

文章编号 1004-924X(2013)10-2594-09

最小节拍组合控制方法在光电跟踪系统中的应用

郭 劲¹, 王卫兵^{1,2} 陈 娟^{1,3*}, 王挺峰¹, 姜振华¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春工业大学 电气与工程学院, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于最小节拍组合控制系统对位置阶跃信号响应快、超调小、稳态误差小, 有利于光电跟踪系统快速捕获目标, 本文针对特定的光电跟踪架设计了最小节拍组合控制系统, 并对其进行了仿真测试和实验测试。实验显示, 仿真结果和实验结果基本吻合, 不仅表明最小节拍组合控制系统在所能跟踪的信号范围内线性度好, 还验证了校正环节和前置滤波器所起的作用。提出的方法降低了超调量, 减少了调节时间, 抑制了系统的抖动, 体现了最小节拍组合控制系统的特点。这种最小节拍组合控制系统在数引方式下能快速捕获和锁定目标, 具有重要工程应用价值。

关键词: 光电跟踪系统; 最小节拍组合控制; 仿真测试; 实验测试; 阶跃响应

中图分类号: V556; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2594

Application of minimal prototype control method in opto-electronics tracking system

GUO Jin¹, WANG Wei-bing^{1,2}, CHEN Juan^{1,3*}, WANG Ting-feng¹, JIANG Zhen-hua¹

- (1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Electric and Electronic College, Changchun University of Technology, Changchun 130033, China*)
** Corresponding author, E-mail: chenjuan@mail.ccit.edu.cn*

Abstract: As the minimal prototype control system has fast response, smaller overshoots and smaller stable errors, it is suitable for a photo-electric tracking system to capture targets. Therefore, this paper designs a minimal prototype control system for a photo-electric tracking frame and also performs simulation and experimental tests. The experiments show that the simulation results are coincident with that of experiments well, which not only demonstrates that the minimal prototype control system is a linear system in the certain region of tracking signal, but also indicates the influences of a correction part and a front filter. This control method reduces overshoot and adjusting time, inhibits the jitter effect of system. These all show that minimal prototype control method can be used to acquire fast targets in digital guiding and is valuable in the project application for opto-electronic tracking systems.

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-07-04.

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项资助项目 (No. 20120615)

Key words: opto-electronics tracking system; minimal prototype control; simulation test; experiment test; step responding

1 引 言

光电跟踪系统是一种广泛应用于陆基、海基、空基和天基中对相对运动目标进行观测的精密仪器,主要由光学系统、伺服系统、测角系统、记录系统和辅助系统等组成^[1]。光电跟踪系统的动态性能和稳态跟踪精度是衡量其性能的重要指标,在一定硬件条件下可通过改善伺服控制方法来提高系统性能,伺服控制方法^[1]包括双闭环控制、速度加速度滞后补偿控制^[2-3]、动态高型控制^[4]、自适应控制^[5]、神经网络控制、模糊控制^[6]、最优控制和内模控制^[7]等。目前大部分文献只报道了这些控制方法在系统稳态跟踪精度方面的研究成果,对系统动态性能的报道不多。

最小节拍组合控制系统^[8]对位置阶跃信号具有响应快速、超调小和稳态误差小的优点。为此,本文针对特定的光电跟踪架在控制系统设计、仿真测试和实验测试方面做了大量详细的研究,并对结果进行了详细的比较和分析,为最小节拍组合控制方法在光电跟踪系统的应用做了基础铺垫。

2 最小节拍组合控制

2.1 定义及特点

最小节拍响应^[8]是指以最小的超调量快速达到并保持在稳态响应允许波动范围内的时间响应,针对被控对象模型所加的校正环节构成的伺服控制则称为最小节拍组合控制。最小节拍响应系统在阶跃输入作用下稳态误差为 0,阶跃响应具有最小的上升时间和调节时间,阶跃响应超调量小于 2%。

2.2 系统类型

根据系统闭环传递函数阶数的不同,最小节拍组合控制系统具有多种标准化闭环传递函数形式^[8],表 1 给出了 3 种形式,其中实际调节时间 t_s 与标准化调节时间 t_s' 的关系为 $t_s' = \omega_n t_s$ 。

表 1 最小节拍组合控制系统标准化闭环传递函数形式
Tab. 1 Standard closed loop transfer function of minimal prototype control system

