

300^m/_m 五机架冷连轧机 电 气 控 制 系 统

陆云源编写
龚家箴校核

上 海 第 十 钢 铁 厂

1983·9·30 定稿

五机架冷连轧机电气控制系统

目 录 8400566

前 言	1
第一章 五连轧机械设备、工艺流程及产品大纲	3
1-1 机械设各概况及工艺操作流程	3
1-2 产品大纲及轧制工艺	4
1-3 工艺对电传装置的要求	5
第二章 五机架冷连轧机的设计	6
2-1 主回路供电方式的确定	6
2-2 设计主机速度控制系统	12
2-3 设计主机张力控制系统	17
2-4 设计卷取机速度及张力控制系统	18
2-5 机组速度给定及锁零装置	21
2-6 系统的抗干扰措施	23
2-7 机组工艺操作、继电信号及保护系统	25
第三章 冷连轧机电气控制系统的基本工作原理	36
3-1 单机系统基本工作原理	36
3-2 卷取机系统基本工作原理	49
3-3 五连轧机组张力控制的基本工作原理	52
3-4 一些主要单元的基本工作原理	57
1. 综合调节器	57
2. 高保持给定积分器	60
3. 电压隔离器	62
4. 电势运算器	65
5. 触发器	70
6. 张力调节器	77

第四章 五连轧机组装置计算及选择	78
4-1 整流变压器计算及选择	79
4-2 平波电抗器的计算及选择	84
4-3 可控硅整流柜的选择	86
4-4 能耗制动电阻的计算及选择	87
第五章 五机组电气控制系统动态参数计算	93
5-1 时间常数 T_m 及 T_L 和参测定方法	93
5-2 系统传递函数推导及动态结构图	100
5-3 用“振荡指标法”设计主机电枢通道	113
5-4 用“振荡指标法”设计主机磁场通道	131
5-5 用“最佳校正”设计卷取机电枢通道	138
5-6 用“最佳校正”设计卷取机磁场通道	146
第六章 五机组电气系统的调试大纲	150
6-1 继电保护动作值的整定	151
6-2 单机系统调整	152
6-3 机组联调、投入张力闭环	157

五机架冷连轧机原是发电机——电动机供电、磁放大器调节及电机放大机励磁的先弱磁后升压系统，至八〇年共运行了十二年，由于设备陈旧，故障率高，系统落后，效率也较低，迫使我们在八〇年八月进行了大修改造。经改造后，落后的系统改为较为先进的可控硅供电系统。

更新后的五连轧以新的面貌于八〇年十〇月正式投入生产。相对旧系统，新系统的优越性是不容置疑的，以其第一年的生产情况的统计中表明：

1. 产量大幅度提高，以电缆带而言，生产的产量从原来班产18T增加到26吨，最高可达30吨。
2. 电耗大幅度降低：由原来每吨钢耗电224度降为163度。
3. 事故率大幅度下降：每月故障时间不超过8小时，有时甚至连续好几个月系统无事故。

生产运行至今，还未曾爆过一只熔丝或损坏过可控硅。

因此，体现了较大的经济价值。

北京整流器厂为五连轧提供了全套整流设备，与我们联合设计了全部系统。

由于更新后的五连轧机电气系统在我国小型冷连轧机中具有一定的先进性和代表性，全国许多兄弟厂都纷纷要求了解这个系统并作为改造和新建小型连轧机的借鉴。有些大学也将该机组作为自动控制专业学生的实习目标，我厂技术人员为学生们进行了实习辅导。新的系统也对电气值班人员提出了更高的要求，我们也进行了必要的培训。

