

# 铝箔合卷机电气自动控制系统

王 炎 胡慎敏 方月泉 杨大明 王庆超

(哈尔滨工业大学)

## 摘 要

本文介绍了一台高速铝箔合卷机电气自动控制系统的结构。卷卷机采用线速度控制系统,开卷机采用张力控制系统。根据铝箔小张力的特点,主拖动采用可控硅供电控制环流的可逆直流拖动。线速度采用调压和非独立调磁系统。张力采用间接控制系统。系统采用串并联校正改善动态指标等。

铝箔合卷机是铝箔生产过程中必不可少的一台设备。本设备机械传动示意图如图1所示。

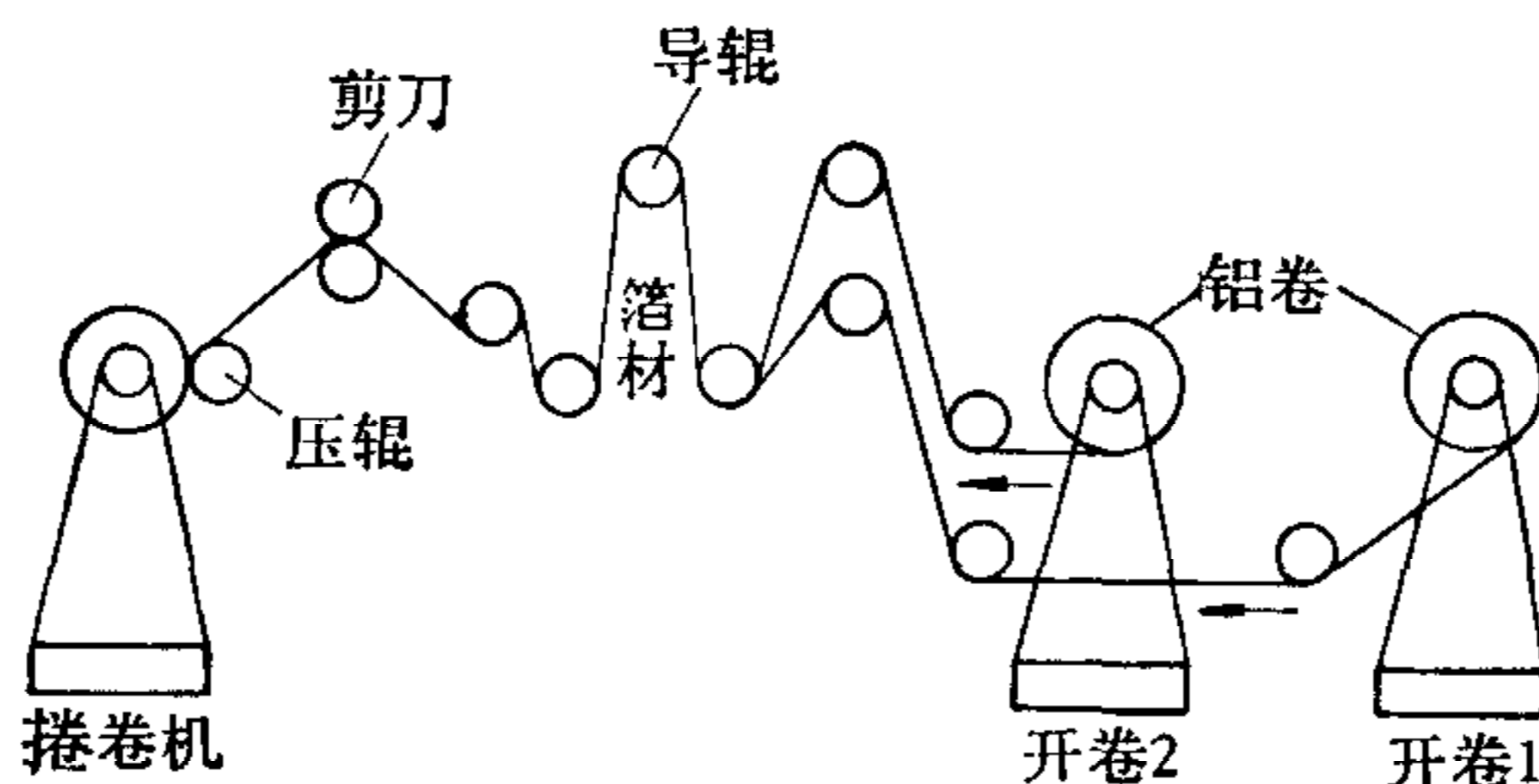


图1 合卷机传动系统示意图

来料宽度为1100毫米,铝卷的最大直径1040毫米,铝卷的最大重量2.2吨,合卷的最高速度600米/分,每张箔材的最大张力100公斤。

由于卷卷和开卷之间没有主传动辊,所以合卷的线速度基准值由卷卷机控制,合卷过程中的张力则由开卷机控制。

这台设备已于一九七九年四月试车成功,与主轧机一起投入试生产运行,于一九八〇年四月由冶金部正式验收交付生产(型号为HJ 1040 A型)。

## 一、卷卷机自动控制系统的结构

对卷卷机的主要要求是:

- (1) 提供恒定的合卷线速度,静差应小于2%。
- (2) 根据箔材厚度不同,工作方式不同,合卷速度可以在18—600米/分内随意给定。在卷卷过程中,为了保持合卷线速度不变,电动机的转速必须随之降低,卷径的变化

范围为 3:1, 因此卷卷机总的转速变化范围较宽.

随卷径变化的调速属于恒功率性质, 因此采用直流调磁电动机, 其调磁范围等于卷径变化范围, 电动机的功率为 22 千瓦.

由于:

- (1) 卷筒惯性大, 减速、停车需要有制动转矩.
- (2) 点动需要正反向运行.

故卷卷机控制系统采用可逆系统. 它的结构如图 2 所示.

