

# 采样频率、系统延迟对跟踪系统稳定性能的影响

王连明, 葛文奇, 谢慕君

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 以典型型系统为例, 对采样频率和系统延迟对跟踪系统稳定性能的影响进行了理论分析, 给出了系统采样频率、系统延迟、开环截止频率以及相位裕量之间的关系式和关系曲线, 为跟踪系统的设计与分析提供了简单有效的方法。仿真结果证明结论是正确的。这种方法可以用于其他类型系统的分析。

关键词: 采样频率; 相位裕量; 系统延迟; 跟踪系统

中图分类号: V556.5 文献标识码: A

## 1 引言

在靶场光电测量设备、天文观测设备以及武

器控制设备中都要用到跟踪系统, 由计算机作为控制元件组成的数字跟踪系统的结构框图如图 1 所示:

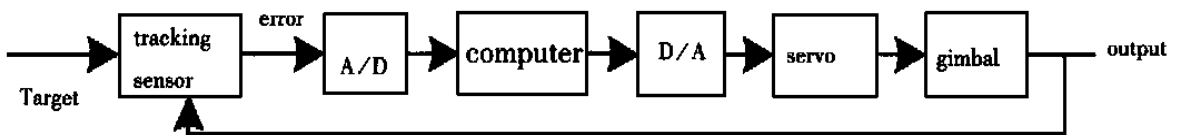


Fig. 1 Block diagram of tracking system

跟踪传感器测出目标相对视轴的误差, 经 A/D 转换后送入计算机进行控制运算, 运算结果经 D/A 转换后, 通过执行元件使被控对象(一般为力矩电机带动跟踪架)产生运动, 以减小误差。在工程应用中, 仅仅靠香农采样定理确定系统采样频率是不够的, 一般认为系统的采样频率比较高,

把跟踪系统按模拟系统的方法进行分析和设计, 从而忽略了采样保持过程和系统中存在的各种延迟对系统性能的影响, 实际上, 采样保持和系统延迟将会降低系统的相位裕量, 从而影响系统的稳定性, 使系统动态响应变差。在考虑采样保持和系统延迟时, 跟踪系统框图如图 2 所示:

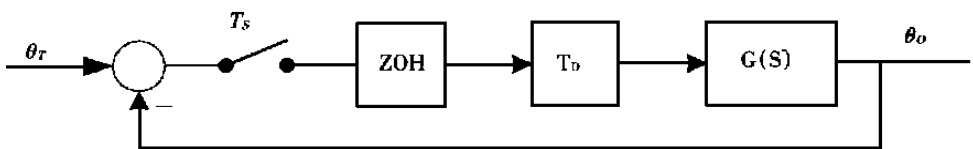


Fig. 2 Tracking system with sample and hold and system time delay

A/D 和 D/A 可以等效为零阶保持器 ZOH,  $T_s$  为采样周期,  $T_D$  包括了系统中的所有延迟, 如跟踪传感器的积分时间产生的延迟、传感器的读出延迟、信号处理电路的延迟、计算机数据处理产生的延迟以及 A/D、D/A 转换延迟等。G(S) 为不

考虑采样保持和各种延迟时, 系统补偿后的开环传递函数, 一般为典型型或型环节, 本文以 G(S) 为典型型环节为例, 即:

$$G(S) = \frac{K(T_1S + 1)}{S^2(T_2S + 1)}$$

对采样保持过程和系统延迟对系统稳定性能,主要是对相位裕量的影响进行分析,为系统设计时,采样频率的选择以及具有延迟特性的部件的选取提供理论依据。

## 2 典型 II 型系统的相位裕量分析

典型 II 型系统的相频特性  $\varphi(\omega)$  满足公式 (1):

$$\varphi(\omega) = -180^\circ - \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega} + \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega} \quad (1)$$

其中:

$$\omega = \frac{1}{T_1} \quad \omega = \frac{1}{T_2}$$

相位裕量  $\gamma(\omega)$  满足:

$$\gamma(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega} - \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega}$$

$$\tan^{-1} \frac{\omega}{\omega} - \tan^{-1} \frac{\omega}{n\omega} \quad (2)$$

其中令:

$$\omega = n\omega$$

由于只考虑采样与延迟对相位裕量的影响,因此取  $\gamma(\omega)$  的最大值,当取

$$\frac{\omega}{\omega} = \frac{\omega}{\omega} = \frac{1}{n}$$

时,  $\gamma(\omega)$  可取得最大值,由(2)式可见,  $n$  越大,即中频段越宽,相位裕量越大,如果取  $n=10$ (这在工程中要以牺牲系统的抗干扰性能和快速性为代价),则

$$\gamma(\omega)_{\max} = 72.5^\circ - 17.5^\circ = 55^\circ$$

## 3 采样保持器和延迟的频率特性以及对系统相位裕量的影响

零阶保持器的传递函数:

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-T_s s}}{s}$$

**Table 1 Relationship between  $K$  and phase margin loss range with  $0 < T_d < T_s$**

$K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Range	86	43	28.7	21.5	17.2	14.3	12.3	10.7	9.6	8.6	5.7
(deg)	~29	~14.3	~9.6	~7.2	~5.7	~4.8	~4.1	~3.6	~3.2	~2.9	~1.9

可见,  $K$  越大,采样频率和系统延迟对系统的稳定性影响越小。但当  $K$  取值太大时,采样周期很小,若要在一个采样周期内完成复杂运算,将对计算机的运算速度提出很高的要求。一般跟踪系统应具有 35 以上的相位稳定裕量,所以,对

其中  $T_s$  为采样周期,在一个采样周期内,其相频特性为:

$$\varphi_h(\omega) = -\omega T_s / 2$$

产生的相位裕量损失为:

$$\Delta\varphi = -\pi f_c T_s$$

其中  $f_c$  为开环截止频率。

延迟环节的传递函数:

$$G_d(s) = e^{-T_d s}$$

其中  $T_d$  为延迟时间。

产生的相位裕量损失为:

$$\Delta\varphi = -2\pi f_c T_d$$

因此,由零阶保持器和系统延迟产生的总相位裕量损失为:

$$\Delta\varphi = -\frac{f_c}{f_s} \left( \frac{1}{2} + \frac{T_d}{T_s} \right) \quad (3)$$

若令  $K = f_s / f_c$ , 则可得  $|\varphi|$  与  $K$  和  $T_d / T_s$  的关系曲线,见图 3:

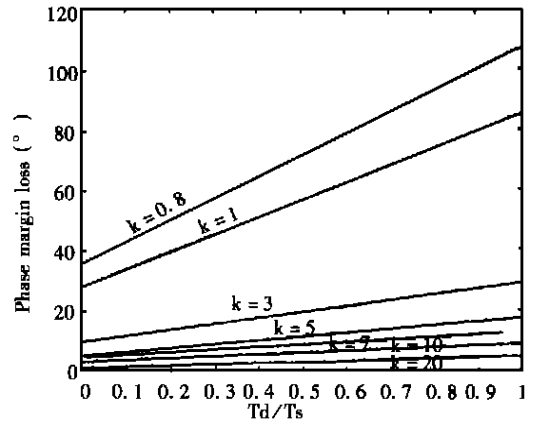


Fig. 3 Relationship between  $|\Delta\varphi|$  and  $K, T_d / T_s$

由图 3 可知:  $K$  值越大,即系统的采样频率相对于开环截止频率越大,则由采样频率和系统延迟引起的相位裕量损失越小。并且  $K$  越大,当  $T_d$  在  $0 \sim T_s$  范围内变化时,相位裕量损失的动态范围越小,即  $|\varphi|$  对  $T_d$  的灵敏度越低(见表 1)

上述的典型 II 型系统  $K$  的取值应至少满足  $K \geq 5$ ,即系统的采样频率至少应大于等于 5 倍的开环截止频率。

下面考虑  $T_d$  的选取,由公式(3)可求:

$$Td = (|\Delta\varphi| \frac{fs}{fc} - \frac{1}{2})Ts = (K|\Delta\varphi| - \frac{1}{2})Ts$$

可见, 当  $K$  和系统的截止频率  $f_c$  确定后, 系统所允许的最大延迟主要由所允许的相位裕量损失

$\varphi$  决定。

图 4 给出了典型 型系统相位裕量分别为  $30^\circ; 35^\circ; 45^\circ$  时,  $T_{dmax}$  与  $fs, fc$  关系曲线。

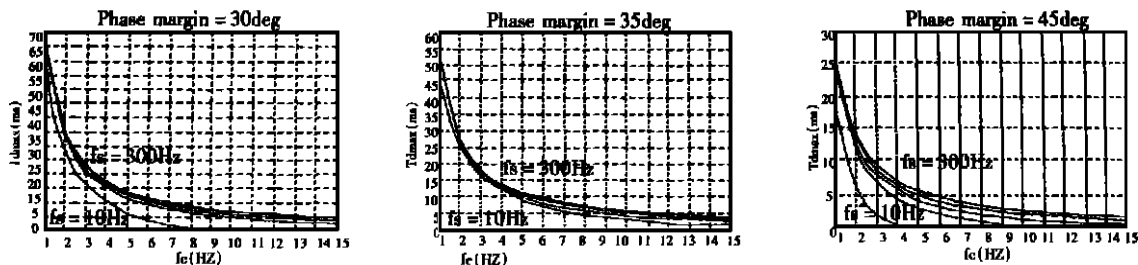


Fig. 4 Relationship between  $T_{dmax}$  and  $fs, fc$  in Type II with phase margin at  $30^\circ; 35^\circ; 45^\circ$  respectively ( $fs = 10\text{Hz}, 30\text{Hz}, 50\text{Hz}, 100\text{Hz}, 300\text{Hz}$ )

由图可见:

(1) 系统所需相位裕量越大, 则所允许的最大系统延迟越小, 对具有延迟的器件要求越高。

(2) 当采样频率选定后, 随着开环截止频率的增加, 最大允许延迟的减小由快到慢。当根据实际要求确定了系统的开环截止频率后, 则系统中的最大允许延迟量也就确定了。开环截止频率越高, 则允许的最大延迟时间越小。

(3) 当系统中各延迟器件选定后, 若给定相位裕量, 则所能做到的开环截止频率就几乎确定, 在延迟比较大时, 采样频率的选取对开环截止频率不会产生太大的影响, 因此, 采样频率并非越高越好, 采样频率选取过高反而会对计算机的运算速度提出过高要求, 费效比无法接受。在延迟比较小时, 采样频率的提高对开环截止频率影响较大, 因此, 可以适当提高系统的采样频率。

(4) 以上分析说明, 采样保持和系统延迟会降低相位裕量, 而相位裕量的降低会导致系统的超调量增加, 甚至会使系统产生振荡, 最终使系统丧

失跟踪能力。

## 4 实际系统分析

某系统的位置采样频率原为  $200\text{Hz}$ , 由于实际需要, 必须降低系统的采样频率, 当采样频率降低为  $50\text{Hz}$  后, 发现系统出现了严重的抖动现象, 无法引导工作。通过对该系统的实际情况进行仿真分析后发现, 采样频率的降低使系统相位裕量减少, 系统的超调和振荡次数增加, 因此使系统出现抖动现象。系统在采样频率分别为  $200\text{Hz}$  和  $50\text{Hz}$  情况下的开环频率特性和阶跃响应曲线分别见图 5、图 6。

已知: 系统按模拟系统分析方法校正后的开环传递函数为:

$$G(S) = \frac{47.62S + 566.9}{0.012S^3 + S^2}$$

理想相位裕量为  $47^\circ$ ; 开环截止频率为  $7\text{Hz}$ , 系统延迟为  $0.1\text{ms}$

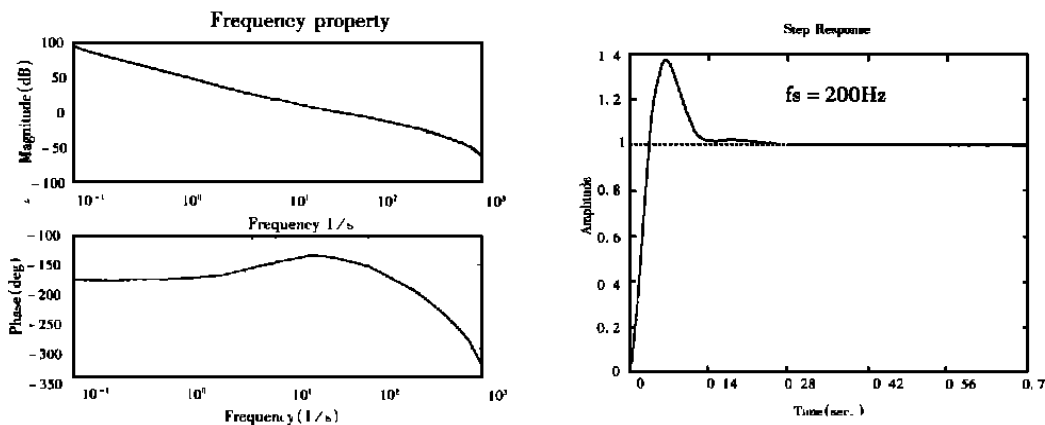


Fig. 5 Frequency property and step response at  $fs = 200\text{Hz}$

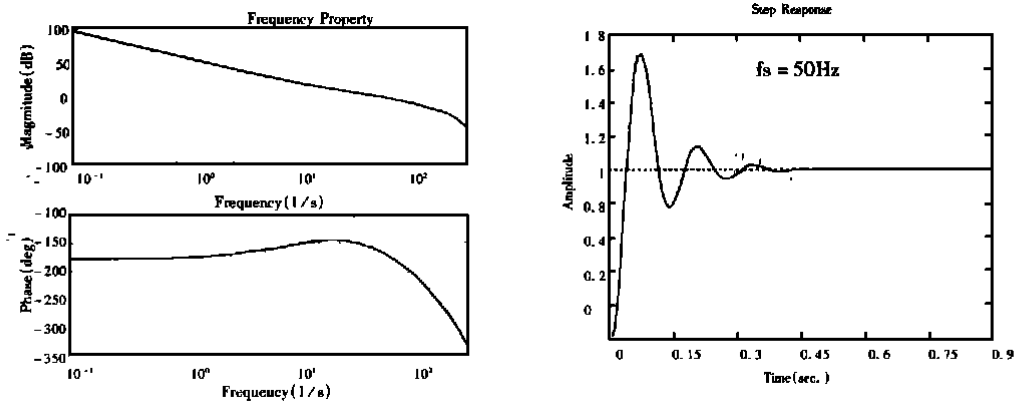


Fig. 6 Frequency property and step response at  $f_s = 50\text{Hz}$

## 5 结 束 语

跟踪系统中的采样保持器和系统中存在的各种延迟会降低系统的相位裕量,从而影响系统的稳定性能。采样频率与系统开环截止频率之比越大,则系统延迟对系统稳定性影响越小,对于比

较理想的典型型系统,二者之比应大于等于 5,在实际系统中,二者之比一般大于等于 10,当采样频率和开环截止频率确定后,则系统的最大允许延迟量就已确定。而系统中的总延迟量确定后,则系统所能做到的最大开环截止频率也就确定了。因此,当给定系统的设计要求时,要充分考虑和估计这些因素的影响,以提高系统的设计质量。

### 参考文献:

- [1] Chodos Steven L. Track loop bandwidth, sensor sample frequency, and track loop delays[J]. Proc. SPIE, 1998, 3365: 69- 76.
- [2] 杨自厚. 自动控制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [3] 冯勇. 现代计算机控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [5] Stockum Larry A, Carroll George R. Precision stabilized plat forms for shipboard electro-optical system[J]. Proc. SPIE, 1984, 493: 414- 425

## Influences of sample frequency and delays on tracking system

WANG Lian-ming, GE Wen-ti, XIE Mu-jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Based on the Type system, influences of sample frequency and system delays on tracking system are analyzed theoretically. Relationship between system sample frequency, system delays, open loop cut-off frequency and phase stability margin is given in formula and curves. It provides a simple and effective method for designing and analyzing a tracking system. The simulation convinces that the result is correct. This method can be used to analyze other systems.

**Key words:** sample frequency; phase margin; system delays; tracking system

作者简介: 王连明(1972-),男,吉林省白山市人,1993年毕业于东北师范大学物理系。现为中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生。所从事的工作和研究方向为光电跟踪和自动控制。