现在，把整个系统进行了归纳、整理、补充，终于编写了这本书。我厂有关技术人员提供了有关的素材，北整厂也提供了有关资料，因此本书是大家关心的结果。

本书可作为交流资料提供兄弟厂参考，也可作为一份培训材料。由于水平关系，本书严密性是不够的，而且一定还存在不少缺点错误，希望读者给予指正。

一九八三年九月

- 1 -

五机架冷连轧机主要电气设备

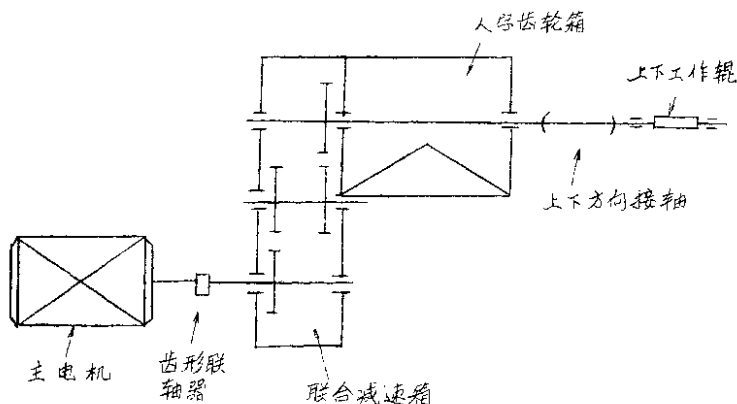
序号	名称	型号	容量	制造厂	数量	备注
1	主电机	ZD49.3/27	100KW	上海电机厂	5台	
2	卷取机	Z ₂ -101	40KW	上海南洋电机厂	1台	
3	叠流调节柜	KG5LZ1000/230	230W/1000A	北京益流器厂	5套	
4	"	KG5LZ500/230	230V/500A	"	2套	
5	直流电源	KGBA60/230	230V/60A	"	2套	
6	整流变压器	BZ1.738080	154KVA	"	7台	
7	励磁变压器	BZ1.738-140	9.8KVA	"	7台	
8	电抗器	BZ1.748.046	500A2mh	"	5台	
9	"		200A6mh	"	2台	
10	操作屏			自制	19块	
11	控制屏			"	5块	
12	操作台			"	4只	
13	操作点			"	5只	
14	测张仪			上海冲压件厂	6套	
15	X-测厚仪	SM2X-A	(0.05~3)%	解放铜厂	1台	
16	冷冻机	KD-20	2000 大卡/小时	上海冷冻机厂	1台	
17	测速机	ZCF-11	220V 150W 1000rpm	上海南洋电机厂	6台	
18	电力变压器	6600/0.380V	1800KVA	上海变压器厂	1台	

第一章 五连轧机械设备、工艺流程及产品大纲

1-1 机械设备概况及工艺操作流程

一、本机组为五机架冷连轧机组，由五台主轧机、一台开卷机及一台卷取机组组成。每台轧机传动方式为单台电机经变速箱变速后，通过人字齿轮箱同时带动上、下二个工作辊，故称为工作辊传动形式（有些轧机可以以压力辊传动，称为压力辊传动，这主要是轧机的用途不同）。

