

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.020

折叠舵舵面展开时间高效测量方法

王娜, 刘星, 武丽丽, 张珠峰, 金路, 钱陈, 蔡顺平, 田振友, 高冬青

(上海航天精密机械研究所 质量检验部, 上海 201600)

摘 要:针对折叠舵舵面展开时间传统测量方法存在的人为因素影响大、效率低等问题,提出一种折叠舵舵面展开时间自动化测量方法,并基于单片机开发设计折叠舵舵面展开时间的自动化测量装置。选择 3 批折叠舵产品,对比分析该自动化测量方法与传统测量方法,验证该自动化测量装置的可靠性和稳定性。

关键词:折叠舵;展开时间;自动化测量

中图分类号:TP29 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0100-05

Efficient Measurement Method for Unfolding Time of Folding Rudder

WANG Na, LIU Xing, WU Lili, ZHANG Zhufeng, JIN Lu, QIAN Chen, CAI Shunping, TIAN Zhenyou, GAO Dongqing
(Quality Inspection Department, Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: This paper proposes an automatic measuring method for unfolding time of folding rudders concerning the problems of significant human factors and low efficiency by the traditional measurement method for folding rudder unfolding time. Based on a microcontroller, an automatic measurement device for folding rudder unfolding time is designed. Three batches of folding rudders are selected to make comparison and analysis on the proposed and traditional measurement methods, which verifies the reliability and stability of the automatic measurement device.

Keywords: folding rudder; unfolding time; automatic measurement

0 引言

各类飞行器在设计制造过程中,为了缩小体积以便储存和运输,往往会将舵面设计为折叠结构^[1-2]。折叠舵舵面展开时间、展开角速度等都属于结构技术性能指标,直接影响飞行器飞行姿态^[3]。飞行器发射后,舵面能否及时展开并有效锁定决定了折叠舵能否正常工作以及飞行器能否完成任务^[4-5],因此有必要在地面进行折叠舵舵面展开时间的测量。

目前国内外学者对舵的折叠展开结构方案可行性分析^[6-7]、折叠结构设计^[8-9]、运动学及多体动力学建模^[10]、柔性体建模、展开性能测试及其试验结果分析、翼面气动特性分析^[11-14]以及结构非线性的响应分析^[15]等方面进行了大量研究,但对折叠舵舵面展开时间测量方法的研究较少。因此导致当前的测量方法难以满足“高质量、高效率、高效益”发展的新要求,主要表现在:由 2 名操作人员相互配合(1 人负责操作高速摄影设备,1 人负责操作折叠舵),通过人眼观察折叠舵折叠的起始角度和释放的时机来控制摄影时间的开始和

结束,最后还需人工二次处理数据才能得出测量结果。这种测量方法存在的问题主要有:1)测量过程需两人配合完成,一人无法独立完成;2)测量结果依赖人工经验与配合默契度,测量效率低下、重复性与稳定性差;3)测量设备昂贵,成本高。因此,需研究出折叠舵舵面展开时间的高效、高精度的测量方法。

1 测量方法与原理

本文针对折叠舵舵面展开时间的测量,拟采用 STC89C52 单片机内部定时器、2 个机械开关及液晶显示屏来实现展开时间的测量和显示。当折叠舵折叠至一定角度时,通过机械开关 1 触发定时器启动计时;当折叠舵展开时,机械开关 2 触发定时器停止计时,定时器的计时时间 Δt 即为舵面展开时间,然后将结果显示在液晶屏上,如图 1 所示。

2 系统整体结构与原理

2.1 系统总体方案设计

根据测量方法与原理,设计系统总体方案。该系统功能模块主要包括 MCU 模块、展开时间测

第一作者简介:王娜(1985—),河南商丘人,高级工程师,硕士,研究方向为检验检测技术研究、质量管理、精益管理等,15316205229@163.com。

量模块和液晶显示模块,如图2所示。展开时间测量模块主要包含2个机械开关,用于给MCU提供舵面折叠和展开位置信号,从而控制MCU内部定时器的启动与停止。液晶显示模块的功能是显示时间和晃动量的测量结果。