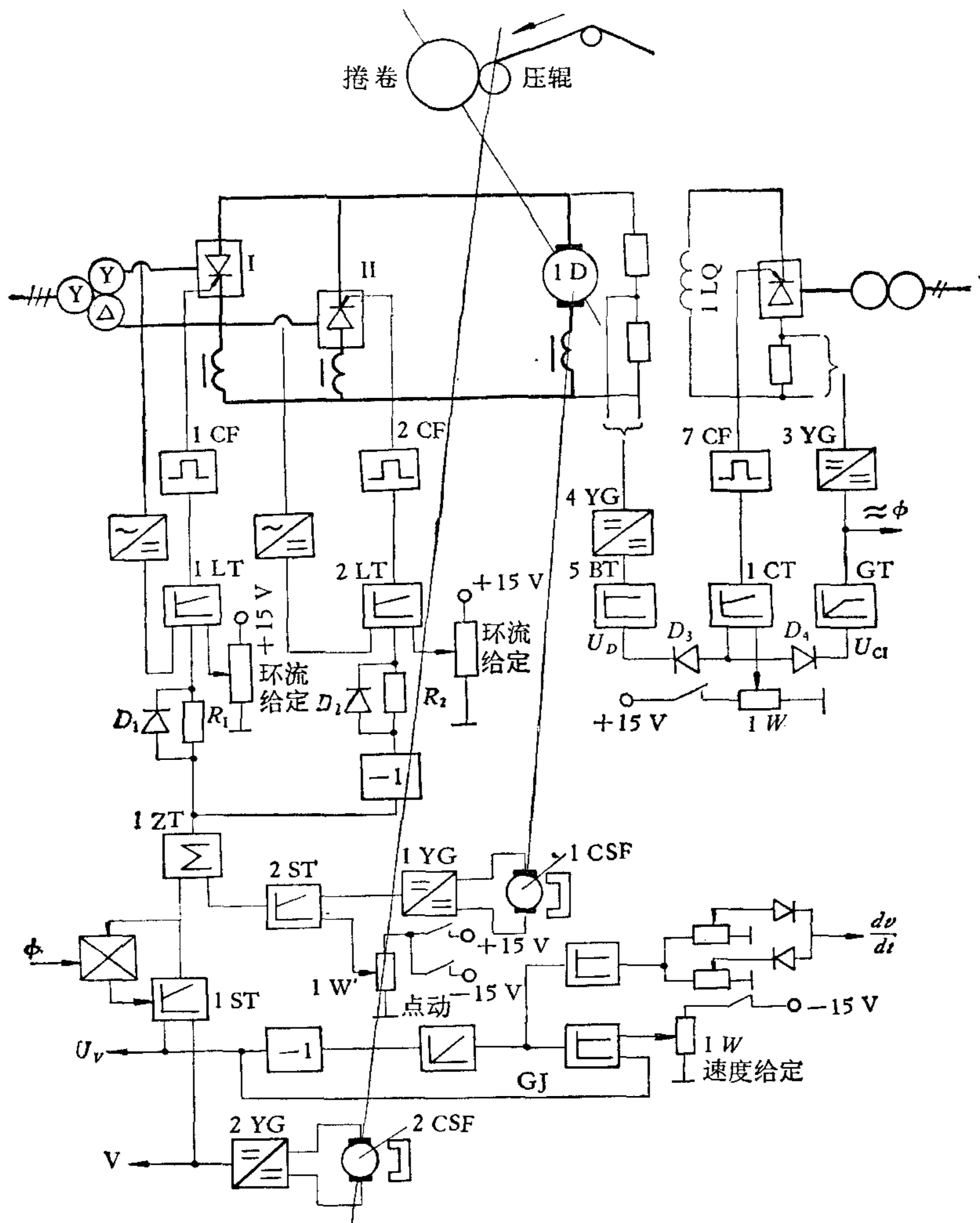


图 2 卷卷机控制系统结构图

卷卷机总的调速范围较宽, 所以采用电流、速度双闭环系统. 主回路采用三相桥式可逆整流电路.

由于合卷的铝箔很薄, 考虑到在减速过程中电流要反向, 为避免出现突然的张力波动, 造成断带, 所以采用控制环流可逆系统.

合卷机要求平稳起动, 起动到最高速度的时间可在 20~30 秒内调节, 加速度为恒值.

这些要求,给定积分器 GJ 均能满足。线速度反馈信号取自联结于压辊上的测速机 2CSF。系统采用非独立励磁控制,它通过由  $D_3, D_4$  组成的最大值选择器实现。

## 二、开卷机控制系统的结构

开卷机共两台,开卷 1 和开卷 2,它们的工作情况相同。对开卷机的主要要求是:

(1) 建立恒定的后张力,并在 10~100 公斤范围内平滑可调。在起动和加减速过程中张力波动不超过  $\pm 10\%$ ,停车时有一定的静张力。

(2) 开卷机的线速度能由卷卷机的线速度决定,其卷筒的卷径变化范围也为 3:1,所以其转速变化范围和卷卷机相同。

(3) 能与卷卷机联动工作,也能单独点动正反向,点动速度可调。

开卷机的电动机功率实取 13 千瓦,调磁范围为 3:1。

根据张力恒定的工艺要求,开卷机应为张力控制系统。由于国产小张力计尚处于试制阶段,因此采用直接张力反馈控制比较困难,故仍采用间接张力控制系统,它的简单工作原理如下:

在采用了动态、空载补偿措施的情况下,开卷机机、电功率的平衡关系为:

$$P = \frac{E \times I}{1000} = \frac{T \times V}{102} \quad (1)$$

式中:  $E$ ——电动机反电势[伏],  $E = C_e \phi n$ ;

$T$ ——箔材张力[公斤];

$I$ ——电动机电枢电流[安];

$V$ ——箔材线速度[米/秒],  $V = \frac{\pi D}{60i} \times n$

由 (1) 可得:

$$T = 0.102 \frac{E}{V} I \quad (2)$$

由公式 (2) 可以看出,如果分别保持  $I$  等于常数,  $\frac{E}{V}$  等于常数就能保持张力恒定。因此这种系统需要二个调节环:

(1) 保持电枢电流  $I$  等于常数的恒电流调节环;

(2) 保持  $\frac{E}{V}$  等于常数的恒电势调节环。

开卷机的控制系统结构如图 3 所示。

下面分电流调节环和电势调节环说明其结构的确定。

### 1. 电流调节环

采用由交流侧取电流信号的电流闭环。

由于控制环流可逆系统在低负载区域内存在环流,而在大负载时环流消失,故电流环的输入输出特性在两个区域内是不一致的,这样张力控制就不精确。为了补偿其不一致,加入了环流补偿调节器 1BC 它是带限幅的比例调节器,仅在环流段内起作用。

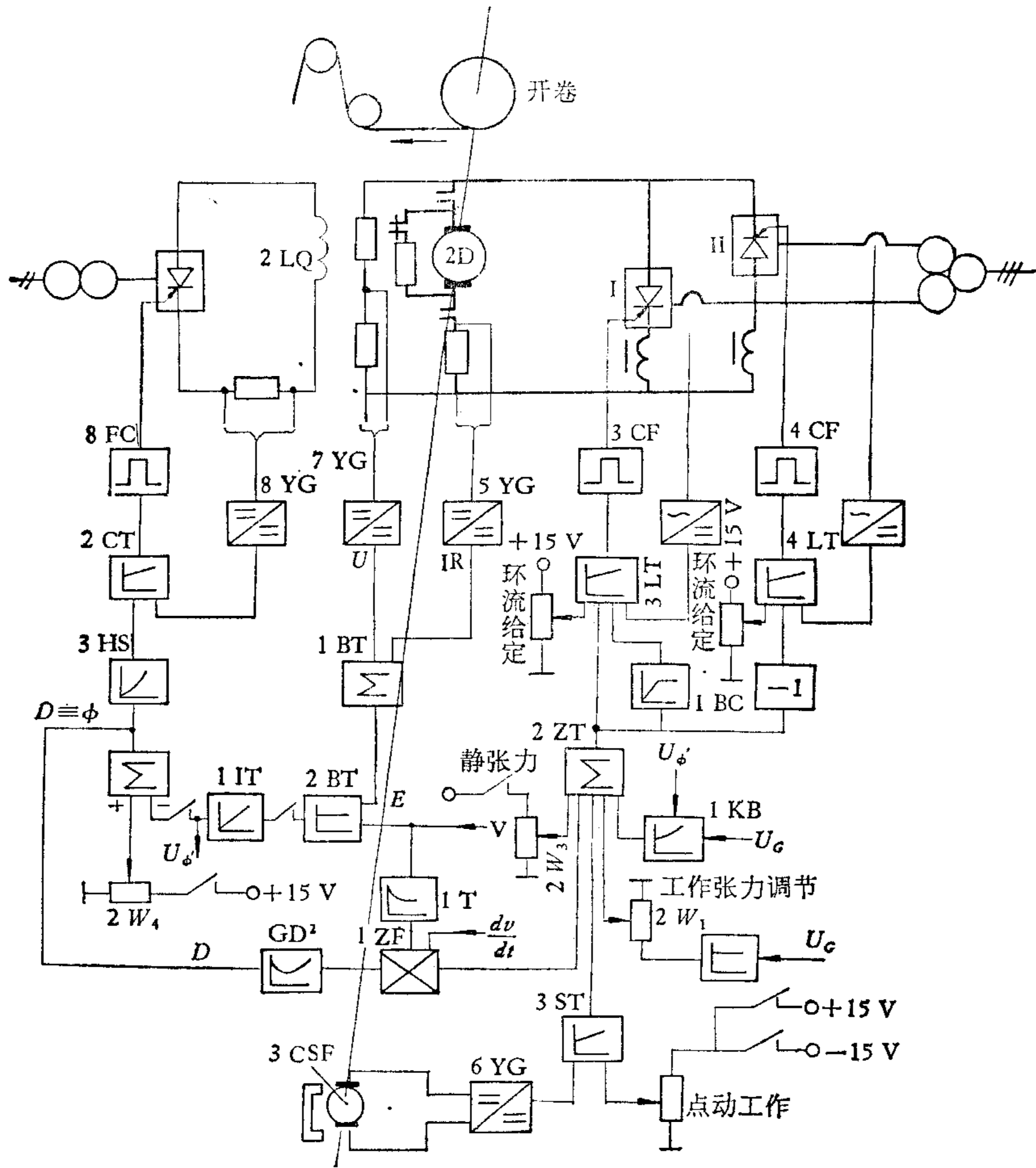


图 3 开卷机控制系统结构图

电流闭环能维持电流为恒值,但在动态情况下,对动态影响需要进行补偿.同理,对空载损耗转矩也应补偿.

电动机所产生的转矩包括:

$$M_D = M_T - M_0 \mp M_d,$$

式中:  $M_T$ ——张力转矩,  $M_T = T \times \frac{D}{2} \times \frac{1}{i}$ ;

$M_0$ ——空载转矩;  $i$ ——转速比;

$M_d$ ——动态转矩,  $M_d = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt}$ ,

与转矩相对应的电流为:

$$I_D = I_T - I_0 \mp I_d .$$

下面分别讨论空载电流和动态电流补偿:

### 1) 空载电流补偿

空载电流是由机械传动系统的损耗、电动机的空载损耗等引起的, 它的大小随系统

的线速度  $V$  及磁通  $\phi$  的不同而改变。由于开卷机的负载张力不大(最小时为 10 公斤),  $I_0$  所占比重较大, 因此对这一部份变化必须进行补偿, 否则铝卷会出现内松外紧。

在图 3 中由给定积分器 GJ 引出一个正比于线速度的信号  $u_v$ , 输入到空载补偿器 1KB(图 4) 1KB 将  $u_v$  信号变换成  $M_0$  的模拟信号, 并通过场效应管除法器除以当时的实际磁通信号, 得到空载电流补偿信号  $I_0$ , 再送入电流调节环的给定 2ZT 的输入端。

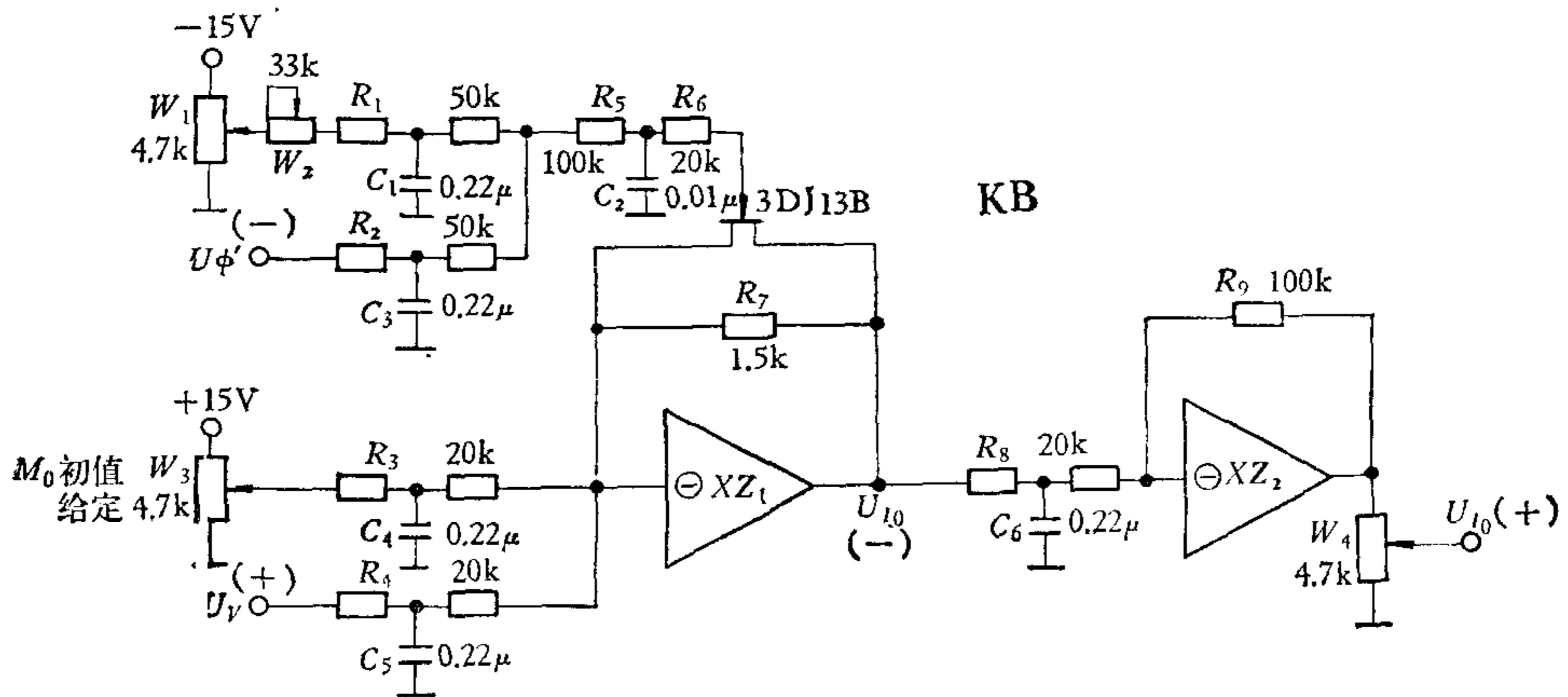


图 4 空载补偿器

## 2) 动态电流补偿

在加减速过程中电动机需要付出一部份克服机械惯性的转矩  $M_d$ , 称为动态补偿转矩, 起动时  $M_d$  与张力转矩  $M_T$  方向相反, 减速时方向相同。动态转矩若用线速度  $V$  表示, 则为:

$$M_d = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \times \frac{60i}{\pi D} \times \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

对应的动态补偿电流:

$$I_d = \frac{1}{C_M \phi} \times \frac{GD^2}{375} \times \frac{60i}{\pi D} \times \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

考虑到

$$E = C_e \phi n = 1.03 C_M \phi \frac{60i}{\pi D} \times V, \quad (5)$$

由 (5) 式得

$$C_M \phi = \frac{E \times \pi D}{V \times 1.03 \times 60i} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (4) 式得

$$I_d = \frac{GD^2}{A_1 D^2} \times \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

其中:

$$A_1 = \frac{375 \pi^2}{1.03 \times 60i^2} \times \frac{E}{V}.$$

因为  $\frac{E}{V}$  由电势调节系统保持为常数, 故  $A_1$  为常数。在 (7) 式中  $GD^2$  为系统总的飞

轮惯量,它包括电动机的  $GD_D^2$ , 卷筒与机械传动机构的  $GD_M^2$  以及铝卷的  $GD_A^2$ .

$$GD^2 = GD_D^2 + GD_M^2 + GD_A^2 \quad (8)$$

$GD_D^2$  与  $GD_M^2$  都为固定量,唯  $GD_A^2$  随铝卷直径不同而变化.

$$GD_A^2 = \frac{4gJ}{i^2} = \frac{\pi b \gamma q}{8i^2} (D^4 - D_0^4) \times 10^3 \text{ [公斤-米}^2\text{]} \quad (9)$$

式中:  $\gamma$ ——铝卷比重,  $\gamma = 2.7$  吨/米<sup>3</sup>;

$b$ ——铝卷宽度[米];

$q$ ——占积率  $q = 0.95$ ;

$D$ ——铝卷外径[米];

$D_0$ ——铝卷内径[米].

(9)式可改写为:

$$GD_A^2 = B_1(D^4 - B_2) \quad (10)$$

式中:

$$B_1 = \frac{\pi \times b \times \gamma \times q \times 10^3}{8i^2}, \quad B_2 = D_0^4.$$

$B_1, B_2$  均为常量. 于是(8)式可写成:

$$GD^2 = GD_D^2 + GD_M^2 + B_1(D^4 - B_2) = B_3 + B_1 D^4. \quad (11)$$

其中:  $B_3 = GD_D^2 + GD_M^2 - B_1 B_2$

将(11)式代入(7)式即得

$$I_d = \frac{1}{A_1 D^2} (B_3 + B_1 D^4) \times \frac{dv}{dt} = \left( \frac{A}{D^2} + B D^2 \right) \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

式中:  $A = \frac{B_3}{A_1}, B = \frac{B_1}{A_1}$ .

由(12)式看出,为了补偿动态电流,应该在综合调节器 2ZT 输入端引入两部份的乘积,一个是合卷线速度的微分量  $\frac{dv}{dt}$ , 另一个与卷径  $D$  成一定函数关系  $\left( \frac{A}{D^2} + B D^2 \right)$  的分量.

$\frac{dv}{dt}$  信号由反映箔材线速度的测速机 2CSF 引出再输入到微分器而获得. 由于系统有惯性,此动态补偿信号将滞后,因此又从给定积分器 GJ 第一级输出端引入一个反映给定的  $\frac{dv}{dt}$  信号直接送入乘法器,这个信号比反映实际的  $\frac{dv}{dt}$  信号超前一些,调节它们的比值可使动态补偿恰到好处.

由于采用恒电势调节系统,故电动机励磁信号  $\phi$  正比于卷径  $D$ . 函数发生器 1HS 的输出即反映了  $\left( \frac{A}{D^2} + B D^2 \right)$  的函数关系.

工艺要求在起车前先建立静张力,因此在 2ZT 输入端又引入一个电流给定信号,改变 2W<sub>3</sub> 的分压比可改变静张力大小.

工作张力信号由给定积分器 GJ 送出,此  $u_v$  信号经比例调节器 6BT、分压器 2W<sub>1</sub> 再输入至 2ZT,由于 6BT 放大系数较大,只要有很小输入即可使 6BT 饱和输出,因此工作

张力可由在操作台上的  $2W_1$  调节。采用上述控制, 起动时工作张力可以逐步加入, 避免断带。

## 2. 电势调节环

对电势调节环的主要要求是保持  $\frac{E}{V}$  为常数。  $V$  由卷卷机控制系统保持为恒值。为了保持  $E$  为恒值, 可以通过调节电动机励磁予以实现。因为:

$$\frac{E}{V} = \frac{C_e \phi n}{\frac{\pi D n}{60i}} = \frac{60i \times C_e}{\pi} \times \frac{\phi}{D} = K \frac{\phi}{D} \quad (13)$$

式中:

$$K = \frac{60i \times C_e}{\pi} = \text{常值}$$

由上式可知, 保持  $E, V$  比值恒定, 也就是随卷径  $D$  的变化使  $\phi$  作相应变化而保持  $\phi$  和  $D$  的比值不变。

在图 3 电势调节系统中, 基准信号取自压辊测速机 2CSF 的输出信号  $V$ 。电动机反电势  $E = -(U + IR)$ , (在开卷时电动机处于发电制动状态) 由电压反馈信号和电流反馈信号在比例调节器 1BT 处综合, 其输出即为比例于电动机反电势  $E$  的信号。  $E, V$  两值在 2BT 输入端比较, 当卷径减小时, 电动机转速加快,  $E$  上升, 当大于  $V$  值时, 积分器 1IT 积分输出, 使合成磁场给定值减小,  $\phi$  减少, 从而使  $E$  降低, 维持  $E, V$  比值不变。

磁通与励磁电流为非线性关系, 所以通过函数发生器 3HS 转换。为了加快磁场电流过渡过程, 并使磁场电流稳定, 避免电压波动与温度等因素干扰, 磁场采用励磁电流反馈组成的闭环控制。