主传动如下图所示：



辊子辊面有效长度为 3000mm，直径为 105~120mm；

压力辊面有效辊长度为 3000mm，直径为 305mm~320mm。

机组最高速度为 4.3 米/秒，此时五机架辊子转速为 710rpm 左右。

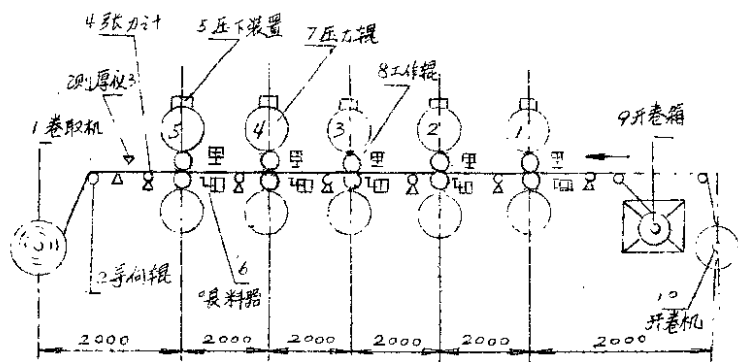
主轧机电机选用 ZD₂-49.3/27 100KW 五台

卷取机电机选用 Z₂-101 40KW 一台

开卷机电机选用 Z₂-62 13KW 一台

（由于机械设备未曾加工好，故暂用开卷箱替代）

三 设备工艺流程布置图



五台变速箱速比分别为(i): 6.04; 6.04; 4.2; 2.5; 1.7。

1-2 产品大纲及轧制工艺

连轧机主要是为了生产大批量、少品种的带钢产品，少量的多品种的带钢在连轧机上生产是不利的。五连轧主要生产的产品是普碳钢B₂P 205/0.5mm/m、205/0.15mm/m及205/0.10mm/m的品种，主要用于电缆工业及轻工业上。

其来料厚度为2.5mm/m二次轧制成形，经过一次轧制轧到0.5%或0.45mm/m及0.35%左右，然后再经过一次轧制到0.3%或0.15%及0.1%等各种类型产品。

典型轧制工艺如下：

205/2.5 → 205/0.1mm/m，连轧二道：

机架	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
出口厚度	1.25	0.8	0.45	0.35	0.25	0.20	0.15	0.12	0.11	0.10

205/2.5m/m → 205/0.15m/m, 连轧二道:

机架	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
出口 厚度	1.65	1.05	0.7	0.48	0.42	0.32	0.24	0.20	0.17	0.15

1-3 工艺对电气传动装置的要求:

电气设备首先必须满足工艺要求。连轧机比单机要求更高。工艺对电传装置的要求如下:

1. 要求轧机调速范围 0.3米/秒到 4.3米/秒, 连续可调, 因此调速范围(复盖率)为 $D=4.3/0.3=14$ 。

2. 各机架速度应能单独起制动及正、反向运转, 并能够联合起制动, 为保证能顺利穿带建张, 必须有速度微调装置。

3. 为保证能顺利穿带, 机架特性要求能满足足够硬度, 动态速降不能大于 25%, 为保证能顺利生产 0.1/205m/m 的产品, 要求轧机的起步特性完全一致。

4. 为减少头尾带钢损耗, 要求轧机起制动时间满足以下要求: 加速时间 ≤ 1.3 秒, 减速时间 ≤ 1.5 秒, 快速降速时间 ≤ 1.0 秒。在上述加减速操作中, 应能保证张力满足需要, 从而保证带钢质量。在发生事故状态下能进行紧急制动, 各机架应能按自己所允许的速率进行急停, 一般急停时间 ≤ 3 秒。

5. 轧机最大张力为 3T, 最小张力为 0.3T, 要求轧机加速时轧机之间张力波动 $\leq \pm 1.5\%$, 卷取(开卷)机与轧机间张力波动 $\leq \pm 5\%$, 在稳速轧制时, 张力波动 $\leq \pm 5\%$, 否则带钢表面将产生肋形, 影响带钢质量。

工艺对电气要求主要涉及到上述五条, 其它从略。

第二章 五机架冷连轧机设计

五机架冷连轧机的电气设计工作，除了要考虑上述工艺要求外，还必须考虑经费及上马时间这两个因素。有了足够的经费及充足的时间，则设备可考虑得更先进一些，但五连轧属于大修改造性质，因此不可能有很多费用及充余的时间，总共投资费用为30万元，时间为二个月。这样一来要求选用的系统在满足工艺及生产产品的要求下，尽量采用较为可靠成熟的单元，设计工作必须十分精确，并且考虑到今后维修方便，系统必须尽量统一。

2-1 主回路供电方式的确定

主回路供电方式方案是决定五机架系统性能，投资费用及今后保证正常生产等各种因素中最关键的一步。因此在五连轧机组主回路供电方案上经过详细的调查，并进行计算。目前确定采用三相全控整流桥供电形式。

