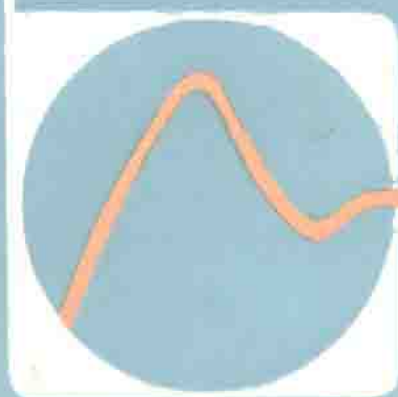




1200热轧卷板机可控硅

供电自动调节系统

上海整流器厂 编写



上海科学技术出版社研究所

1200 热轧卷板机可控硅供电自动调节系统

上海整流器厂 编写

*

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.25 字数: 329,000

1977年11月第1版 1977年11月第1次印刷

印数: 1—4,900

代号: 151634·354 定价: 1.65 元

(限国内发行)

毛主席语录

独立自主，自力更生。

打破洋框框，走自己工业发展的道路。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

在毛主席革命路线指引下,在无产阶级文化大革命和批林批孔运动推动下,上海机电和冶金工业战线的广大工人和技术人员狠批洋奴哲学、爬行主义,发扬“自力更生,奋发图强”的革命精神,以三结合会战的形式,经过两年多的努力,制造成功由我国自行设计、自行制造的采用可控硅新技术的1200毫米热连轧机。1200毫米热连轧机卷板机可控硅传动装置,是一套大功率电气传动自动化设备,是1200毫米热连轧机的重要组成部份。该工程自一九七二年六月开始,经过调研、设计、试制、生产、安装、现场调试等过程,于一九七四年十二月三十日试卷,一次试卷即获成功。后经细调和继续试验、改进,多次试运行,证明系统性能基本良好,符合和满足工艺提出的要求,为冶金工业现代化作出了贡献。

1200毫米热连轧机卷板机的电气传动部分全部采用可控硅供电,带张力卷取,调节系统按最佳理论设计,采用双闭环系统,并使用了线性集成电路新型电子元件。

电气传动部分有五台电动机,卷筒机一台250千瓦,张力辊机一台125千瓦,成形辊机三台各16千瓦。全部采用可控硅供电调速装置,共使用500安培、1200伏可控硅元件102只。

为保证产品质量,卷板机卷取钢板时需要有张力。张力形成的原理是使卷筒机线速度高于张力辊机线速度,卷板时卷筒机通过钢板使张力辊机处于发电状态而形成张力。可控硅供电装置可以对直流电动机进行可逆无级调速,在本装置中并考虑了恒张力控制。

本调节系统中的恒张力控制是采用最大力矩的方法,并进行动态补偿。调节系统采用了经典的频率域法进行最佳调节设计,分析了性能指标以及静差、跟踪误差和抗扰动的能力等。

卷筒机和张力辊机电气传动的调节系统设计为速度、电流双闭环,逻辑控制的反并联无环流可逆装置。其特点是采用一套电流调节器、电流互感器和触发装置,通过电子开关控制两组整流桥;逻辑装置除能可靠切换外,还可使可控硅在逆变角投入,进行再生制动,这样避免反接制动时的电流冲击。

调节系统中的电子线路如给定积分调节器,电流给定调节器的负反馈限幅器、乘法器,卷径检测电路,无环流逻辑电路,串联并联电子开关等都进行一些新的设计。调节电路采用了线性集成电路(主要电路采用了FC-52线性集成电路),使电子装置的结构简单,体积缩小,维修方便,工作性能也好。

在整个工程三结合的设计、制造、调试过程中，得到上钢一厂、上海市安装公司调试队、上海电器科学研究所、上海轻工业设计院、上海冶金设计院、上海交通大学、上海冶炼厂、上海钢铁研究所等单位的大力协助和密切配合。

遵照伟大领袖毛主席关于“要认真总结经验”的教导，我们初步进行了技术总结，以供国内从事电气传动自动化和可控硅应用技术的工人同志和科技人员参考。

鉴于水平有限，在总结中存在不少缺点和错误，热忱地希望同志们批评指正。

编 者

目 录

第一章 概述

- 一、工艺要求 (1)
- 二、系统概述 (2)

