**文章编号** 1004-924X(2022)02-0137-06

# 天问一号高分相机多状态可靠性建模方法

王 严,孙天宇,罗佺佺,李 杨,李晓波\*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部,长春130033)

摘要:为了分析天问一号火星高分相机不同状态对性能的影响,最大限度提高使用效率,对高分相机的多状态、状态变化 过程和仿真方法开展研究。首先,分析相机的组成和不同功能单元退化产生的影响。然后,分析相机在轨工作的多状态 变化规律,建立转化过程模型。最后,提出基于多状态的仿真建模方法。案例仿真分析结果表明:考虑调整后实际有效 数据获取概率提高评估准确性,通过敏感度分析也可有效提出调焦单元可靠性要求。多状态分析方法可有效评估火星 相机或其他航天光学载荷可靠性水平,有效指导可靠性要求的制定和工程设计。

**关 键 词:**多状态;退化;可靠性建模;仿真 **中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi**:10.37188/OPE.20223002.0137

## Multi-state reliability modeling method for Tianwen-1 high-resolution camera

WANG Yan, SUN Tianyu, LUO Quanquan, LI Yang, LI Xiaobo\*

(Space Department III, Changchun Institution of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) \* Corresponding author, E-mail: lixiaobo104@163.com

**Abstract**: In order to solve the problems of multi-state impact on camera performance and to maximize efficiency, multi-states and their transition models were investigated. First, the origin of multi-state was identified, and the effect of deterioration of each function unit was analyzed. Then, a model containing multi-state transition was established. Finally, a simulation method is put forward. A brief case study indicated that considering multi-states would improve the accuracy and reliability of prediction, and that sensitivity analysis will help in balancing the system reliability requirement and system reliability. The multi-state reliability simulation method can be a more accurate method for predicting the reliability of space cameras and provides a practicable engineering solution.

Key words: mutil-state; degradation; relialibity modeling; simulation

1引言

工程任务中常用"完好"和"故障"两种状态

来衡量产品。对于光学载荷,上述两种状态只能 考量产品能否实现数据采集,却无法表征数据的 质量。在实际的应用过程中,虽然光学载荷正常

**收稿日期:**2020-09-25;修订日期:2020-11-19. **基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 61805001) 进行拍摄,但下行图像中总会出现图像离焦模 糊、大量云雾遮挡等情况。光学载荷产生这些 "劣质图像"的原因有很多,如相机本身的结构适 应性、平台的测定轨精度和稳定性、成像参数正 确性、拍摄场景的未知性等。

上述问题在近地探测任务中,由于平台测定 轨道精度高,数据下行能力强,资源充沛,目标明 确以及地面后期处理手段使其并不突出。然而 对于火星探测而言,探测未知性强,测轨精度低、 拍摄调价变化大,使得"劣质图像"增加;又由于 地火距离远,通讯时间长,数传能力弱,传回的数 据可能为无效数据,使得本就紧张的带宽资源被 浪费。因此,对火星高分相机开展更为细致准确 的多状态可靠性建模的需求更为迫切。

目前针对载荷可靠性研究还局限于传统方 法,在文献[1]中使用传统方法对航天相机进行 了建模和故障树分析,但是没有考虑相机多状态 的变化过程;在文献[2]中利用故障树的方式对 航空相机进行分析,未考虑相机自调节机构带来 的多状态影响,并且计算复杂只适用于简单情 况;在文献[3-6]中使用多状态解析的分析方法 解决了相关产品的多状态问题;文献[7]针对空 间相机多状态开展研究,但未清晰界定状态的边 界。本文在此基础上,针对火星高分相机,提出 一种基于蒙特卡洛仿真方法开展多状态可靠性 分析和预计方法,为工程使用开辟一条可行 途径。

## 2 相机多状态建模

#### 2.1 相机组成

火星高分相机由六个功能单元组成,如图1 所示。光机结构形成光路,为相机各单元提供支 撑;主控单元进行电源转换,执行与外部、内部的 通讯功能;成像单元把光信号转化为电信号并进 行处理;存储单元对图像数据进行存储并择机下 传;热控单元根据工作环境的变化控制各组部件 温度水平;调焦单元通过运动机构对焦距进行 调整。

各组成单元均可能发生不同程度的降级,并 对系统的性能产生影响。光机结构在振动、冲



图1 火星高分相机构成示意图



击、高低温下可能发生变形,从而可能产生离焦、 畸变。主控单元器件的性能退化可能导致供电 电压不稳,通讯异常信号增多;成像单元器件退 化可导致图像坏点增多,对比度下降;热控单元 退化可导致温度控制差,结构变形,图像数据畸 变;存储单元退化导致存储数据错误或丢失;调 焦单元退化则导致调焦定位不准。系统的性能 是各功能单元性能的有机结合,即使部分系统产 生一定的退化,也可通过系统的调整和容错能力 使整机的性能保持不变。

