

# 电视精密跟踪控制系统的设计和应用\*

徐凤安 冯仲良 夏春和<sup>1)</sup>

(中国科学院沈阳自动化所)

## 摘 要

本文介绍了一个用于实际的电视精密跟踪控制系统,该控制系统在外场跟踪飞行体时稳定可靠,跟踪精度为数角秒。

文中论述了人参与的复合捕获控制系统,找到了该系统参数的设计准则,即在切换时要满足相对变化量  $\Delta \leq 15\%$ 。

其次,重点论述了三阶无静差电视精密跟踪控制系统的设计方法,即利用Z变换直接求解,使得系统满足最佳条件  $\partial \sigma_{\max} / \partial K_j = 0$  和  $\partial^2 \sigma_{\max} / \partial K_j^2 > 0$ ,从而,使得该控制系统满足了高稳定性和高精度的技术指标,并在实际中获得了应用。

## 一、系统简述

该采样电视精密跟踪控制系统由单杆捕获复合控制、电视传感器、电视准最佳滤波器和速度环四部分组成。

为了稳定而高精度的远距离跟踪,电视传感器采用了长焦距光学系统(视场角  $\pm 12$  角分),用高灵敏度的超正析摄像管接收目标信号,对电视信号的处理应用了可变空域门和计算平均脱靶量等技术;电视工作体制为40帧/秒,逐行扫描,其中心分辨率为600行电视行。伺服系统采用了准最佳可变带宽滤波器、大功率直流力矩电机、高灵敏度直流测速发电机、双通道自稳零运算放大器、晶体管桥式比例大功率放大器等部件。

该控制系统工作时,开始用单杆追捕目标,当目标进入电视视场的捕获范围时,电视空域门就把目标紧紧地套住,此时合上自动跟踪开关,系统便由一阶无静差单杆复合控制自动地转换到三阶无静差控制;当发现由于目标信噪比下降而使目标在监视器上有波动时,可合上窄通带开关,使系统继续跟踪目标,直到目标影象在摄像管上等于行扫一行为止。

该电视跟踪系统在夜间能够稳定的跟踪北极星,并对若干人眼明显可见的星体进行了跟踪,白天对气球、比斯飞机进行了多次稳定的跟踪,其跟踪精度均达数角秒。

## 二、系统结构简介

全套电视控制系统由高低控制系统、方位控制系统两部分组成,以达到对空间飞行目

\* 本文曾在1979年全国自动化技术应用学术年会上宣读,本文修改稿于1980年2月18日收到。

1) 该项研制成果是在沈阳自动化所、北京电视设备厂、长春光机所等兄弟单位和有关同志共同努力下取得的。

标跟踪的目的。图 1 为系统结构图，电视光学接收系统和摄像机安装在经纬仪的主望远镜上，人操纵的单杆半自动跟踪系统通过 25× 或 50× 倍率的瞄准镜进行捕获和跟踪目标。