第二章 卷筒机

- 一、直流电动机的参数 (10)
- 二、电器设备的选择与计算 (11)
 - 1. 电枢回路整流装置 (11)
 - 2. 可控硅整流元件的选择 (12)
 - 3. 可控硅供电装置变压器的计算 (14)
 - 4. 电抗器的计算 (15)
 - 5. 可控硅供电保护装置的计算 (17)
 - 6. 触发装置 (27)
 - 7. 讯号系统 (27)
 - 8. 励磁回路 (34)
 - 9. 稳压电源 (35)
- 三、调节系统 (46)
 - 1. 调节系统的特点 (46)
 - 2. 调节系统的基本单元 (47)
 - (1) 给定积分调节器 (47)
 - (2) 速度调节器 (51)
 - (3) 电流给定调节器 (54)
 - (4) 电流调节器 (55)
 - (5) 速度和电流反馈 (59)
 - (6) 脉冲门 (61)
 - (7) 运转指令调节器 (62)
 - 3. 无环流逻辑装置 (67)
 - (1) 主要单元 (67)
 - (2) 逻辑的工作原理 (76)
 - 4. 卷径 D 的检测装置 (80)
 - (1) 卷径检测原理 (80)
 - (2) 各单元的说明 (82)
 - 5. 动态补偿装置 (89)

(1) 乘法器	(89)
(2) 转速微分调节器	(99)
(3) 动态补偿的模拟	(104)
6. 其它单元	(111)
(1) 张力矩调节器	(111)
(2) 电流综合调节器	(113)
(3) 钢板咬入讯号检测调节器	(115)
(4) 线速度反馈调节器	(115)
四、系统的动态计算	(118)
1. 系统结构方框图	(118)
(1) 调节对象	(118)
(2) 系统结构图	(119)
2. 参数确定	(120)
(1) 电动机电枢回路的电磁时间常数 T_D 的确定	(120)
(2) 电动机的机电时间常数 T_M 的确定	(121)
(3) 可控硅整流器的传递函数	(121)
(4) 电流反馈的传递函数	(122)
(5) 速度反馈的传递函数	(122)
3. 电流最佳调节	(123)
(1) 电流环的传递函数	(123)
(2) 校正环节的参数	(125)
(3) 电流环的各项性能指标	(126)
(4) 电流环的简化	(130)
4. 速度最佳调节	(131)
(1) 速度环的传递函数	(131)
(2) 校正环节的参数	(132)
(3) 速度环的性能指标	(133)
(4) 速度环的简化	(133)
5. 对扰动的响应	(134)
(1) 电流环对扰动的响应	(136)
(2) 速度环对扰动的响应	(137)
6. 系统的静差、跟踪误差和扰动误差	(137)
(1) 电流环	(137)
(2) 速度环	(139)

第三章 张力辊

一、直流电动机的参数	(141)
二、电器设备的选择与计算	(142)
1. 电枢回路整流装置	(142)

2. 可控硅供电整流变压器的计算	(142)
3. 可控硅整流元件的选择	(143)
4. 电抗器的计算	(145)
5. 可控硅供电保护装置的计算和选择	(146)
(1) 过电压保护	(146)
(2) 过电流保护	(149)
6. 触发装置	(155)
7. 励磁回路供电装置	(155)
三、调节系统	(155)
1. 指令	(155)
2. 电流给定调节器	(156)
3. 速度电流反馈	(156)
(1) 速度负反馈的计算	(156)
(2) 电流负反馈的计算	(157)
四、系统的动态计算	(159)
1. 参数确定	(159)
(1) 电动机电枢回路的电磁时间常数 T_D 的确定	(159)
(2) 电动机的机电时间常数 T_M 的确定	(160)
(3) 可控硅整流器的传递函数	(160)
(4) 电流反馈的传递函数	(160)
(5) 速度反馈的传递函数	(160)
2. 电流最佳调节	(160)
(1) 电流环的传递函数	(160)
(2) 校正环节的参数	(161)
(3) 性能指标	(162)
(4) 电流环传递函数的简化	(162)
3. 速度最佳调节	(162)
(1) 速度环的传递函数	(162)
(2) 校正环节的参数	(163)
(3) 性能指标	(164)
(4) 速度环传递函数的简化	(164)
4. 对扰动的响应	(164)
(1) 电流环对扰动的响应	(164)
(2) 速度环对扰动的响应	(164)
5. 系统的静差、跟踪误差和扰动的误差	(164)

