

文章编号: 1003-501X(2006)12-0005-04

脱靶量累加前馈补偿电视跟踪器的跟踪误差

邢启江¹, 吴绍勇², 陈娟³, 姜永华¹

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264000;

2. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230000;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗部, 吉林 长春 130033)

摘要: 电视跟踪系统通常采用速度、位置双闭环控制。前馈控制可以提高跟踪精度但无法实现; 速度、加速度滞后补偿, 跟踪精度提高有限。动态高型方法是在负反馈控制系统中增加若干积分环节以提高跟踪精度。随着目标速度的提高和光电跟踪设备自动化程度的提高, 对电视跟踪器伺服系统的跟踪精度提出了越来越高的要求。本文创新性引出一一种斜坡累加补偿方法, 通过理论证明和仿真, 指出它与动态高型技术高度相似, 从而从新的角度解释了动态高型提高跟踪精度的机理, 并为动态高型方法在工程上实现电视跟踪伺服系统的跟踪精度的提高提供了坚实的理论依据。

关键词: 脱靶量; 电视跟踪; 电视跟踪器; 动态高型; 跟踪误差

中图分类号: V556

文献标识码: A

Accumulation feed-forward of the off-axis value to increase the tracking precision for the TV tracker

XING Qi-jiang¹, WU Shao-yong², CHEN Juan³, JIANG Yong-hua¹

(1. *Electronic and Information Engineering Department,
Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264000, China;*

2. *The Institute of Information Science and Technology,
China Science and Technology University, Hefei 230000, China;*

3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: The speed and position double close-loop control is commonly applied in the TV tracking system. The feed forward control can improve the tracking precision but be unrealizable. The speed and accelerated speed delay compensation can do the same just in a limited range. The Dynamic High Type (DHT) control is to add some integral sections in the feed back control system for improving the precision. With the increase of both object speed and automatic tracking ability of the optoelectronic tracking equipment, higher precision is needed for the servo system in the TV tracker. Here, we put forward a ramp accumulated compensation method, which is verified by both the theory and simulation, that it is similar to DHT control. Accordingly, DHT control can be explained in a new point of view, and we offer the theoretical foundation for DHT realization in the engineering to improve the tracking precision of the TV tracker.

Key words: Off-axis value; TV tracking; TV tracker; Dynamic high type; Tracking errors

收稿日期: 2006-03-06; 收到修改稿日期: 2006-08-03

基金项目: 吉林省科技厅基础研究基金项目(2003013)

作者简介: 邢启江(1963-), 男(汉族), 山东烟台人, 高级工程师, 博士, 研究方向为精确雷达制导技术。E-mail: xingqijiang@163.com

引言

电视跟踪系统是一种跟踪测量系统,当目标进入电视视场后,伺服系统捕获并锁定目标,目标相对视场中心的偏差即为脱靶量。通常的电视跟踪系统采用速度、位置双闭环控制。前馈控制是在闭环控制的基础上增加一开环控制支路,用以提供运动目标速度,进而提高了跟踪精度^[1]。但电视跟踪系统只能提供脱靶量,故前馈控制无法实现。而速度、加速度滞后补偿或同轴跟踪^[2]的等效前馈控制,均选择了在速度回路处提供目标速度信息作为前馈信号,由于技术实现的困难,跟踪精度提高有限。动态高型方法是指在负反馈控制系统的基础上增加若干个积分环节以提高跟踪精度。该方法在国外的光电跟踪系统中已成功应用,在国内没有工程上成功应用的报道。本文在脱靶量处提供前馈信号,创新性引出一种斜坡累加补偿方法,仿真结果说明,该方法与动态高型方法的本质是相同的,诠释了动态高型方法提高跟踪精度的机理,为动态高型方法的工程实现提供了坚实的理论依据。

1 动态高型控制

动态高型是在负反馈控制系统的基础上增加一个或多个积分环节以构成高型系统,从而减小系统的跟踪误差。原理如图 1 所示, $G_1(s)$ 是位置校正环节, $G_2(s)$ 是速度环传递函数, $1/s$ 是积分环节, K_1 , K_2 是动态积分环节的增益。