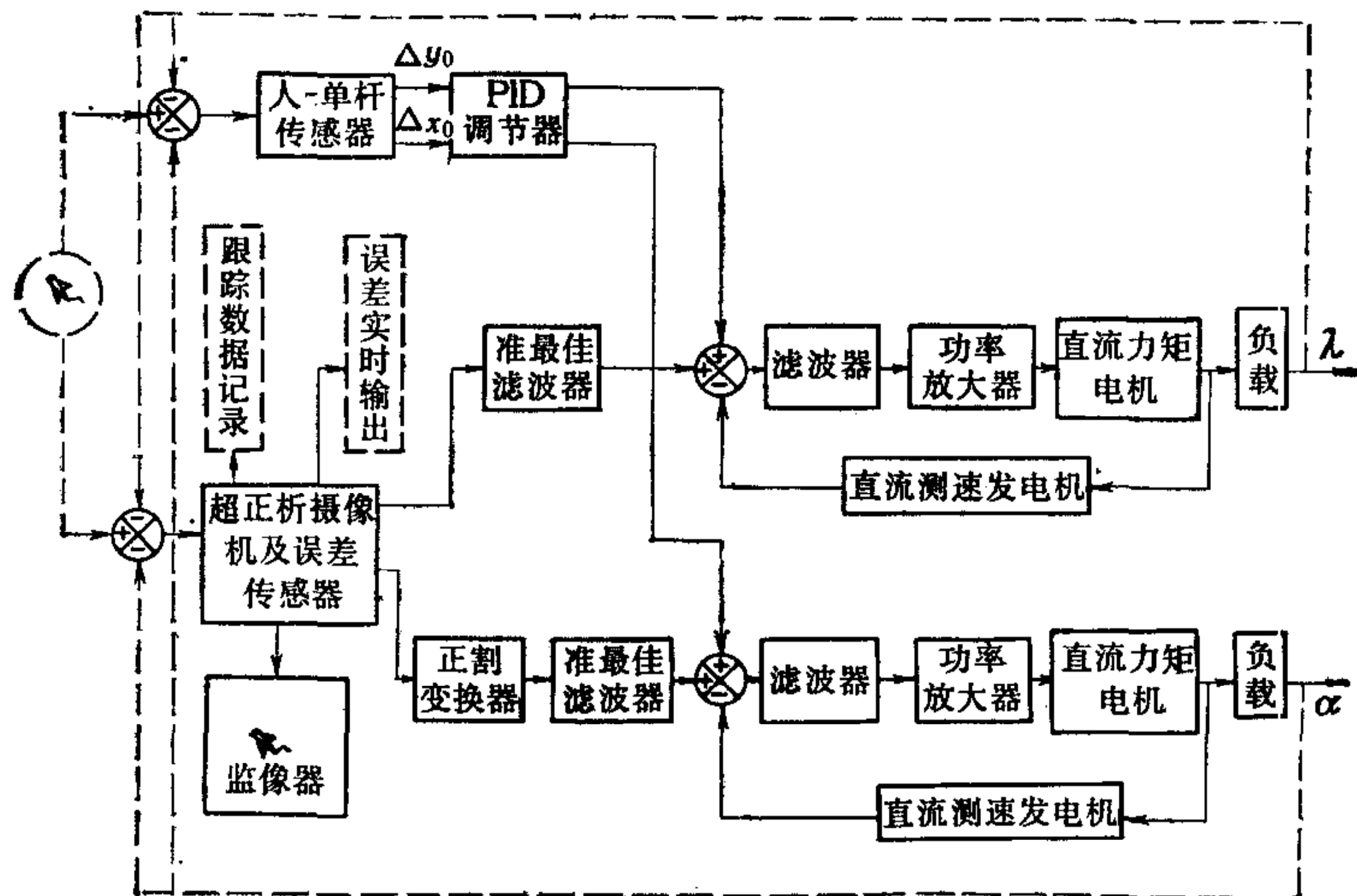


图 1 电视跟踪系统结构图

### 三、一阶无静差增益系数 $K_1$ 的选定

因为电视传感器的视场角只有  $\pm 12$  角分，稍不注意，目标很容易跑出视场。所以，我们采用了高低、方位两伺服系统分别由一阶无静差控制自动地转换到三阶无静差控制的程序。

由于系统在切换到自动跟踪的第一阶段是人参与的复合控制辅助跟踪，为此，先把人操纵单杆的半自动跟踪控制系统分析一下：

当目标出现在跟踪的工作角空间时，由操纵人员利用 PD 调节器把目标捕获到瞄准镜视场中，并进行跟踪，把目标紧紧地锁在一定的误差范围之内。在位置环中，操纵人员的传递特性等效为一个惯性环节  $G_H(s) = K_N / (1 + T_H s)$ （把人的延迟时间考虑到  $T_H$  中去了）。实践证明，由于人的高度灵巧性，比例系数  $K_N$  和时间常数  $T_H$  的大小还跟目标的运动特性有关，定性地讲，目标相对仪器的角速度  $\omega$  越大，比例系数  $K_N$  相应的会增大，时间常数  $T_H$  会相应的减小。然而，由于人的适应性和预卜性受被控对象较大时间常数  $T_{30}$  和人的“眼手”通路不理想性所限制，所以  $K_N$  的增加和  $T_H$  的减少是有限度的。

总之，人参与的控制其适应性能是很强的，从概略瞄准到把目标捕获到光学瞄准镜中，若是无人参与是不可想象的；另外，还表现在跟踪速度较快的目标时，例如角速度  $\omega = 2$  度/秒，此时  $K_N$  可高达  $60 \text{ 秒}^{-1}$ ，速度跟踪滞后误差  $\varepsilon_1 \approx 2$  角分。

通过外场实际跟踪切换得到的评价指标是：当突然合上切换开关  $K_0$ （见图 2），即接入电视一阶无静差通路，所产生的误差在半秒钟内最大相对变化量

$$\Delta = \left| \frac{\varepsilon_{1\max}(t_1) - \varepsilon_1(t_0)}{\varepsilon_1(t_0)} \right| \leq 15\%$$

时,操纵手可来得及调节,跟踪不紧张,可以达到稳定的平滑切换。

正在半自动跟踪的情况下,在  $t = t_0$  时刻突然接通电视跟踪通道时,具有一定增益  $K_1$  的电视通道,就将在速度回路中加上一个瞬时电压  $K_1 \varepsilon_1(t_0)$ ,而人的传递特性,在这个瞬时,就会显现出一个等效的传递函数  $G = K_N / (1 + T_H s)$ ,取  $T_H = 0.25$  秒,  $K_N = 60$  秒<sup>-1</sup>,对受过训练的操纵手,用此传递函数来表示其特性是十分相近的。其等效方框图如图 2 所示。