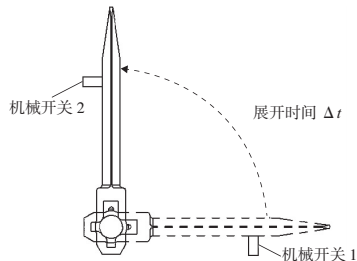


图1 折叠舵舵面展开时间测量原理

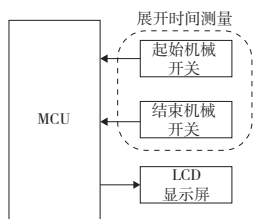
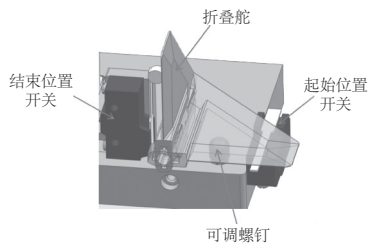


图2 系统总体方案框图

折叠舵舵面从折叠状态至展开状态的时间可采用定时器计时获得,如图3(a)所示。折叠位置与展开位置分别布置一个机械开关,分别通过对折叠和展开位置2个开关的通断控制来触发定时器的启动计时与停止计时,即当舵面开始展开的瞬间接通起始位置机械开关,MCU控制定时器启动;当舵面完全展开结束位置开关接通,MCU控制定时器停止,定时器的计时时间即为展开时间。使用时,对可调限位螺钉调整使得折叠角度始终为 90° ,可保证每件产品测量时舵面保持相同展开角度,然后调整起始位置开关,使舵面刚好折叠 90° 时,起始位置开关正好接通。折叠舵舵面展开时间测量工作流程如图3(b)所示。



(a) 结构示意图



(b) 工作流程图

图3 折叠舵舵面展开时间测量结构示意和工作流程

2.2 分系统结构与原理

1) 单片机系统设计

折叠舵舵面展开时间测量的单片机系统主要有单片机微控制器、晶振电路与复位电路构成,如图4所示。本文选用的单片机微控制器是某公司生产的STC89C52^[16],该单片机为一种低功耗、高性能CMOS 8位微控制器,拥有灵巧的8位CPU和系统可编程Flash,可为众多嵌入式控制应用系统提供灵活、有效的解决方案。

晶振电路是结合单片机内部电路产生单片机工作时所必须的时钟信号。晶体振荡器选用的是12 MHz的高稳定无源晶体振荡器。电容C1、C2起微调作用,电容值在5~30 pF。

复位电路包含两种复位方式:一种是上电自动复位,另一种是按键手动复位。其原理是按下键或上电单片机的复位引脚接收 $2\mu\text{s}$ 以上的高电平信号就重新开始执行程序,其作用是让单片机复位。

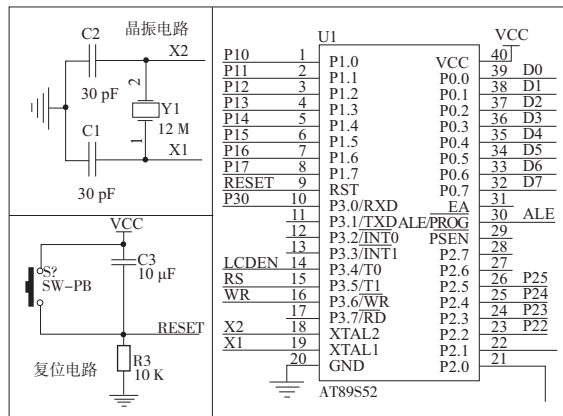


图4 单片机系统

2) 显示电路设计

该模块采用LCD1602液晶屏将测量的时间和晃动量实时显示在屏幕上,该液晶屏可以在任意位置显示数字和符号。如图5所示,LCD1602共有16个引脚,其主要引脚的具体功能与控制如下。

第3引脚V0为对比度调节端,接正电源时对比度最弱,接地时对比度最高,对比度过高会产生“鬼影”,电路中将该口与10 K的电位器串联,可调节显示对比度,使读数清晰可见。

第4引脚RS为寄存器选择端,高电平时选择数据存储器,低电平时选择指令寄存器,电路设计中该脚与单片机P3.5口相接。

第5引脚WR为读/写信号线,当为高电平时

进行读操作,为低电平时进行写操作,本设计中仅用于显示测量数据,该引脚与单片机 P3.6 口相接,当 RS 与 WR 均为低电平时,可写入测量所得数据。

第 6 引脚 EN 为使能端,该脚与单片机 P3.4 口相接。当 EN 端由高电平变为低电平时(下降沿)液晶模块执行命令。

第 7—14 引脚 D0—D7 为 8 位双向数据线,7 号脚为最低位,14 号脚为最高位。与单片机 P0.0—P0.7 相接。为解决单片机 I/O 口资源不够用问题,在 LCD1602 与单片机 P0.0—P0.7 之间通过锁存器 74HC573 相连,锁存器的开启与关闭由单片机 P3.0 口控制。

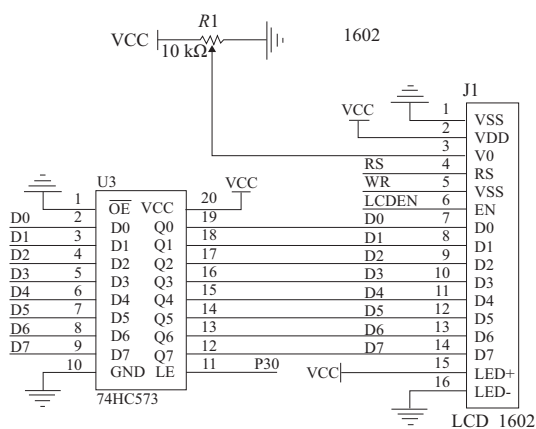


图 5 LCD1602 液晶显示电路

2.3 测量装置软件系统设计

软件控制程序的编写基于 Keil uvision4 软件平台,采用单片机 C 语言进行,并通过 STC-ISP 软件和下载/通信电路烧录至单片机程序存储区。控制程序包括初始化程序、液晶显示程序、测时程序等。