#### 2.2 多状态分析

火星高分相机在轨的多状态有两方面原因, 一方面是工作期间受到交变温度、拍摄条件等因 素影响成像;另一方面是则由于组件自身的退 化。两相结合就可能出现多种故障模式,如通讯 失灵、图形模糊、图像坏像元增加、图像畸变变暗 等。这些故障状态中有些是在轨无法恢复,直接 导致任务失败的;有些可以通过功能单元的局部 调整或设置参数调整,使相机整体性能恢复到正 常拍摄状态;有些虽然无法恢复但并不影响任务 执行。如果从系统表现的角度来对这些状态进 行定义的话,可以分为四种状态,参见表1。

(1)状态0:完美工作状态;

(2)状态1:性能下降,调整后可恢复至 状态0;

(3)状态2:性能下降,不可恢复,仍可执行 任务;

(4)状态3:系统失效无法执行任务。

在传统的预计过程中,仅关注状态0(完美状态),使预计可靠度指标偏低。并且由于对调整

Tab. 1 States of camera				
类型	状态描述	常见故障模式		
0	图像质量复核要求,各项指标在公差范围内			
1	性能下降,调整后可恢复性能	离焦、拍摄参数错误		
2	性能下降,不可恢复,仍可执行任务	部分探测器损坏,坏点增加		
3	系统失效无法执行任务	结构损坏、关键器件失效(如通讯FPGA)		

表1 相机状态表

单元可恢复系统的程度缺乏评估,无法合理的确 定调整单元的可靠性要求,开展该状态的定量评 估可以解决该问题,为调整功能单元效费比的工 程评估提供一条可行途径。

#### 2.3 状态转移过程

在不具备调整单元的相机系统中,状态都是 从正常到退化,退化到故障,如图2所示过程为:

- (1)状态0到状态1;
- (2)状态1到状态2;
- (3)状态2到状态3;
- (4)状态0到状态3;
- (5)状态1到状态3;
- (6)状态2到状态3。

当产品具有了状态识别和调整功能后,在特 定情况下可以在既定状态间进行逆变换,即从1 状态变为0状态。



图 2 状态转移示意图 Fig. 2 Schematic of state transition

## 2.4 退化模拟方法

产品在使用过程中必然经历由正常到退化, 再到失效的过程,其中退化和失效是人为对产品 内在变化过程的一个界定和划分,一般通过对关 键参数设定阈值来进行判断。这就使得故障的 阈值与完全失去功能或在物理化学形态上发生 变化仍存在一段区域,在这段区域内,产品虽然 可实现功能,但在性能上会出现下降,如图3 所示。



图 3 退化区域的界定 Fig. 3 Degradation zone definition

通过图3所示的两个阈值,可以定义出退化 区,但在真实产品中,失效阈值的定义与调整单 元的调整能力是直接相关的。

## 3 仿真模型

## 3.1 仿真假设

为了简化仿真过程,进行如下假设:

(1)产品各单元的退化和故障的分布均服从 指数分布;

(2)各单元相互独立,不会发生关联故障;

(3)各单元可同时发生故障;

(4)状态参数的随机生成数不大于失效阈值 时,可实现调整恢复功能。

#### 3.2 仿真流程

仿真流程如图4所示,图中编号与说明一致, 具体步骤说明如下:

(1)初始化,完成对系统的功能逻辑关系分析,确定系统的基本单元个数,同时确定底事件和顶事件关系,确定系统的结构函数。确定仿真初始参数,制定仿真引擎。确定仿真策略、确定仿真时钟驱动机制、确定最大仿真次数、确定仿

真步长、确定仿真时钟初始值。



图 4 仿真流程图 Fig. 4 Simulation flow path

(2)累加仿真时间;

(3)生成ti时刻的各单元状态随机数,形成
 状态随机数矩阵,ξ<sub>n</sub>为故障状态随机数,ξ<sub>n</sub>为退
 化状态随机数矩阵;

(4)通过状态随机数和当前的仿真时间比 对,从而判断出单元当前的状态,形成状态矩阵;

(5)根据状态矩阵判定系统的当前状态;

(6) 判定系统是否符合自调整逻辑;

(7)判定调整系统是否完好,依据调整成功 概率生产随机数,判定是否调整成功;

(8)统计调整过后的系统状态;

(9)多次仿真取状态的均值,累积不同时间 内的状态;

(10)完成累加时间,结束仿真。

## 4 案例分析

针对火星高分相机数据通过适当简化处理 后进行案例分析。调焦单元在光机结构出现问 题时可进行调整。根据调整单元能力,判定退化 的失效阈值为0.8倍的故障阈值,其余参数 见表2。