一、为了决定采用三相全控桥供电还是反并联供电形式，曾经对国内现有的一些同类轧机上进行了调查，例如北京带钢厂及天津材料研究所的三连轧机，上述二台轧机均采用二组全控桥进行反并联供电，系统较复杂，事故率较高。而且了解到，在轧机带上一一定的负载下按一定斜率减速时，轧机完全可以按负载所产生的制动力矩进行减速，而反组桥在上述情况下减速时不会付出反向电流，即电机在减速时不必付出制动力矩。目前他们那里反组桥仅在反向运转时起作用，但对连轧机来讲反向运转仅是低速冲动时偶而用一下，不是作为主要传动方式，为此可考虑用一组桥进行供电，低速反转则采用其它方式来解决。

二、为稳妥起见，对工艺给出的最小负载量（以30%额定负载）下，轧机降速时间及降速顺序是否满足工艺及降速需要进行了计算。在轧机中，为了正常进行轧制，需要满足关系式：

$$\Delta M = M_D - M_Z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

其中 M_D 电机力矩, M_Z 负载力矩。

从式中可看出, 有三种情况: $\Delta M \geq 0$, $\Delta M > 0$, 电机力矩使轧机加速, $\Delta M = 0$, 轧机稳速轧制, $\Delta M < 0$ 轧机将减速, 如果 $M_D = 0$, $\Delta M = -M_Z$, 则使轧机得到最大的减速度, 为此, 我们依靠这一概念进行计算, 计算方式及结果如下:

电机参数: ZD₂ 43/27 100KW, 220V, 513A, 400~1200 rpm。

$$GD^2: 72 \text{ kg-m}^2$$

当电机不付出轧制力矩, 完全以 30% 额定负载力矩进行减速, 这时轧制带钢的力作为制动力作用到轧辊上, 再由轧辊经过机械传动作用到电机上, 此时电机作为负载。为此, 按轧制工艺中的“史通公式”(或能耗曲线法)首先近似计算出每一台轧机在额定负载下的轧制扭矩, 轧机在此负载作为制动力矩降速, 要求能满足二点:

1. 要满足停车顺序为 5、4、3、2、1, 五机架应能停得最快, 这样在降速过程中不会产生拉钢现象, 以保证带钢完整。

2. 要满足工艺提出的快速减速 ≤ 10 秒钟, 并且希望在降速时, 电机尚还有一些轧制力矩付出, 以保证能进行张力调节, 满足工艺提出的减速时张力波动 $\leq 15\%$ 这一要求。

对于五机架轧机来说, 额定压力为 120T, 工作辊传动方式, 取 $d = 105 \text{ mm}$, 以轧机在生产 205/0.3mm 产品时为例, 各机架工艺分配的出口厚度为:

$$2.5 - 1.7 - 1.1 - 0.75 - 0.45 - 0.3 \text{ mm}$$

根据“史通公式”: 计算轧制扭矩为 $M = 2P\varphi l_c$, 其中 $l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h}$ 。

P : 压力;

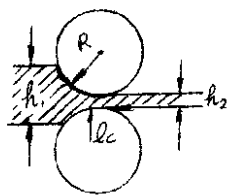
φ : 力臂系数取 0.35~0.45;

l_c : 接触弧长;

R : 辊子半径;

Δh : 绝对压下量 $\Delta h = h_1 - h_2$,

轧辊与轧材示意图如右示。



对于[#]1、[#]2机架来说，由于来料未曾进行过轧制，因此轧材较软，故而不需要很大的压力即可得到很大的变形。对于后机架来说由于轧材已经经过数次轧制，故轧材较硬，必须加大压力才能得到变形，而且力臂系数相应亦取得大些。计算如下（计算时忽略辊子的变形阻力等扭矩）：

$$M_1 = 2P\phi\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$= 2 \times 90 \text{ T} \times 0.35 \times \sqrt{105/2 \times 0.8} \times 10^{-3}$$

$$= 408.28 \text{ kg-m}$$

$$M_2 = 2P\phi\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$= 2 \times 95 \text{ T} \times 0.38 \times \sqrt{105/2 \times 0.6} \times 10^{-3}$$