1) 控制系统总体程序设计流程

折叠舵舵面展开时间测量控制系统主要提供定时器启停控制、数据处理、数据显示等功能,其软件运行流程图如图 6 所示。

根据图 6 中序列号进行详细软件程序设计,具体如下。

序号 1:系统上电进行复位初始化,LCD 屏幕显示正常。

序号 2:将折叠舵安装至卡槽,折叠至 90°,同时起始开关被按下,与之相接的单片机 P_{20} 口由 1 变为 0。

序号 3-4:折叠舵自由释放,系统检测 P_{20} 口是否由 0 变为 1,当 P_{20} 变为 1 时则定时器启动定时。

序号 5:折叠舵展开过程中,系统不断检测

P_{21} 口值是否由 1 变为 0,当 P_{21} 为 0 时,定时器停止计时。

序号 6:单片机内部进行数据处理,将测得的时间送至 LCD1602 液晶屏显示。

序号 7:测量结束,取出折叠舵。

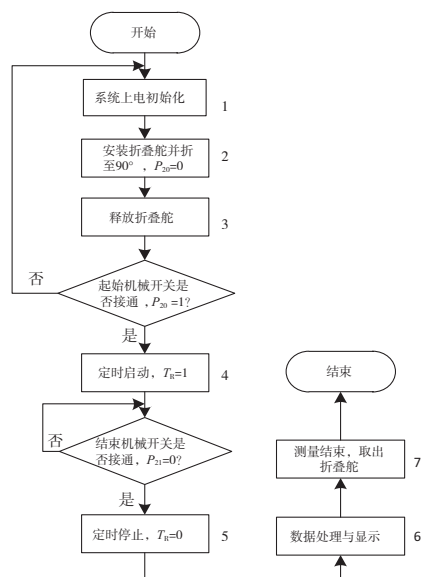


图 6 软件运行流程图

2) 定时模块程序设计

定时模块采用 STC89C52 单片机内部自带的 T1 定时器,方式 1,数据寄存器 TH1、TL1 (TH1、TL1 分别为 8 位数据寄存器,用于保存计数值的高 8 位和低 8 位)。计数原理为:计数时,从 TL 开始加 1 计数,计满后向 TH 进位,直至 TH 溢出,置标置位 TF,申请中断,MCU 进行中断处理。

MCU 晶振为 12 MHz,机器周期即为 1 μ s,即每 1 μ s 产生 1 次计数,因测时精度为 ± 5 ms,故采用定时器定时最小间隔周期为 1 ms。定时 1 ms 需对机器周期进行 1 000 次计数,又 T1 是对机器周期进行 65 536 次计数,所以 1 000 次计数无法让其溢出。因此必须先对定时器里设置初值 64 536 (65 536—1 000),使得计满 1 ms 定时器刚好能溢出。因计数器是 2 个 8 位组成,要把差值装进这两个 8 位,低 8 位最多能装 256 个机器周期,计满了就用高 8 位,即低 8 位满 1 次则高 8 位加 1,高 8 位装多少,低 8 位就满了几次。

计时核心程序代码如下:

```
void timer () interrupt 3
{
    TH1 = (65 536 - 1 000) / 256; // 计数达 1 ms 重新赋值
    TL1 = (65 536 - 1 000) % 256;
    ms_time += 1; // 展开时间变量
}
```

3) 显示模块程序设计

采用 LCD1602 液晶屏进行测量结果的显示。根据前文所述,可根据 LCD 的 RS 及 WR 引脚的高低电平来控制数据的读取、存入。屏幕的指令操作主要包括清屏、回车、输入模式控制、显示开关控制、显示模式控制等内容。

显示程序的核心代码如下:

```
void WriteCmd(uchar com)//写指令
{
    lcd_rw=0;//0 表示写
    lcd_rs=0;
    P0=com;//给 P0 送指令
    delay(5);
    lcd_en=1;//写入
    delay(5);
    lcd_en=0;
}

void WriteData(char dat)//写数据
{
    lcd_rw=0;//0 表示写
    lcd_rs=1;
    P0=dat;//给 P0 送数据
    delay(5);
    lcd_en=1;//写入
    delay(5);
    lcd_en=0;
}
```

3 折叠舵舵面展开时间测量方法验证与分析

3.1 试验方案

为验证折叠舵舵面展开时间自动化测量装

置,本文采用与改进前的高速摄影测量方法进行比较,即在折叠舵舵面一次装夹展开下,用两种测量方式同时进行测量。测量现场如图 7 所示。

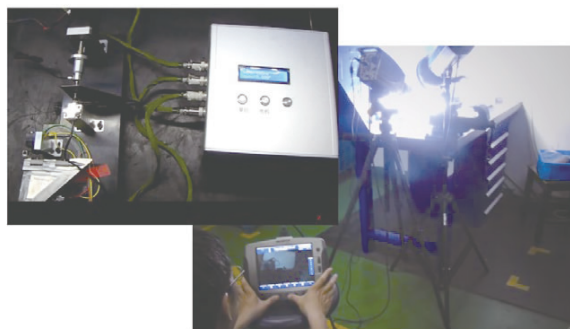


图 7 两种方法测量现场

3.2 试验结果与分析

本文对 3 个批次共计 101 件折叠舵舵面的展开时间进行了测量比对试验。3 个批次先后交付数量分别为 36 件、30 件、35 件,测量结果分别如图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)所示。