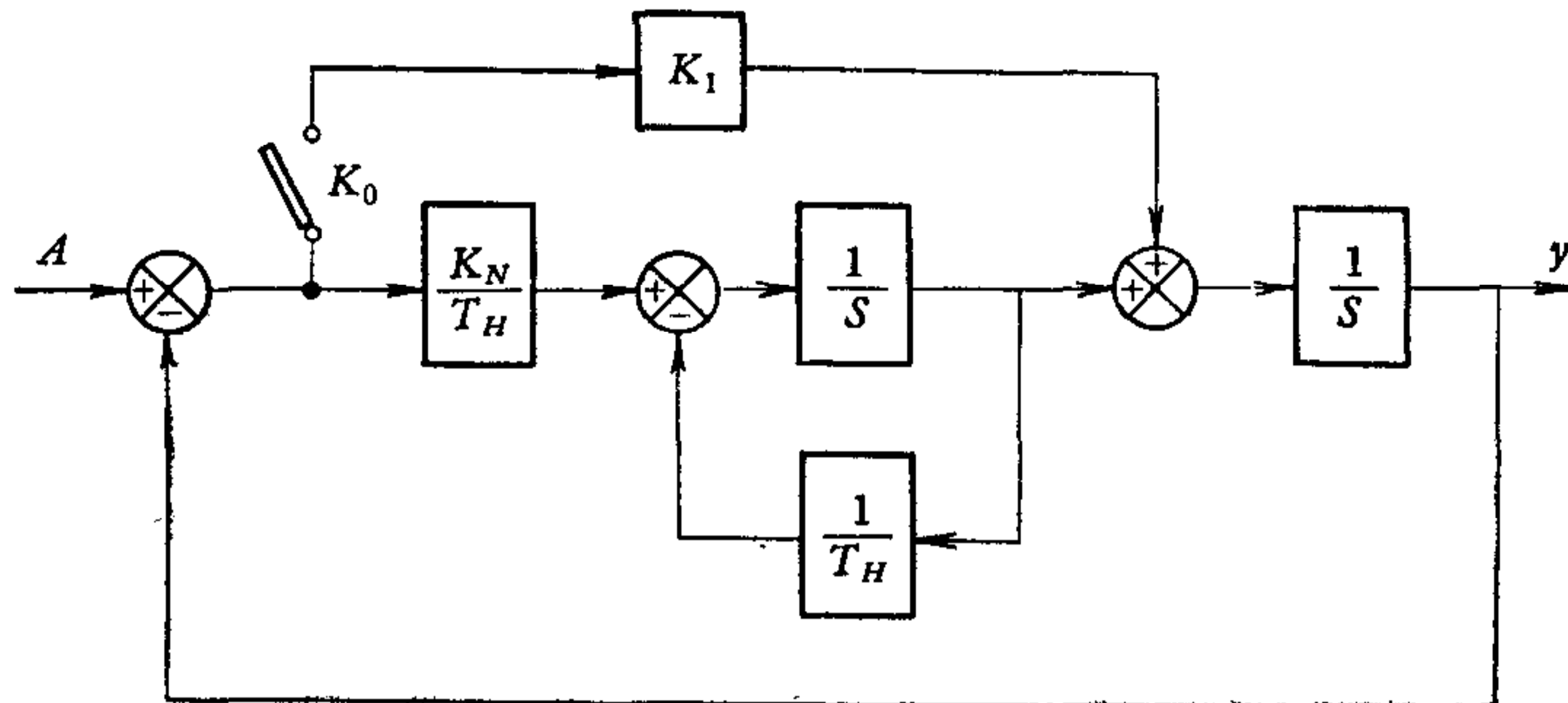


图 2 切换开关  $K_0$  突然闭合时人参与的简化等效传递框图

由于速度环和电视传感器的等效时间常数相对于  $T_H$  小一个数量级,所以,分析问题 时,把被控对象看作一个简单的放大和积分环节,这样做并不失其真实性。

在时间  $t = t_0$  时,合上开关  $K_0$ ,在操纵手来得及反应的短时间内,其目标输入给系统的特性,可以看作  $A(t - t_0) = A(t_0) + \omega(t - t_0)$ ,此时,依图 2 可得系统的微分方程式

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left( \frac{1}{T_H} + K_1 \right) \frac{dy}{dt} + \frac{K_N + K_1}{T_H} y = K_1 \frac{dA}{dt} + \frac{K_N + K_1}{T_H} A, \quad t - t_0 \geq 0 \quad (1)$$

设  $A_1 = A, A_2 = dA_1/dt, y_1 = y, y_2 = dy_1/dt - K_1 A$  则式(1)可化成如下的矩阵形式:

$$\frac{dV(t - t_0)}{dt} = DV(t - t_0), \quad t - t_0 \geq 0 \quad (2)$$

其中

$$V(t - t_0) = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_1 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_N}{T_H} - K_1^2 & 0 & -\frac{K_N + K_1}{T_H} & -\left( \frac{1}{T_H} + K_1 \right) \end{bmatrix}$$

把式(2)进行拉氏变换,整理后得:

$$V(s) = (sI - D)^{-1} V(t_0), \quad (3)$$

其中初始条件是

$$V^T(t_0) = [A(t_0) \quad \omega \quad y_1(t_0) \quad \omega - K_1 y_1(t_0)].$$

通过式(3)求解得系统输出的拉氏变换为:

$$Y_1(s) = \frac{s \left[ K_1 s + \frac{K_1 + K_N}{T_H} \right] A(t_0) + \left[ K_1 s + \frac{K_1 + K_N}{T_H} \right] \omega + s^2 \left[ y_1(t_0) \left( s + \frac{1}{T_H} \right) + \omega \right]}{s^2 \left[ s^2 + s \left( \frac{1}{T_H} + K_1 \right) + \frac{K_N + K_1}{T_H} \right]}$$

误差输出的拉氏变换为:

$$\varepsilon_1(s) = A_1(s) - Y_1(s) = \frac{\frac{\omega}{K_N} \left( s^2 + \frac{1}{T_H} s + \frac{K_N}{T_H} \right)}{s \left[ s^2 + \left( K_1 + \frac{1}{T_H} \right) s + \frac{K_1 + K_N}{T_H} \right]}, \quad (4)$$

当选  $K_1 = 2$  时, 把具体参数代入式 (4) 中, 得误差的动态输出

$$\varepsilon_1(t - t_0) = \varepsilon_1(t_0) \{ 1 - 0.115 e^{-3(t-t_0)} \sin 15.4(t - t_0) - 0.032 [1 + 1.02 e^{-3(t-t_0)} \sin (15.4(t - t_0) - 1.76)] \}, \quad t - t_0 \geq 0$$

算得误差  $\varepsilon_1$  的相对最大变化量:

$$\Delta = \left| \frac{\varepsilon_{1\max} - \varepsilon_1(t_0)}{\varepsilon_1(t_0)} \right| = \left| \frac{0.888 \varepsilon_1(t_0) - \varepsilon_1(t_0)}{\varepsilon_1(t_0)} \right| \approx 11.2\%.$$

此时  $\Delta \approx 11.2\% < 15\%$ , 满足不丢失目标的条件.

实际切换系统, 选用  $K_1 = 2$  以来, 在跟踪星体、气球、飞机时, 切换平稳, 工作可靠.

#### 四、三阶无静差控制系统准最佳滤波器的综合

控制对象的等效小时间常数之和确定后, 闭环系统的无静差度越高, 越能在系统通频带较窄的基础上获得近似无穷大的相应阶无静差增益系数; 同时系统对抑制噪声和干扰也越有利. 实践还证明了, 当系统把目标锁在电视视场中时, 三阶无静差这个所谓条件稳定系统是相当稳定的. 通过准最佳滤波器滤出的速度、加速度及冲击加速度是和目标飞行特性相当一致的, 因而跟踪时动态误差在数角秒以内.

任何所谓最佳均是有条件的, 相对的. 考虑到电视跟踪视场较小, 而且采样输出给系统的误差均是小阶跃信号, 因而此处的准最佳滤波器是指它的插入能保证在单位阶跃作用下, 获得最大超调量  $\sigma_{\max}$  为最小, 同时也应保证获得较理想的冲击加速度误差系数  $K_j$ , 即准最佳滤波器的插入, 使得系统满足极值条件

$$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial K_j} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{\max}}{\partial K_j^2} > 0, \quad (6)$$

此时系统的各参数只要变化不大, 系统就能近乎在最佳稳定区域工作, 进行正常跟踪.