衣 2 甲兀 可
----------

Tab. 2 Units reliability parameters		
系统	MTBF/h	状态
主控单元	$1 \times 10^{6}$	0,2,3
存储单元	$1.3 \times 10^{6}$	0,2,3
热控单元	$1 \times 10^{7}$	0,1,2,3
成像单元	$0.8 \times 10^{6}$	0,1,2,3
光机结构	$1.2 \times 10^{6}$	0,1,2,3
调焦单元	$0.5 \times 10^{6}$	0,2,3

根据上述输入,调整系统工作时间1至9年, 从而得到不同工作时间的各状态发生概率如图5 所示,随着时间的增加,系统处于正常状态的概 率降低,而处于退化和失效状态的概率逐渐 升高。

为了分析系统可靠度对调焦单元失效率的





敏感性,对调焦单元的故障率从0.1×10<sup>-6</sup> h<sup>-1</sup>到 0.9×10<sup>-6</sup> h<sup>-1</sup>进行调整,步进距为0.1×10<sup>-6</sup> h<sup>-1</sup>,工作时间为1年至9年,同时加入无调焦单 元的情况(即令其失效率为正无穷),得到如图6 所示的分析结果。从图中可以看出,随着调焦 单元失效率的降低,系统的可靠度得到了 提升。



其中取调焦单元失效率为0.5×10<sup>-6</sup> h<sup>-1</sup>与 无调焦两种情况进行对比分析,各时间点上的 可靠度之差如图7所示。调焦单元的存在将系 统可靠度平均提高12%,较大幅度的提高了系 统的可靠度。在初始时系统处于正常状态的概 率较高;随着时间的增加,退化逐渐发生,由于 调焦单元的存在,对系统可靠度的提升逐渐增 加;到寿命末期,随着其他单元退化的加剧,调 焦单元对其不产生作用,同时调焦单元也开始 发生退化失效,所以对系统可靠度性能提升逐

## 参考文献:

- [1] 王冶. 一种相机载荷可靠性建模方法[J]. 信息与 电脑(理论版), 2012(24): 147-148.
  WANG Y. A reliability modeling method for camera load [J]. *China Computer & Communication*, 2012(24): 147-148. (in Chinese)
- [2] 曾照洋,任占勇.基于多状态的系统可靠性预计
   [J]. 航空标准化与质量,2008(2):43-46.
   ZENG Z Y, REN Z Y. System reliability prediction

渐开始下降,仿真结果符合航天相机客观变化 规律。



#### 5 结 论

航天相机在使用过程中会出现多种状态,并 且随着工作时间的增加,退化状态发生概率逐渐 增加,从而对图像质量产生影响,通过调焦机构 可以在一定范围内对退化过程进行调整。本文 构建了航天相机多状态分析的仿真方法,可根据 各单元的特点进行调焦单元可靠性参数确定的 分析和优化,为工程分析和应用提供了一条可行 的途径。

但目前航天相机退化数据收集较少,在今后 的使用和维护过程中注意对数据的收集将会其 退化过程的分析和建模起到重要作用。

> based on multi-state [J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2008(2): 43-46. (in Chinese)

- [3] BARLOW R E, WU A S. Coherent systems with multi-state components [J]. Mathematics of Operations Research, 1978, 3(4): 275-281.
- [4] LEVITIN G, LISNIANSKI A. Structure optimization of multi-state system with two failure modes
   [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 72(1): 75-89.

- [5] 张际良.多状态系统的性能可靠性[J].自动化学报,1996,22(2):246-250.
  ZHANG J L. Performance reliability of multistate system[J]. Acta Automatica Sinica, 1996, 22(2):246-250. (in Chinese)
- [6] EL-NEWEIHI E, PROSCHAN F, SETHURA MAN J. Multistate coherent systems [J]. Journal

#### 作者简介:



王 严(1985-),男,吉林长春人,硕 士,助理研究员,2012年于北京航空航 天大学获得硕士学位,主要从事产品 可靠性研究。E-mail: wangyan@ciomp.ac.cn of Applied Probability, 1978, 15(4): 675-688.

[7] WANG Y, YU P, QI X D, et al. Multi-state reliability modeling and simulation of system with selfadjusting function[C]. 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). August 6-8, 2014, Guangzhou, China. IEEE, 2014: 518-521.

#### 通讯作者:



**李晓波**(1987-),男,陕西宝鸡人,硕 士,助理研究员,2014年于西北工业大 学获得硕士学位,主要从事光机系统 集成仿真与优化方面的研究。Email; lixiaobo104@163.com

142