

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.04

# 利用数学模型实现动态测试系统 目标模拟器的校准

吴振雨

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 某型导弹动态测试系统在交付验收试运行中出现长弹道仿真的命中率低下问题, 因此要对目标模拟器摆镜的驱动能力进行校准验证。本文通过对产品结构原理和测试方法的分析, 建立了比例导引数学模型, 然后用数学仿真的方法, 对目标模拟器摆镜的驱动能力进行了校准验证, 解决了动态测试专用设备驱动能力校准的技术难题。

**关键词:** 动态测试; 比例导引; 目标模拟器; 驱动能力

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2016)06-0013-03

## Calibration of Mathematic Model to Dynamic Measurement System Target Simulator

WU Zhenyu

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** A certain type of air to air missile has a problem in operation whose hit rate of long trajectory is lower. So the driving ability of the target simulator swing mirror need to be calibrated and verified. Through the analysis of product structure principle and test methods, a mathematic model of proportional guidance is built, and the artificial mathematical methods are used to calibrate and verify the driving ability of the target simulator swing mirrors. The technical problem of the special equipment driving ability is solved in dynamic testing.

**Key words:** dynamic measurement; proportional guidance; target simulator; driving ability

## 0 引言

某型产品动态测试系统在交付验收前进行了试运行, 在使用中出现弹道仿真命中率低下, 长弹道仿真脱靶量合格率只有 50%, 严重影响使用。

通过对导弹横滚运动和视线运动历史数据分析发现, 长弹道仿真的弹道数据呈发散情况, 在发散过程中出现的现象是目标模拟器运动不正常, 总是提前向左上方方向偏转, 而横滚转台则向横滚角减小的方向快速运动, 设备采集到的舵机输出伺服电压  $CF$  出现严重的饱和现象, 导致  $CF$  信号不能有效调节弹体姿态。以上异常显示弹道仿真不能命中的原因是由于动态测试系统的目标反应时间和移动方位不满足仿真条件引起的, 研制厂家虽然同意修改动态测试系统的目

标模拟器控制参数, 但是需要我方提供目标摆镜控制驱动能力不足的具体时间和方位参数, 因此需要对动态测试系统目标模拟器的驱动能力进行校准, 验证其能力不足的情况。

## 1 验证方案

### 1.1 动态测试系统测试工作原理

#### 1.1.1 动态测试系统组成

按照功能原理将控制部件动态测试系统划分为飞行模拟主控台、横滚转台系统和目标干扰系统三个部分。动态测试系统硬件部分由三台控制机柜、目标模拟器及大理石平台、横滚转台、气源柜、外设电源等组成, 系统组成及相互关系如图 1 所示。

主控台是整个测试系统的核心设备, 协调管理整个系统以完成模拟测试功能, 由硬件和软件两大部分组成。主控台硬件部分包括主控计算机、模型解算计算机、数据采集系统、电源控制及信号选择系统、DDR-DDE-500SX 实时网络、数字示波器、电源模