为了满足  $\sigma_{\max}$  获极小值的最佳条件公式(5)和(6), 我们在这个高阶无静差采样控制系统中, 利用了 Z 变换直接求出系统的阶跃响应, 并用“等区间搜索法”, 在不同比值  $h_1 = \tau_1/\tau_3$  和  $h_2 = \tau_3/T_{30}$  的情况下, 求得我们所希望的  $\sigma_{\max}$  极小和折衷的冲击加速度误差系数  $K_j$  值(在采用模拟滤波器的采样控制系统中, 该设计方法比用频率法或保角变换法来设计, 既快又可明确知道系统的阶跃响应, 可获小的比值  $\sigma_{\max}/K_j$ . 尤其是在采样周期  $T$  和系统的等效小时间常数  $T_{30}$  可以比较, 或者  $T > T_{30}$  时, 此直接设计方法就显得更加优越了).

下面以高低控制系统的宽频带设计为例, 写出准最佳滤波器参数综合的过程.

三阶无静差高低控制系统方框图示于图 3.

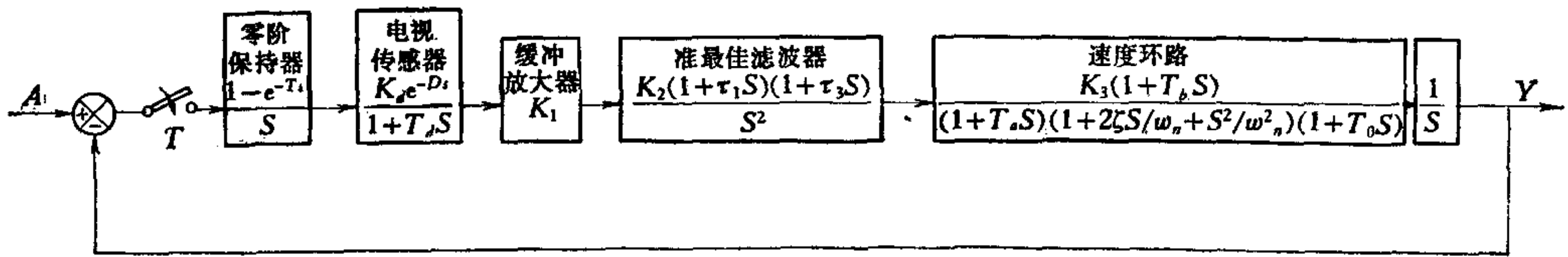


图 3 高低控制系统框图

为了便于工程上的明快设计,我们把图 3 近似简化为图 4.

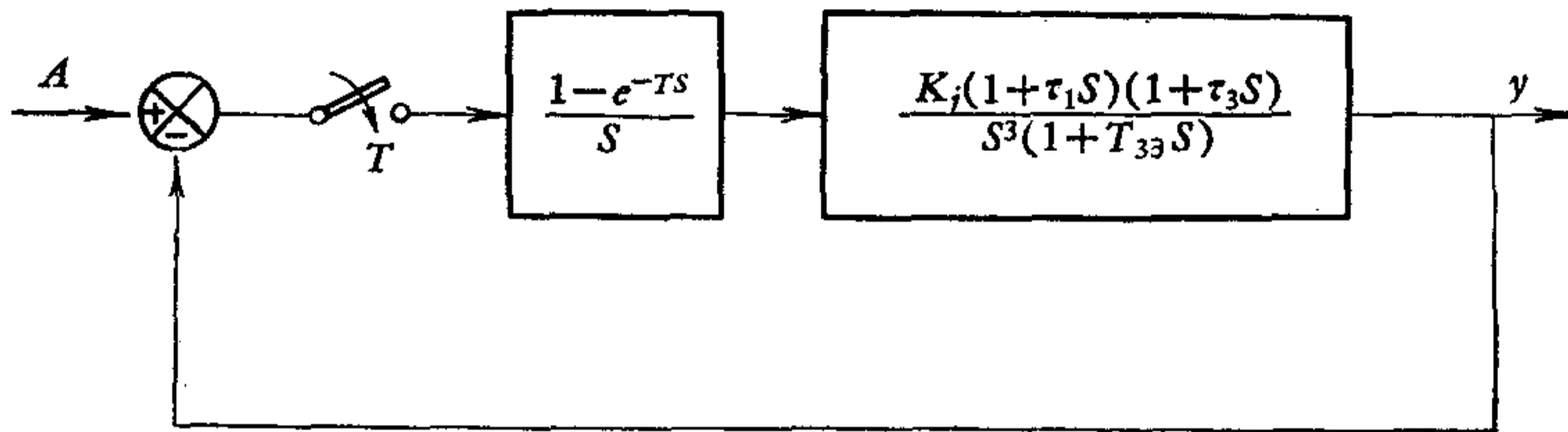


图 4 图 3 的近似简化框图

依据图 4, 可以写出系统的闭环脉冲传递函数

$$W(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z)}, \tag{7}$$

和闭环误差脉冲传递函数

$$W_e(z) = \frac{1}{1 + G(z)}, \tag{8}$$

式中  $G(z)$  为系统开环传递函数  $G(s)$  的  $z$  变换表达式, 其中

$$G(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{K_j(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_3 s)}{s^3(1 + T_{3\theta} s)}$$

在采样周期定为  $T = 0.025$  秒, 系统的等效小时间常数  $T_{3\theta} = 0.03$  秒, 借鉴综合连续三阶无静差控制系统的“M”振荡指标法<sup>[1]</sup>, 又考虑到欲在一块运算放大器上实现二重积分环节<sup>[2]</sup>(为了节省一块运算放大器和在实践中调试简便), 我们取  $h_1 = \tau_1/\tau_3 = 2.5$ ,  $h_2 = \tau_3/T_{3\theta} = 20$ , 从而可得  $\tau_3 = 0.6$  秒,  $\tau_1 = 1.5$  秒. 把具体参数代入式 (7) 中, 可求得系统对阶跃输入的脉冲响应

$$Y(z) = \frac{W(z)}{1 - z^{-1}} = \frac{K_j z^{-1}(7.387 - 9.268z^{-1} - 3.222z^{-2} + 5.112z^{-3}) \times 10^{-3}}{(1 - z^{-1})[(1 - z^{-1})^3(1 - 0.4347z^{-1}) + K_j z^{-1}(7.387 - 9.268z^{-1} - 3.222z^{-2} + 5.112z^{-3}) \times 10^{-3}]}$$

在不同的冲击加速度误差系数  $K_j$  的情况下, 算得表 1, 通过表 1 可以看出  $K_j \approx 15$  时,  $Y(z)$  输出的最大值等于  $z^{-7}$  的系数 1.109, 近似为 1.11, 和它对应的是这几组超调量中最小的一个, 其值为  $\sigma_{\max} \approx 11\%$ . 再利用式 (8), 可算得冲击加速度误差系数为  $K_{ji} \approx 780$ .