阶数	标准闭环传递函数	标准调节时间/s
3	$\frac{\omega_n^3}{s^3 + 1.90\omega_n s^2 + 2.20\omega_n^2 s + \omega_n^3}$	4.04
4	$\frac{\omega_n^4}{s^4 + 2.20\omega_n s^3 + 3.50\omega_n^2 s^2 + 2.80\omega_n^3 s + \omega_n^4}$	4.81
5	$\frac{\omega_n^5}{s^5 + 2.70\omega_n s^4 + 4.90\omega_n^2 s^3 + 5.40\omega_n^3 s^2 + 3.40\omega_n^4 s + \omega_n^5}$	5.43

2.3 设计过程

以光电跟踪系统被控对象开环传递函数模型为例,经实验测量和系统辨识得到开环传递函数为:

$$G_m = \frac{K_m}{(T_m s + 1)(T_c s + 1)} = \frac{1.007}{(0.8091s + 1)(0.01153s + 1)} \quad (1)$$

在串联校正方式基础上配置前置滤波器构成最小节拍组合控制系统,可获得改善系统的特殊功能^[8]。零点减小系统阻尼会使峰值时间超前和超调量增大,极点增大系统阻尼会使峰值时间滞后和超调量减小,因此选择合适的前置滤波器会降低系统的超调量和减小系统的调节时间。依据此原理选择串联校正零极点形式和前置滤波器形式分别为 G_c 和 G_f :

$$G_c = K_c \frac{s + z}{s + p} \quad (2)$$

$$G_f = \frac{z}{s + z} \quad (3)$$

由以上环节构成的最小节拍组合控制系统原理如图 1 所示。

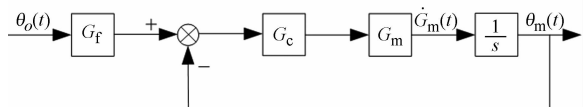


图 1 最小节拍组合控制系统原理框图

Fig. 1 Theory block diagram of minimal prototype control system

所得系统闭环传递函数为：

$$G_{closed} = \frac{K_m K_c z / T_m T_e}{s^4 + s^3 (T_m + T_e + p T_m T_e) / T_m T_e + s^2 [1 + p (T_m + T_e) / T_m T_e + s (p + K_m K_c) / T_m T_e + K_m K_c z / T_m T_e]} \quad (4)$$

将式(4)闭环传递函数 G_{closed} 与表 1 中 4 阶标准化传递函数 Φ 对比, 依据对应系数相等和 $t_s = 5s$ 联立方程组, 计算得到的 5 个方程中只包含 K_c, z, p 和 ω_n , 方程组无解, 表明校正环节的形式需要根据被控对象模型来选取。

若将 G_c 和 G_f 分别改为：

$$G_c = K_c \frac{(s + z_1)(s + z_2)}{(s + p_1)(s + p_2)}, \quad (5)$$

$$G_f = \frac{z_1 z_2}{(s + z_1)(s + z_2)}, \quad (6)$$

此时可得系统闭环传递函数为：

$$G_{closed} = \frac{K_m K_c z_1 z_2 / T_m T_e}{s^5 + s^4 [T_m + T_e + (p_1 + p_2) T_m T_e] / T_m T_e + s^3 [1 + (p_1 + p_2) (T_m + T_e) + p_1 p_2 T_m T_e] / T_m T_e + s^2 [(p_1 + p_2) + p_1 p_2 (T_m + T_e) + K_m K_c] / T_m T_e + s^2 [p_1 p_2 + K_m K_c (z_1 + z_2)] / T_m T_e + K_m K_c z_1 z_2 / T_m T_e} \quad (7)$$

同样将式(7)闭环传递函数 G_{closed} 与表 1 中 5 阶标准化传递函数 Φ 对比, 按照上述类似过程解得校正环节的极点均大于 0, 表明此时仍难以得到正确的校正环节形式。

若从被控对象开环传递函数 G_m 分析, 由于 $T_e \ll T_m$ 时, 可将 G_m 简化为一阶惯性环节：

$$G_m = \frac{K_m}{(T_m s + 1)} = \frac{1.007}{(0.8091s + 1)}, \quad (8)$$

此时和 G_f 分别采用式(2)和(3)形式, 得到系统闭环传递函数为：

$$G_{closed} = \frac{K_m K_c z / T_m}{s^3 + s^2 (1 + T_m P) / T_m + s (K_m K_c + p_e) / T_m + K_m K_c z / T_m} \quad (9)$$