$$= 405.22 \text{ kg-m}$$

$$M_3 = 2P\phi\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$= 2 \times 100 \text{ T} \times 0.40 \times \sqrt{105/2 \times 0.35} \times 10^{-3}$$

$$= 342.93 \text{ kg-m}$$

$$M_4 = 2P\phi\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$= 2 \times 110 \text{ T} \times 0.42 \times \sqrt{105/2 \times 0.30} \times 10^{-3}$$

$$= 366.7 \text{ kg-m}$$

$$M_5 = 2P\phi\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

$$= 2 \times 120 \text{ T} \times 0.45 \times \sqrt{105/2 \times 0.30} \times 10^{-3}$$

$$= 303.07 \text{ kg-m}$$

式中： M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ，分别为[#]1~[#]5机架负载力矩。

力矩计算所得是[#]1最大，[#]5机架最小，由于后机架对前机架有张力，因此尚须付出张力矩，这些力矩的付出使电机功率后机架比前机架要大，由于张力矩对减速影响不大，为方便起见，计算时可以忽略，为了保证机组减速时张力调节力矩付出，减速所耗力矩设为各机架在30%负载时的力矩，为 $M'_T = 30\% M$ ，式中 M 为

负载力矩，计算得表如下：

机架	1	2	3	4	5
M'_F	122.5	121.56	102.68	110.01	90.92

在制动中，除了负载所产生的制动力矩以外，还有机械摩擦力矩及电机摩擦力矩二项，分别选取如下：

机械摩擦力矩视压力而定，一般选取轧制力矩的 3% 作为机械摩擦力矩，则：

$$M''_F = 3\% M'_F$$

电机摩擦力矩可以用电机轴上输出力矩乘上 2% 系数而得，而轴上输出力矩为：

$$M'_H = 975 \frac{P}{n_s} = 975 \frac{100}{400} = 243.75 \text{ kg-m}$$

故电机摩擦损耗力矩可以考虑为：

$$M'''_F = 0.02 \cdot M'_H = 0.02 \times 243.75 = 4.875 \text{ kg-m}$$

在以 30% 额定负载力矩作为制动力矩的情况下，该力矩传递到电机上时正好降成 $1/i$ 倍， i 为电机致轧辊间的传动比，因此综合考虑到负载力矩、摩擦力矩及电机摩擦力矩值，可以得到计算结果如下表示：

机 架 号	1	2	3	4	5
负载折算到电机上的制动力矩 (kg-m)	20.28	20.13	24.49	44.0	53.48
总摩擦损耗力矩 (kg-m)	8.955	8.93	8.37	8.58	8.00
总制动力矩 (kg-m)	29.24	29.06	32.86	52.58	61.48

根据公式：

$$M_Z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

及

$$T_Z = \frac{n_{\max}}{dn/dt}$$

得

$$\begin{aligned} T_Z &= 1200 / \frac{375 M_Z}{GD^2} \\ &= 1200 / \frac{375}{72} \cdot M_Z \end{aligned}$$

将表中数值代入上式，则可得到每一轧机的降速时间如下表：

机 架 号	1	2	3	4	5
制 动 时 间 (t)	7.88	7.93	7.01	4.38	3.75

通过上表可以看出，降速顺序是按[#]5、4、3、2、1机架顺序停下，因此如果电机不付出力矩时降速，不会产生拉钢现象，而且还可看出，机组降速时间最慢的为7.93秒，比工艺要求快速停车10秒钟还多2.1秒，故机组在实际降速时，在除去降速力矩后电机还有正向力矩付出，而这些力矩的付出正好能保证机组在降速时能进行张力调节，从而保证满足工艺的需要。

在这里，还要附带说一句，由于轧钢工艺是十分复杂的，各种因素的变化量很多，它涉及到轧材软、硬，轧辊冷却情况，压下量大小及机组运行速度等许多因素有关。在压力加工中冷轧与热轧是不同的，因为热轧可塑性好，材料容易变形，因此热轧只能带小张或无张轧制，否则宽度就难保证。冷轧中，主要是通过压力使材料变形。但轧材经过多次轧制以后，产生加工硬化，要轧成相当薄的材料就十分困难，因为此时轧机压力都消耗在机架牌坊的弹性变形