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 国家工程技改项目

作者简介: 吴振雨(1983-), 男, 吉林四平人, 工程师, 硕士, 主要从事红外产品控制部件工艺工作。

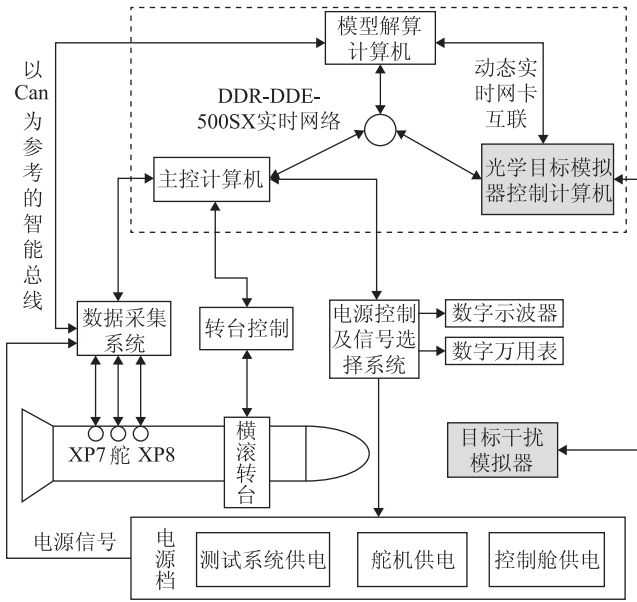


图1 动态测试系统原理组成框图

电电源，一旦发现异常，马上给电源控制及信号选择系统下发命令，切断相应电源并报告故障。

动态测试系统的工作原理可简化为图2的工作原理框图，即系统采集产品的舵控电压信号 $CF_{1\sim 4}$ 电压值输入控制模型，经过控制模型计算得到目标模拟器的俯仰和偏航角度，还有弹体滚转的姿态角度，由模型解算程序输出这几个角度值控制目标模拟器和横滚转台动作，然后产品根据目标运动方向会输出不同的 $CF_{1\sim 4}$ 电压信号，最终完成闭环控制。

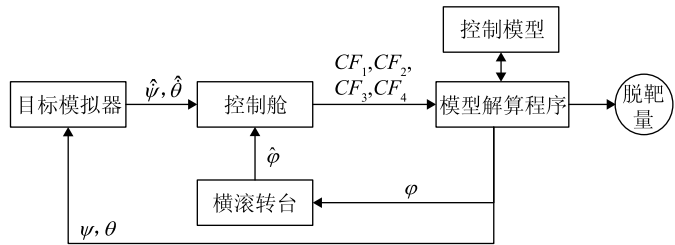


图2 动态测试系统原理简化图

块及传输电缆等。主控台软件部分包括主控计算机软件、模型解算计算机软件和模型解算程序三大块：主控计算机软件由管理及监控模块、设备驱动、接口通信程序、用户界面及数据库等组成；模型解算计算机软件由仿真算法、仿真软件、接口通信程序等组成；控制模型是测试的关键，由导弹的空气动力学方程、运动学方程等数学模型组成，存储在模型解算计算机内，与模型解算软件交互传输信息。

目标干扰系统包括光学目标模拟器控制计算机(包括目标模拟器控制软件)和光学目标干扰模拟器。光学目标干扰模拟器由红外目标模拟器系统、二维转动反射镜、二维摆动反射镜和光学平台组成。

横滚转台系统包括横滚转台、产品装夹装置、力矩加载器和转台控制系统组成。

### 1.1.2 动态测试系统工作流程

系统采集导弹控制舱输出的舵控电压信号和其它电信号，经过信号调理电路后由数据采集系统经由以CAN总线为参考的智能总线发送给主控计算机和模型解算计算机，主控计算机处理得到的数据，将系统运行状态数据直接显示出来，并完成导弹飞行过程的三维视景仿真，同时模型解算计算机根据得到的舵控电流信号经过控制模型运算，得到目标干扰模拟系统和横滚转台的控制参数，运算结果通过动态实时网卡和DDR-DDE-500SX实时网络实时传递给目标干扰模拟器及转台控制计算机。目标干扰模拟器及转台控制计算机完成目标及干扰的模拟，同时完成导弹横滚姿态的模拟。主控计算机实时监控和显示系统各部分的供

## 1.2 验证方案制定

根据动态测试系统工作原理知，此系统相当于一个半实物仿真平台，控制舱作为系统中的实物部分，一旦运行将不受外界控制。在无法正常工作的情况下，可通过数学的方式模拟控制舱输出 $CF_1 \sim CF_4$ 电压信号，使动态测试系统在人为的条件下运行工作。数学模型取代产品的工作流程框图如图3所示。