同样将(5)式闭环传递函数 G_{closed} 与表 1 中 3 阶标准化传递函数 Φ 对比, 依据对应系数相等和要求的实际调节时间 $t_s = 2.02s$ 联立方程组计算校正环节 G_c 和 G_f 的具体形式分别为：

$$G_c = 4.8209 \frac{s + 1.3333}{s + 2.2655}, \quad (10)$$

$$G_f = \frac{1.3333}{s + 1.3333} \quad (11)$$

通过上述设计过程可看出, 校正环节的形式需根据被控对象来确定, 前置滤波器的形式需根据校正环节来确定。

3 仿真测试

由以上确定出的各环节组成的最小节拍组合控制系统 Simulink 仿真结构如图 2 所示, 分别以无校正环节无前置滤波器系统、有校正环节无前置滤波器系统和最小节拍组合控制系统(图 3(d)和表 2 中分别用 1、2、3 表示)对阶跃信号 1、30、60、120、150、180、210、240、270、300、330 和 360° (转动一圈) 进行仿真测试, 仿真结果分别如图 3 (a)(b)(c) 所示, 对应图 2 中的 Scope 显示, 图 3 的定量结果如表 2 所示。为了直观显示 3 种系统的对比结果, 由于相似性, 以 180° 阶跃响应为例, 对比结果如图 3(d) 所示。

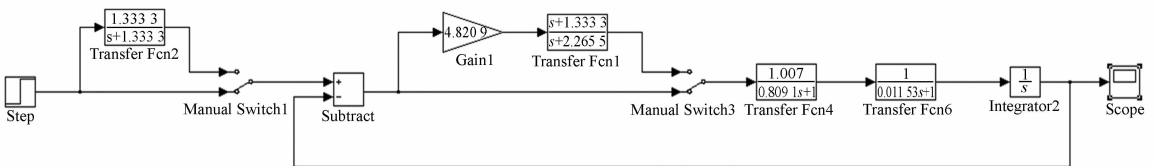
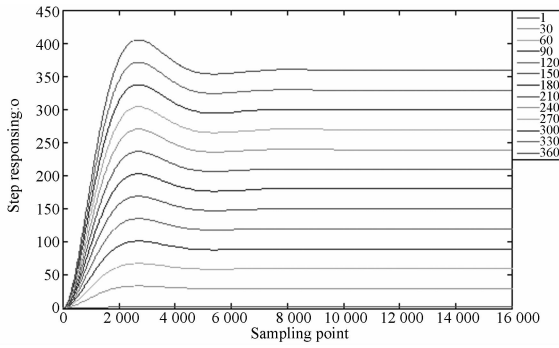


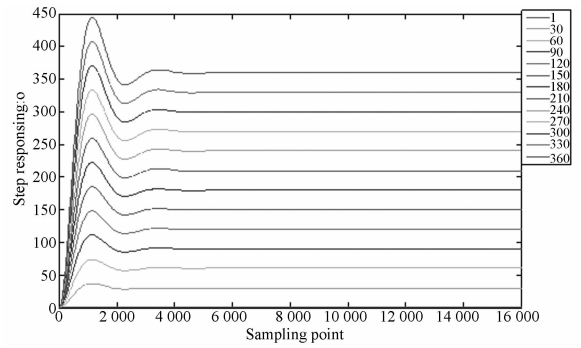
图 2 最小节拍组合控制系统仿真结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of minimal prototype control system



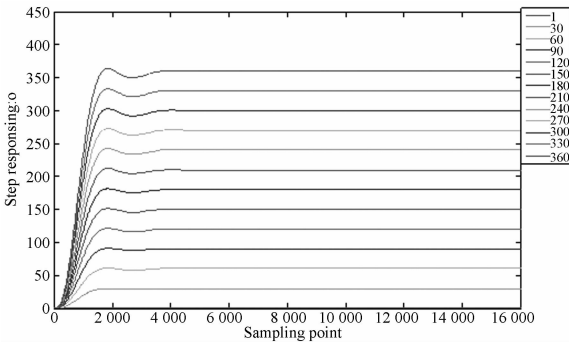
(a) 无校正环节无前置滤波器控制系统

(a) Control system without correction part and front filter



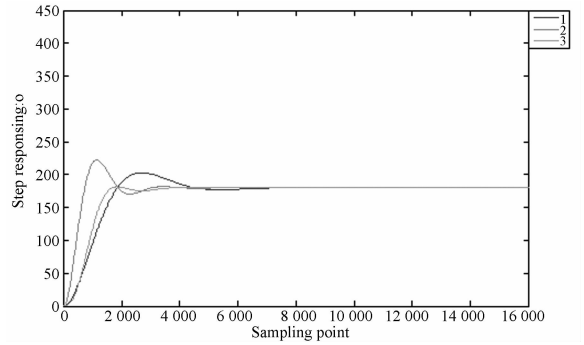
(b) 有校正环节无前置滤波器控制系统

(b) Control system with correction part and without front filter



(c) 最小节拍组合控制系统

(c) Minimal prototype control system



(d) 3种系统的 180°阶跃响应对比

(d) Comparisons of three systems on step responding for 180°

图 3 3种系统的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of three systems

表 2 系统指标定量仿真结果

Tab. 2 Simulation quantitative results of system index

系统	指标	1°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
1	峰值(°)	1.128 3	33.848 9	69.697 8	101.546 7	135.395 6	169.244 5	203.093 4	236.942 3	270.791 2	304.640 1	338.489 0	372.337 9	406.186 8
	其它	超调量为 12.83%;调节时间为 6 s;稳态误差、稳态波动量、稳态误差带均为 0												
2	峰值(°)	1.235 6	37.068 1	74.136 3	111.204 4	148.272 5	185.340 7	222.408 8	259.476 9	296.545 0	333.613 2	370.681 3	407.749 4	444.817 6
	其它	超调量为 23.56%;调节时间为 4 s;稳态误差、稳态波动量、稳态误差带均为 0												
3	峰值(°)	1.010 0	30.299 1	60.598 1	90.897 2	121.196 3	151.495 3	181.794 4	212.093 5	242.392 6	272.691 7	302.990 8	333.289 9	363.588 8
	其它	超调量为 1.00%;调节时间为 2 s;稳态误差、稳态波动量、稳态误差带均为 0												

从图 3(a)(b)(c)的定性分析和表 2 的定量结果可看出 3 种系统完全是线性系统,从图 3(d)和表 2 中可知超调量顺序为 3<1<2;调节时间为 3<2<1,得到最小节拍组合控制系统性能最佳,其调节时间为 2 s,符合理论设计。

4 实验测试

以相应位置阶跃信号进行实验,图 4 为某型号光电跟踪系统实验平台,系统开环传递函数为式(1)。图 1 中的位置负反馈信息通过采样频率为 800 Hz 的 24 位角编码器获得,伺服控制器采

用 PC104 板卡,校正环节后的信息经 PWM 功率放大器后控制电机转动跟踪输入阶跃信号。

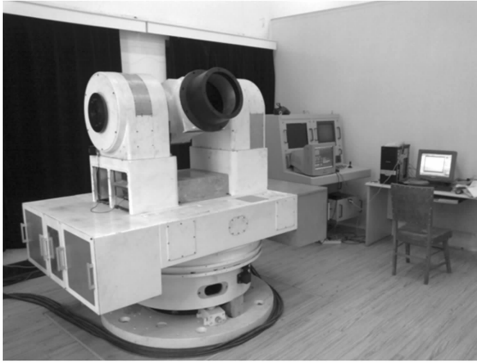


图 4 光电跟踪系统实验平台

Fig. 4 Experiment measurement of opto-electronics tracking system

实验采用程序控制,对上述校正环节和前置滤波器环节分别通过双线性变换:

$$s = \frac{2z-1}{T_s(z+1)} \quad (12)$$

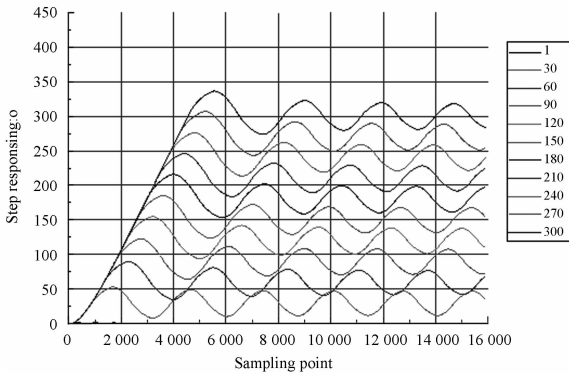
得到输入 $x(k)$ 和输出 $y(k)$ 的关系分别为:

$$y(k)_c = 4.8182x(k) - 4.8102x(k-1) + 0.9972y(k), \quad (13)$$

$$y(k)_f = 0.00083[x(k) + x(k-1)] + 0.9983y(k). \quad (14)$$

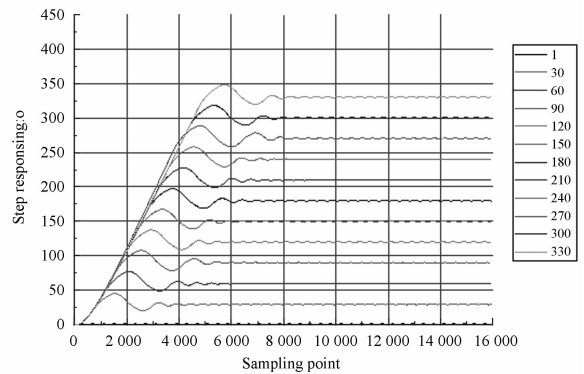
分别以无校正环节无前置滤波器控制系统、有校正环节无前置滤波器控制系统和最小节拍组合控制系统(图 5(d) 和表 3 中分别用 1、2、3 表示)对阶跃信号 1、30、60、120、150、180、210、240、270、300、330 和 360° 进行实验测试,方位角编码器的实验结果分别如图 5(a)(b)(c)所示,图 5 的定量结果如表 3 所示。为了直观显示 3 种系统的对比结果,由于相似性(1°阶跃小信号除外),以 1800 阶跃响应为例,对比结果如图 5(d)所示。

从图 5(a)(b)(c)的定性分析和表 3 的稳态定量结果看出 3 种系统基本属于线性系统(小信号除外),从图 3(d)和表 3 中可知超调量顺序为 $3 \approx 2 < 1$,调节时间为 $3 \approx 2 < 1$,稳态误差、稳态波动量、误差带从小到大顺序均为 $2 < 3 < 1$ 。从稳态波动量结果对比可看出有校正控制系统可以明显抑制无校正控制系统的稳态抖动性。



