

文章编号 1004-924X(2008)12-2435-06

机载光电成像设备的可测试性系统设计

刘晶红¹, 孙 辉¹, 沈宏海¹, 李 仕^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高机载光电成像系统的可测试性,对该设备进行了全面的可测试性系统设计。可测试性系统由自测试系统、测试信息口、外部测试系统 3 部分组成。采用模糊理论与专家系统相结合的方法,解决了目前产品普遍存在的可测试性设计考虑不足、自动化程度不高、故障诊断不到位等问题。实验显示,可测试性系统设计的设备故障诊断率达 97% 以上,说明在可测试性设计中采用模糊理论与专家系统相结合的方法是行之有效的。

关键词:机载设备;光电成像设备;可测试性;故障诊断

中图分类号:V243.5 **文献标识码:**A

Design of testable system for airborne optoelectronic imaging equipment

LIU Jing-hong¹, SUN Hui¹, SHEN Hong-hai¹, LI Shi^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to improve the testable ability of an aircraft-borne optoelectronic imaging system, the comprehensive testable system design is proposed for equipment fault diagnosis. The testable system is composed of three parts, an automated test system, a testable interface, and an exterior test system. A special method combining the fuzzy theory and the expert system is used to solve the problems universally existed in the present product, such as the consideration insufficiency of testable design, low automaticity, and the incomplete fault diagnosis. The experiment results show that the fault diagnosis ratio of testable system designed in equipments has been improved to 97%. It is implicated that the testable design combining the fuzzy theory with the expert system is effective.

Key words: airborne equipment; optoelectronic imaging equipment; testability; fault diagnosis

1 引 言

机载光电成像设备不同于地面设备,由于飞

机具有一定的风险性,并且近年来机载光电成像设备的复杂程度也越来越高,因此,对它的可靠性、可维性和保障性要求也越来越高,这些即关联到设备另一个重要的性能——可测试性。

可测试性定义为系统或设备能够及时并准确确定其状态(可工作、不可工作或性能降低),并隔离其内部故障的一种设计特性。这个定义强调可测试性是一种设计特性,即可测试性设计(DFT)。在系统研制的不同阶段中应分别实施测试性分析、设计和验证,以保证系统具有所要求的测试性。

可测试性对机载光电成像设备的维护性、可靠性、安全性、战备性和寿命周期费用都有直接和间接的影响。一个可测试性差的产品必然会有未被检测出的故障状态,导致可靠性差,同时也增加其平均修复时间,降低设备的战备完好性和可用性,而修复时间的增加意味着增加维修人力和测试资源的支出,即增加使用和保障费用^[1]。

因此,一个复杂的机载光电成像设备在使用、维护和修理过程中都离不开功能测试和状态监控。但目前产品普遍存在可测试性设计考虑不足、自动化程度不高、故障诊断不到位等问题。为了提高现代机载光电成像系统可测试性,本文采用模糊理论与专家系统相结合的方法,进行机载光电成像设备的可测试性系统设计。

2 核心设计思想

随着模糊控制理论的蓬勃发展,模糊控制思想越来越深地影响着人们的思想,因为“模糊概念”更适合于人们的观察、思维、理解与决策。机载光电成像系统是一个多变量、非线性、时变的复杂系统,要想精确地描述复杂对象与系统的任何物理现象和运动状态,实际上是不可能的,因此要想提高系统可测试性的自动化程度,除用传统的逻辑判断等基本方法外,还需要引入模糊理论与专家系统的设计思想,进一步提高系统可测试性的自动化程度。

2.1 模糊模型

模糊控制理论^[2]中有很多定义,其中最大隶属度原则很适合于复杂系统的故障诊断。

最大隶属度原则:

设 x_1, x_2, \dots, x_m 表示 m 种故障现象变量,它们的取值分别为 X_1, X_2, \dots, X_M (语言值)。

令论域 $X = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_m), x_j \in X_j (j \leq m)\}$,

如果 μ_B 是 X 到 $[0, 1]$ 的映射,即 $\mu_B(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \in [0, 1]$,

称 $\mu_B(x)$ 为 x 相对于模糊集合 B 的隶属程度。设 $B_i \in \mathcal{L}(X) (i \leq n)$, 它可以代表 n 种故障, 如果某个故障表现现象为

$$x_0 = (x_1^0, \dots, x_m^0) \in X, \quad (3)$$

当 $\mu_{B_j}(x_0) = \max_{j \leq n} \mu_{B_j}(x_0)$ 时, 诊断为第 j_0 种故障。这就是最大隶属原则。

有关建立 $\mu_B(x)$ 的方法, 可以是:

假定每个故障现象只取两种状态, 第 i 种故障现象发生, 表示为 $x_i = 1$, 不发生为 $x_i = 0$, 设 $x_0^{(j)} = x_{01}^{(j)}, x_{02}^{(j)}, \dots, x_{0m}^{(j)}$ 是第 j 种故障的典型故障现象, 可建立隶属函数:

$$\mu_{B_j}(x) = \cos(d(x, x_0^{(j)})) \quad (j \leq n), \quad (4)$$

或者

$$\mu_{B_j}(x) = e^{-\alpha_j d(x, x_0^{(j)})} \quad (\alpha_j > 0, j \leq n), \quad (5)$$

显然, $0 \leq \mu_{B_j}(x) \leq 1$, 且 $\mu_{B_j}(x_0^{(j)}) = 1$ 。考虑到不同故障现象在不同故障诊断中的作用, 可取 $\alpha_j = (\alpha_1^{(j)}, \alpha_2^{(j)}, \dots, \alpha_m^{(j)}) (j \leq n)$ 。其中 $\alpha_i^{(j)}$, 表示 x_i 在诊断第 j 种故障时的作用, 且满足条件

$$(1) 0 \leq \alpha_i^{(j)} \leq 1, \quad (6)$$

$$(2) \sum_{i=1}^m \alpha_i^{(j)} = 1 \quad (j \leq n), \quad (7)$$

$$(3) \text{当 } x_0^{(j)} \text{ 中, } x_0^{(j)} = 0, \text{ 取 } \alpha_i^{(j)} = 0. \quad (8)$$

现今

$$\mu_{B_j}(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i^{(j)} x_i, \quad (9)$$

也同样有 $0 \leq \mu_{B_j}(x) \leq 1, \mu_{B_j}(x_0^{(j)}) = 1$ 。

2.2 专家系统^[2-3]

专家系统是一个能在特定领域内, 以人类专家水平去解决该领域困难问题的系统, 由知识库、推理机、自学习机、专家数据库组成, 具有启发性、透明性、灵活性等特点, 它不仅能使用逻辑性知识, 也能使用那些虽然没有严谨的理论依据, 也很难保证在各种情况下的普遍正确性, 但却能在一定的条件下有效地解决问题。

2.3 机载光电成像设备采用模糊专家诊断方法举例

设备不能进行位置锁定, 当角度传感器出现故障时有 4 种故障现象(已在专家库中): $x_1 \sim x_4$ 分别为角度数值不变化、角度信号相位差小于正常范围、角度信号幅度小于正常范围、角度信号电流小于正常值。根据该角度传感器工作原理, 应该有两种故障可能: B_1 : 指示光栅松动, B_2 : 接收管性能变坏。设 B_1, B_2 的典型故障现象为 $x_1^0 =$

(1,1,1,1)与 $x_2^0=(1,0,1,1)$,考虑到不同故障现象在不同故障中的作用,相应的 α 值是:

$$\alpha_1=(0.2,0.6,0.1,0.1), \quad (10)$$

$$\alpha_2=(0.5,0,0.2,0.3). \quad (11)$$

若实际出现的故障现象是

$$x_0=(1,1,0,0), \quad (12)$$

那么可以用最大隶属度原则做出故障诊断:

由式(9)得到:

$$\mu_{B1}(x)=0.2x_1+0.6x_2+0.1x_3+0.1x_4, \quad (13)$$

$$\mu_{B2}(x)=0.5x_1+0.2x_3+0.3x_4. \quad (14)$$

将式(12)带入,故障现象对 B_1 、 B_2 的隶属度分别为:

$$\mu_{B1}(x_0)=0.8, \quad (15)$$

$$\mu_{B2}(x_0)=0.5. \quad (16)$$

按最大隶属度原则,可诊断为 B_1 为指示光栅松动故障。

系统中大多数故障均可以按此方法诊断。

3 系统设计

3.1 设计目标

一个完美的机载光电成像设备的可测试性系统设计应达到以下目标:

- (1) 实时检测系统工作状态;
- (2) 具有安全性;
- (3) 系统具有可持续性工作能力;
- (4) 具有故障记忆性^[1];
- (5) 能够从以往的只能定性测试提高到能够定量测试;
- (6) 能够进行故障隔离和维护帮助指导。

3.2 系统组成

可测试性系统与机载光电成像设备的构成关

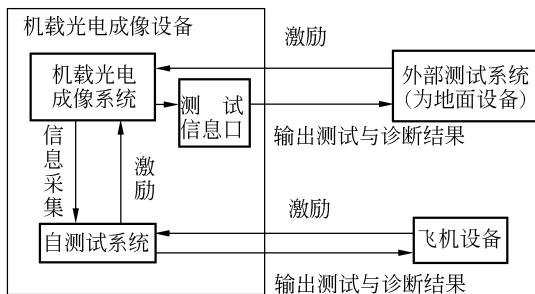


图 1 机载光电成像设备测试系统组成

Fig. 1 Composition of aircraft-borne optoelectronic imaging equipment test system

系如图 1 所示。可测试性系统由自测试系统、测试信息口、外部测试系统 3 部分组成。其中自测试系统、测试信息口与机载光电成像系统组成一个不可分割的系统。自测试系统在设备空中执行任务时起到非常重要的作用^[4]。外部测试系统在物理连接上是一个单独的测试系统,与测试信息口配合用于机载光电成像系统回到地面后对其进行详细测试与诊断。

3.3 系统工作原理

测试系统对被测系统产生激励信号,然后采集被测系统的关键输出信号,正常情况下,被测系统的输出信号都在规定范围或时间内变化,否则测试系统就判断该被测系统出现了故障,并把这一故障以代码的形式存在 RAM 中,同时向飞机设备输出故障状态和告警。由于通过测试性设计对影响系统安全的关键设备和部位进行监控并测试参数,一旦发现故障,可自动切断故障源,防止灾难性故障发生,提高了安全性;也可从存储器中调出应急参数,保证设备继续运转。同时测试系统具有帮助指南数据库,可进行设备维护指导^[5-6]。

自测试系统实时性强,在机载光电成像设备空中执行任务起到非常重要的作用。

外部测试系统因为是地面测试设备,体积重量不受限制,可以做成一个功能强大的测试设备,可对设备进行定量检查^[7]。

3.4 详细设计

根据系统实时性、复杂度、实用性、可靠性等综合因素考虑,在设计时给自测试系统和外部测试系统进行了分工,即设计目标中的(1)~(4)由自测试系统完成,(5)~(6)由外部测试系统完成。

3.4.1 自测试系统设计

实际上自测试系统即为机内测试(BIT),机内测试能力是设备或系统内部所提供的自动检测和隔离故障的综合能力。

有针对性地对通用机载光电成像设备进行机内可测试性设计,通用机载光电成像设备的系统组成如图 2 所示。

为了节约资源,减少系统复杂程度,设计时采用与机载光电成像设备尽可能共享资源的方式,如系统测试与伺服控制单元共用 CPU₁,摄像机测试与镜头控制单元共用 CPU₂,自测试系统组成框图如图 3 所示。

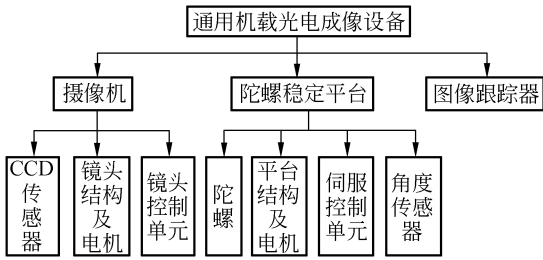


图 2 通用机载光电成像设备系统组成

Fig. 2 Composition of general aircraft-borne optoelectronic imaging equipment system