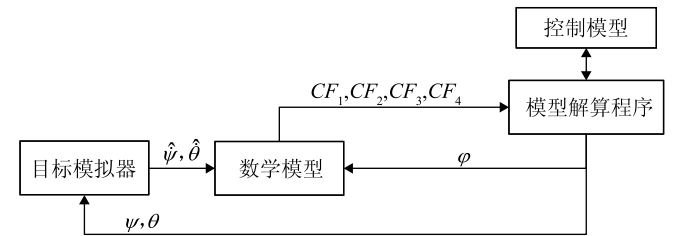


图3 数学模型取代产品的原理简化图

采用数学模型取代控制舱后，就可以完成闭环测试仿真，在保证系统运行的前提下，人为输入控制指令，采集目标的运动轨迹和运动时间，就可以对目标模拟器的驱动能力进行校准验证。

## 2 比例导引数学模型建立

### 2.1 导弹跟踪目标的特性分析

导弹跟踪目标过程：目标的红外辐射成像于探测器敏感面上，当光学系统做圆锥扫描时，目标像点依次扫过各个探测器，将热辐射转换为具有空间方位信息的电脉冲；红外探测器输出的脉位调制信号经过信

息处理板放大整形后通过 A/D 采样送入弹载计算机系统；弹载计算机对数字化的信号进行鉴别，并与处理后的基准信号进行比较，产生目标偏离光轴的误差信号，最后给出极坐标跟踪矢量的正弦信号（幅度和相位）；跟踪信号经放大后驱动陀螺进动使光轴指向目标，实现导引头对目标的闭环跟踪。而对舵机的驱动为导引头内的跟踪信号由极坐标变换为直角坐标控制信号，实现对舵机两个通道舵面的对应控制，以此改变弹体的飞行姿态，控制导弹的飞行轨迹，导弹本身只有俯仰和偏航两个控制通道，对滚转没有控制。

### 2.2 比例导引数学模型

如图 4 所示，X 轴为导弹弹轴；Y、Z 为舵机两个相互垂直通道的舵面；Y 轴为偏航； $\psi$  为导弹的偏航角；Z 轴为俯仰； $\theta$  为俯仰角；当弹体绕 X 轴转了  $\varphi$  角时，控制部件自身没有控制信号的改变，但是舵控信号的控制方向却因为绕 X 轴转了  $\varphi$  角后使导引头输出的通道 I 和通道 II 的伺服控制信号  $SF_{13}$  和  $SF_{24}$  发生了耦合，经过矢量变化得到

$$\begin{cases} SF_{13} = \dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi \\ SF_{24} = -\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi \end{cases}$$

式中： $SF_{13}$  为导弹偏航伺服控制力  $SF_1 + SF_3$ ； $SF_{24}$  为导弹俯仰伺服控制力  $SF_2 + SF_4$ ； $\dot{\psi}$  为导弹偏航变化率； $\dot{\theta}$  为导弹俯仰变化率。

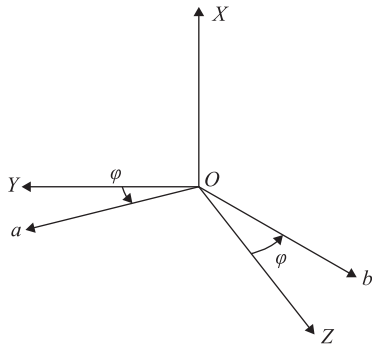


图 4 坐标系

由于目标运动视为弹目视线运动，这样就得到了含有目标视线运动变化量的方程，根据产品技术指标，当产品处于 I 通道位置，目标以  $1^\circ/s$  的角速度做方位运动时，采集到的  $SF_1$  和  $SF_3$  有变化， $SF_2$  和  $SF_4$  没有变化。 $1^\circ/s$  运动理论上导引头输出的控制电流为 125 mA，舵机的理论电阻为  $24 \Omega$ ，则  $SF_1 + SF_3$  理论上应该为 3 V，则输入舵机的控制信号电压  $SF_{13}$  和  $SF_{24}$  的数学表达式为

$$\begin{cases} SF_{13} = 3(\dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi) \\ SF_{24} = 3(-\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi) \end{cases}$$