在停车时, 使积分器 (IT) 输入和输出均断开, 电容可记忆原有输出电压, 相当于卷径记忆。

## 三、串并联校正模数最佳的参数选择

铝箔合卷机采用了串并联校正的方法, 其调节器接线如图 5 所示。

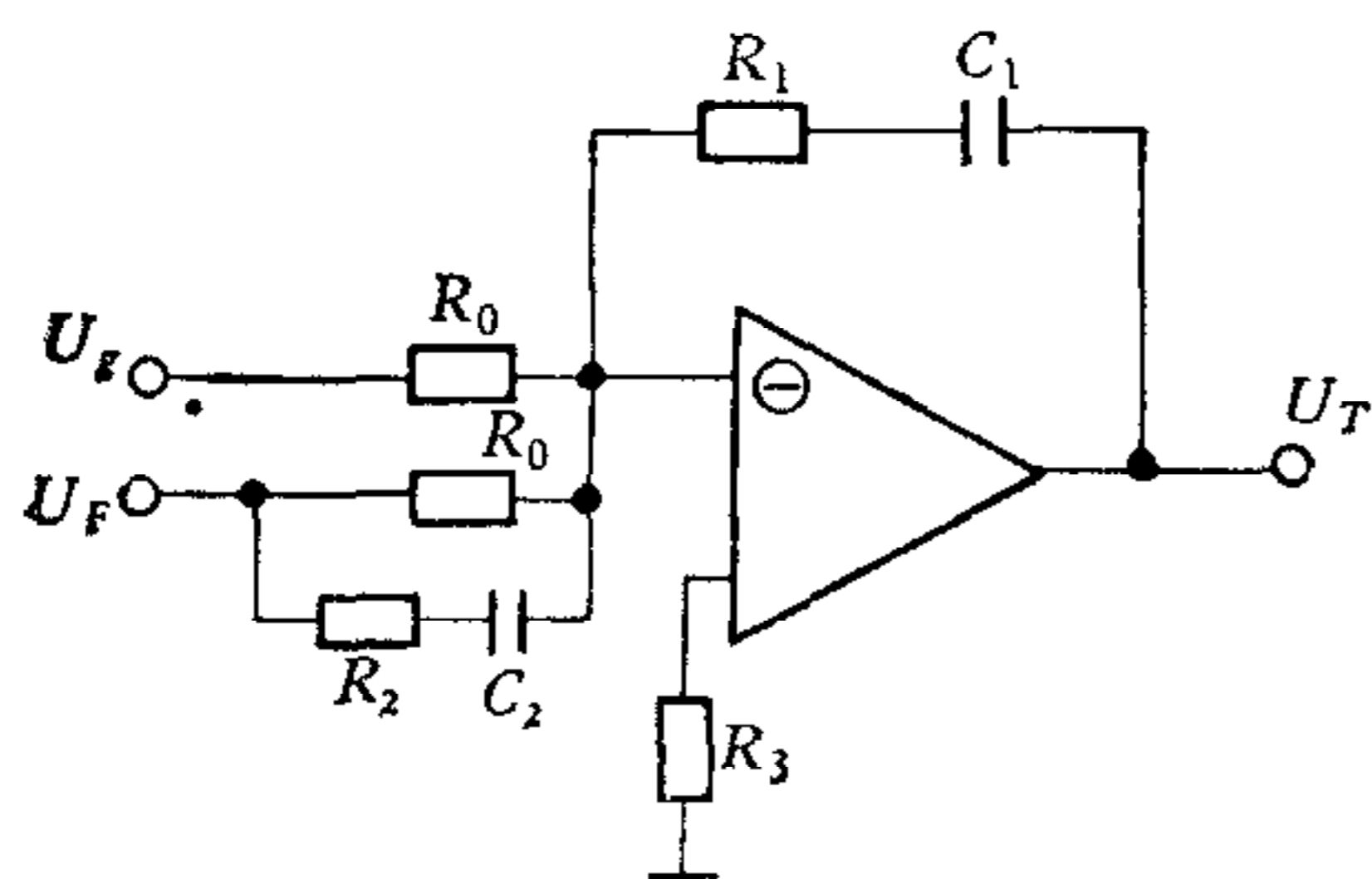


图 5 串并联校正结构

如何确定串并联校正的调节器参数, 我们仍沿用模数最佳原理。

图 5 调节器对  $U_g(s)$  输入回路的传递函数为

$$W_1(s) = \frac{U_T(s)}{U_g(s)} = \frac{1 + T_1 s}{T_0 s} = \frac{K_p (1 + T_1 s)}{T_1 s}$$

式中:  $T_1 = R_1 C_1$ ,  $T_0 = R_0 C_1$ ,  $K_p = \frac{R_1}{R_0}$ 。

对  $U_F(s)$  输入回路的传递函数则为

$$W_2(s) = \frac{U_T(s)}{U_F(s)} = \frac{(1 + T_1 s)(1 + T_3 s)}{T_0 s (1 + T_2 s)},$$

式中:  $T_2 = R_2 C_2$ ,  $T_3 = (R_0 + R_2) C_2$

采用上述调节器后电流环的方块图为图 6。

若取  $T_1 = \tau + T_2$ ，并令  $K = K_s \times K_a \times 1/R_a$ ，根据模数最佳化条件  $A(\omega) = 1$ ，可推导出最佳化参数条件：