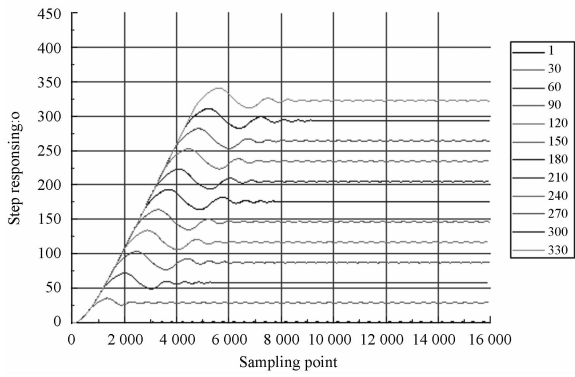
(a) 无校正环节无前置滤波器控制系统

(a) Control system without correction part and front filter



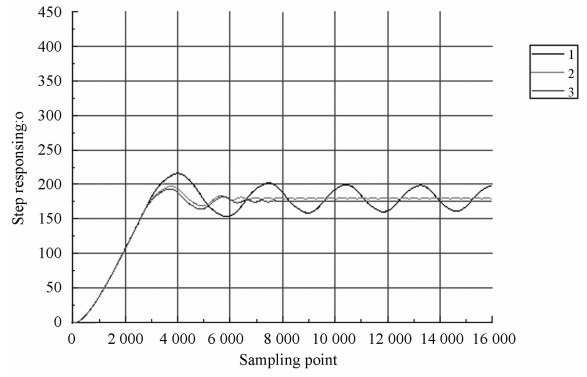
(b) 有校正环节无前置滤波器控制系统

(b) Control system with correction part and without front filter



(c) 最小节拍组合控制系统

(c) Minimal prototype control system

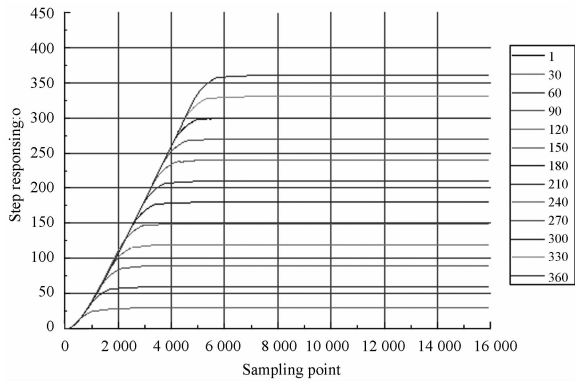


(d) 3种系统的 180°阶跃响应对比

(d) Comparison of three systems on step responding for 180°

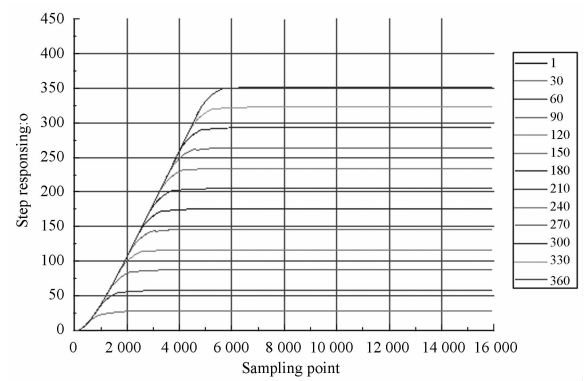
图 5 3种系统的实验结果

Fig. 5 Experiment results of three systems



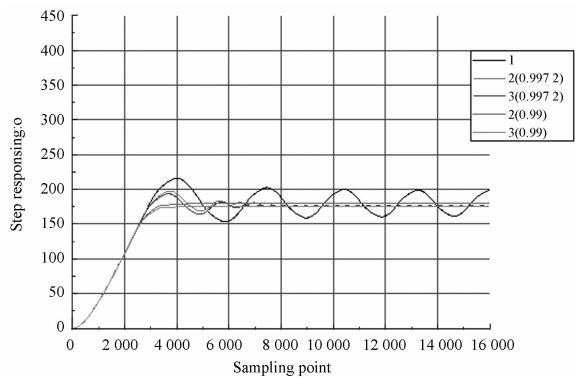
(a) 有校正环节无前置滤波器控制系统

(a) Control system with correction part and without front filter



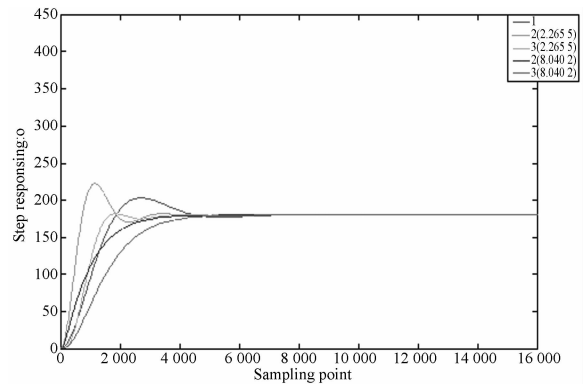
(b) 最小节拍组合控制系统

(b) Minimal prototype control system



(c) 改前善后 3种系统的 180°阶跃响应实验对比

(c) Experiment result comparison of three systems before and after improvement on step responding for 180°



(d) 改善前后 3种系统的 180°阶跃响应仿真对比

(d) Simulation result comparison of three systems before and after improvement on step responding for 180°