因为  $SF_1$  和  $SF_3$ ， $SF_2$  和  $SF_4$  是大小相同的两对控制信号，且  $SF_{13} = SF_1 + SF_3$ ， $SF_{24} = SF_2 + SF_4$ ，所以得到

$$\begin{cases} SF_1 = 1.5(\dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi) \\ SF_2 = 1.5(-\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi) \\ SF_3 = 1.5(\dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi) \\ SF_4 = 1.5(-\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi) \end{cases}$$

又因为动态测试系统采集的是  $CF_{1-4}$ ， $CF_{13}$  和  $CF_{24}$  是  $SF_{13}$  和  $SF_{24}$  经过伺服电压放大器放大得到的，伺服电压放大器中点电流技术指标为 375 mA；舵机自身的阻值理论值为  $24 \Omega$ ，因此舵机处于零点的常数电压为 9 V。

所以，控制部件输出的  $CF_{1-4}$  信号数学模型为

$$\begin{cases} CF_1 = 9 + 1.5(\dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi) \\ CF_2 = -9 + 1.5(-\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi) \\ CF_3 = -9 + 1.5(\dot{\psi} \cos\varphi + \dot{\theta} \sin\varphi) \\ CF_4 = 9 + 1.5(-\dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi) \end{cases}$$

计算所得的舵控电压信号电压值需要进行限幅处理， $CF_1$  和  $CF_4$  受限于  $[0, 30]$ ， $CF_2$  和  $CF_3$  受限于  $[-30, 0]$ 。

### 3 目标模拟器的驱动能力验证

将比例导引数学模型加入模拟解算计算机，作为控制部件使用，构成仿真测试回路，就可以对目标模拟器进行校准，由此检测目标模拟器摆镜的运动轨迹，考察其是否满足设备使用要求。

具体校准测试方法如下：利用比例导引数学模型进行数学仿真，编辑指令，让滚转角  $\varphi$  输出为  $90^\circ$ ，即相当于转台滚转到  $90^\circ$ ，测试程序令目标俯仰摆镜和方位摆镜分别走行程为  $1^\circ$ 、频率为 1 Hz 的正弦；然后启动动态测试系统，按照测试程序进行测试，采集产品舵机控制电压 CF 的信号，并将控制指令角速度保存下来，曲线如图 5 与图 6 所示。

通过对比发现：目标在方位上运动滞后控制指令约 0.104 s，相当于方位滞后  $360^\circ \times 1 \times 0.104 = 37.44^\circ$ 。

## 6 结论

通过以上分析, 本文的结论可总结为以下几点:

1) 4130 合金钢盐雾腐蚀图像具有明显的色彩特征和纹理特征, 通过对不同颜色空间分量的统计特征分析得到最能描述腐蚀特征的分量为 HSV 空间的 S 和 V 分量以及 YCbCr 颜色空间的 Cb 分量。

2) 针对 4130 合金钢腐蚀图像及类似有明显流痕、明显锈斑类的腐蚀图像, 流痕区域在 RGB 颜色模型空间主要体现在 R 分量和 G 分量, YCbCr 颜色空间的 Cb 分量可以同时增强图像 R 分量和 G 分量对图像的影响效果; 对于流痕与锈斑的边界区域, RGB 颜色模型主要体现在某一分量存在“骤减”, HSV 颜色空间的 S 分量可对边界区域进行明显的区分。

3) 为了得到流痕包围的腐蚀黑斑, 通过分析饱和度的变化规律, 提出了一种最大饱和度判别法, 将饱和度最大像素作为“初始像素”。利用区域增长以及相应的迭代算法将流痕包围的腐蚀黑斑提取出来。

4) 利用本文提出的方法对腐蚀图像的各类特征进行分析, 用完整度作为腐蚀程度的判定参数, 其判定结果可直接量化, 相比目视判定更准确。

## 参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T6461-2002 金属基体上金属和其他无机覆盖层经腐蚀试验后的试样和试件的评级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [2] 纪刚, 李红梅, 张伦武. 对镀层材料外观腐蚀特征的识别及分析处理[J]. 表面技术, 2001, 30(1): 21.
- [3] 许述剑, 翁永基, 李相怡. 图像分维对腐蚀坑分布特征的表征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 109.
- [4] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. GJB 150.11A-2009 军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾试验[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- [5] Otsu N. A threshold selection method from a gray level histogram[J]. IEEE Trans. 1979, 9: 62.
- [6] 杨丹, 赵海滨, 龙哲, 等. MATLAB 图像处理实力详解[J]. 北京: 清华大学出版社, 2014.