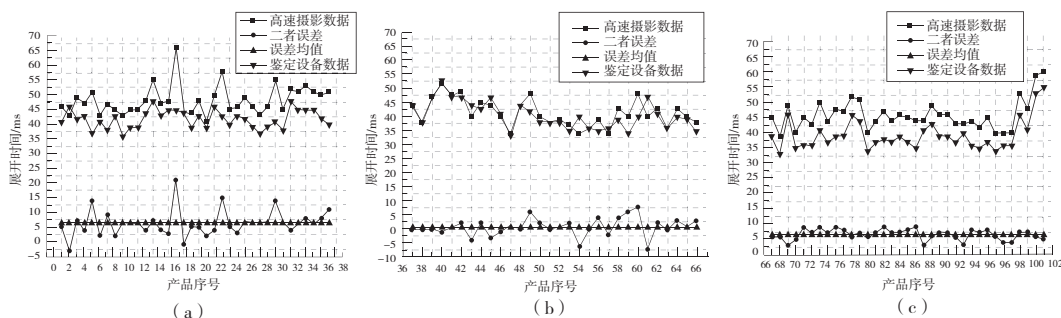


图 8 两种方法的试验测试结果

首先,从图 8 中可以看出,采用自动化测量装置与高速摄影设备两种方法的测量结果变化趋势基本一致。其次,从 3 次结果中也可以看出采用自动化测量装置的测量结果总体上比采用高速摄影设备的测量结果偏小,二者误差波动范围分别为 $-3 \sim 21$ ms、 $-7 \sim 8$ ms、 $4 \sim 9$ ms。3 次的误差波动范围各不相同,第 1 次波动最大,第 3 次波动最小,其原因主要是高速摄影测量方法的起始与结束点均为人眼观察得出,不同人对测量时机的把握各不相同,因此会对测量结果造成一定的误差。

另外,从误差均值上来看,两种测量方法的误差均值分别为 6.3 ms、0.8 ms、6.5 ms,显然第 2 次误差均值与第 1 次和第 3 次偏差较大,第 1 次和第 3 次误差均值基本一致,其主要原因为第 2 次

的高速摄影测量人员与第 1 次和第 3 次测量人员不一致,这也证明了自动化测量方法受人为因素影响较小,高速摄影测量方法受人为因素影响较大。

4 稳定性分析

为进一步验证自动化测量装置的稳定性,在测量人员、测量时间、测量地点以及测量产品等条件均相同的情况下,同时采用自动化测量装置和高速摄影设备对同一个折叠舵连续进行 10 次测量,测量结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,两种方法的测量结果变化趋势基本一致,这验证了测量设备的稳定性和可靠性。而对于同一个产品 10 次测量结果存在差异的主要原因为操作人员每次手动释放折叠舵的时机存在偏差。

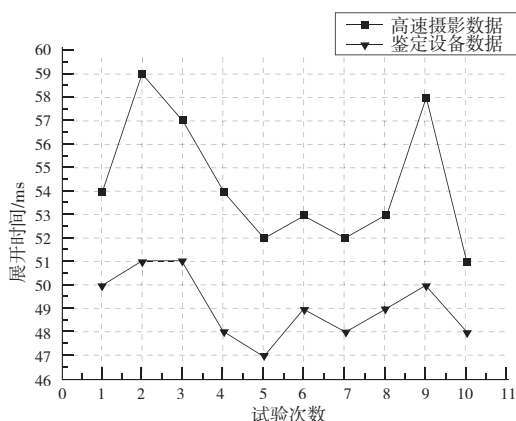


图9 同一产品连续测量10次结果

5 结语

为实现折叠舵舵面展开时间的高效、高精度测量,克服传统人工测量存在的效率低、不可靠等问题,根据产品被测结构特征,本文基于单片机开发设计了一种折叠舵舵面展开时间自动化测量装置。采用自动化测量装置进行测量不仅减少了测量前的准备工作,而且其仅需一人就可完成测量任务,并且受人为因素影响极小,这极大地提高了折叠舵舵面展开时间的测量质量和效率。

参考文献:

- [1] 丛霄九. 高速飞行器折叠舵面结构非线性动响应与颤振分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [2] 李智,杨雷,段丽华,等. 组合扭杆式折叠舵展开性能研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(8):164-169.

