

文章编号 1004-924X(2004)06-0614-05

航空底片测试仪的恒张力数字控制系统研制

陈荣刚^{1,2}, 沈建华², 黄文浩¹

- (1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;
2. 解放军炮兵学院 三系, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在航空底片测试仪的运动过程中, 底片张力的变化对底片的位移和定位精度影响很大, 从而导致测试结果的稳定性。在对测试仪传动机构的运动学和动力学分析的基础上, 建立了全数字闭环控制模型。为了实现张力的实时采样和控制, 采用数字信号处理技术(DSP)控制底片在运动过程中的张力, 使张力趋于设定的最佳值。使得测试仪获取稳定的、真实的图像数据, 为正确测评航空感光胶片成像质量提供了基础。实验结果表明底片平均移动速度最高可达到 23 m/min; 张力设定范围是 $F_{\min}=0\text{ N}$, $F_{\max}=30\text{ N}$; 张力变化控制量为 $\Delta F=\pm 0.05\text{ N}$; 重复定位精度为 $\pm 10\mu\text{m}$; 满足了设计要求。

关键词: 航空底片; 张力; 实时控制; DSP

中图分类号: V242.44 文献标识码: A

Tensioning digital control system for aerial negative film tester

CHEN Rong gang^{1,2}, SHEN Jian hua², HUANG Wen hao¹

- (1. *Department of Precision Machinery and Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
2. *The Third Department, PLA Artillery Academy, Hefei 230031, China*)

Abstract: The accuracy of displacement and location of the negative is greatly affected by the change of its tension in the aerial negative film tester. Based on the kinematics and dynamics of the transmission mechanism, a control model was built by means of DSP (digital signal processing) to carry out the real time control of the tension when the negative is in motion. The fixed tension guarantees the stability of the system and the requirement to the accuracy standard, which makes possible for the tester to get the real image data. It lays a good foundation for the accurate testing of aerial negative film. The highest moving speed of the negative is 23 m/min, the range of tension is from $F_{\min}=0\text{ N}$ to $F_{\max}=30\text{ N}$, the variety of controlled tension is $\Delta F=\pm 0.05\text{ N}$ and the repeating orientation precision of the tester is $\pm 10\mu\text{m}$, which meet the design requirements.

Key words: aerial negative film; tension; real time control; DSP.

1 引言

系统地测评航空照相底片影像质量, 是改进和提高航空感光胶片成像质量的重要环节, 研制一套检测、评价底片影像质量的专用仪器, 是很有必要的。

长期以来, 胶片测评方法是在已照相冲洗后的底片上, 凭肉眼进行观察选择, 并用光密度计检测若干点的密度, 然后根据经验和被检测若干点的数据对底片的影像质量做出评价, 以此来指导或修正胶片的拍摄和冲洗工作。这种方法, 由于选点的随机性和不可重复性, 加之手工操作速度较慢、数量较少, 而且不同人员的主观差异性, 使得数据和分析的可比性、重复性、客观性受到一定程度的影响^[1-2]。

把上述检测过程以及影像质量评价智能化、自动化是研制本仪器的目的^[3]。而作为测试仪的核心技术之一是底片运动和定位的控制系统, 它是原始数据采集是否真实、可靠的根本保证。

2 传动机构的设计

被测航空底片幅面宽 160~ 240 mm、长 1 000 ~ 3 000 m, 边缘无控制齿孔, 为了保证在测试中底片移动和定位的精确, 必须保持适当的张力和速度, 使得底片与各个传动轴之间实现纯滚动, 其传动机构布局如图 1 所示。



图 1 测试仪传动机构简图

Fig. 1 Transmission mechanism diagram

一般张力控制系统是由伺服电机、磁粉制动器或电磁离合器、控制器、力传感器或测量厚度超声传感器及电源组成^[4-6]。由于系统的控制参数为模拟量, 因此在测试中要实现精确的张力、速度、位移和定位控制有难度。采用实时的数字控

制方式可以较好地解决这个问题, 为此在系统的测长轴上安装了增量式光电编码器, 在测张力轴上安装了绝对式光电编码器, 在两胶片卷轴上安装了步进电机, 在水平移动区安装了底片边缘位置检测传感器^[7-8]。

2.1 几何参数

已知条件: 胶片卷轴的内径为 d 、装满胶片后的直径为 D 、胶片宽度为 W ; 底片的厚度为 δ 、每张胶片的长度为 a 、片间隔为 b 、片头和片尾的无效长度为 l_1 和 l_2 、底片密度为 $\rho(\text{kg}/\text{mm}^3)$ 。

