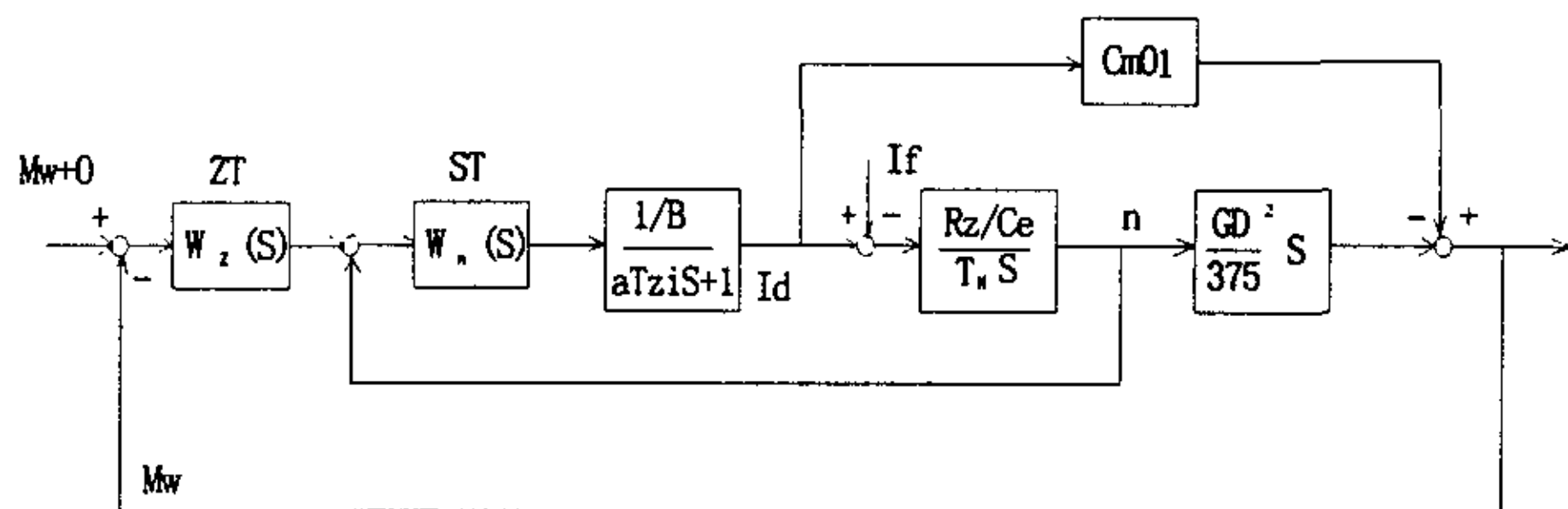


图3 张力控制系统动态结构图

中力矩检测部分单独划出，则可看出，在忽略 $C_m\Phi$ 作用时，对轧制力矩 M_w 的控制，也就是对负载电流 I_f 进行控制。在稳态过程中即 $I_d = I_f$ ，就是对电枢电流 I_d 进行控制，从而实现张力控制；高速线材轧机中的夹送辊与精轧机之间的张力控制，就是采用了直接对系统的电枢电流进行控制（即控制速度调节器的输出限幅值）达到张力控制要求的。

其计算原理如下：

设第 i 机架的转速为 n_i ，线速度为 v_i

$$\lambda_i = \frac{V_i}{V_{i-1}}$$

$$n_i = k_i \cdot v_i$$

可得：

$$\frac{n_i}{n_{i-1}} = \frac{k_i}{k_{i-1}} \cdot \frac{1}{\lambda_{i-1}} = Q_i$$

其中： λ 为机架的延伸率，由轧机孔型辊缝调整确定。

K 为设备固有常数，由辊径、齿轮传动比确定。

Q 为相邻机架间的速比。

在轧钢中，每次对单机架速度的设定，就是建立新的速比匹配关系。当进行级联调时，即按 $n_i = Q_i \cdot n_{i+1}$ 的关系式，逐一向上游推

算各机架的转速。这种以保持各机架间速比不变为原则的级联调节方法属于传统的“直接速度式”微张力控制，现首钢第三线材厂即为此型。其优点是简单易实现，缺点是不含张力补偿项，控制精度较低。