第四章 成形辊

一、电动机参数及工艺要求	(165)
二、方案的选择	(166)

三、主回路参数计算及继电讯号显示	(167)
1. 整流变压器的计算	(167)
(1) 变压器的参数计算	(167)
(2) 变压器的结构分析	(168)
(3) 变压器线圈温升校验	(168)
2. 平波电抗器的计算	(169)
3. 可控硅与快速熔断器的选择	(170)
4. 可控硅换向过电压保护的计算	(170)
5. 交流侧过电压保护的计算	(170)
6. 直流侧过电压保护的计算	(171)
7. 霍尔电流检测的选择与计算	(172)
8. 继电讯号显示	(173)
四、励磁回路的计算	(173)
五、触发调节系统	(174)
1. 触发系统	(174)
(1) 技术指标	(174)
(2) 触发原理	(174)
(3) 同步电源	(177)
2. 稳压电源	(178)
3. 调节系统	(178)
(1) 概述	(178)
(2) 工作原理	(178)
4. 无触点过电压电流保护装置	(183)
六、静态计算	(189)
1. 工艺对电力拖动的静态要求	(189)
2. 系统的静态结构图	(189)
3. 系统的静态方程的建立	(190)
4. 原始数据	(191)
5. K_u 、 α 、 K_t 、 β 的确定	(192)
七、动态计算	(194)
1. 原始数据	(194)
2. 系统的方框图	(194)
3. 电流调节器的计算	(197)
4. 电压调节器的计算	(198)
八、操作系统	(200)
附件：直流电动机时间常数的确定方法	(202)

第一章 概述

一、工艺要求

1200 五连轧热轧机所轧制成的钢板出机架后,由长为七十二米的滚道传送至卷板机,这时,钢板经滚道上的喷雾冷却,达到卷板机所要求的卷取温度($600\sim 650^{\circ}\text{C}$),卷板机是采用张力卷取的原理,张力由卷筒机与张力辊*形成,为了确保张力卷取和减少卷取操作事故,故要求低速咬钢,咬钢速度为 1.6 米/秒。

卷板机由一台卷筒机,一台张力辊和三台成形辊**组成,整个连轧线由两套卷板机轮流工作,以缩短卷取的间隙时间。

主机的轧制速度为 8 米/秒,经过滚道减为 1.6 米/秒,形成堆钢。

当滚道将钢板送至卷板机时(图 1),张力辊处于电动状态,钢板经导引装置送到卷筒机,卷筒***线速度比张力辊的线速度高 5%,根据前滑量来确定的。当钢板咬入后,卷筒降速,产生制动力矩,此力矩即转化成初始张力。成形辊的线速度比卷筒的线速度高 5%,钢板咬入时,成形辊提供一部份弯曲力矩,协助钢板包缠于卷轴上,待卷至 3~4 圈后,卷筒咬入讯号调节器即发出讯号使成形辊停止运转,同时,由气压通过气套将成形辊脱开。

卷筒机通过钢板带动张力辊转动,由于其线速度比张力辊电动状态所具有的线速度大,使张力辊成为发电状态,将能量逆变到电网中去。这时,张力辊成为卷筒机负载的一部分,卷筒机的这一部分所消耗的能量就转化成钢板的张力。

张力建立以后,操作人员在操作台上操纵,把讯号给于张力辊调节柜,使发出加速指令,使加速到 10 米/秒(最大达到 12 米/秒),以消除低速咬钢时所产生的堆钢现象,当堆钢现象消除后,速度下降至正常卷取速度(8 米/秒)。