图 6 改善后系统的实验结果

Fig. 6 Experiment results of improved systems

表 3 系统指标定量实验结果

Tab. 3 Experiment quantitative results of system index

系统	指标	1°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
改 前	峰值/(°)	1.847 76	53.272 0	90.090 0	122.873 5	154.766 1	185.422 4	215.876 2	245.862 0	275.981 7	306.529 2	336.019 6	—	—
	稳值/(°)	1.036 5	29.147 4	59.235 5	91.083 2	121.437 0	150.512 7	177.112 0	207.954 4	237.612 6	271.140 2	302.793 2	—	—
	误差/(°)	0.036 5	-0.852 6	-0.764 5	1.083 2	1.437 0	0.512 7	-2.888 0	-2.045 6	-2.387 4	1.140 2	2.793 1	—	—
	1 超调量/(%)	78.27	82.77	52.09	34.90	27.45	23.19	21.89	18.23	16.15	13.05	10.97	—	—
	波动量	0.0068	36.186 6	37.450 0	38.293 2	40.445 1	40.147 5	40.960 5	40.256 1	43.409 6	42.966 1	43.069 1	—	—
	误差带/(%)	0.63	63.76	32.98	22.33	18.39	14.22	12.78	10.32	10.34	8.12	7.78	—	—
	t_s/s	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	峰值/(°)	1.821 3	45.437 1	77.552 5	107.976 4	137.583 5	167.625 6	197.629 3	227.971 1	257.991 3	288.568 6	317.897 0	347.853 2	—
	稳值/(°)	0.961 5	29.963 7	59.970 2	89.981 1	119.971 4	149.972 3	179.976 7	209.968 0	239.970 4	269.968 0	299.981 9	329.933 5	—
	误差/(°)	-0.038 5	-0.036 3	-0.029 8	-0.018 9	-0.028 6	-0.026 77	-0.023 3	-0.032 0	-0.029 6	-0.032 0	-0.018 1	-0.066 5	—
改 后	2 超调量/(%)	89.42	51.64	29.32	20.00	14.68	11.77	9.81	8.57	7.51	6.89	5.97	5.43	—
	波动量	1.195 4	1.221 2	1.221 9	1.267 9	1.250 7	1.271 0	1.350 7	1.427 9	1.508 9	1.280 6	2.435 9	3.456 2	—
	误差带/(%)	64.43	2.10	1.04	0.71	0.53	0.42	0.35	0.32	0.29	0.24	0.39	0.32	—
	t_s/s	—	2.5	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	8	—
	峰值/(°)	1.583 4	35.825 0	72.409 9	103.967 7	134.311 7	164.088 7	193.626 8	222.936 6	252.285 2	281.514 0	310.742 1	340.167 9	—
	稳值/(°)	0.947 1	29.269 6	58.556 6	87.873 1	117.144 5	146.440 6	175.743 5	205.025 8	234.327 4	263.641 0	292.943 2	322.192 1	—
	误差/(°)	-0.052 9	-0.730 4	-1.443 4	-2.126 9	-2.855 5	-3.559 4	-4.256 5	-4.974 2	-5.672 6	-6.359 0	-7.056 8	-7.807 9	—
	3 超调量/(%)	67.18	22.40	23.66	18.32	14.65	12.05	10.18	8.74	7.66	6.78	6.08	5.58	—
	波动量	1.246 3	1.255 9	1.246 6	1.244 9	1.275 1	1.290 5	1.434 0	1.462 6	1.638 3	1.806 5	2.883 2	3.725 4	—
	误差带/(%)	67.19	2.18	1.09	0.71	0.56	0.44	0.41	0.36	0.38	0.34	0.58	0.75	—
t_s/s	—	2.5	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	8	—	
改 后	2 稳值/(°)	0.967 1	29.894 1	59.899 5	89.897 4	119.899 3	149.901 2	179.898 4	209.898 6	239.900 5	269.898 0	299.901 0	329.900 2	359.893 9
	误差/(°)	-0.032 9	-0.105 9	-0.100 5	-0.102 6	-0.100 7	-0.098 8	-0.101 6	-0.101 4	-0.099 5	-0.102 0	-0.099 0	-0.099 8	-0.106 13
	3 稳值/(°)	0.874 1	29.188 3	58.490 9	87.783 2	117.074 4	146.371 5	175.663 2	204.956 1	234.253 6	263.547 2	292.838 9	322.131 8	351.423 8
误差/(°)	-0.125 9	-0.811 7	-1.509 1	-2.216 8	-2.925 6	-3.628 5	-4.336 8	-5.043 9	-5.746 4	6.452 8	-7.161 1	-7.868 2	-8.576 2	

