

数字锁相弹道相机旋转快门相位控制器的优化设计

崔洪恩^{1,2,3} 王健¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 白城兵器试验中心, 白城 137001)

摘要 分析了弹道相机系统的构成, 并对弹道相机的最主要部分——旋转快门相位控制器工作原理进行剖析。鉴于闭环锁相控制捕获速度及同步准确对目标的摄取及后续交汇处理准确均有较显著影响, 在具体分析弹道相机各种工作状态和控制信号关系的基础上, 设计了一种基于数字锁相技术的弹道相机旋转快门相位控制器, 并对驱动频率及相位差调整等关键技术难点进行建模分析, 论证了该设计方案的可行性及优越性。实验结果表明, 采用该设计方案可显著提高相机旋转快门的同步准确, 使得相机交汇处理数据具有更好的平滑性和一致性。

关键词 弹道相机; 最优控制; 数字锁相环路; 相位控制器

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

0 引言

武器装备的测试水平与武器装备的发展是密切相关、相辅相成的。现代战争要求发展高准确的全天候作战武器, 与此相适应, 提高对现代武器的全天候综合测试能力至关重要。当前, 我国对诸如导弹、火箭、炮弹等弹道参数的测试, 主要是利用各种传感器或胶片进行成像测试; 而相比之下, 在国外广泛采用的弹道相机则利用镀膜玻璃干板作为成像介质, 具有高准确、大视场等特点, 在常规兵器弹道测试中具有举足轻重的作用^[1]。但弹道相机也有它的缺点, 即相机控制部分多采用模拟锁相技术控制相机快门, 且以模拟电路、分立元件为主的设计方法, 同步捕获范围窄、速度慢、准确低, 严重影响了交汇测量准确。随着数字技术的发展, 尤其是大规模集成电路及微处理器的广泛应用, 使得一些复杂的高准确控制得以实现^[2]。针对上述问题, 本文提出了应用数字锁相技术取代模拟锁相技术控制弹道相机旋转快门的方案, 并结合具体的试验应用效果分析了该设计方案的可行性和优越性。

1 原理分析

1.1 系统概述

弹道相机主机由光学镜头组、旋转快门、程序快门等组成^[3]。旋转快门控制曝光中心与摄影频率信号的同步, 程序快门控制相机开拍、抹点(为了方便空间交汇处理时确定时间基准点)和停拍。弹道相机的旋转快门由快、慢两组叶片组成, 每组有四个叶片, 各自分装在四个轴上。快慢叶片之间由过渡齿轮联系起来, 它们都是由同步电机通过变速齿轮箱驱动。旋

转快门在工作时连续旋转, 当叶片开口打开光瞳时, 目标在底版上成像, 获得干板图像, 经过后期处理获得弹道空间坐标, 再计算出弹道诸元参数。

系统采用磁滞式三相同步电动机作为驱动电机, 该电机的转速正比于定子绕组控制电压的频率, 调整电机的驱动频率就可以调整电机的转速, 进而达到控制曝光频率的目的。锁相控制就是控制输入信号(摄影指令)和反馈信号(旋转快门的回答信号)这两个脉冲信号的前沿同步, 从而实现弹道相机旋转快门的同步。

1.2 锁相原理

锁相环路是一个相位跟踪系统, 从输入信号加到环路的输入端开始, 直到环路达到锁定的全过程, 称为捕获过程。捕获过程所需要的时间, 称为捕获时间 T_p 。对一定的环路来说, 是否能通过捕获而进入同步, 完全取决于起始频差 $\Delta\omega_0$, 若 $\Delta\omega_0$ 超过某一范围, 环路就不能捕获^[4]。这个范围的大小是锁相环路的一个重要性能参数, 称为环路的捕获带 $\Delta\omega_p$, 也就是锁相环路的牵引范围。

为了保证摄影指令的前沿和旋转快门曝光曲线中心位置同步, 首先要使叶片的曝光频率和摄影指令的频率保持近似相等, 就是起始频差 $\Delta\omega_0$ 应小于环路的捕获带 $\Delta\omega_p$, 模拟锁相技术最大的弱点就是, 必须由人工进行初始校准调节来实现捕获, 且同步准确较低, 而采用数字锁相技术则可以很好地解决这一问题。

2 数字锁相相位控制器的设计

数字技术的发展使得高准确的控制得以实现, 利用微处理器的中断和定时器把周期、相位差这样的物理量变成数字量, 再通过这些数字量来设置和调节电机的驱动频率, 进而达到控制电机的转速、实现自动锁相的目的^[5]。其原理如图 1。