及轧辊压扁上了。因此单靠轧是不能使材料轧得很薄的，也就是说对薄料而言，影响轧材厚度的敏感参数是张力，故要生产较薄的产品如 $205/0.1\text{m/m}$ 的种类，必须结合采取拉张力的办法。因此冷连轧机进行轧制带钢，一方面是通过“轧”，另一方面是通过“拉”的办法，边轧边拉使轧材加工成形。

综上所述，我们选定主回路采用三相全控桥供电，不采用反并联供电型式。实际使用效果很好，在目前国产的小型连轧机中，这还是第一台。采用三相全控整流桥供电，一次投资费用节约40%左右，而且系统简单可靠，调整维修也方便。由于一般资料对三相全控桥的各种性能有较详细的叙述，这里从略。

以上决策不用反并联主回路的分析是近似的，较精确的分析应该考虑到最后输出机架在下面二种特殊条件下的力学分析作为决定是否需要反并联主回路的依据：

1. 卷取机在最大卷径时的降速惯性力矩不致断带，并且最后机架来克服。

2. 最后机架处在各种轧材品种中，最小轧制力矩状态下能否克服本机架和卷取机（在最大卷重时）降速惯性力矩之和。

因此，考虑了卷取机的降速问题，对于五机架而言将使负载制动力矩减小，制动时间要比上面计算的要长一些。但如果进行综合考虑后计算可知，降速时间仍比10秒钟要小。因此上述决定仍然适用。对于卷取机而言，在轧制 0.1m/m 的带钢时，极限张力是 $T_{\max}=2000\text{kg/cm}^2 \times 0.1 \times 205 \times 10^{-2}=410\text{kg}$ ，而卷取机在最大卷重时由该张力进行制动时，则卷取机可在5~6秒内即可停下，这样在卷取机主回路的选择时，我们也不考虑采用反并联供电形式。

至于计算卷取机降速时间步骤如下：

1. 先计算出负载、卷筒及机械各部分惯量及电机之惯量。
2. 在最大张力 $T_{\max}$ 下，先计算出负载及机械各部分的降速时间。然后计算在 $T_{\max}$ 下电机的降速时间（由于负载与电机降速时， $T_{\max}$ 与它们有的有 $1/i$ 关系，有的没有 $1/i$ 关系）。
3. 再将二时间相加即可得到卷取机总的降速时间。

上述计算，读者有兴趣可自己根据具体设备进行计算。

2-2 主机速度控制系统：

一 在拖动系统中，对于直流电动机来说，其机械特性方程式为：

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_u \phi^2} M$$

改变 R 可以改变 n ，但这种办法在轧机上并不适用，因为特性差且浪费大量能源。为此在轧机上一般采用改变 U 及 ϕ 的办法来调速，一般称之为先升压后弱磁调速办法，亦叫作恒力矩恒功率调速，这样对能充分合理地利用电机能力是十分重要的。目前五机组亦采取调压调磁两种办法来进行调速。对电气系统来说，供电是比较简单的，但为满足工艺及产品的需要，系统是比较复杂的。并且在以稳定可靠的前提下，亦采用了一些在国内来说比较先进的单元，关于这些问题，我们将在后面一些章节中分别加以介绍。