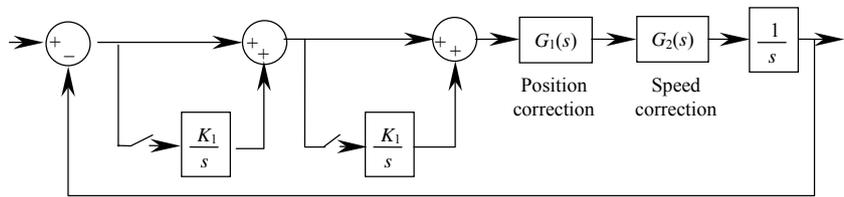


图 1 动态高型控制原理图

Fig.1 Principle diagram of the DHT control

文献[3]证明,当并入一个积分环节时,系统由 I 型变为 II 型,系统的速度误差系数提高到 ∞ ,加速度误差系数也得到相应的提高;当并入两个或多个积分环节后,系统的型号由 I 型变为 III 或更高次型号,系统的动态误差将进一步减小。

2 脱靶量累加原理

2.1 脱靶量的线性叠加

电视跟踪器脱靶量线性累加仿真示意图如图 2,其中 f_1 为目标输入, O_1 为由 f_1 产生的电视跟踪器的输出, δ_1 为电视跟踪器跟踪 f_1 时的脱靶量(此时假设 f_2 为 0)。

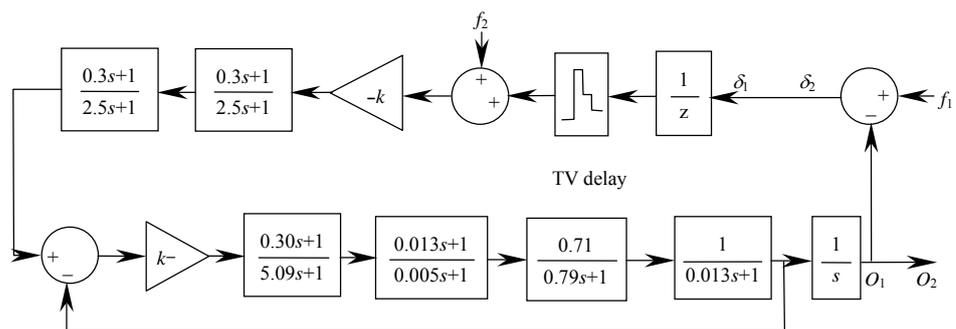


图 2 脱靶量线性叠加示意图

Fig.2 Diagram of the off-axis linear addition

f_2 为在电视脱靶量处附加的输入信号, O_2

为 f_2 产生的输出, δ_2 为输入 f_2 时产生的脱靶量(此时假设 f_1 为 0),显然有:

$$\delta_2 = 0 - O_2 = -O_2 \quad (1)$$

考虑同时输入目标信号 f_1 和附加信号 f_2 ,由线性系统的叠加原理可得,系统跟踪目标产生的脱靶量 δ 为

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \delta_1 - O_2 \quad (2)$$

2.2 时间函数 f_2 构建

O_2 是电视跟踪器跟踪 f_2 产生的输出,于是有:

$$O_2 \approx f_2 \quad (3)$$

结合式(2), 可得:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \delta_1 - O_2 \approx \delta_1 - f_2 \quad (4)$$

约定电视跟踪器跟踪目标 f_1 时的脱靶量 δ_1 为原始脱靶量。

由式(4)知, 要使附加 f_2 前馈信号后系统跟踪目标的脱靶量 δ 尽量小, 则要求 f_2 尽量逼近原始脱靶量 δ_1 。

现在构建时间函数 f_2 使之逼近原始脱靶量 δ_1 。将一个时间函数经过零阶采样保持, 得到的结果无疑是该函数的一个逼近。如图 3。

从 t_0 时刻开始, 令 f_2 等于 δ_1 的零阶采样保持, 数学上相当于从 t_0 时刻开始, 每隔时间 Δt 给 f_2 累加一个幅值为当前 $(\delta_1 - f_2)$ 的阶跃信号。

而由式(4)知, 系统在目标输入 f_1 , 电视脱靶量处前馈输入 f_2 的情况下, 跟踪目标脱靶量 δ 约为 $(\delta_1 - f_2)$; 那么, 从 t_0 时刻开始, 每隔时间 Δt 给 f_2 累加一个幅值为当前跟踪脱靶量 δ (约为 $(\delta_1 - f_2)$) 的阶跃信号, 得到的 f_2 将为原始脱靶量 δ_1 的一个逼近。

2.3 平滑脱靶量累加控制的实现——脱靶量斜坡累加

脱靶量斜坡累加原理是: 每隔 0.2s 采样得到当前系统脱靶量 δ 后, 将其保持 0.2s 并通过一个 5/s 积分环节, 使 f_2 在 0.2s 内线性上升, 在下一个采样时刻到来时, f_2 恰好上升了 δ (因为积分环节的增益 5 是按照 1/0.2 选取的), 如图 4。 f_2 按照斜率 $\delta/0.2$ 上升, 故大大减弱了突变成分。

图 5 为斜坡累加补偿方法应用于图 1 系统的仿真结果。从第 10s 开始每隔加入脱靶量斜坡累加补偿, 系统脱靶量由无补偿时的 10 降低到现在的 -2.5~4。

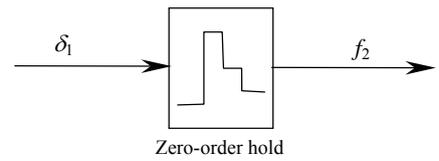


图 3 通过零阶保持得到 f_2

Fig.3 Obtaining f_2 through zero-order hold

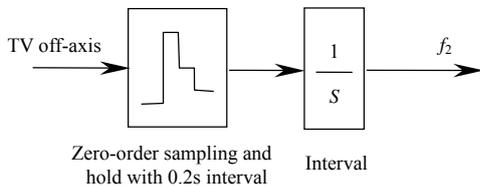


图 4 斜坡累加构造的具体实现

Fig.4 Realization with ramp-addition

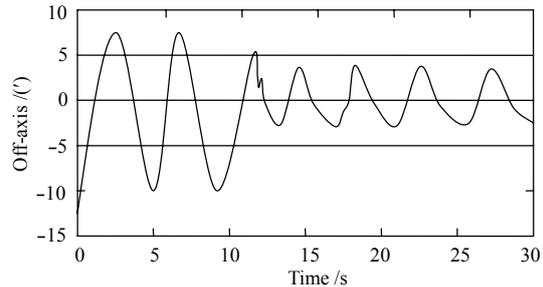


图 5 0.2s 间隔斜坡累加补偿时的系统跟踪误差

Fig.5 System tracking error with 0.2s interval ramp-addition compensation

2.4 斜坡累加 f_2 补偿系统脱靶量的变化规律

我们可以通过数学归纳法证明斜坡累加 f_2 补偿系统脱靶量的变化规律:

1) t_0 时刻, 累加器采样得到系统当前脱靶量 $\delta(t_0)$ 为 $\delta_1(t_0)$, 前馈信号 f_2 从零开始上升, 经过一个采样间隔 Δt , 到达 t_1 时刻, f_2 升至:

$$f_2(t_1) = 0 + \delta_1(t_0) = \delta_1(t_0) \quad (5)$$

2) 若 t_n 时刻, 前馈信号 f_2 等于原始脱靶量 δ_1 在 t_{n-1} 时刻的值:

$$f_2(t_n) = \delta_1(t_{n-1}) \quad (6)$$

则因为 O_2 与 f_2 的高度近似, t_n 时刻系统的当前脱靶量 $\delta(t_n)$ 满足:

$$\delta(t_n) = \delta_1(t_n) - f_2(t_n) = \delta_1(t_n) - \delta_1(t_{n-1}) \quad (7)$$

在 t_n 时刻, 累加器采样得到当前脱靶量 $\delta(t_n)$, 前馈信号 f_2 在 $f_2(t_n)$ 基础上开始上升, 经过一个采样间隔 Δt , 到达 t_{n+1} 时刻:

$$f_2(t_{n+1}) = f_2(t_n) + \delta(t_n) = \delta_1(t_{n-1}) + [\delta_1(t_n) - \delta_1(t_{n-1})] = \delta_1(t_n) \quad (8)$$

从而有, t_{n+1} 时刻的系统的当前脱靶量 $\delta(t_{n+1})$ 满足:

$$\delta(t_{n+1}) = \delta_1(t_{n+1}) - f_2(t_{n+1}) = \delta_1(t_{n+1}) - \delta_1(t_n) \quad (9)$$

式(5)~(9)证明了对电视跟踪器进行斜坡累加补偿时, 在累加器的各个采样时刻 t_n , 系统跟踪目标的当前脱

靶量为无补偿时的原始脱靶量 δ_1 从采样时刻 t_{n-1} 经采样间隔 Δt 到采样时刻 t_n 的变化量 (即 $\delta_1(t_n) - \delta_1(t_{n-1})$), 于是得出结论, 加斜坡补偿后的系统脱靶量与无补偿时的原始脱靶量随时间的变化率成正比, 而与采样间隔时间 Δt 成反比。

3 斜坡累加器补偿与动态高型方法的类似性

由图 1, 动态高型方法在电视脱靶量处加入前馈信号, 即将当前脱靶量直接输入一个增益为 K 的积分环节。而图 6 中, 斜坡累加补偿的实现即对系统当前脱靶量进行采样时间间隔为 Δt 的零阶采样保持后, 再通过一个增益为 K 的积分环节:

$$K = 1/\Delta t \quad (10)$$

两者的实现方法仅仅相差一个零阶采样保持环节, 那么其补偿结果是否也高度相似? 为此, 进行了 0.2s 采样间隔的斜坡累加补偿与 $K=5$ 的动态高型补偿的比较, 结果见图 6。

图 6 中, 曲线 1 为系统跟踪光学动态靶标, 从第 10s 开始加入 0.2s 采样间隔的斜坡累加补偿时系统的跟踪误差; 曲线 2 为系统加入动态高型补偿时的系统跟踪误差。仿真结果显示, 两误差曲线很相似, 只是动态高型补偿时的跟踪误差曲线更光滑一些; 另外, 跟踪等效正弦目标以及选取不同的积分增益 K 时的仿真结果也得到相同的结论: 所谓的斜坡累加补偿方法其实是一种类似的动态高型控制。

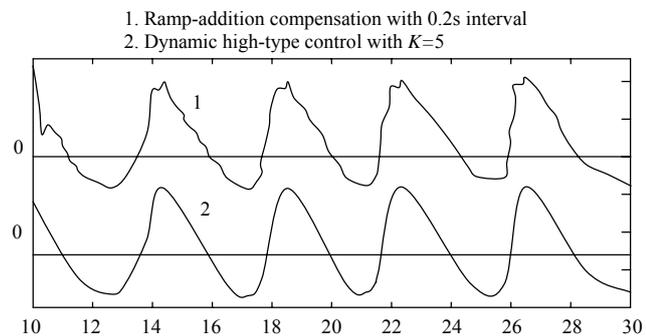


图 6 0.2s 采样间隔斜坡阶跃补偿与 $K=5$ 的动态高型控制

Fig.6 System tracking error at both the ramp-addition compensation with 0.2s interval and DHT control with $K=5$

4 结 论

两种补偿方法的类似, 诠释了动态高型方法的机理(动态高型方法通常被认为是通过增加积分环节来提高系统无差度)实际上是电视跟踪器脱靶量的斜坡累加补偿, 更重要的是, 前面分析的斜坡累加补偿得到的结论—譬如前馈信号 f_2 是对原始脱靶量 δ_1 的逼近以及补偿后系统跟踪误差的变化规律, 可以用于分析动态高型方法, 这对解决动态高型方法在工程运用上的一些问题提供了帮助。

参考文献:

- [1] 王建立, 陈 涛, 陈 娟, 等. 提高光电经纬仪跟踪快速运动目标能力的一种方法[J]. 光电工程, 2002, 29(1): 34-37.
WANG Jian-li, CHEN Tao, CHEN Juan, et al. A method to improve the tracking ability for the fast moving target [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(1): 34-37.
- [2] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光电工程, 1989, 16(3): 1-42.
MA Jia-guang. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989, 16(3): 1-42.
- [3] 孙 健. 动态高型控制方法在光电经纬仪跟踪伺服系统中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
SUN Jian. Study on the dynamic high-type control for the opto-electronic theodolite servo system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and physics, the Chinese Academy of Sciences, 2004.