当 $(D - d)/2 \gg \delta$ 时, 可近似认为底片最大卷胶片圈数 n 为

$$n = (D - d)/2\delta, \tag{1}$$

其中第 n 圈周长为

$$L_n = \pi[d + 2(n - 1)\delta]$$

总长度为

$$L = L_1 + L_2 + K + L_n = \pi[nd + n(n - 1)\delta], \tag{2}$$

底片的张数(张)为

$$Z = (L - l_1 - l_2)/(a + b), \tag{3}$$

2.2 系统的运动和动力学分析

2.2.1 运动分析

底片的卷绕长度与放出长度的变化关系在理论上是线性的, 如图 2 所示。

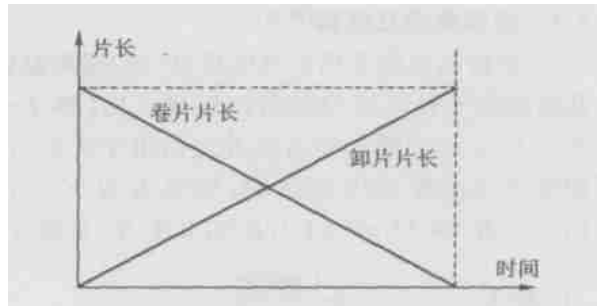


图 2 卷胶片、卸胶片的长度变化曲线

Fig. 2 Alterable length of unwind wing

为满足以上规律, 两胶片卷轴上底片的线速度应相等, 控制两电机轴的角速度 $d\varphi_1/dt$ 、 $d\varphi_2/dt$ 可实现平均线速度为一定值, 底片移动的线速度 (mm/s) 和位移量 (mm) 可通过测长轴上传感器获取的数据进行计算。

$$V = R d\varphi/dt, \tag{4}$$

$$L = \int R d\varphi. \tag{5}$$

式中, R 表示测长轴的半径 (mm); φ 表示测长轴

的转角(rad)。

2.2.2 动力学分析

为防止底片因摩擦被划伤, 将底片在移动的过程中与光源的光学玻璃表面之间的距离保持在 4 mm 以上, 根据实验和计算此时底片受到 10~20 N 的张力作用。在设计中, 在测张力轴上装一定扭矩旋绕弹簧, 使弹力矩 $M \propto K\theta$ 。K 为弹簧刚度系数, θ 为张力轴的转角, 它的大小和方向被数字化后送到微控制器中。通过控制两电机轴的转角 φ_1 和 φ_2 的相对变化量, 实现张力的精确控制。为使系统能够迅速进入稳态, 张力测试机构受到动平衡力作用。

当胶片的张力为定值时, 卷胶片轴上电机产生的扭矩(N·cm)为

$$Tem_1 = T_1(\varphi_1) + T_f + Jd\Omega_1/dt, \quad (6)$$

供胶片轴上电机产生的扭矩为(N·cm)

$$Tem_2 = T_f + Jd\Omega_2/dt - T_1(\varphi_2), \quad (7)$$

式中, $J = J_1 + J_2 + J_3(\varphi)$; 这里 J_1 、 J_2 和 $J_3(\varphi)$ 分别为电机、胶片轴和胶片的转动惯量; $d\Omega/dt$ 为电机轴的角加速度; $T_1(\varphi)$ 为负载转矩; T_f 为机械部分的摩擦转矩^[9]。

3 数字控制模型的建立

3.1 控制思想及模型^[10-11]

该传动机构采用步进电机进行控制和驱动, 其电流的矢量幅值与输出扭矩成正比, 即 $Tem_x \propto |\Sigma I_k|$ 。若忽略运动时底片之间由于受张力作用而产生的摩擦力的影响, 则张力为 $F = M \sin(Tem_x/R_x) \propto M \sin(|\Sigma I_k|/R_x)$, 其中 R_x 是底片

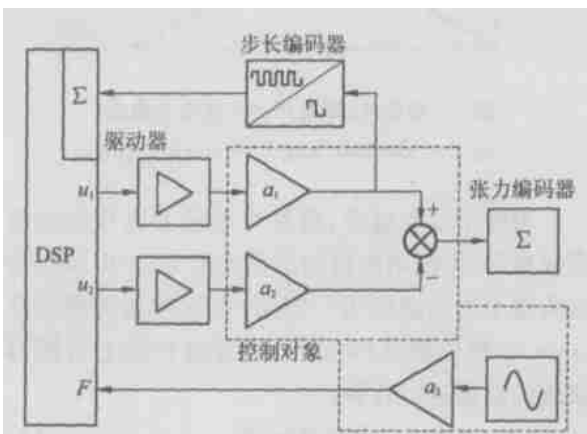


图 3 控制模型原理框图

Fig. 3 Digital control model

在缠绕过程中不断变化的半径值, 须动态检测, 方法是利用测长轴上的光电传感器, 经过公式(5)对胶片位移进行精确测量, 然后实时地反复推算供片轴上底片的半径 R_1 和卷片轴上底片的半径 R_2 。

根据上述思想, 并对控制量进行必要的简化, 即: 忽略电机的动态过渡过程和张力变化对胶片伸长量的影响等, 可得出控制模型, 如图 3 所示。

3.2 控制系统的分析

由控制模型可知, 因底片位移为闭环反馈, 故定位控制较为简单。而张力回路上因存在三个动态参数, 需要复杂的控制算法才能保证系统的稳定。

$$F(k) = \{\Sigma [u_1(k)\alpha_1(k) - u_2(k)\alpha_2(k)]\} \alpha_3(k) \quad k \in [0, \infty], \quad (8)$$

其中: $\alpha_1(k)$ 与供片轴上底片的半径 $R_1(k)$ 相关, 即 $\alpha_1(k) = aR_1(k)$;

$\alpha_2(k)$ 与卷片轴上底片的半径 $R_2(k)$ 相关, 即 $\alpha_2(k) = aR_2(k)$;

$\alpha_3(k)$ 与测张力轴转角位置相关, 在稳态时, 可认为 $\alpha_3(k)$ 是常数 α_3 。

令 $b = a\alpha_3$, 得到

$$F(k)/b = \Sigma [u_1(k)R_1(k) - u_2(k)R_2(k)], \quad (9)$$

可见, 由于 $u_1, u_2 \in \{1, 0, -1\}$, 故 $F(k)$ 不能做到完全恒定不变, 但在一个较小的 ΔF 范围内保持相对恒定^[12-13]。

由公式(9)可知稳态运行时, 控制算法的主要任务就是获取 $R_1(k)$ 、 $R_2(k)$ 这两个参数。在类似系统中, 有的采用实时硬件检测的方法来获取

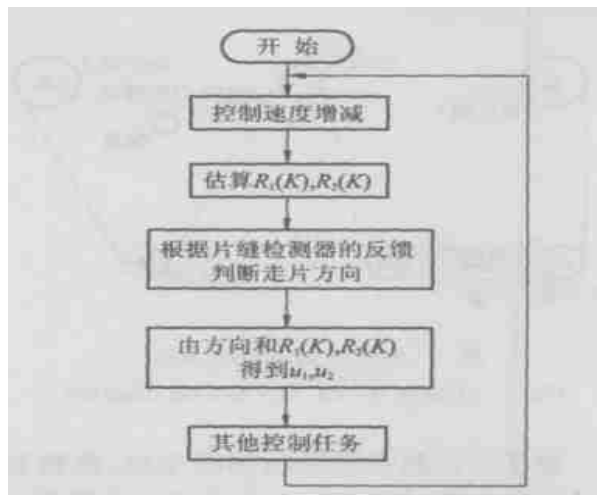


图 4 控制程序流程图

Fig. 4 Control program flow chart

这两个参数,但这会很大程度上增加系统成本。而本系统采用软件自适应方法,在线实时地估算这两个参数。由于使用了先进的 DSP (Digital Signal Processing) 技术,运算速度达到 40 MIPS,这就使得自适应的复杂算法得以实时实现^[14-15]。其控制程序流程框图如图 4 所示。

4 结 论

经过对该系统的性能指标测试得出以下结果:底片平均速度为 23 m/min;张力设定范围是 $F_{\min} = 0 \text{ N}$, $F_{\max} = 30 \text{ N}$;张力变化控制量为 $\Delta F = \pm 0.05 \text{ N}$;重复定位精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$;每幅图像均自动采集 150 万像素以上的数据,底片的移动、定位完全自动化,重复精度高,数据稳定性好。因此建立在大量样本空间上的计算机测评专家系统,

可完全消除测评过程中的人为因素,使得检测结果的客观性、可靠性得到提高,满足了设计要求。图 5 为测试仪的实物图片。



图 5 测试仪实物照片

Fig. 5 Photo of the aerial negative film tester

参考文献:

- [1] 吴若薇. 制版感光材料[M]. 北京:印刷工业出版社, 1996: 227-273.
WU R W. *Sensitive material of plate making* [M]. Beijing: Publishing House of Printing Industry, 1996: 227-273. (in Chinese)
- [2] 朱瑞林, 杨玉亭. 一种新型的多功能照相胶片影像质量评价方法[J]. 感光科学与光化学, 2003, 21(2): 132-136.
ZHU R L, YANG Y T. A Novel multiple image assessment method for photographic film[J]. *Photographic Science and Photochemistry*, 2003, 21(2): 132-136. (in Chinese)
- [3] 朱敬斯. 智能化感光材料高分辨测定仪研制[J]. 影像技术, 1999, (4): 27-31.
ZHU J S. Research into an intellectual high resolving power tester for photographic material[J]. *Image Technology*, 1999, (4): 27-31. (in Chinese)
- [4] 崔纳新, 徐少华. 恒张力微机控制系统的研制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2000, (4): 27-29.
CUI N X, XU S H. The development of a microcomputer control system for constant tensility[J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2000, (4): 27-29. (in Chinese)
- [5] 范凌. PID 恒张力控制系统的测控机构与系统成套设备[J]. 电工技术, 2003, (11): 34-35.
FAN L. Measurement control mechanism and system complete design of PID constant strain control system[J]. *Electric Engineering*, 2003, (11): 34-35. (in Chinese)
- [6] 李颖宏, 王捷. 智能绕线控制系统的设计[J]. 新技术新工艺, 2003, (6): 4-5.
LI Y H, WANG J. The design of the intelligent wire winding system[J]. *New Technology and New Process*, 2003, (6): 4-5. (in Chinese)
- [7] 宋刚, 张蕾. 基于普通编码器的高精度位置检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 699-702.
SONG G, ZHANG L. Approach and realization for improving the measurement accuracy with low-resolution encoder[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(5): 699-702. (in Chinese)
- [8] 付旭东, 付瀛. 位置检测装置 光电编码器[J]. 沈阳电力高等专科学校学报, 2002, 4(4): 27-29.
FU X D, FU Y. Photoelectric encoder for position detection[J]. *Journal of Shenyang Electric Power Institute*, 2002, 4(4): 27-29. (in Chinese)
- [9] 张崇巍, 李汉强. 运动控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1992: 87-104, 125-155.
ZHANG C H W, LI H Q. *Motion control system* [M]. Wu Han: Publishing House of Wu Han Technology University,

2002, 87-104, 125-155. (in Chinese)

- [10] 郑长征, 唐艳, 周伟. 解算式张力控制算法的实现 [J]. 电子工程师, 2002, 28(1): 23-26.
ZHENG CH Z, TANG Y, ZHOU W. The realization of tension control by algorithm [J]. *Electronic Engineer*, 2002, 28(1): 23-26. (in Chinese)
- [11] 王春香, 王永章. 精密张力控制系统及其控制精度的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 407-408.
WANG CH X, WANG Y ZH, *et al.* A Research of the precise tension control system and control precision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2000, 21(1): 407-408. (in Chinese)
- [12] 李友善. 数字控制系统分析和综合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 99-154.
LI Y SH. *The analysis and synthesize of numeral control system* [M]. Beijing: Publishing House of National Defence Industry, 1985: 99-154. (in Chinese)
- [13] 正田英介. 自动控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 98-155.
HIROMU HARUKI. *A automatic control* [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2001: 98-155. (in Chinese)
- [14] 李桂菊. 数字信号处理器 TMS320C25 与微机的串行通讯 [J]. 光学 精密工程, 1999, 7(2): 101-105.
LI G J. Serial communication between digital signal processor TMS320C25 and computer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(2): 101-105. (in Chinese)
- [15] 张芳兰. TMS 320C2XX 用户指南 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
ZHANG F L. *TMS 320CXX user manual* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999. (in Chinese)

作者简介: 陈荣刚(1960-), 男, 安徽固镇人, 1983年毕业于清华大学精密仪器系, 副教授, 博士研究生, 从事精密仪器与机械方向课题研究; E-mail: chen_r_g@163.com
黄文浩(1944-), 男, 江苏武进人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为精密仪器及纳米技术方面的教学和研究工作。