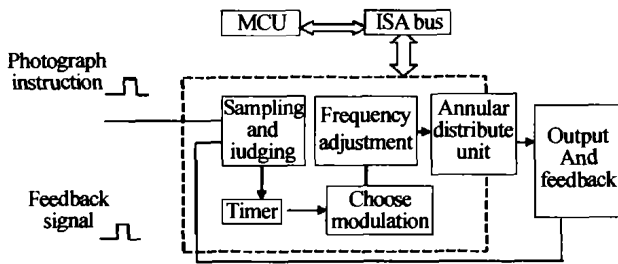


图1 旋转快门原理图

Fig. 1 The principle chart of the revolving shutter

为保证测量数据时空对应关系的准确性,旋转快门的控制是相控系统的核心,这是系统控制的关键点,也是难点.重新研制旋转快门控制系统,可使用FPGA芯片实现智能化的数字锁相控制系统.利用超大规模可编程门阵列芯片实现了对控制参数的灵活设置、对准确误差值的智能分析并进一步细化

控制量的粒度,使控制系统快速、平稳、有效的控制旋转快门,可显著地缩短快门的同步时间,大幅度提高同步准确,并可以适应不同快门的机械特性.

旋转快门的控制方式是按设定的转速启动旋转快门,当转速均衡后,采集反馈信号与标准的指令信号进行比较,判断出同步误差的大小与方向,通过对同步电机转速多种方式的调节,控制同步误差在要求范围之内,完成闭环锁相控制.

2.1 端口地址定义

单片机的P0口与可编程计数器8253的数据口相连,完成8253的三个计数器的控制字和初值的设置.端口地址包括8253的控制口和三个计数器的初值端, T_0 口、 T_1 口、 T_2 口^[6].各端口地址设定如表1所示.

表1 数字锁相8253端口地址设定列表

名称	P2.7	P2.6	P2.5	P2.4	P2.3	P2.2	P2.1	P2.0	PO口地址	端口地址
控制口	0	0	0	0	0	0	1	0	FFH	02FFH
T0口	0	0	0	0	0	0	1	0	FOH	02FOH
T1口	0	0	0	0	0	0	1	0	F1H	02F1H
T2口	0	0	0	0	0	0	1	0	F2H	02F2H

2.2 数字锁相环数学模型的建立

数字锁相环的特点在于以数字量代替模拟量、用软件实现部分硬件的功能.锁相软件有两个主要功能:一是根据摄影指令的周期和占空比来产生相应的电机驱动频率;二是根据软件判断的相位差进行锁相调整.要实现这两项功能,就必须建立相应的数学模型和算法.

2.2.1 电机初始驱动频率的计算

根据摄影指令的周期和占空比产生相应的电机驱动频率是实现数字锁相的关键.摄影指令周期 T_i 是定时器的记数值 A 与单片机定时器记时周期 T_d 的积,即 $T_i = AT_d$.经分析发现旋转快门曝光周期(回答信号) T_h 与机械传递系数 k_i 、快慢叶片变速比 k_j 、频转比 k_k 及电机驱动频率 f_q 有如下关系^[7]: $T_h = k_i \cdot k_j \cdot k_k / f_q$.由于电机的驱动频率由可编程计数器产生,所以计数器的初值 E 可表示为; $E = 1/f_q T_j$, T_j 为可编程计数器的记数周期.根据锁相的基本理论,要使锁相环路经捕获过程达到所定状态,就必须满足输出信号与输入信号的频率差为零、相差等于常数,即 $T_i = T_h$.析上述关系可得到传递函数如下.

$$E = \frac{AT_d}{k_i k_j k_k T_j}, \text{该式即为根据摄影指令初始化电机、并使回答信号与之同频数学模型,这是设计锁相软件的重要依据.}$$

2.2.2 根据相位差进行锁相调整的数学模型

摄影信号与反馈回答信号的相位差由单片机和定时器来判断,相差 ΔT 可用定时器的记数值 ΔA 来

表示,即 $\Delta T = \Delta A \cdot T_d$.相位差的调整是用屏蔽插值的方法来实现的,插值的最小单位是单片机的记时周期.欲将回答信号的周期 T_h 延长 ΔT_q 时间,只需将回答信号周期内电机驱动波形的周期延长 ΔT_q 时间.而回答信号周期 T_h 的延长量 ΔT_q 正是相差的补偿调整量 Δt .根据相位锁定条件,需满足 $\Delta t = XT_d$, X 为插值个数.于是得到数字锁相的闭环传递函数: $X = \Delta A$.将补偿传递函数写成标准形式,相差的补偿调整量 Δt 可以表示为 $\Delta t = \Phi(x) \cdot X \cdot T_d$,其中 $\Phi(x)$ 为插值传递系数函数,是插值量 x 的函数.显然 $\Phi(x)$ 是一常数,正是这一点保证了系统工作的长期稳定性.

3 试验结果

采用该方案成功地研制了弹道相机旋转快门控制器,其同步准确为 $\pm 100\mu\text{s}$,较原模拟锁相控制器的 $\pm 200\mu\text{s}$ 准确有显著提高;捕获时间 $\leq 30\text{s}$,即加电30s后系统自动同步,而原控制器需由人工干预调同步,捕获时间视起始频差是否位于捕获带内及操作手熟练程度而定,同步时间相对较长.