采用控制轧制力矩的方法，实现张力控制的方案，有它的致命弱点。因两架之间的张力大小，是通过相应两架的轧制力矩来反应的，而由轧制力矩来判断轧件是否处于张力(或推力)轧制，是有条件的，即轧制过程中，轧机相对轧件变形所产生的变形力矩应基本不变，否则整个系统的张力将无法控制。就是说，轧制力矩中主要包括二个量，一个是张力矩，一个是变形力矩。变形力矩的大小在压下不变(轧制的辊缝不变)情况下，取决于轧件的材质、温度等因素。一根十几米长的钢坯，如果它的断面尺寸、温度以及内部化学成分不是很均匀的话，必然在轧制过程中有变形力矩的变化，即轧制力矩相应波动。由于这种波动并不是由张力变化直接引起的，因而势必导致系统判断出错，对张力无法控制，尤其在微张力控制下更加困难。

所以，采用这种张力控制方案，必须对坯料的均匀度有严格的要求(在 3% 内)，否则难以达到预期的效果，而被迫改为仅对轧件头部实行微张力控制，以避免或减小“不均匀”因素所造成的影响。对于不产生变形力矩的情况下(如夹送辊的张力控制等)，则不存在这个问题，采用轧制力矩方法控制张力，就更可靠、有效。

考虑到电机参数和调速装置的动态指标，负荷变化等因素对轧速的影响，应将三线材级联调系统进一步改进成“电流—速度间接式”微张力控制，以尽量使轧速调整到最佳状态。

其计算原理为：

$$V(i) = \frac{V(i+1)}{\lambda(i+1)} [1 + S_j(i) + S_q(i)] \dots \dots \dots (1)$$

式中： S_j 为第 i 机架人工对速度设定的干预系数。

S_q 为第 i 机架张力对速度的调整系数。

设第 K 次采样时张力的偏差值 $\Delta q(K)$ 。

$$\Delta q(k) = \frac{D}{2R} C_m \phi [I_a(k) - \frac{I_f}{F_s}] \dots \dots \dots (2)$$

则根据 PID 控制算法有：

$$S_q(k) = K_p \cdot \Delta q(k) + K_i \sum \Delta q(r) + K_d [\Delta q(k) - \Delta q(k-1)] \dots \textcircled{3}$$

(2) (3) 式中:

K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例, 积分和微分系数。

$C_m \phi$ 为电机系数。

D 为轧辊直径

R 为齿轮传动比

I_a 为电机电枢电流采样值。

I_f 为自由轧制时电机电枢电流。

F_s 为张力系数设定值。

应用这种“电流—速度间接式”微张力控制的算法原理, 可在三线材现有的 square-D 可编程机中编程, 程序框图如图 4 所示。

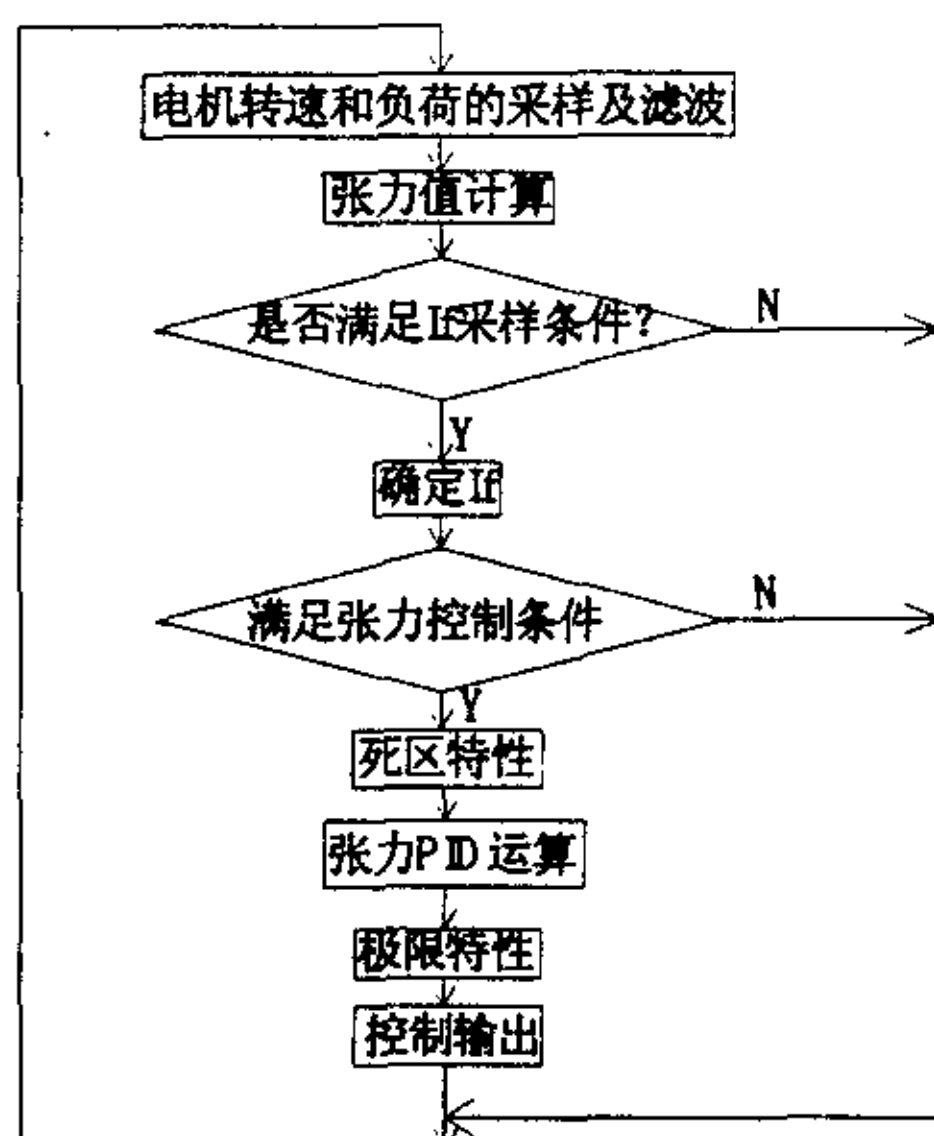


图4 张力控制程序框图

实施此方案, 可直接利用现有的网络通讯和 square-D 可编程机, 无需增加硬设备。若能采用这种较先进的微张力控制, 可使机架的负荷由最大波动 50% 减至 10% 左右, 使三线材的轧材质量和成材率有较大的提高。

§ 2 夹送辊的张力控制

一、夹送辊张力控制的基本思想

夹送辊的速度调节是以精轧机的线速度作为基准值的，由于精轧机出口速度很高，活套调节又造成精轧机轧制速度的波动，使得夹送辊的动态响应跟不上，而直接影响到吐丝机的圈型。问题的关键是要抓住张力控制，解决好夹送辊与精轧机、吐丝机之间的速度匹配问题，即三者间的同步性问题。我们的办法就是利用电流调节器比速度调节器的动态响应快的特性来控制夹送辊的张力。在轧制过程中，让速度调节器起饱和和非线性的作用，而让电流调节器起恒值控制作用。用设定电流限幅值作为电流环的给定，使之产生一恒定力矩，形成夹送辊与精轧机之间的恒张力控制，快速地调节由速度波动而产生的张力波动。这就使得在整个控制过程之中，既有利用速差进行的张力控制，又有电流恒值进行的张力控制。

二、夹送辊张力控制系统的给定控制（速度给定控制和电流限幅值给定控制）

控制系统是由可编程机分别计算出速度给定值 $TR-n$ 和电流限幅给定值 $TR-I$ 来实现的，以此来代替原模拟系统靠调节电位器和阻容参数的陈旧手段。给定值的波形图如下：

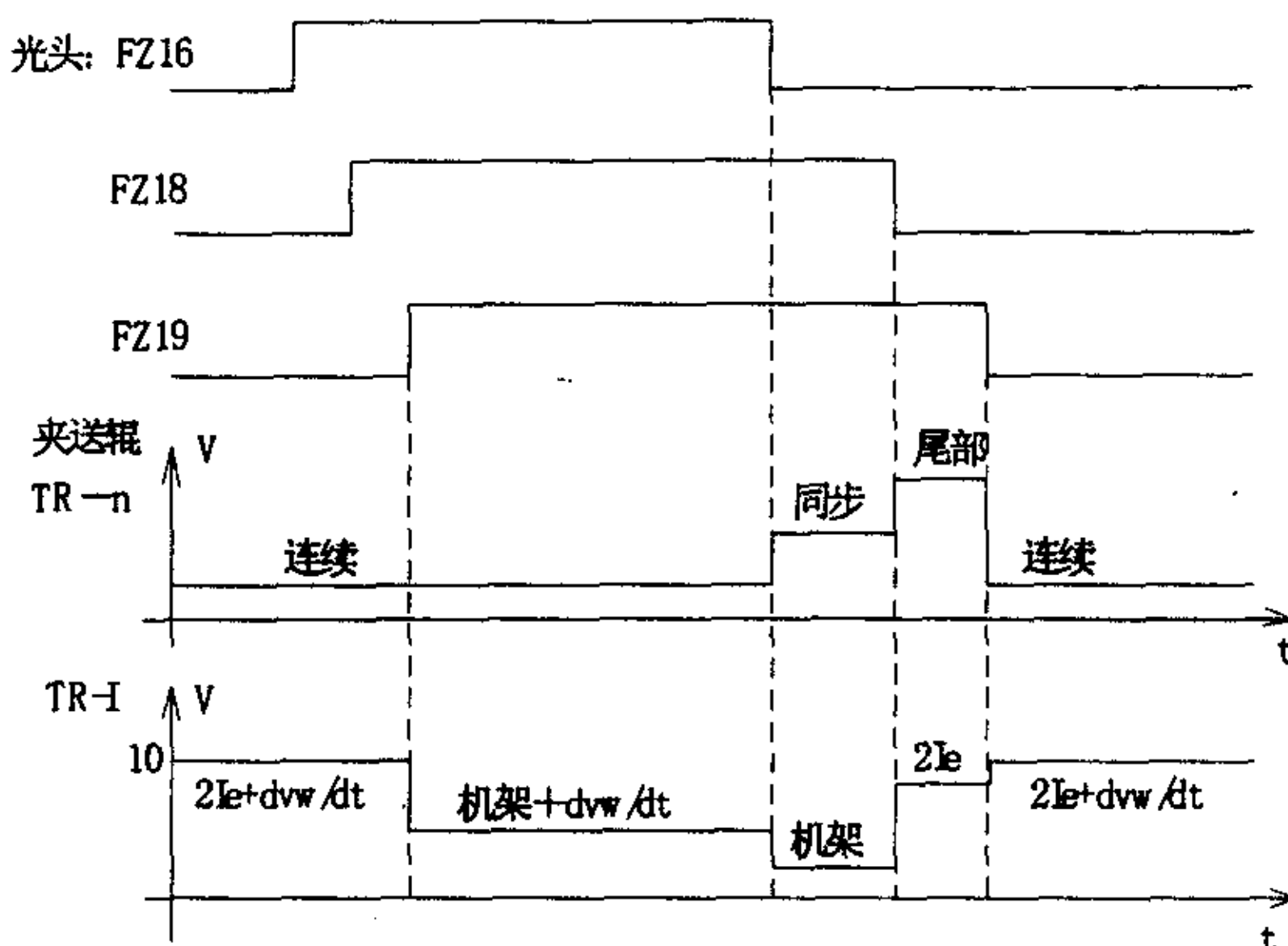


图 5 给定值波形图

1、速度给定值

根据三种不同的工作状态给出。

(1) 在“连续”状态下。（夹送辊空载时及咬钢后直到线材尾部到达精轧机前）

$$n_{TR1} = K_1 K_2 \cdot V_{FB}$$

其中： V_{FB} 是精轧机出口的实际线速度设定值； K_1 是夹送辊与精轧机的速差张力值的超前系数，现取 1.3； $K_2 = 10/D_{TR} = 1.16$ ， D_{TR} 为夹送辊辊径，已绘制出夹送辊的辊径/电压模拟曲线，当辊径变化时，可由表查出 D_{TR} ，据 93 年 4 月 29 实测，电机转速与设定值的误差在 1 转/分以内，精度非常理想。

(2) 在“同步”状态下。（线材尾部到达精轧机前直到线材尾部出精轧机）

$$n_{TR2} = K \cdot nf$$

其中： nf 是夹送辊的速度反馈值； K 是同步系数，现取 1.2。

K 的选择是根据调试情况进行的，主要是通过 K 的选择使速度调节器退饱和后，夹送辊的速度基准值仍高于精轧机，基本同步于前一阶段的速度，形成以速差控制的张力控制。

此状态正值轧材尾部穿过精轧机，选择 K 的目的是使速度调节器退饱和后，夹送辊的速度仍高于精轧机，且基本上与前一段速度保持同步。

(3) 在“尾部”状态下。（线材尾部出精轧机后直到夹送辊抛钢）

$$n_{TR3} = K \cdot nf$$

其中： K 是前滑系数，取决于出口机架。

现用 25# 机架为例， K 取 1.186。在速度环的作用下，电机由“同步”速度升到“尾部”速度，有效地防止了精轧机抛钢后突然失去张力所造成的尾部抖动和甩尾，实现了平滑过渡。

总之，可编程机时刻将精轧机上游机架速度的变化，根据轧材所处的不同位置以及相关的因素，通过程序计算出相应的夹送辊速度基准值，以获得最佳的级联速度配合。

2、电流限幅值

主要分为两个阶段。

(1) 当夹送辊咬入钢头至钢尾出精轧机止为一个阶段，若选“头部”夹送工作制时，则夹送辊全线压辊轧制。这阶段电流限幅值的

范围是 $67\% - 100\%I_e$, 视出口机架选择而定, 称为“机架电流”状态。咬钢时, 动态速降立即使速度调节器饱和, 但电流调节器给定在限幅值控制下, 无法使速度调节器退饱和。这阶段, 夹送辊与精轧机之间始终带张力控制, 电流环起恒值调节作用, 使夹送辊在限幅值控制下恒张力控制轧材。

(2) 当精轧机抛钢后, 立即失去张力, 此阶段称为“额定电流接通”状态, 电流限幅值切换到 $200\%I_e$ (对应 10^V) 这时速度环退饱和, 夹送辊在“同步”和“尾部”切换速度下, 以速差形成的张力来控制轧材。

三、夹送辊张力控制系统分析

如图 5 所示, 在 n_{TR1} 基准值控制下, 夹送辊对应的速度是 n_1 , 电流限幅值是 $I_{L1}=100\%I_{max}$, 精轧机由于活套头部控制的调节, 使得夹送辊的速度基准值 n_{TR1} 也波动。由于速度环没有饱和, 夹送辊的速度调节总是能满足 $W_{n1}=X_{n1}$, 实际上是夹送辊以比精轧机高 7.4% 的速度等待轧件的到来。

当轧件咬入夹送辊后, n_{TR1} 仍保持不变, 电流限幅值变成 I_{L1}' (一般设定为 $I_{L1}'=35\%I_{max}$, 在控冷画面上显示的是 $2 \times 35\% = 70\%$)。此时, 由于咬钢后的动态速降 Δn 立即使速度调节器饱和; 夹送辊电流尽管上升, 但由于给定的电流幅值为 $35\%I_{max}$, 无法使速度调节器退饱和。电流调节器给定为限幅值控制, 电流反馈 X_2 很快和 I_{L1}' 平衡, 对应的夹送辊速度是 n'_1 , 假如 $n'_1 > n_{TR1}$, 速度调节器退饱和。但 n_{TR1} 在设定中已考虑了超前精轧速度 7.4% , 所以无论 $n'_1 > n_{TR1}$, 还是 $n'_1 < n_{TR1}$, 夹送辊始终和精轧机制间存在着张力控制。当 $n'_1 < n_{TR1}$ 时, 速度调节器由于存在偏差而饱和, 电流环为恒值调节, 夹送辊在 I_{L1}' 控制下恒张力控制线材。当 $n'_1 > n_{TR1}$ 时, 速度调节器退饱和, 夹送辊在 n_{TR1} 控制下以精轧机和夹送辊的速度差 (7.4%) 产生的张力控制线材。

这样利用双环控制, 速度调节器的饱和非线性作用, 保证了电流环的恒值调节。在夹送辊和精轧机的配合问题上, 解决了夹送辊动态响应慢的矛盾。

当线材尾部到达精轧机前活套扫描器时, 主控计算机给出 n_{TR2} , 同时给出 $I_{L2}=100\%I_{max}$; 在 n_{TR2} 控制下, 由于电流限幅值为 100% , 又存在两种可能: 一种可能是电流上升、转速上升, 使得调节器退饱和; 另一可能是降低给定值 ($n_{TR2} < n_{TR1}$) 同样可以产生负偏差, 使调节器退饱和 $n_{TR2} = K2n_f$ (n_f 是当时夹送辊的实际速度)。但由于在 n_{TR1}

控制下, 速度开环, n_{TR1} 和 n_f 不相等, 并且是动态随机的, 是在电流环控制下对应的瞬时速度, 则无论是哪一种可能, 都在向调节器退饱和方向作用, 使夹送辊又变成线性控制系统。由于此时精轧机已经抛钢, 没有活套的调节, 精轧机的速度基本保持不变; 夹送辊在 n_{TR2} 的控制下, 以速差形成的张力控制线材。尾部在精轧机内完成调节器退饱和的控制, 比尾部出精轧机后进行退饱和控制可以更有效地防止精轧机抛钢后产生的甩尾。但由于进行给定值的切换和电流限幅值的切换产生的加速或制动电流, 会在线材尾部带来张力控制的困难。在调试中, 由于 K 参数选配不当, 经常出现钢的尾部留在精轧机的出口机架前。所以, 对上述二种可能需要进行综合考虑。

当线材尾部出精轧机后, 主控计算机仍保持 $I_{L2}(100\%I_{max})$ 恒定不变, 并给出 $n_{TR3}=Kn_f$, 由于速度环控制, 电机开始制动降速到 $n_f=n_{TR3}$, 有效地防止了精轧抛钢后张力突然消失所造成的尾部抖动和甩尾, 保证了平滑地过渡, 使吐丝机有较好的圈形。

当线材尾部出夹送辊后, 主控计算机控制夹紧电磁阀打开, 并给出 $Wn1$ 基准值。电流限幅值仍保持为 $I_{L2}(100\%I_{max})$, 准备下一根线材的到来。

四、系统稳定性的分析

在控制系统中, 只要存在一个非线性环节, 则该系统就为非线性控制系统。夹送辊在整个控制过程中, 利用了速度调节器的饱和和非线性, 是一种串联校正前置放大器饱和的控制系统。(如图 6)

调速系统的开环传递函数是

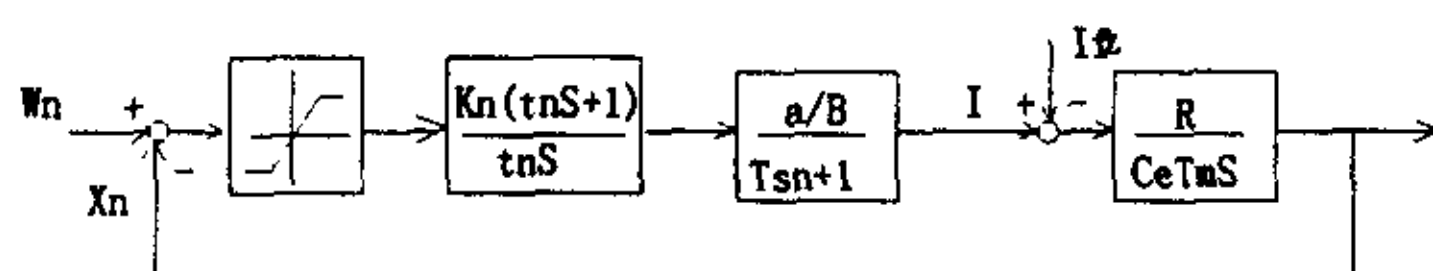


图6 夹送辊动态结构图

$$W(S) = \frac{K_n \alpha R (C_n S + 1)}{C_n / S C_e T_m S^2 (T_{sn} S + 1)} = \frac{K_n (C_n S + 1)}{S^2 (T_{sn} S + 1)}$$

从描述函数的结论中知饱和特性不产生相移, 只有使系统的谐波增益下降的效应。由于截止频率 W_c 前移, 相频特性不变, 则夹送

棍控制系统的稳定性是增加的。

综上所述，在整个级联调控制中，夹送辊控制部分采用了时间最佳控制、自适应控制等思想。利用双环控制的饱和非线性作用，很好地解决了精轧机和夹送辊之间的速度配合问题。

第七章 结束语

在生产过程中,影响成品尺寸的因素很多,从活套控制的角度分析,主要有以下两点:

1、活套波动对成品尺寸影响:

在轧制过程中,由于种种原因可能使活套套高产生波动,无法稳定在某一高度上,导致精轧成品尺寸波动较大,严重时超出公差,成为废品。这是因为在活套套高波动较大时相应各机架速度在不断地调节,轧件在这之间很难实现无张力轧制,常出现拉钢,形成张力。尽管精轧是机组传动,精轧机内的轧件势必受到前面张力的影响,使出口成品尺寸出现偏差。所以在日常生产中,活套出现较大波动时,应停机检查;影响活套波动的因素除工艺设备原因外,还应从控制本身检查,主要是活套检测元件(活套扫描器)。

2. 起套、收套控制对成品尺寸的影响

由于起、收套控制和轧钢工艺本身的影响,使得成品的头、尾部不可避免地出现超差。但一般应控制在2-3圈以内。

起套控制的过程是:相邻两架之间,当轧件的头部进入下一架时;考虑一定的安全余量,发出起套信号,使气缸动作,由挑套杆将轧件挑起,与此同时,调节相应上游或下游机架速度形成活套。在整个起套过程中有两个时间值难以准确设定,一个是活套挑气缸的死区时间,另一个是轧件进入下一架起套安全时间的设定。如果起套时间设定过早,轧件还未进入下一架就起套,使得轧件头部离开导位,导致堆钢。所以,时间设定不得不从顺轧的角度考虑,以至过于保守,而使起套时间过晚。这样在未起套时,轧件是处于张力情况下轧制的,且起套瞬间张力还相当大。这必然使成品头部超差圈数增加,使成材率下降,剪头的劳动强度也增大。

收尾控制与起套控制类似。收尾时,由于逻辑切换等原因,产生速度波动,引起活套抖动影响成品尺寸。

另外,粗、中轧的张力调整,对成品尺寸有一定的影响。这是因为粗、中轧的张力对后面的活套控制有影响助缘故。由于张力传递因素的影响,如粗、中轧张力调整的过大,则当尾部离开粗轧区时,将使下游机架失张,引起活套产生较大的波动;影响最终成品尺寸。

从上面分析可以看出,活套影响成品尺寸,仍是张力这个因素,张力是纽带。所以应控制好预精轧区在活套调节下的无张力轧制。

参考文献

- (1) 董雷 高速线材轧机中的活套控制 电气传动 1989、2。
- (2) 钟廷珍等 线材生产 冶金工业出版社 1989、4
- (3) 杨鹏 攀钢线材厂精轧机自适应控制
北京科技大学自动化系硕士论文, 1990
- (4) 谢仕矩等 高速线材轧机的现状与任务 轧钢 1990, 4。
- (5) 史东日 唐钢高速线材轧机的张力控制轧钢 1990、2
- (6) 陈诗河、张进 国外高速线材轧机综述 钢铁技术 1986、7。
- (7) 苏彦民 电力拖动系统的微型计算机控制
西安交通大学出版社 1988
- (8) 陈伯时 自动控制系统 机械出版社 1981
- (9) 董雷 线材轧机中活套控制及其对成品尺寸的影响
马钢技术 90、3
- (10) 王卫东 线材轧制中的夹送辊张力控制 马钢技术 90、2