(上接第 15 页)

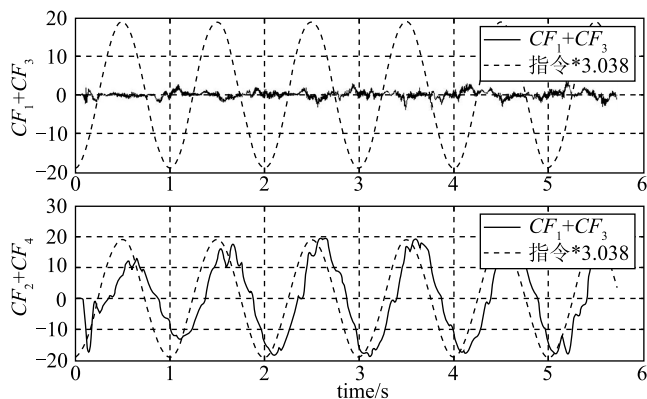


图 5 转台 90°位置, 目标方位 1°, 1 Hz 运动曲线图

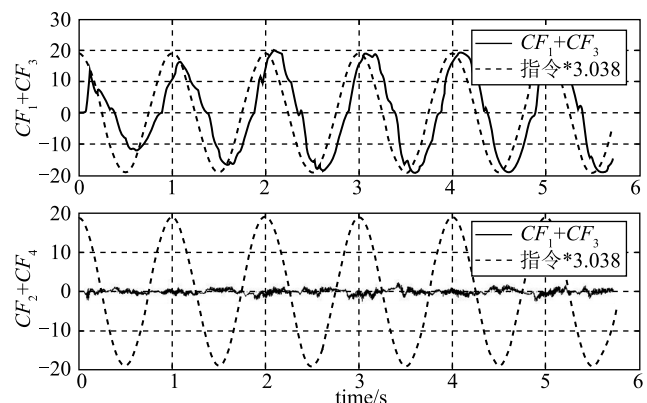


图 6 转台 90°位置, 目标俯仰 1°, 1 Hz 运动曲线图

而目标在俯仰上滞后控制指令约 0.136 s, 相当于俯仰滞后  $360^\circ \times 1 \times 0.136 = 48.9^\circ$ 。

## 4 结论

通过验证得出, 目标模拟器摆镜的驱动能力不足, 在 1 s 中落后控制指令大约  $40^\circ$  左右, 因此需要增强目标模拟器的跟踪能力。厂家根据提出的指标对目标模拟器的 PID 参数进行了调整, 并更换了驱动电机, 由此使得系统的速度和精准度均有显著的提高, 通过工艺产品动态测试直接取得了弹道仿真的高命中率。

本文通过对产品结构原理和测试方法的分析, 建立了比例导引数学模型, 然后用数学仿真的方法, 完成了对目标模拟器摆镜驱动性能的校准验证, 解决了动态测试专用设备驱动能力校准的技术难题, 从而确保了动态测试设备的正常交付使用。

## 参考文献

- [1] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] 冯炳灿, 孔德仁, 商飞. 反射内存网络在实时测控系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, 28(1): 60-62.
- [3] 冯旭哲, 罗飞路, 陈建云, 等. 基于反射内存网络实时测试系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1447-1449.
- [4] 张安民, 徐海, 崔连虎. 导弹半实物仿真实时数据采集系统设计[J]. 计算机仿真, 2011, 19(1): 119-122.