其工作方式如图 2 所示,当接近卷完时,带钢尾部离开张力辊,张力消失,张力辊恢复为电动状态。这时,成形辊通过气套将辊压下,以防止带钢尾部松开,卷完

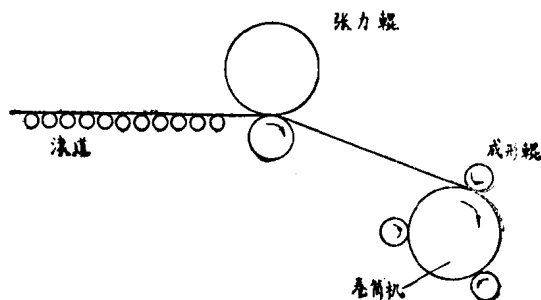


图 1

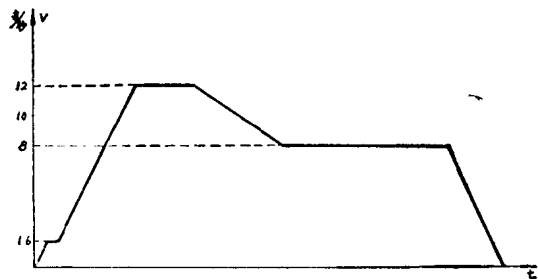


图 2

* 张力辊电机简称为张力辊

** 成形辊电机简称为成形辊。

*** 卷筒机简称为卷筒

后操作人员又给张力辊调节柜发出停车讯号,此时,卷筒,张力辊,成形辊这三机都停止。在出现事故的情况下,卷筒、张力辊均要能够反转。

工艺数据

带钢尺寸: 厚 2~6 毫米, 宽 750~1050 毫米, 长 70~200 米

钢 种: 16 锰钢, 普通钢

卷取速度: 8 米/秒

卷筒直径: 0.75~1.4 米

钢卷重量: 4.8 吨

最大张力: 700~1000 公斤

卷取温度: 600~650°C

抗弯系数: 600°C 时, $\sigma_s = 17$ 公斤/毫米²

650°C 时, $\sigma_s = 11$ 公斤/毫米²

根据卷板机卷取过程所提出的工艺要求:

堆钢卷取速度为 1.6~12 米/秒可调, 正常卷取速度为 8 米/秒;

系统要能可逆, 能正反转, 能制动及逆变;

要有张力 (700~1000 公斤)。

二、系统概述

根据工艺要求, 系统的设计考虑到以下三点:

1. 张力辊、卷筒为无环流电枢反并联, 设计成速度, 电流双闭环系统; 成形辊不可逆, 设计成电压、电流双闭环系统;
2. 以恒张力来设计;
3. 以张力辊控制速度, 用卷筒控制张力。

卷筒、张力辊、成形辊这三机联动的工作原理如图 3 所示。

三机联动时, 指令设在张力辊, 张力辊上的给定积分调节器的讯号同时输出到卷筒、成形辊, 卷筒的给定积分调节器只是作单动调试用, 因此三机的起动或制动, 加速或减速都是在操作台上控制, 并通过张力辊调节器进行控制。

张力辊的速度反馈是取自张力辊测速发电机; 张力辊的转速可直接转化为轧制线速度。轧制线速度 V 可用下式表示。

$$V = \frac{\pi n D}{60} \quad (1-2-1)$$

式中: n ——张力辊转速(转/分)

D ——张力辊直径(=0.4 米)

从(1-2-1)式得:

$$n = \frac{60V}{\pi D} \quad (1-2-2)$$

如令 $V=8$ 米/秒, $D=0.4$ 米

则张力辊转速

$$n = \frac{60 \times 8}{\pi \times 0.4} = \frac{480}{1.256} = 382 \text{ 转/分}$$

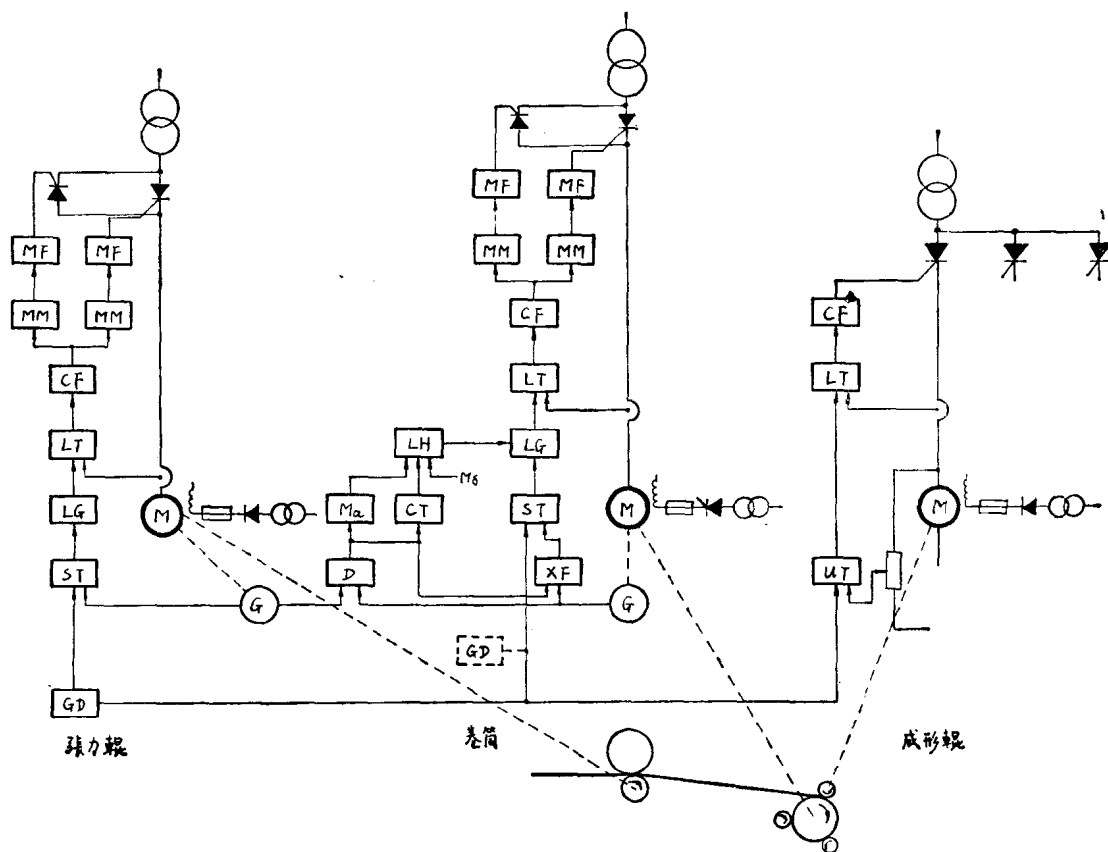


图 3

M——电动机；G——测速发电机；GD——指令，给定积分调节器；ST——速度调节器；UT——电压调节器；LT——电流调节器；LG——电流给定调节器；CF——触发器；MM——脉冲门；MF——脉冲分配门；LH——电流综合调节器；D——卷径检测调节器；Ma——动态补偿调节器；CT——张力补偿调节器；Mo——弯曲力矩与摩擦力矩整定；Xf——线速度反馈调节器

已知，卷筒的速度给定讯号来自张力辊，形成速度闭环的速度反馈由卷筒测速发电机测得的转速经过线速度调节器化为线速度反馈来完成，这样使给定与反馈值之间的差 $|\Delta n|$ 减小，便于张力辊速度控制。因为当开始卷板后，使卷筒速度调节器的 PI 特性进入饱和区。卷筒直径增大时，为保持线速度不变，卷筒转速逐渐下降，如果是转速反馈，随着转速的下降，则 $|\Delta n|$ 越来越大，这样在加减速时，响应就慢，而且有死区，因为需要克服 $|\Delta n|$ 的值，才能控制速度。采用线速度反馈，则与卷筒转速无关。而且不会在断带和卷取结束时，卷筒机产生增速现象。

(一) 卷筒控制张力，在卷取过程中为保持恒张力，采用最大力矩法，即基速以下满磁卷取，电流与卷径 D 成正比，这样可出最大力矩。

$$M_T = T \cdot \frac{D}{2} = C_\mu \phi I \quad (1-2-3)$$

式中： M_T ——张力矩；

T ——张力；

D ——卷筒直径；

C_μ ——电动机转矩系数；

ϕ ——电动机励磁磁通;

I ——电动机电枢电流。

由(1-2-3)式,得:

$$T = 2C_{\mu} I \frac{\phi}{D} \quad (1-2-4)$$

为保持张力不变,必须使 I 正比于 $\frac{D}{\phi}$ 。

因为在卷取过程中, D 是不断增加的, 张力矩也要增加。如果 ϕ 是满磁, 使:

$$I = \frac{T \cdot \frac{D}{2}}{C_{\mu} \phi} = \frac{T}{2C_{\mu}} \cdot \frac{D}{\phi} = k_1 \cdot \frac{D}{\phi} \quad (1-2-5)$$

将(1-2-5)式代入(1-2-4)式

$$T = 2C_{\mu} k_1 \frac{D}{\phi} \cdot \frac{\phi}{D} = k_T = \text{常量}$$

即在基速以下, 只要使 ϕ 不变, I 正比于 D , 即可保持张力不变。

如果在基速以上,

$$E = C_e \phi n \quad (1-2-6)$$

式中: E ——电动机反电势

C_e ——电动机电势系数

将(1-2-2)式代入(1-2-6)式, 则

$$\left. \begin{aligned} E &= C_e \phi \frac{60V}{\pi D} \\ \frac{D}{\phi} &= \frac{C_e \cdot 60}{\pi} \cdot \frac{V}{E} \\ I &= k_1 \cdot \frac{D}{\phi} = \frac{T}{2C_{\mu}} \cdot \frac{C_e \cdot 60}{\pi} \cdot \frac{V}{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-7)$$

如果张力是一定的, 则

$$I = \frac{TC_e 60}{2C_{\mu} \pi} \cdot \frac{V}{E} = k_2 \cdot \frac{V}{E} \quad (1-2-8)$$

已知线速度 V 是不变的, k_2 是系数 $\left(= \frac{TC_e 60}{2C_{\mu} \pi} \right)$ 则 I 与反电势 E 成反比。若以反电势来调节 I , 即可维持张力不变。

这种控制方式与恒电流恒电势控制方式比较, 有许多优点。为便于比较, 恒电流恒电势控制方式简述如下:

从(1-2-4)式可知, 若采用恒定的 I 和 $\frac{\phi}{D}$, 即可使张力恒定, 从(1-2-7)式可知:

$\frac{\phi}{D}$ 与 $\frac{E}{V}$ 是成正比的; 若使 $\frac{E}{V}$ 恒定, 即可达到 $\frac{\phi}{D}$ 恒定:

$$I = k_i; \quad \frac{\phi}{D} = k_D$$

将此式代入(1-2-4), 得:

$$T = 2C_{\mu} k_i k_D$$

其办法是在卷取过程中,使给定电流保持恒定,则当 D 增加时, ϕ 也增加,以保持 $\frac{\phi}{D}$ 不变,这样在开始卷取时,必须在弱磁状态才有可能,这种控制方法有两大缺点。

第一,在弱磁下开始卷取,则电动机只能付出小的力矩,电机力矩得不到充分利用为了满足卷取要求,结果使所选电机容量就要增大。

电动机在弱磁状态下工作使卷取的加速度也要受到电机能力的限制。

还有在卷取较厚的钢板时,弯曲力矩恰好在卷径小时最大。因为

$$M_{\phi} = \frac{b}{4} \delta^2 \sigma_s \left(1 - \frac{3R\sigma_s}{\delta E} \right) \quad (1-2-9)$$

式中: M_{ϕ} ——弯曲力矩

b ——板宽

δ ——板厚

σ_s ——抗弯强度 11~17 公斤/毫米²

R ——卷取半径

E ——弹性模数 $(1.8 \sim 2.2) \times 10^6$ 公斤/毫米²

可知弯曲力矩随着半径 R 增大而减小。

这与电动机的力矩情况恰好相反,

而当采用最大力矩法时,则在小卷径时如需要大的力矩,便可满足。

第二,弱磁比必须与卷径比成正比,如卷径比为 4:1,则弱磁比也必须是 4:1,否则不能得到补偿,这样大大限制了对电动机选择的机动,如用最大力矩法,可扩大对电机的使用范围。

本卷板机卷径比较小,卷筒直径由 0.75 米到最大直径 1.4 米,其卷径比为 $\frac{1.4}{0.75} = 1.86$ 。

本电动机的型号为 ZD₂65/44-5B,额定电压为 330 伏,转速为 250 转/分。

电动机是否能满足转速要求,可验证如下。瞬时转速值不但与线速度 V 有关,而且与瞬时卷径值 D_B 有关, D_B 可由下式来决定。

$$D_B = \left(\frac{a}{K_{\sigma} S} t^2 + D_0^2 \right)^{1/2} \quad (1-2-10)$$

式中: a ——线加速度

t ——加速度时间

D_0 ——卷筒直径初始值

K_{σ} ——等效系数

$$K_{\sigma} = \frac{\pi \times 10^3}{2\delta}$$

δ ——板厚

S ——填充系数(取 0.8)

将(1-2-10)式代入(1-2-2)式,可得:

$$n = \frac{60}{\pi} (V_0 + at) \left(\frac{a}{K_{\sigma} S} t^2 + D_0^2 \right)^{-1/2} \quad (1-2-11)$$

依不同条件可得转速的最大瞬时值,(表 1)

表 1

n (转/分)		$\sigma=2$ (毫米)	4	6
V_8 (米/秒)	$a=2$	194	184	176
	$a=3$	195	187	180
	$a=4$	196	189	182
V_{12} (米/秒)	$a=2$	279	258	242
	$a=3$	284	269	252
	$a=4$	288	272	258

由此可知: 如果卷取线速度为 8 米/秒, 则转速都在基速以下, 不需弱磁。

如果卷取线速度要达到 12 米/秒, 则最大转速为 288 转/分, 比基速 (250 转/分) 高 38 转/分。这一点升速若采用弱磁装置是不合适的, 所以采用升压升速, 把电枢电压由 330 伏加大到 380 伏, 即可满足系统要求。

(二) 卷筒在钢板咬入卷几圈后, 速度调节器即进入饱和区, 电动机即转为力矩控制。力矩控制由张力矩, 加速力矩, 弯曲和摩擦力矩三部份组成:

$$M_0 = M_{T_0} + M_{a_0} + M_{\phi_0} \quad (1-2-12)$$

式中: M_0 ——电动机总力矩。

M_{T_0} ——张力矩

M_{a_0} ——加速力矩

M_{ϕ_0} ——弯曲和摩擦力矩

这三种力矩分别整定和运算, 然后由一个电流综合调节器进行综合, 也可称力矩综合调节器。因力矩与电流成正比关系, 此调节器再直接去控制电流给定调节器, 由限制其限值, 通过电流来达到力矩的控制。

电动机额定电流 $I_{DH} = 845$ 安, 设定运行电流为

$$2I_{DH} = 845 \text{ 安} \times 2 = 1690 \text{ 安。}$$

$$M = C_{\mu} \phi_H \sum I$$

其中: C_{μ} ——转矩系数 $= 10.4 \times 10^{-8}$

ϕ_H ——额定磁通 $= 11.13 \times 10^6$

$$\therefore M = 10.4 \times 10^{-8} \times 11.13 \times 10^6 \sum I = 1.16 \times \sum I$$

$$= 1.16 \times 1690 = 1960 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

张力矩由带钢张力和卷径 D 来确定, (1-2-3) 式为

$$M_T = T \cdot \frac{D}{2}$$

T 是给定的, 由 700~1000 公斤, 卷径 D 是逐渐增大的, 由 0.75~1.4 米, 各取其最大值, 则得最大张力矩:

$$M_T = 1000 \cdot \frac{1.4}{2} = 700 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

加速力矩也即动态补偿力矩:

$$M_a = \frac{\sum GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1}{375} [GD_{电机}^2 + GD_{卷筒}^2 + GD_{钢卷}^2] \frac{dn}{dt}$$

$$= \frac{1}{375} \left[GD_k^2 + \frac{\pi \rho S b}{8} (D_B^4 - D_0^4) \right] \frac{dn}{dt} \quad (1-2-13)$$

式中: M_a ——加速力矩

GD^2 ——飞轮惯量

$\frac{dn}{dt}$ ——转速加速度

ρ ——钢材密度

S ——填充系数

D_B ——卷径瞬时值

D_0 ——卷径初始值

证明如下:

$$M_a = \sum J \frac{d\omega}{dt} = (J_{电机} + J_{卷筒} + J_{钢卷}) \frac{d\omega}{dt}$$

$$M_{a_{电机}} = J_{电机} \frac{d\omega}{dt} = mr^2 \frac{d\omega}{dt} = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

$$= \frac{2\pi}{60 \times 4g} GD^2 \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