上述设计方法也是我们综合方位通道和窄通带参数的基本原则, 准最佳滤波器的具体线路和参数见图 5 和图 6.

图 7 为插入方位、高低控制系统的准最佳滤波器切换变通带简化线路, 当开关  $K_1$  闭合时, 继电器绕组  $W_{11}$  通电, 把高低一阶无静差控制系统接入; 2 秒后继电器绕组  $W_{12}$  通电, 把方位一阶无静差控制系统自动接入; 再过 2 秒后继电器绕组  $W_{21}$  通电, 自动接入高

表 1  $K_i$  变化时系统对单位阶跃的响应  $Y(z)$

$K_i$	$Y(z)$
30	$0z^{-0} + 0.2216z^{-1} + 0.6556z^{-2} + 1.0613z^{-3} + 1.3026z^{-4} + 1.3567z^{-5} + 1.2774z^{-6} + \dots$
20	$0z^{-0} + 0.1477z^{-1} + 0.4480z^{-2} + 0.7620z^{-3} + 1.0100z^{-4} + 1.1618z^{-5} + 1.2252z^{-6} + 1.2243z^{-7} + \dots$
15	$0z^{-0} + 0.1108z^{-1} + 0.3401z^{-2} + 0.5924z^{-3} + 0.8132z^{-4} + 0.9670z^{-5} + 1.0732z^{-6} + 1.1090z^{-7} + 1.0931z^{-8} + \dots$
10	$0z^{-0} + 0.0739z^{-1} + 0.2295z^{-2} + 0.4090z^{-3} + 0.5810z^{-4} + 0.7304z^{-5} + 0.8520z^{-6} + 0.9463z^{-7} + 1.0166z^{-8} + 1.0669z^{-9} + 1.1016z^{-10} + 1.1244z^{-11} + 1.1387z^{-12} + 1.1469z^{-13} + 1.1509z^{-14} + 1.1522z^{-15} + 1.1515z^{-16} + 1.1487z^{-17} + \dots$