$$T_3 = \sqrt{\frac{2T_0T_a}{K} - \frac{T_0}{K}}$$

因此参数选取原则为：

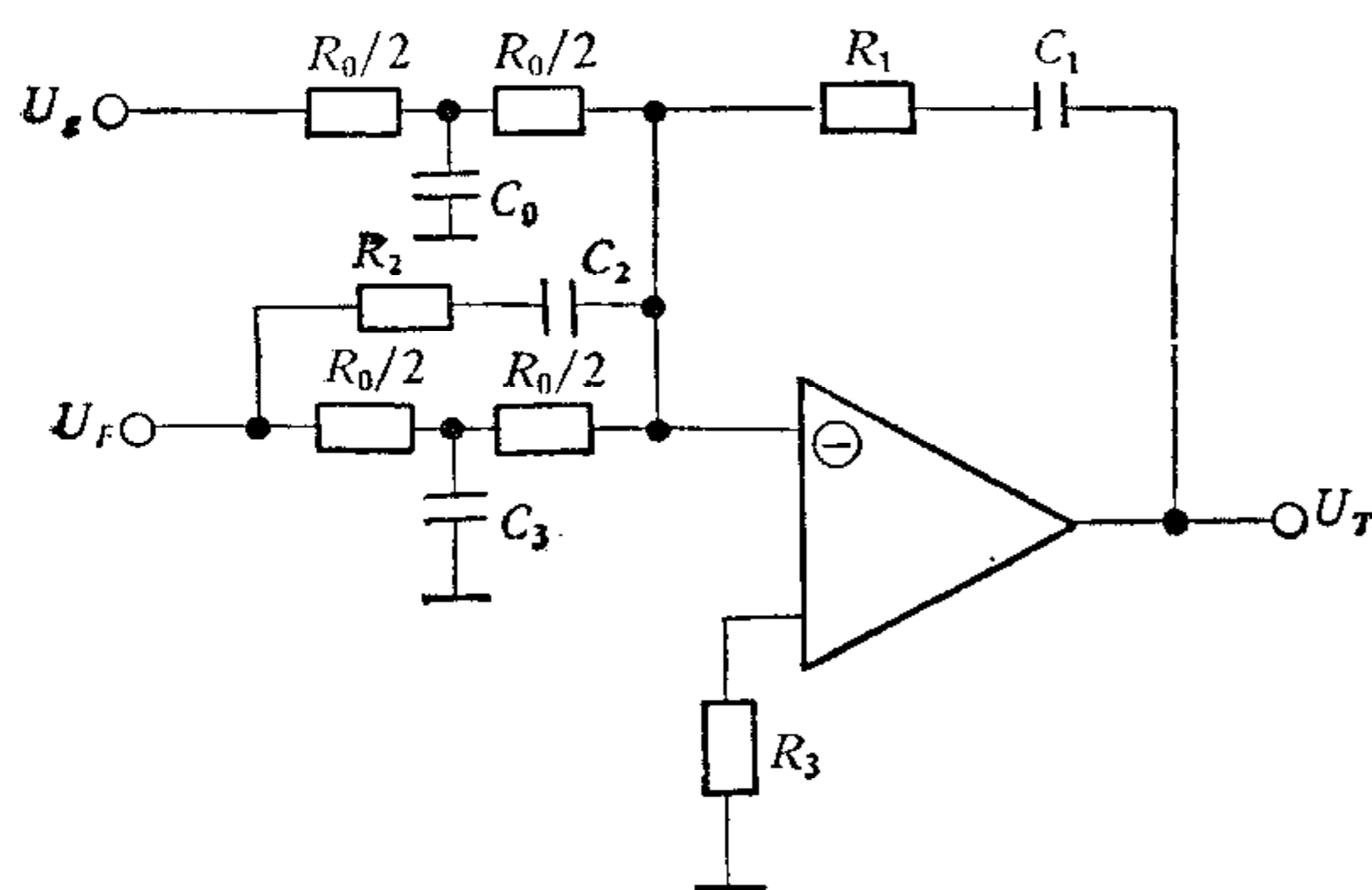
(1) 主通道中比例积分调节器的微分时间常数按惯性补偿原则选取。

$$T_1 = \tau + T_2$$

(2) 反馈回路的微分时间常数  $T_3$  按系统最佳化原则选取。

$$T_3 = \sqrt{\frac{2T_0T_a}{K} - \frac{T_0}{K}}$$

(3) 主通道中调节器积分时间常数  $T_0$  可取为  $T_0 = \frac{T_1}{K_p}$ ，其中  $K_p$  为调节器对给定信号的动态放大系数。一般  $K_p = 1-5$ 。



$R_0 = R_1 = R_2 = 20K; C_1 = 0.47\mu f;$   
 $C_2 = 0.22\mu f; C_0 = 0.22\mu f; C_3 = 0.22\mu f.$

图 7 系统调节器结构

$t_k = 18ms$ ，超调量  $\sigma = 4\%$ ，电流稳态值  $I_D = 32A$ 。

对于突加干扰信号的动态指标为：

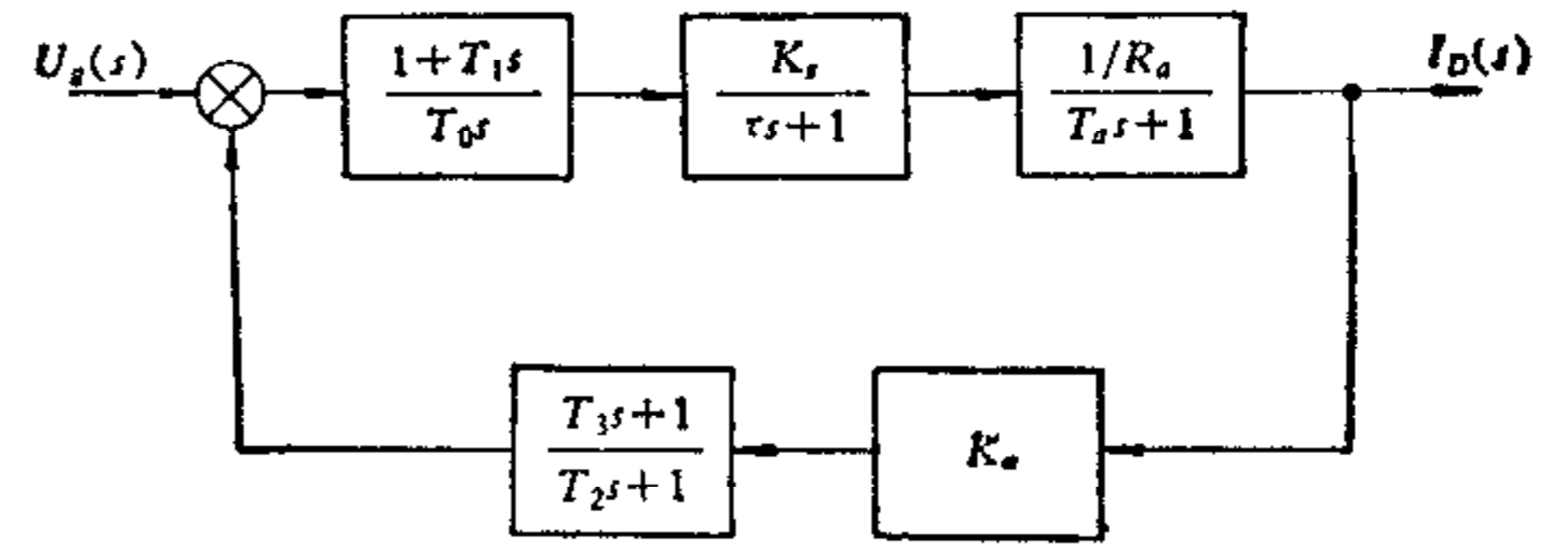


图 6 电流环方块图

(4) 为了补偿等效变换后微分环节影响，在输入端加给定滤波环节，其时间常数  $T_4 = T_2$ 。

经过调整，调节器实际参数与计算分析基本一致。由于电流反馈信号纹波较大，所以仍加有滤波环节。

图 7 为系统调节器结构。

系统在突加阶跃给定和突加负载干扰的响应实测如图 8 所示。

对于突加阶跃给定信号的动态指标为：

飞升时间  $t_0 = 10ms$ ，过渡过程时间

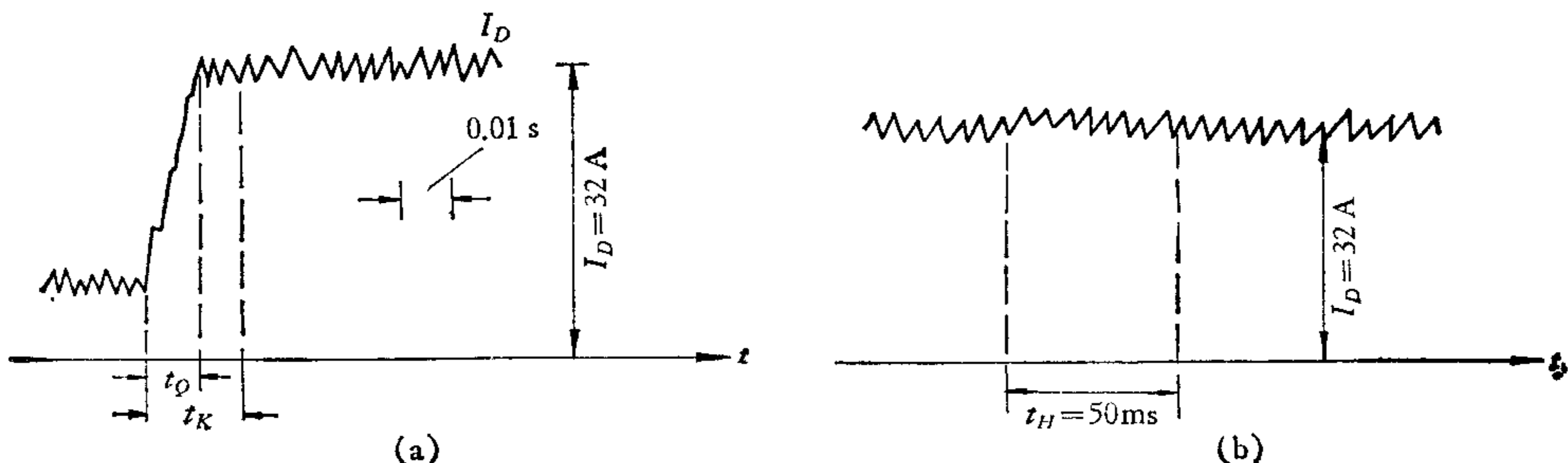


图 8 系统的实际响应



超调量  $\sigma = 5\%$ , 恢复时间  $t_H = 50\text{ms}$ , 电流稳态值  $I_D = 32\text{A}$ .

由实测波形看来采用串并联微分校正后的动态品质较二阶最佳和三阶最佳的更为理想.

## 四、本系统的抗干扰措施

### 1. 对于可能产生电耦合电路的抗干扰措施

- 1) 将电网与各种操作电路、控制电路隔离起来, 以消除同网络的直接电耦合干扰.
- 2) 所有的控制信号、操作信号线均用走线槽, 用杂散布线的方法, 以减小各平行线之间的分布电容.
- 3) 电网与 SCR 的变压器隔离. 变压器起到匹配电压和抑制干扰及地环流的作用.
- 4) 直流高电平回路与控制回路用电压隔离器 (YG) 隔离.
- 5) 信号传输用低通滤波来抑制噪声电平.

### 2. 对于可能产生磁耦合的场合采用双绞线的措施

如触发脉冲线用 20—40 扭/米以上的双绞线, 工艺上应注意将易产生干扰与易接受干扰的回路单独组成往返的双绞线并贴近地线布线, 可获得抗电耦合和磁耦合干扰的良好效果.

### 3. 对于可能产生公共阻抗干扰的措施

- 1) 分电源供电.
- 2) 加大控制电源供电线截面以减小公共阻抗.

### 4. 接地问题

本系统采用外壳金属保安接地、强电地线、控制零线互相隔离的方法, 也即通称的“浮地”法.

现场运行证明: 在设计调试过程中采用上述措施是可以达到抗干扰目的的.

## 五、结 束 语

经过实际调试和试车说明:

(1) 合卷机中卷卷机采用速度控制, 开卷机采用张力控制完全可以满足工艺要求, 即用单纯建立后张力的方法可以使合卷箔材卷紧.

(2) 对于控制较薄的箔材采用控制环流可逆系统比较合宜, 加减速过程平滑, 反应也比较快, 调试方便, 虽然增加了整流变压器, 但由于容量小, 初投资不大, 同时相对地提高了系统的抗干扰性.

(3) 采用  $E, V$  直接比较的电势环, 并应用积分器作为卷径记忆和卷径预选装置大大简化了张力控制系统, 而且实际效果很好.

(4) 对于铝箔等小张力系统, 空载补偿是必要的. 利用场效应管组成的乘、除法器功能良好、简单、成本低、通频带宽, 精度也满足一般实际系统的需要.

(5) 采用串并联校正的方法无论是对于给定信号, 还是对于扰动信号都有一个较好的动态品质指标, 参数可按模数最佳原则选取, PI 调节器的比例微分项按惯性补偿原则选取, 对消系统中的小时间常数群. 反馈回路的微分环节按下式选取

$$T_3 = \sqrt{\frac{2T_0T_a}{K}} - \frac{T_0}{K}$$

(6) 抗干扰以至可靠性的工作必须贯彻在研制、调整、运行的全过程。常用的抗干扰方法中隔离、滤波、绞线,处理好各种接零接地比较有效,例如本系统没有用屏蔽线,而且在公用电缆槽中平行敷设多芯通讯电缆,仍能正常运行。

## THE ELECTRIC CONTROL SYSTEM OF AN ALUMINUM FOIL-DOUBLER

WANG YAN HU SHENMIN FANG YUEQUAN

YANG DAMING WANG QINGCHAO

(Harbin Institute of Technology)

### ABSTRACT

This paper introduces the structure of an electric control system of a high-speed machine of aluminum foil-doubler.

The entry reel adopts linear velocity control system, while two pay-off reel adopt tension control system.

According to the characteristics of small tension of the aluminum foil, main driving adopts the reversible D.C. motor of SCR supply with circulating current control.

The linear velocity control system adopts non-independent variable field system.

The tension system adopts indirect control system.

During the system design some special control elements are used, and the system adopts serial-parallel correcting devices for improving dynamic indices.

### 学术活动简讯

## 中国自动化学会关于增补常务理事及增聘副秘书长的决定

因学会工作的需要,经在京常务理事会讨论,并分别经全体理事和全体常务理事通讯投票表决,决定增补杨振业同志为常务理事,决定增聘杨振业、吴忠明、黄大地和王洪宾同志为学会副秘书长。

中国自动化学会