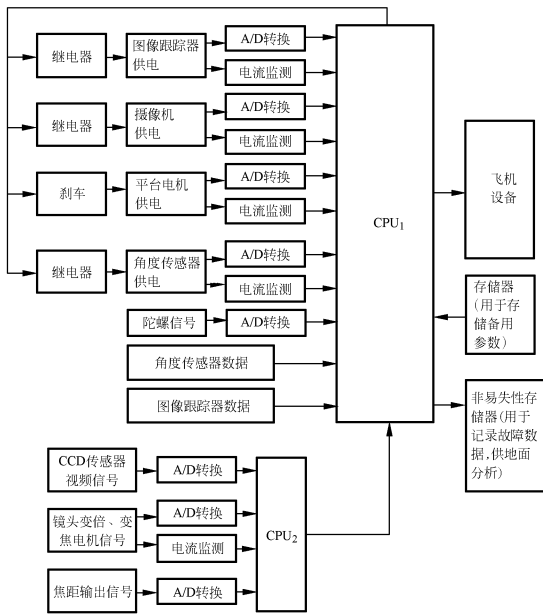


图 3 自测试系统组成框图

Fig. 3 Block diagram of automated test system

CPU₁ 首先监测各分系统的供电情况,通过 A/D 转换监测电源的幅度是否正常,如不正常马上向飞机发出告警信号;同时监测分系统的电流大小,若出现大电流等异常情况马上切断继电器或刹车,保证飞机安全;采集陀螺信号和角度传感器信号,监测系统平稳性,若陀螺信号出现异常可调用存储器的备用参数保持系统工作平稳性;摄像机工作状态可由 CPU₂ 监测,然后将数据通过串口传送给 CPU₁;CPU₁ 可以将故障数据存入非易失性存储器,便于回到地面后详细分析空中出现的故障。最后 CPU₁ 将自测试结果实时传送给飞机设备,供地面指挥中心进行决策参考。

3.4.2 外部测试系统设计

外部测试系统的功能有一部分与自测试系统相同,但却是必要的,因为自测试系统工作正常的前提是 CPU₁ 必须正常工作,若 CPU₁ 出现故障,则自测试系统处于瘫痪状态。而外部测试系统则可以依赖于 CPU₁ 对机载光电成像设备进行全面测试。

外部测试系统的全面测试,依赖于自测试设计时的测试信息口,测试信息口的信息越丰富,对外部测试系统的测试越有利,但考虑到机载设备的多方面因素的限制,测试信息口的信息也不能过细,很多可以靠外部测试系统强大的数据处理能力来代替^[8-9]。

测试信息口送给外部测试设备的信息如图 4 所示。

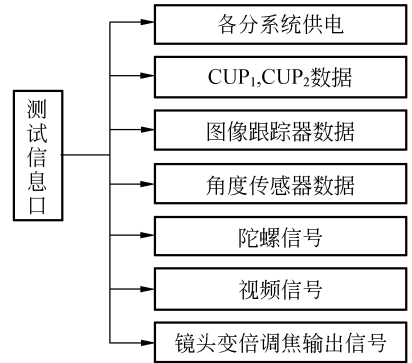


图 4 测试信息口送给外部测试设备的信息

Fig. 4 Information of exterior test facility from test letter interest

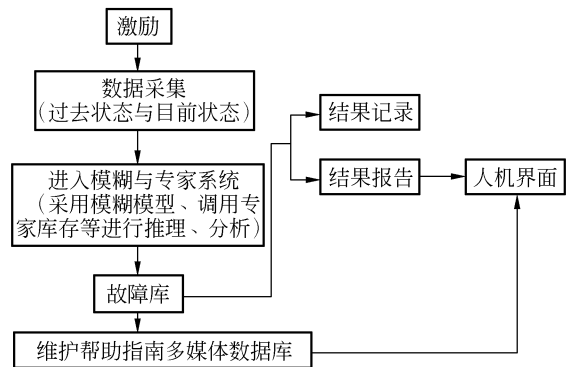


图 5 外部测试设备软件模块划分

Fig. 5 Software module division of exterior test facility

外部测试设备的硬件设计与自测试的设计方法相似,这里不再重述。实际上,外部测试设备大量的工作在于编制强大的模糊专家诊断系统软件,该软件系统具有知识库、专家库、推理机、数据状态库等,并具有人机接口、解释功能和编辑功能,如图 5 所示。

4 系统实验结果

在一个机载光电成像系统项目中采用了上述的可测试性设计,系统的抽样测试结果如表 1 所示。

表 1 机载光电成像系统测试性抽样的测试结果

Tab. 1 Test results of test sampling of aircraft-borne optoelectronic imaging system