电机提供的参数 $GD^2 = 372$ 公斤米²

$J_{卷筒}$ 是一个实心圆柱体

其对 Z 轴的转动惯量

$$J = \int_0^L \int_0^r 2\pi \rho r^3 dr dl = \frac{1}{2} mr^2 = \frac{1}{4g} \frac{GD^2}{2}$$

$$M_{a_{卷筒}} = J_{卷筒} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{4g} \cdot \frac{GD^2}{2} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1}{375} \frac{GD^2}{2} \frac{dn}{dt}$$

工艺提供的参数卷筒长为 5680 毫米, 直径为 750 毫米等粗实心圆柱体。

实际重量 $G = 14580$ 公斤

因此飞轮惯量

$$GD^2 = \frac{GD_0^2}{2} = 14580 \times \frac{(0.75)^2}{2} = 4080 \text{ 公斤米}^2$$

再加附属物, 取卷筒 $GD^2 = 4300$ 公斤米²

$J_{钢卷}$ 是一个空心的变量圆柱体

同理,

$$J_{钢卷} = \frac{Gr^2}{2g} - \frac{Gr_0^2}{2g} = \frac{GD^2}{2g \cdot 4} - \frac{GD_0^2}{2g \cdot 4}$$

$$= \frac{\pi \rho S b}{4g \cdot 8} D^4 - \frac{\pi \rho S b}{4g \cdot 8} D_0^4 = \frac{1}{4g} \cdot \frac{\pi \rho S b}{8} (D^4 - D_0^4)$$

考虑钢卷是变化的, 以 D_B 代替 D

$$M_{a_{钢卷}} = J_{钢卷} \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{4g \cdot 60} [GD_{钢卷}^2] \frac{dn}{dt} = \frac{1}{375} \left[\frac{\pi \rho S b}{8} (D_B^4 - D_0^4) \right] \frac{dn}{dt}$$

设加速到 $D_B = 1$ 米处, 则 $D_B = 1$ 米时钢卷的 GD^2 为:

$$GD_{\text{钢卷}}^2 = \frac{\pi \rho S b}{8} (D_B^4 - D_0^4) = 1.76 \times 10^3 \text{ 公斤米}^2$$

式中 $\rho = 7800 \text{ 公斤/米}^3, S = 0.8$
 $b = 1.05 \text{ 米} \quad D_0 = 0.75 \text{ 米}$

$$\therefore M_a = \frac{1}{375} [GD_{\text{电机}}^2 + GD_{\text{卷筒}}^2 + GD_{\text{钢卷}}^2] \frac{dn}{dt} = \frac{1}{375} \left[GD_k^2 + \frac{\pi \rho S b}{8} (D_B^4 - D_0^4) \right] \frac{dn}{dt}$$

以 $D_B = 1$ 时作为设计的最大力矩

取 $a = \frac{dV}{dt} = 3 \text{ 米/秒} \quad \frac{dn}{dt} = \frac{60}{\pi} \frac{1}{D_B} \frac{dV}{dt} = 57.3 \text{ 转/分/秒}$

$$M_a = \frac{1}{375} [372 + 4300 + 1760] 57.3 = 983 \text{ 公斤米}$$

式中: J ——转动惯量

g ——重力加速度

G ——重量

m ——质量

r ——半径

D ——直径

l ——长度

b ——宽度

$\frac{d\omega}{dt}$ ——角加速度

$\frac{dn}{dt}$ ——转速加速度

$\frac{dV}{dt}$ ——线加速度

M_σ 为弯曲力矩与摩擦力矩

从(1-2-9)式中是考虑弹性与塑性相结合。

为了简单起见采用理想塑性弯曲

$$M_\sigma = \frac{b}{4} \delta^2 \sigma_s \quad (1-2-14)$$

即弯曲力矩与板宽板厚及抗弯强度有关其关系示于表 2。

表 2

M_σ (公斤·米)	b (米)	0.75	1.05
δ (毫米)			
2		13	18
3		29	40
4		51	72
6		115	161