若将式(13)改为:

$$y(k)_c = 4.818 2x(k) - 4.810 2x(k-1) + 0.99y(k) \quad (15)$$

按照同样处理过程得到改善后系统的实验结果如图 6 所示,图 6(a)(b)的定量结果如表 3 所示,系统指标变化规律均与改善前的结果基本一致,且改善后系统对小信号 1°和大信号 360°信号可以跟上,提高了系统的线性范围。从图 6(c)和表 3 可看出改善后的控制系统基本消除了无校正控制系统的稳态抖动性,且无超调量,稳态精度也有所提高,从式(13)变到式(15),相当于增大了式(2)或式(10)的极点 p 值,若采用 $p=8.040 2$,利用图 2 进行仿真,以 180°阶跃响应为例,仿真对比结果如图 6(d)所示,极点增大系统阻尼会使峰值时间滞后和超调量减小,因此从超调量或稳态误差角度来看,图 6 的实验结果和仿真结果与理论分析一致。

5 结果比较与分析

对仿真结果和实验结果进行比较分析。从稳态误差对比结果看,系统难以稳定到所要求的精度,这与测量设备精度和各种干扰小信号有关;从稳态波动量和稳态误差带对比结果看,系统存在一定的抖动。

对有校正环节无前置滤波器控制系统和最小节拍控制系统的实验结果进行比较分析,从稳态误差对比结果看,前者低于后者;从峰值对比结果看,后者低于前者,这是由于前者系统阻尼小于后者系统阻尼,表明前置滤波器所起的作用,与理论分析和仿真结果基本吻合。

6 结 论

本文介绍了基于被控对象的最小节拍组合控制系统的定义、特点、类型和设计过程。针对光电跟踪架设计出的最小节拍组合控制系统,在数引方式下分别进行了仿真测试和实验测试。总体来看,仿真结果和实验结果基本吻合。实验结果表

明,最小节拍组合控制系统在所能跟踪的信号范围内线性度好,验证了校正环节和前置滤波器所起的效果,降低了超调量,减少了调节时间,抑制了系统的稳态抖动效应,体现了最小节拍组合控制系统的特点。这种最小节拍组合控制系统在数引方式下能快速捕获和锁定目标,具有重要工程应用价值。

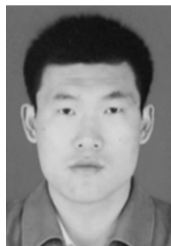
参考文献:

- [1] 陈娟. 光电经纬仪数字化伺服控制技术[M]. 长春: 长春光机所内部讲义, 2006.
CHEN J. *Digital Servo Control Technology of O-E theodolite* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)
- [2] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标技术的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
WANG J L. *Study on TV Tracking System of O-E theodolite to Track and Acquire Fast Moving Targets* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2003. (in Chinese)
- [3] 李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 279-284.
LI W J, CHEN T. Equivalent combined control technique based on Kalman filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 279-284. (in Chinese)
- [4] 孙建, 高慧斌. 动态高型控制方法在光电经纬仪跟踪伺服系统中的应用[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 21-23.
SUN J, GAO H B. Application of dynamic high type method in tracking servo system of theodolite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 21-23. (in Chinese)
- [5] 陈涛, 陈娟, 陈长青. 直流量矩电机低速自适应跟踪控制[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 31-34.
CHEN T, CHEN J, CHEN C Q. Adaptive tracking control of DC torque motor in low speed [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(3): 31-34. (in Chinese)
- [6] 韩晓泉, 陈娟, 王建立, 等. 光电跟踪中模糊控制的应用现状及发展[J]. 电光与控制, 2003, 10(2): 58-61.
HAN X Q, CHEN J, WANG J L, et al.. Application and development of fuzzy control in opto-electronics tracking [J]. *Electronic-optics and Control*, 2003, 10(2): 58-61. (Chinese)
- [7] 李洪文. 基于内模PID控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 327-332.
LI H W. Servo system of large telescope based on internal model PID control method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 327-332. (in Chinese)
- [8] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
HU SH S. *Automatic Control Theory* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



王卫兵(1986—),男,陕西杨凌人,硕士研究生,2010年于兰州大学物理系获得学士学位,主要从事光电跟踪伺服控制与控制算法方面的研究。E-mail: wangweibing10@126.com



王挺峰(1977—),男,山东文登人,副研究员,硕士生导师,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电测控与光电总体技术方面的研究。E-mail: wtfeng@sinac.com



姜振华(1984—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光束控制、自动控制等领域的研究。E-mail: pily09@163.com

导师简介:



郭 劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电测控与光电对抗技术方面的研究。E-mail: guojin1964@126.com

通讯作者:



陈 娟(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电跟踪与伺服控制技术的研究。E-mail: chenjuan@mail.ccit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)