序号	故障名称	测试结果	序号	故障名称	测试结果
1	镜头变倍齿轮卡滞	√	19	图像跟踪器字符叠加单元故障	√
2	镜头变倍电机损坏	√	20	图像跟踪器电源供电不正常	√
3	镜头电机驱动单元损坏	√	21	平台上限位信号故障	√
4	镜头变倍左限位信号故障	√	22	平台下限位信号故障	√
5	镜头变倍右限位信号故障	√	23	平台限位信号供电不正常	√
6	镜头焦距输出单元故障	√	24	陀螺故障无输出	√
7	CCD 视频故障	√	25	陀螺漂移指标超标	√
8	摄像机控制电路 CPU ₂ 故障	√	26	陀螺采集单元故障	√
9	摄像机控制电路通讯单元故障	√	27	平台方位电机坏	√
10	摄像机电源供电不正常	√	28	平台俯仰电机性能下降	/
11	角度传感器发光管坏	√	29	平台俯仰电机坏	√
12	角度传感器接收管坏	√	30	平台方位电机驱动单元故障	√
13	角度传感器指示光栅松动	√	31	平台俯仰电机驱动单元故障	√
14	角度传感器信号放大单元故障	√	32	平台伺服处理单元 CPU ₁ 故障	√
15	角度传感器信号采集单元故障	√	33	平台通讯单元故障	√
16	角度传感器电源供电不正常	√	34	平台配重块松动	√
17	图像跟踪器信号处理单元故障	√	35	平台接地线脱落	√
18	图像跟踪器信号通讯单元故障	√	36	系统滤波器失效	√

经过实际检验,基本满足了设计目标,故障诊断率达到了 97% 以上。

该机载光电成像设备的可测试性系统是一个集测试、故障诊断、系统保护、系统维护、系统维修于一体的综合性测试设备,具有如下作用:

(1) 保证机载光电成像设备在空中高可靠性地工作;

(2) 可大幅度缩减复杂系统维护、保障费用,提高现场保障能力。

5 结 论

在进行测试性设计时要综合考虑,因为在系

统内部增加了自测试系统和测试信息口,使系统变得复杂起来,可测试性设计不良会降低设备的完好性,甚至自测试系统本身故障可能会引起整个系统正常工作,因此应权衡利弊,在理论上的可行性和实现过程的复杂性之间进行权衡,拟定一个最佳方案。

测试技术是具有全局性的关键技术,尤其在高科技领域,测试技术具有极其重要地位。特别是机载光电成像设备的研制具有一定的风险性,在机载光电成像系统设计之初就应充分考虑系统的可测试性设计,应象对待可靠性指标那样对待测试性指标的实现,并将可测试性设计从以往的定性要求提高到现在的定量要求。

参考文献:

- [1] 刘晶红. 机载设备工作状态记录仪[J]. 光学精密工程, 2004, 7(5): 89-94.
LIU J H. Airborne equipment duty precis writer instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 7(5): 89-94. (in Chinese)
- [2] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
CHU J. *Fuzzy Control Principle and Application* [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [3] 钟志. 分布式无人机自动检测系统的研究与设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2004.
ZHONG ZH. *Distributional unmanned aerial vehicle automatic detection system's research and design* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [4] 王格芳. 通用雷达装备自动测试系统集成与开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(5): 502-505.
WANG G F. The general purpose radar equipment automation testing system integrated and develops[J]. *Electron Measurement and Instrument Academic Journal*, 2000, 14(5): 502-505. (in Chinese)
- [5] 范跃华, 刘震, 刘白林, 等. 基于层次诊断模型的机电设备故障诊断专家系统[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 14(4): 79-81.
FAN Y H, LIU ZH, LIU B L, *et al.*. Based on gradation diagnosis model of mechanical and electrical equipment [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2004, 14(4): 79-81. (in Chinese)
- [6] 郭桂蓉, 庄钊文. 信息处理中的模糊技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1993: 102-106.
GUO G R, ZHUANG ZH W. *Blurred Technology in Information Processing* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1993: 102-106. (in Chinese)
- [7] 徐章遂, 房立清. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2000: 52-56.
XU ZH S, FANG L Q. *Malfunction Information Diagnose Principle and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 52-56. (in Chinese)
- [8] SPOELDER H J W. Virtual instrumentation and virtual environments[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 1999(9): 14-19.
- [9] CRISTALDI L, FERRERO A, PIURI V. Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: what is really useful, innovative, and technically sound [J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 1999(2): 20-27.

作者简介: 刘晶红(1967—), 女, 吉林长春人, 研究员, 主要从事机载光电成像技术方面的研究。E-mail: liu1577@126.com