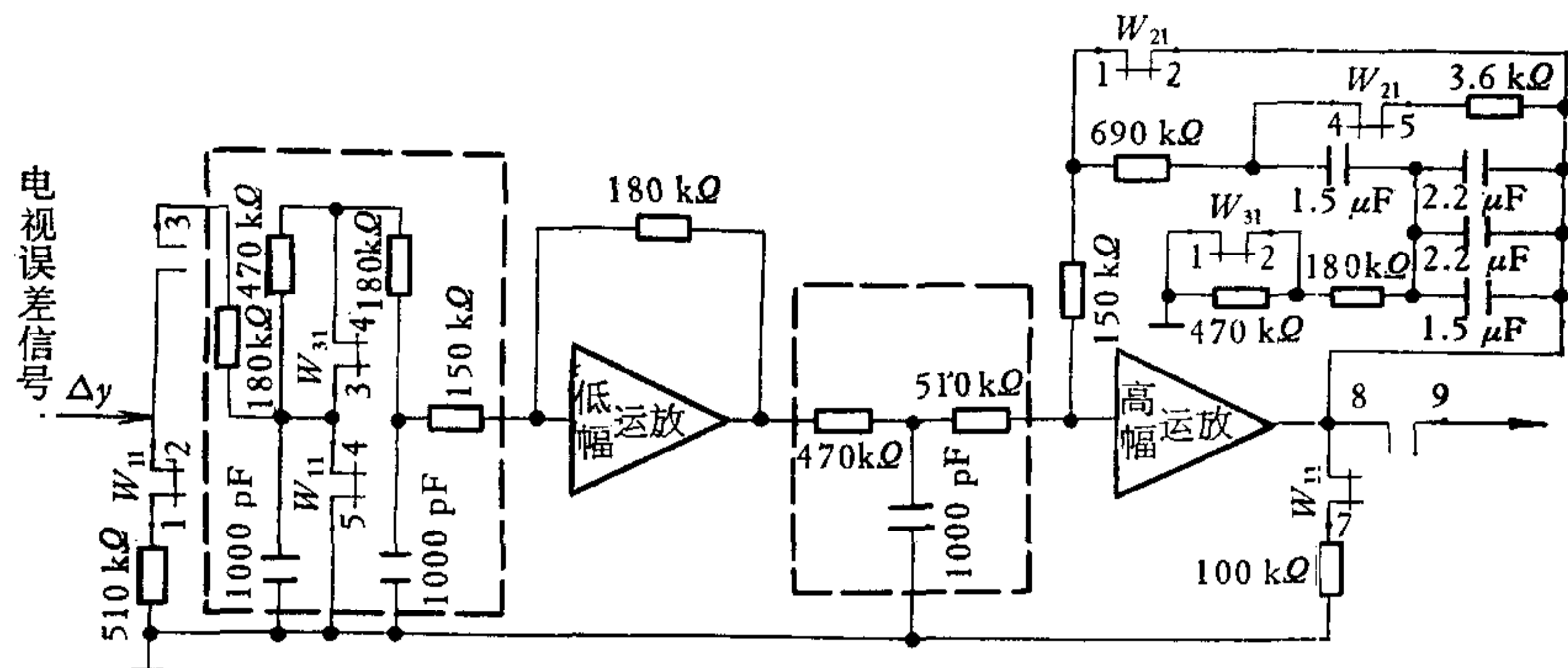


图 5 电视跟踪高低用准最佳滤波器

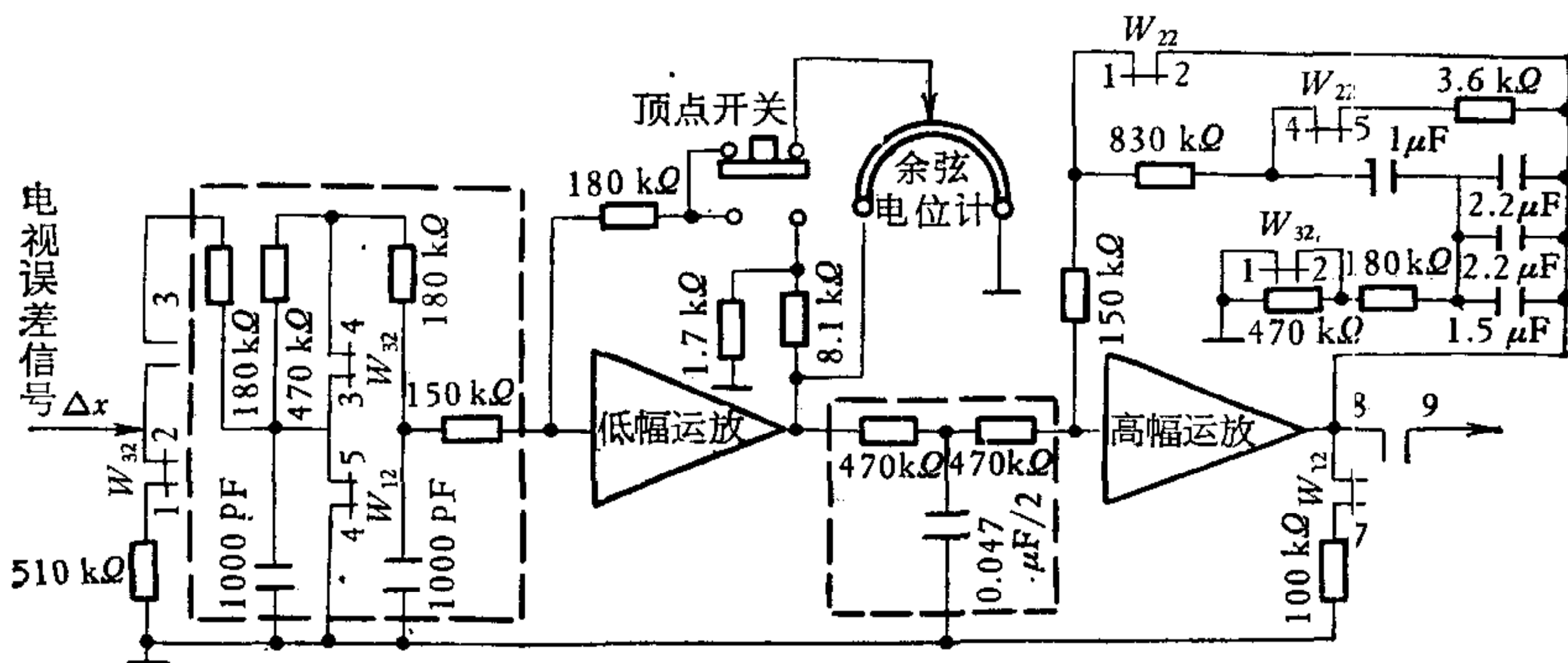


图 6 电视跟踪方位用准最佳滤波器

低三阶无静差控制系统；再过 2 秒  $W_{22}$  通电自动接入方位三阶无静差控制系统。在系统跟踪远距离慢速目标时，可合上开关  $K_2$  使继电器绕组  $W_{31}$ ， $W_{32}$  通电，把窄通带参数投入到系统通道中。为了抑制现场中的噪声和干扰，在图 5 和图 6 中的虚线框内  $R$ 、 $C$  作为噪声滤波器。