二 电枢控制回路采用张力、速度、电流、电压四闭环形式，磁场控制回路采用电势及磁通双闭环形式。系统结构图如下页图所示。

(1) 虚框内弱磁时起作用。

(2) FC 为反相器，对于三机架以前的机架使用。

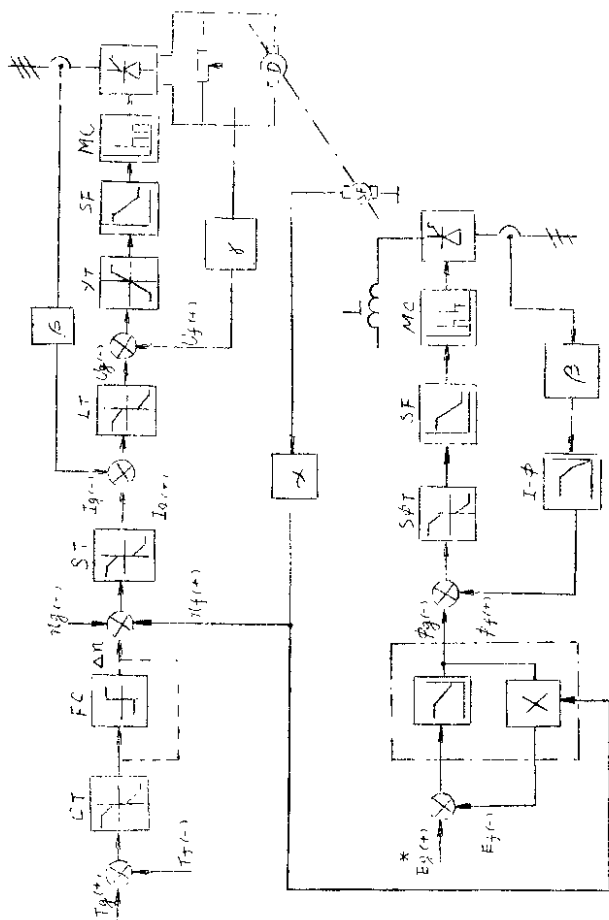
(3) 第三机架无 CT 调节器。

上面结构图除了第三机架为基准机架，不设置张力调节器外，其它机架均设置了张力调节器，分别对前（或后）机架电机进行工艺速度补偿。下面对系统设置这些环节的原因作一些说明，由于篇幅关系，对一般书籍中能查阅到的原理这里不作详细介绍，可查阅其它资料。

三 主通道系统：

(1) 电枢通道是基于双闭环的基础上的，我们知道双闭环系统有以下一些特点：

① 快速性及抗扰性均很好，能实现最大力矩起动，调整及检



修方便。

② 速度及电流分别采用二只调节器，因此参量之间互不影响，并且易于调整。

③ 电网电压波动及负载扰动分别可由 LT、ST 内环克服，可做到无静差。

④ 在负载较轻、 α 角较大时，电流会断续，这时电机转速将发生振荡。

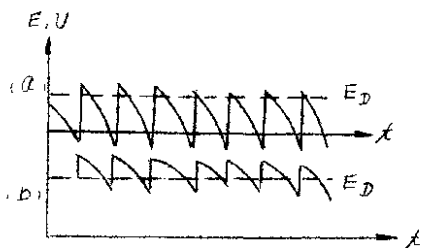
综上所述，双闭环系统作为连轧机系统的基本系统是可行的，但由于单纯的双闭环系统有缺陷，在小电流时电流断续会引起振荡，除非在调整时牺牲动态性能指标，因此不能满足生产 205/0.1mm 的产品需要，故而必须改进，本系统引进电压内环，来克服电机转速在电流断续时的振荡问题。

2. 电压环的作用原理：

(1) 由于电流断续时，过渡过程很短，等于电磁时间常数 T_L 消失，电流断续的原因是由于自感电势 ($\mathcal{E}_L = -L \frac{di_D}{dt}$) 维持不到

SCR 导通到下一个脉冲到来，从而在波形图上可看到电压过“0”点没有了，因此尽管

α 角未曾变化，但通过 SCR 输出的平均电压升高了，故电机转速也升高，如右图 (a) (b) 示，形成了电机速度输出特性等效软特性，从而使系统发生振荡，要消



除振荡问题可采用二个办法来解决：一是采用加大电抗器的办法，使电流连续，从而解决振荡问题。但采用这一方案，虽然并不会影响系统的快速性及稳定性（由于在调整时可采取加大电流环放大倍数来对消加大电抗器后 T_L 的增加），但会增加电抗器投资费用及损耗，因此在目前供电系统中常采用另一些办法。其中之一就是在