- [3] 刘断尘. 舵机折叠舵展开性能分析及试验[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [4] 刘昊鹏. 舰上弹射模拟系统设计与折叠舵展开动力学分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [5] 王国超,李瑞,程迁,等. 某型导弹折叠舵动力学仿真与可靠性分析[J]. 弹箭与制导学报,2018,38(5):1-4,8.
- [6] 刘飞. 弹翼折叠展开机构工作可靠性分析的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [7] 赵志强,谢里阳. 舵翼展开机构可靠性分析与试验研究[J]. 失效分析与预防,2017,12(3):195-202.
- [8] 张苗苗. 折叠翼面展开机构设计及其力学性能研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [9] 陈克,王洪波,周国峰,等. 内埋式发射导弹折叠舵结构设计与分析研究[J]. 强度与环境,2018,45(5):52-57.
- [10] 唐宏. 折叠舵面动力学建模和非线性颤振分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [11] 刘森,蒋坤,潘晓军,等. 折叠舵展开过程气动特性分析[C]. 中国航空学会. 北京:2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册),2017:197-200.
- [12] 李东,李斌,刘仙名. 空空导弹折叠舵展开过程气动载荷分析[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(3):154-156.
- [13] 王强,马志赛,张欣,等. 基于模态综合法的含间隙折叠舵面动态特性分析[J]. 航空学报,2020,41(5):223507.
- [14] 章斌. 折叠翼展开机构工作可靠性仿真与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2015.
- [15] 朱益均. 折叠舵面结构接触非线性动响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [16] 马巧梅. 基于STC89C52的智能门禁系统的设计[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):235-238.

收稿日期:2023-09-04

(上接第99页)

- [9] 凌静秀,孙伟,杨晓静,等. 复杂应力状态下TBM刀盘裂纹应力强度因子分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(4):633-639.
- [10] 夏毅敏,卞章括,胡承欢,等. 复合式土压平衡盾构机刀盘性能综合评价方法[J]. 机械工程学报,2014,50(21):1-9.
- [11] 杨帆. 超大直径泥水盾构刀盘安装焊缝疲劳寿命预测[J]. 中国工程机械学报,2024,22(6):784-789.
- [12] 刘浩,段怿欣,张爽,等. 复杂地层盾构刀盘损伤分析及既有刀盘结构改造研究[J]. 土木工程学报,2024,57(增刊2):32-38.
- [13] 真嘉捷,赖丰文,黄明,等. 基于LightGBM-Informer的盾构隧道管片上浮时间序列预测模型[J]. 岩土力学,2024,45(12):3791-3801.
- [14] 王义盛,杨志超,张炎,等. 砂性地层盾构掘进撕裂刀磨损规律分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(8):82-88.

- [15] 刘尧,陈改革,刘振国,等. 关联规则挖掘驱动的盾构机刀盘健康评估方法[J]. 中国机械工程,2023,34(11):1326-1334,1342.
- [16] 茹华莎. 基于t-SNE流形学习的盾构刀盘施工磨损后性能评估[J]. 工程机械文摘,2024(2):53-55.
- [17] 张永,龚众望,郑英,等. 工业设备的健康状态评估和退化趋势预测联合研究[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(1):180-197.
- [18] 王伯芝,丁爽,黄永亮,等. 基于WaveNet网络的盾构刀盘扭矩超前预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(7):27-33,42.
- [19] 刘泉维,邵小康,纪明涛,等. 复合地层加强型盾构对比选型技术与滚刀磨损特征研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(7):154-161,170.
- [20] 冯通,胡锦健,李研,等. 基于TCN-LSTM的盾构刀盘扭矩实时预测研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(5):120-128,166.

收稿日期:2024-02-06