### 五、系统场内跟踪测试结果

系统跟踪性能的鉴别采用了等效正弦法<sup>[3]</sup>，测定的动态滞后误差见表 2，系统的单位阶跃特性也列于表中。

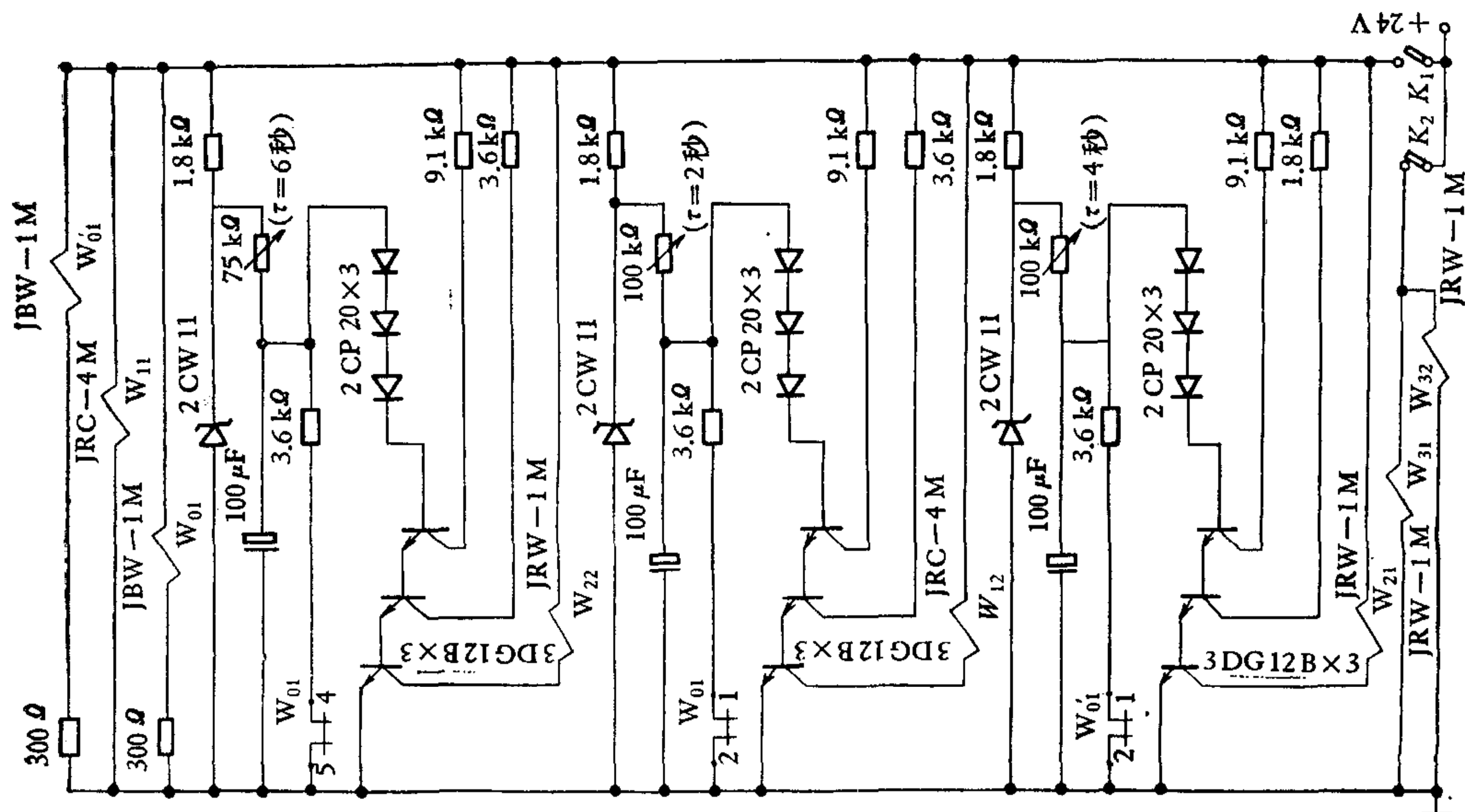


图 7 电视跟踪切换线路

表 2 系统对等效正弦和单位阶跃的响应特性

输入类		等效正弦			单位阶跃		
输入特性	位 置	±100°	±50°	±25°	给人误差电压 $u = 1.5$ 伏 相当于 3 角分		
	速 度	±10°/S	±5°/S	±2.5°/S			
	加 速 度	±1°/S <sup>2</sup>	±0.5°/S <sup>2</sup>	±0.25°/S <sup>2</sup>			
	冲击加速度	±0.1°/S <sup>3</sup>	±0.05°/S <sup>3</sup>	±0.025°/S <sup>3</sup>			
系统类	响应性能	最大动态滞后误差	最大动态滞后误差	最大动态滞后误差	最大超调量 $\sigma_{max}$	达 5% 的过渡过程时间	
	方位控制系统 $\alpha$	宽通频带	102 角秒	48 角秒	—	12%	0.9 秒
		窄通频带	—	—	150 角秒	11.6%	1.8 秒
高低控制系统 $\lambda$	宽通频带	22 角秒	11 角秒	—	11%	0.75 秒	
	窄通频带	—	—	74.4 角秒	11%	1.5 秒	

## 六、场外跟踪效果

1976 年秋、1977 年春和 1978 年夏以来，在场外对星体、气球和超音速飞机进行了多次自动跟踪。图 8 是对人眼明显可见的星体进行自动跟踪时 X-Y 记录仪记录的误差曲线；图 9 是对直径 1 米气球进行自动跟踪时记录的误差曲线，最长跟踪时间达 59 分钟，直到气球爆破还抓到一碎片跟踪了数分钟，跟踪距离达 52 公里，其最大跟踪误差在 6 角秒左右；图 10 是对超音速飞机跟踪时，由单杆半自动跟踪切换到自动跟踪记录的误差曲线，从记录曲线上看出，稳定跟踪时的最大误差电压为 50 毫伏，合角误差为 6 角秒。

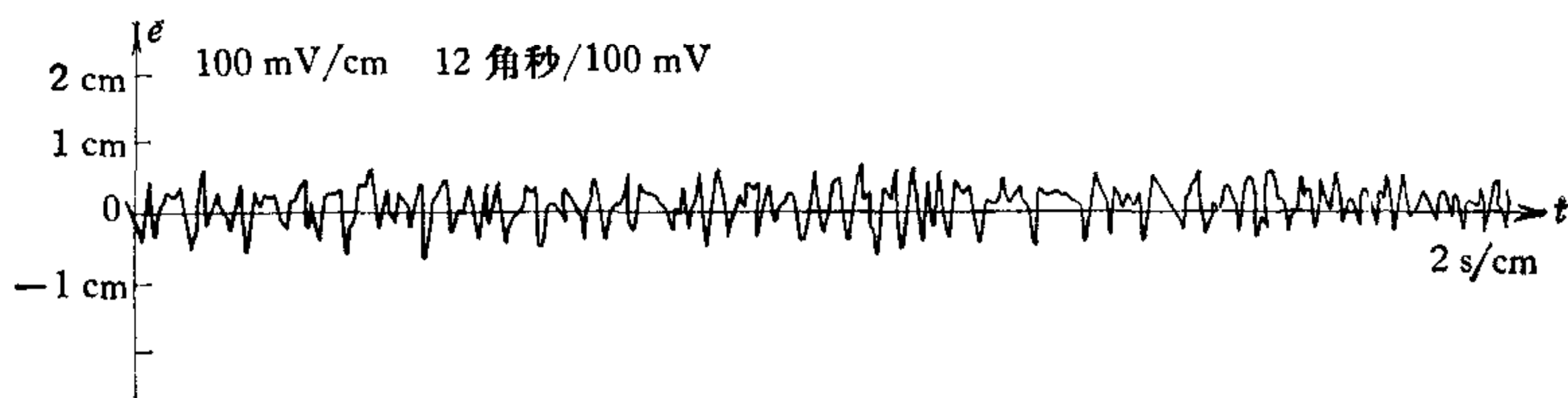


图 8 自动跟踪星体的误差曲线

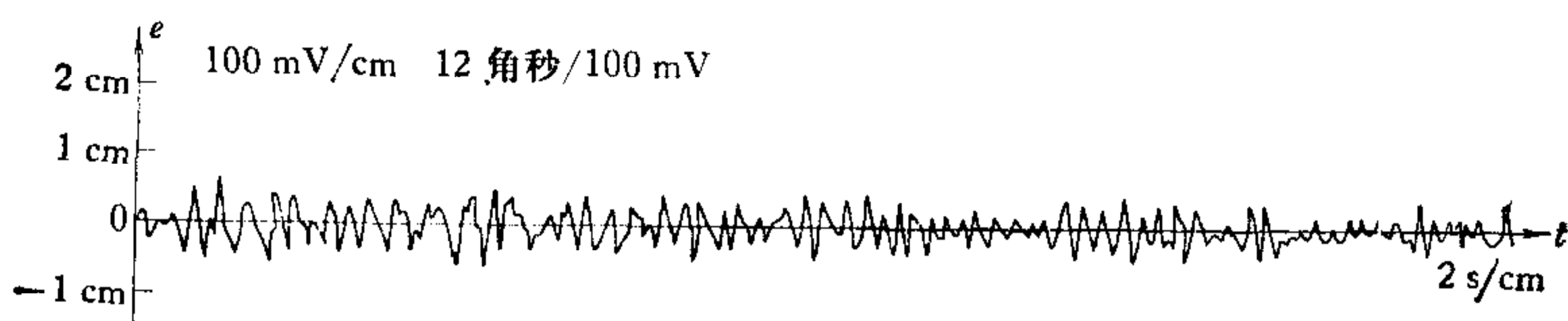


图 9 自动跟踪气球的误差曲线

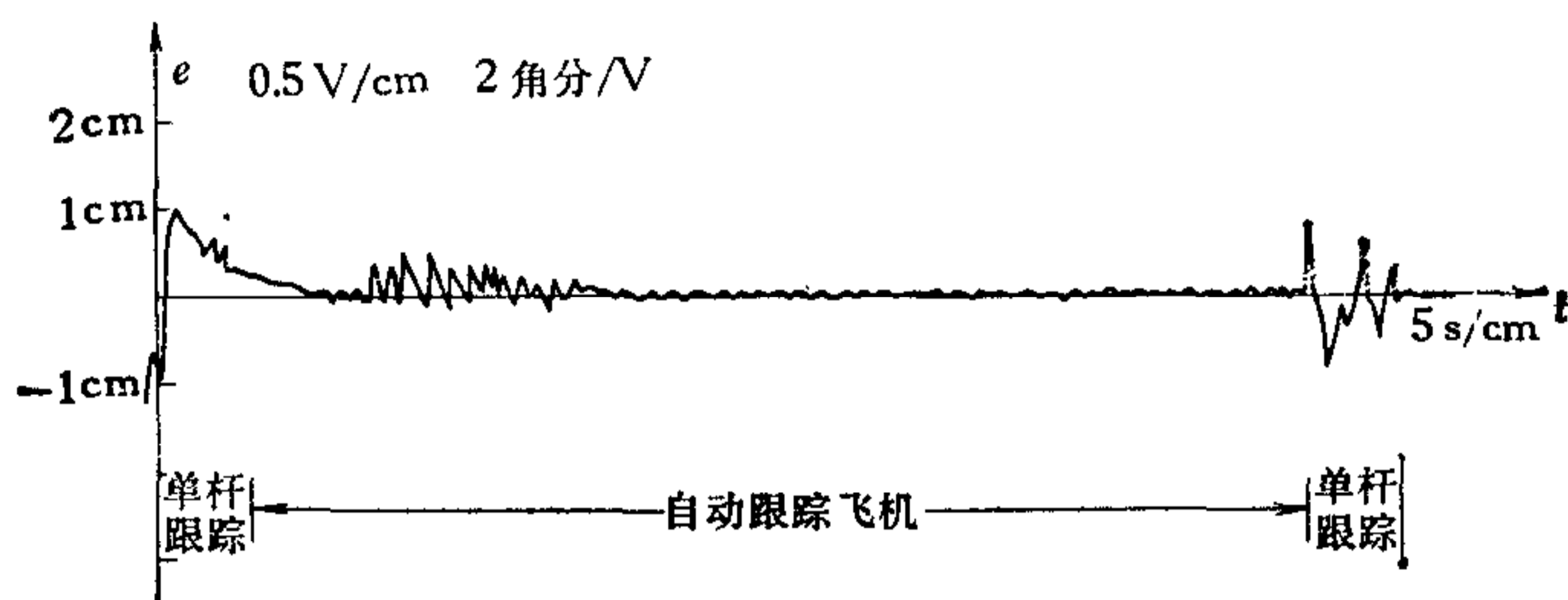


图 10 单杆-自动跟踪飞机切换误差记录曲线

## 参 考 文 献

- [1] B. A. 别塞克尔斯基著, 冯明义译, 自动调节系统的动态综合, 科学出版社(1976).  
 [2] Direct-drive Servo Design Handbook, Inland Motor Corporation, (1967) No. 2, 32—33.  
 [3] B. A. 别塞克尔斯基等著, 曾汉林等译, 小功率随动系统的设计, 国防工业出版社(1964).

## DESIGN AND APPLICATION OF A PRECISION TV TRACKING SYSTEM

XU FENG-AN FENG ZHONG-LIANG XIA CHUN-HE  
 (Shenyang Institute of Automation, Academia Sinica)

## ABSTRACT

This paper describes a practical design of a precision TV tracking system, which, with a tracking error of only a few arc seconds, is stable and reliable in the field trial-operation.

The combined man-attendant acquisition system is first presented and the design criterion of the tracker has been established. This namely criterion  $\Delta \leq 15\%$ , should be maintained so as to avoid the liability of missing the target.

In the second part of this paper emphasis is placed on the application of the third order astatic method in the designing of such tracking system—using Z transform technique for solving the problem and providing the optimum conditions

$$\partial \sigma_{\max} / \partial K_j = 0 \text{ and } \partial^2 \sigma_{\max} / \partial K_j^2 > 0.$$