在某型远程多管火箭的试验中,为了验证该数字化控制系统的性能,我们采用了新旧控制系统对比的试验方法.选取坐标系为炮口坐标系,原点 O 为炮口,横轴为水平距离(X),竖轴为高度(Y)的右手坐标系,弹道所在平面为坐标平面.原、新控制系统所得数据的 $Y-X$ 模拟图分别如图2、图3.从这两幅图可以看出,新系统数据弹道平滑性及稳定性明显好于原系统数据.

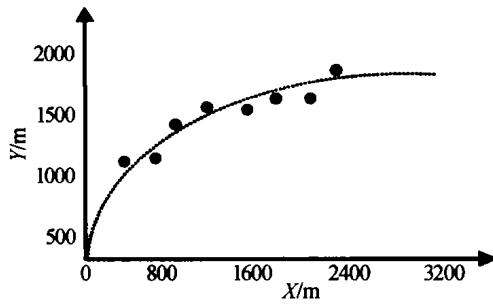


图2 原控制系统数据模拟图

Fig.2 Original data simulation drawing of control system

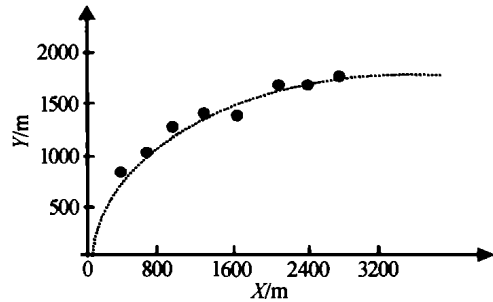


图3 新控制系统数据模拟图

Fig.3 Present data simulation drawing of control system

4 结论

通过试验中的具体应用和新老控制系统的对比,可见该数字锁相控制系统的准确和稳定性更高,证明了数字化控制方案的可行性.数字锁相技术在弹道相机控制系统方面的应用必将会更大地发挥弹道相机的作用,具有光明的应用前景.

参考文献

- 1 卢军,徐大伟,石勇山.机载红外诱饵弹的运动诡计模型及其发展方向.光电技术应用,2004,6:10~14

- Lu J, Xu D W, Shi Y S. *Photoelectric Technical Application*, 2004, 6:10 ~ 14
- 2 旁浩,王赞基.一种新型的全数字锁相环.中国电机工程学报,2003,2:37~41
Pang H, Wang Z J. *Chinese Electrical Machinery Engineering Journal*, 2003, 2:37 ~ 41
- 3 李玉喜,范国臣.最新常规武器试验训练教材.国防科工委司令部,2002,8:16~27
Li Y X, Fan G C. *The Headquarter of the Commission of Science, Technology and Industry for National Defenses*, 2002, 8:16 ~ 27
- 4 李刚林,菱姜苇.51系列单片机设计原理.北京航空航天大学出版社,2004,1:168~175
Li G L, Ling J W. *51 Single Machine Design Principle in Series*. Beijing: Beihang University Publishing Press, 2004, 1:168 ~ 175
- 5 刘宝廷,程树康.电动机原理及其驱动控制系统.上海电器科学研究所,2001,6:23~28
Liu B T, Cheng S K. *Electric Motor Machine and Its Drive System*. Shanghai: Scientific Research Institute of the Electric Apparatus of Shanghai, 2001, 6:23 ~ 28
- 6 戴逸民.频率合成与锁相技术.合肥:中国科学技术大学出版社,2001,12:12~35
Dai Y M. *The Frequency Synthesize and Locks Mutually Technique*. Hefei: China Science & Technology University Press, 2001, 12:12 ~ 35
- 7 彭世均.电机原理及设计.重庆:重庆大学出版社,2002,5:55~62
Peng S J. *Electrial Engineering Principle and Design*. Chongqing: Chongqing University Press, 2002, 5:55 ~ 62

An Optimization Design for Phase Controller of Revolution Shutter in Trajectory Camera Based on DPLL

Cui Hong'en^{1,2,3}, Wang Jian¹

1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 Baicheng Weapon Testing Center, Baicheng 137001

Received date:2003-10-13

Abstract The composition of trajectory camera and working principle of the phase controller of revolution shutter are analyzed. Then it designs a new phase controller after the relationship between control signals and different working states of trajectory camera based on DPLL (Digital Phase-Locked Loop) is evaluated. In addition a mathematic model has been found to subscribe the mode of driving frequency and phase modulation. After experiments it's showed that this design prompts relatively the synchronization precision of the phase controller in contrast to the former design based on Analog Phase-Locked Loop.

Keywords Trajectory Camera; Optimization Control; DPLL; Phase Controller



Cui Hong'en born in 1972 and graduated as a Bachelor of Engineering from Nanjing College of Communication Engineering of PLA in 1995. Then he became an engineer of Baicheng Weapon Testing Center. Now he is doing his research job in Signal and Information Processing at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences.