2024 年 第 24 卷 第 20 期
2024, 24(20):08398-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2302359
引用格式:杨恒辉, 常博博, 黄新阳, 等. 航空复杂装备测试目标设计方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8398-8402.
Yang Henghui, Chang Bobo, Huang Xinyang, et al. Test object design method for aviation complex equipment[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8398-8402.

自然科学总论

航空复杂装备测试目标设计方法

杨恒辉, 常博博, 黄新阳, 林清
(西安航空计算技术研究所, 西安 710065)

摘 要 为了保证航空装备的可靠性、安全性,提升系统的测试、维修与保障能力,对系统测试性提出了更高的需求。通过系统测试性问题分析,综合考虑系统功能重要度、失效率、故障风险影响、可测试性等要素,建立系统测试性目标函数模型;研究基于功能重要度分析、功能失效风险与失效率分析、故障树分析和可测试性技术在复杂系统测试性目标确定中的方法应用。通过航空辅助动力装置控制系统测试性目标选取表明,所提出的方法可以实现动力控制系统中的功能重要度与风险项分析,并且能够指导开展高风险项的测试性设计。

关键词 测试性对象; 重要度; 故障模式影响分析(FMEA); 故障树
中图法分类号 N945.23; **文献标志码** A

Test Object Design Method for Aviation Complex Equipment

YANG Heng-hui, CHANG Bo-bo, HUANG Xin-yang, LIN Qing
(Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China)

[**Abstract**] In order to ensure the reliability and safety of aviation equipment and improve the testing, maintenance and support capabilities of the system, higher requirements were proposed for system testability. The testability objective function model of the system was established by analyzing the testability problem of the system, considering the system function importance, failure rate, failure risk effect, testability and other factors. The application of functional importance analysis, functional failure risk and failure rate analysis, fault tree analysis and testability technology in the determination of testability targets for complex systems was studied. Through the analysis and calculation of testability target selection in auxiliary power unit(APU) control system, it is show that the proposed method can realize the analysis of functional importance and risk items in the power control system, and can guide the testability design of high risk items.

[**Keywords**] testability object; importance degree; failure mode and effects analysis(FMEA); fault tree

系统的测试性是准确识别系统故障,并能够准确完成故障定位,为系统的运行维护提供可靠数据支持,提升系统的维修能力[1-2]。随着航空装备功能性能的不断提升,系统的复杂度越来越高;同时,随着电子计算机、机电技术的快速发展,相对于传统的机械液压系统,系统综合了计算机技术、机械电子技术、自动控制技术、传感技术等,系统的功能性能快速提升的同时,系统的故障模式相较于传统的机械液压更加多样复杂,这也对系统的测试性设计技术提出了更高的要求。

20 世纪 70 年代,Liour F 提出了测试性概念后,测试性技术受到高度重视并快速发展,从早期的基于经验的可测试性设计发展到具有丰富理论与技术基础的设计,如基于故障物理的模拟电路测试性分析[3]、多信号流图模型、混合诊断模型等[4]。中国学者在测试性技术上开展大量研究,取得了大量成果。丁善婷等[5]采用马尔可夫过程融合贝叶斯网络的测试性优化建模方法,充分考虑了设备退化过程。王鹏等[6]利用基于结构和功能的多状态系统测试建模与测试点选取方法解决测试性设计过程中的退化状态测试问题。姜晨等[7]提出层次化测试性建模方法,通过对复杂系统层次划分,建立起包含全部测试属性的多层次测试性有向图模型,修正故障概率,更准确地将故障定位到满足当前机

收稿日期: 2023-04-02 **修订日期**: 2024-04-12
基金项目: 工信部民机专项航空科学基金(M-2017-D-28)
第一作者: 杨恒辉(1982—),男,汉族,陕西西安人,硕士,研究员。研究方向:航空动力系统控制与仿真。E-mail:85988746@qq.com。

载设备维修精度的层级。郭丹等[8]开展了基于系统工程的装备测试性基本流程研究,重点研究装备研制各阶段测试性确认与验证方法。综上可知,前人研究多集中在新方法在系统测试性建模、系统故障模式的多态分析、测试性的验证与确认技术,对于复杂系统测试性设计中测试目标的确定鲜有系统性的研究。

由于系统功能、架构复杂度不断提升,系统测试性设计的关键就是如何快速、有效地选取确定测试目标。鉴于此,对系统测试性问题开展建模描述,通过系统功能重要度分析技术、可靠性技术确定系统中测试对象的选取,可为负载系统测试性设计与验证提供基础。

1　测试性问题描述

将一个系统的测试问题描述为一个 6 元组 $<F_U, F, I, F_T, R, T>$,其中,$F_U=\{F_{U1}, F_{U2}, \cdots, F_{Un}\}$ 为系统功能状态集合,指系统的功能集合组。$I=\{i_1, i_2, \cdots, i_n\}$ 为系统第 F_{Ui} 个功能的重要度,定义 $0<i_n\leqslant 1$,系统中不存在没有价值的功能;$i_n>0$;定义为系统的存在而赋予的功能是系统中的核心功能,其重要度为 1。$F=\{f_1, f_2, \cdots, f_n\}$ 为装备的故障状态集,装备的同一功能在同一时刻最多只有一个故障发生,f_i 表示仅有第 i 个功能失效时的故障状态,由 0 和 1 表示,其中 1 表示故障,0 表示无故障。$F_T=\{P(f_1), P(f_2), \cdots, P(f_n)\}$ 表示第 i 个功能失效概率,$0<P(f_n)<1$,$\sum_{i=1}^{n}p(f_n)=1$。$R=\{R_1, R_2, \cdots, R_n\}$ 为风险影响系数,对系统故障模式风险定义影响系数,取值在[0, 1.0],风险影响越大,系数越大。一般,一类故障定义为发生将导致系统完全失效,因此,定义一类故障影响系数取值为 1.0。$\boldsymbol{T}=[t_1, t_2, \cdots, t_n]$ 为故障的可测试性矩阵,指该故障模式是否具备开展测试性设计;功能单元故障可测试,需要功能单元输入信号可控,输出信号可观测。其中,$t_i=1$ 表示该故障模式可测试;$t_i=0$ 表示该故障模式不可测试。

系统中每一个功能的测试性目标函数可定义为

$$h_i=i_iP(f_i)R_it_i \tag{1}$$

测试性设计的目标是以最小的成本,实现系统功能故障的准确测试,既满足优化目标函数:

$$D=\min\left\{\sum_{i=1}^{n}h_i\sum_{i=1}^{n}c_i\right\} \tag{2}$$

式(2)中:D 为系统测试最优费效;c_i 为第 i 个功能的测试成本。

系统测试性目标设计的总体思路如图 1 所示。

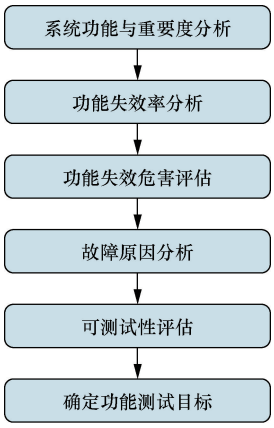

图 1　测试性目标设计流程

Fig. 1　Design process of testability objective

2　功能重要度分析

任何层级的系统设计都是围绕系统的功能需求开展设计。通过功能需求重要度分析,对系统功能重要度进行分级,作为测试性设计的目标来源的重要依据。

产品设计中首先要通过系统需求分析获得用户需要,关键是确定用户对系统任务关注的重点。

Kano 模型通过对系统功能需求的分类和识别,确定影响用户满意度的关键因素,并需求进行区别处理,提升需求捕获的准确性。根据卡诺模型理论,系统的需求可分为:必备型需求(M)、期望型需求(O)、魅力型需求(A)、无差异型需求(I)和反向型需求(R)[9],如图 2 所示。

Better-Worse 指数可定量评价在提供某种需求时用户满意度系数和不提供某种需求时用户的不满意系数。采用 Better-Worse 指数计算系统各需求满意与不满意系数,具体公式为

$$B_{e_i}=\frac{A_i+O_i}{A_i+O_i+M_i+I_i} \tag{3}$$

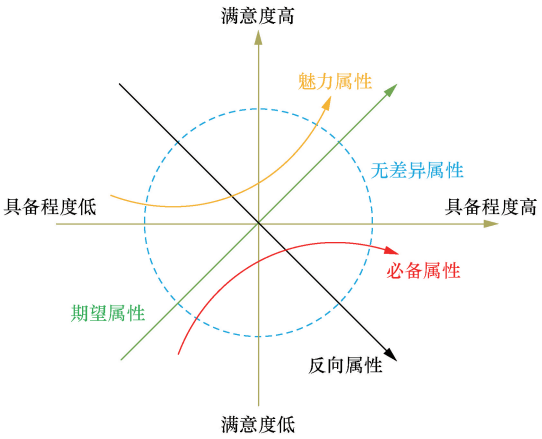

图 2　卡诺模型

Fig. 2　Kano model

$$W_{o_i} = -\frac{M_i + O_i}{A_i + O_i + M_i + I_i} \tag{4}$$

式中:B_{e_i}为第 i 项需求满意系数;W_{o_i}为第 i 项需求不满意系数;A_i为第 i 项魅力需求;O_i为第 i 项期望需求;M_i为第 i 项必备需求;I_i为第 i 项无差异需求。

综合考虑 Kano 模型的动态性和需求对客满意度影响的不一致性,需对顾客需求基本重要度进行调整。对 Better-Worse 指数的需求评估结果运用质量功能展开(quality function deployment,QFD)-中需求重要度调整计算方法进行优化调整,保证需求重要度更符合使用者的目标,计算函数为

$$I_R = I_{R_0}^{\frac{1}{k}} \tag{5}$$

式(5)中:I_R 为需求重要度改进调整系数;k 为 Kano 因子;I_{R_0}为需求重要度初始调整系数,$I_{R_0} = \frac{C_{S1}}{C_{S0}}$,其中,$C_{S1}$为需求重要度目标值,$C_{S0}$为重要度当前值可通过数据调查分析获取。

Kano 因子的取值可根据需求分类特征估计得到,如取值 2、1、0.5 分别为魅力需求、期望需求、基本需求的 Kano 因子取值[10]。

$$\omega_i' = \mathrm{Max}\left[\frac{B_{e_i}}{\sum_{i=1}^{n} B_{e_i}}, \left|\frac{W_{o_i}}{\sum_{i=1}^{n} W_{o_i}}\right|\right] \tag{6}$$

$$\omega_i = \omega_i' I_{R_i} \tag{7}$$

式中:Max 表示取最大值;ω_i'为第 i 个功能初始重要度;ω_i 为第 i 个调整后的功能重要度;I_{R_i}为第 i 项需求重要度调整系数。

3 失效率与风险影响系数分析

3.1 失效概率分析

可靠性预计是为了估计产品在给定的工作条件下的可靠性而进行的工作,它运用以往的工程经验、故障数据,结合当前的技术水平,以元器件、零部件的失效率作为依据,预计产品(元器件、零部件、子系统或系统)实际可能达到的可靠度。因此,可将可靠性预计数据作为测试性对象设计依据。

产品的故障率是产品可靠性的一种基本参数,其表示在规定的条件下和规定的时间内,产品故障总数与寿命单位总数之比[11],产品的失效概率密度函数 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{E[N(t+\Delta t) - N(t)]}{\Delta t} \tag{8}$$

式(8)中:$N(t)$为[0, t]时刻内 N 个产品失效的函数;$E(\,)$为产品在 Δt 时间内发生失效的平均数。

设产品寿命服从指数分布,则产品概率密度函数可表示为

$$f(t) = \lambda \mathrm{e}^{-\lambda t}, \quad t \geqslant 0 \tag{9}$$

式(9)中:λ 为失效率;t 为产品运行时间。

产品在时间区间(0, t]内无故障,在(t, $t+\Delta t$)内出现失效的条件概率与时间之比定义为产品的失效率 $\lambda(t)$,可表示为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t \mid T > t)}{\Delta t} \tag{10}$$

式(10)中:$P(\cdot)$为产品的失效概率;T 为首次失效时间。

产品在时间区间(0, t]内未失效的概率为 $R(t)$,则在(t, $t+\Delta t$)内出现失效的概率为

$$R(t) - R(t+\Delta t) = -R'(t)\Delta t \tag{11}$$

式(11)中:$R'(t)$ 为产品发生失效的概率。

条件概率为

$$P(t < T < t + \Delta t \mid T > t) = \frac{-R'(t)\Delta t}{R(t)} \tag{12}$$

由式(10)得

$$\lambda(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} \tag{13}$$

当系统服从指数分布时,系统可靠度函数 $R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}$,则有

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\mathrm{e}^{-\lambda t}}{\mathrm{e}^{-\lambda t}} = \lambda \tag{14}$$

指数分布产品的失效率为常数 λ。电子产品和机电产品的寿命一般服从指数分布。

目前,电子产品常用的可靠性预计方法为应力分析法,应力分析法计算公式为

$$\lambda_p = \lambda_b(\pi_E \pi_Q \pi_c \cdots) \tag{15}$$

式(15)中:λ_p为元器件使用失效率;λ_b为元器件基本失效率;π_E为环境系数;π_Q为质量系数;π_c为电流额定系数,不同元器件的 π 系数略有不同。

应力分析法中的各项系数可通过标准查表获取,如《美国军用电子设备可靠性预计手册》(MIL-HDBK-217)、《电子设备可靠性预计程序》(Bellcore/Telcordia (SR-332)、《机械产品可靠性预计手册》(NSWC-98/LE1)、《国产军用电子设备可靠性预计手册》(GJB/Z-299C)。

3.2 风险影响分析

针对重要度高的功能开展故障模式影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)分析,确定功能失效的故障模式,并对故障模式开展风险影响分析。

FMEA 是在产品设计阶段和过程设计阶段,对构成产品的子系统、零件,对构成过程的各个工序逐一进行分析,找出所有潜在的失效模式,并分析其可能的后果,从而预先采取必要的措施,以提高

产品的质量和可靠性的一种系统化的活动。通过FMEA分析方法可以确定系统的故障模式,并对故障模式的风险等级进行评定。

产品在运行中各个时刻的故障状态f_i所产生的后果严重程度划分为高风险状态、中风险状态、低风险状态和正常状态[12],具体如下。

(1)正常状态。系统运行状态都正常,不会对系统功能性能产生影响。

(2)低风险状态。系统运行中系统中的部件故障导致系统风险状态发生变化,但该故障不影响或轻微影响系统的功能性能。

(3)中风险状态,系统运行中的部件故障导致系统功能性能出现较大降低。

(4)高风险状态。系统运行中的部件故障,导致系统功能性能较中风险状态进一步降低,造成系统失控或性能严重退化。

定义系统故障风险为各种可能状态下的平均损失,可表示为

$$r = \sum_{e} L(e)P(e) \tag{16}$$

式(16)中:r为故障风险值;L为状态e对应故障风险损失;$P(e)$为系统处于某一状态e下的概率。

故障风险损失根据系统功能损失状态进行评估,一般正常状态$L=0$;低风险状态L取值在(0, 0.4];中等风险状态L取值在(0.4, 0.8];高风险状态L取值在(0.8, 1.0]。

4　故障原因与可测试性分析

4.1　故障原因分析

故障树分析是一种自顶向下的分析方法,故障树分析具有形象直观、灵活多用、逻辑性强等特点,在航空、航天等领域广泛应用[13]。在测试性设计中,系统的故障模式可以通过经验数据获取,但故障模式一般不是单一故障的结果,而是多种故障的综合结果,因此需确定导致故障模式的所有故障原因,对故障原因进行分析,对失效率超出设定阈值的对象开展测试性设计。

系统中各底事件相互独立,X_i为底事件的状态变量,T'为顶事件的状态变量。故障树顶事件由底事件最小割集确定,底事件最小割集多采用上行法和下行法确定[14]。若故障树由k个最小割集S_k,则顶事件T'发生的概率$P(T')$为

$$P(T') = P(S_1 \cup S_2 \cup \cdots \cup S_k) \tag{17}$$

采用故障树方法,以系统故障模式为顶事件开展分析,确定导致顶事件发生的所有底事件与最小割集,以可靠性预计数据为基础,对各底事件开展分析,确定各底事件失效概率。

4.2　可测试性分析

在产品的测试性设计中,受系统复杂性、产品工艺技术水平、空间结构、质量、成本等约束,无法做到无限制设计。因此,应充分考虑系统对象的可测试性与设计约束。可测试性分析以系统测试对象为目标,对系统进行分割,分割按照相关性最小原则和直接激励性原则开展。

最小相关性使测试对象相互独立,与各模块、组件之间的相互作用最小,减小被测试模块、单元与其他单元的干扰。直接激励性保证被测对象能够直接响应激励,保证测试路径的最短化,降低测试激励控制的复杂度,并能够在分割模块的边界观察到激励响应。当系统任意层级的组件无法激励或激励后无法观测时,该组件无法开展测试性设计,或者测试性成本高。

5　实例分析

辅助动力装置作为一种小型燃气涡轮轴发动机,其功能需求纷繁负载,且具有其个性需求。通过对多种架构辅助动力的功能需求分析,选取典型的功能需求,如表1所示。根据系统调研和专家评估数据,各功能重要度如表2所示。

根据功能重要度分析,恒转速控制、引气控制、停车控制等功能的重要度高。根据系统可靠性预计数据与FMEA分析,确定系统各功能失效风险等

表1　辅助动力系统功能

Table 1　Auxiliary power system functions

序号	功能需求	序号	功能需求
X_1	起动加速控制	X_7	超转保护控制
X_2	恒转速控制	X_8	超温保护控制
X_3	引气控制	X_9	掉电热启动控制
X_4	防喘控制	X_{10}	APU振动监测
X_5	停车控制	X_{11}	数据通信
X_6	进气门控制	X_{12}	数据存储

表2　功能重要度

Table 2　Functional importance

需求编号	Better系数B_{e_i}	Worse系数W_{o_i}	重要度ω_i
X_1	0.054 43	-0.107 15	0.123 94
X_2	0.108 85	-0.111 62	0.131 87
X_3	0.113 80	-0.093 76	0.126 98
X_4	0.079 17	-0.104 92	0.124 56
X_5	0.034 63	-0.111 62	0.126 32
X_6	0.079 17	-0.095 99	0.110 97
X_7	0.121 22	-0.094 87	0.121 22
X_8	0.076 69	-0.100 45	0.108 40
X_9	0.054 43	-0.029 02	0.065 29
X_{10}	0.114 34	-0.035 64	0.080 85
X_{11}	0.079 17	-0.078 13	0.095 37
X_{12}	0.084 11	-0.036 83	0.084 35

级,开展系统不同运行时间下的风险分析。表 3 为系统运行 1 000 h 时各功能的故障风险。

随着时间的增加,故障功能故障风险快速增加,因此需重点对风险高的功能故障开展测试性设计。以引气功能丧失为顶事件开展故障树分析,导致顶事件发生的底事件主要包括:引气电磁阀驱动故障,引气电磁阀故障。因此,在设计中应重点开展引气阀驱动接口开路与短路故障检测设计;针对引气阀增加引气阀打开和关闭位置检测设计,位置检测可通过限位微动开关实现,系统工作前可控制引气阀打开,检测位置开关状态,均具备可激励与可观测能力。上述分析结果与工程实际开展对比验证,测试目标的选取正确可靠,能够满足工程需求。

表 3 系统功能风险

Table 3 System function risks

需求编号	1 000 h 时各功能的故障风险	需求编号	1 000 h 时各功能的故障风险
X_1	0.239 0	X_7	0.137 4
X_2	0.169 8	X_8	0.081 7
X_3	0.138 6	X_9	0.011 7
X_4	0.096 7	X_{10}	0.021 5
X_5	0.216 7	X_{11}	0.037 9
X_6	0.092 6	X_{12}	0.025 3

6 结论

随着系统复杂度不断增加,安全性与维护保障需求不断提升,测试性设计已成为系统设计的关键环节。所提出的复杂系统测试性设计方法,重视工程实用性与有效性,从系统功能重要度出发,综合考虑失效风险影响、故障原因分析和可测试性等因素,较为客观的为系统测试性对象的确定提供了设计依据,具有较强的工程指导意义。

参 考 文 献

[1] 田华明, 孙华, 赵宏佳. 复杂电子系统的 TEAMS 测试性研究[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 72-76.
Tian Huaming, Sun Hua, Zhao Hongjia. Study on TEAMS test ability of complex electronic systems[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(9): 72-76.

[2] 曾亮亮, 朱江雷, 吕欣. 机载系统测试性设计体系研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 591-602.
Zeng Liangliang, Zhu Jianglei, Lü Xin. Research on the testability design system of airborne system[J]. Advances in Aeronauticsal Science and Engineering, 2020, 11(4): 591-602.

[3] 李睿峰, 李文海, 唐小峰, 等. 基于故障物理注入的模拟电路测试性分析方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(1): 43-48.
Li Ruifeng, Li Wenhai, Tang Xiaofeng, et al. Testability analysis method of analog circuit based on physical injection[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 43-48.

[4] 谢皓宇, 杨鹏, 张勇, 等. 考虑集成故障与单元互测的系统级测试性分配与设计[J]. 测控技术, 2020, 39(3): 13-17.
Xie Haoyu, Yang Peng, Zhang Yong, et al. System-level testability allocation and dedign considering integration fault and unit mutual test[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(3): 13-17.

[5] 丁善婷, 蔡胜玲, 谭梦颖, 等. 马尔可夫过程融合贝叶斯网络的测试性建模研究[J/OL]. (2023-02-21)[2023-03-25]. https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230092.
Ding Shanting, Cai Shengling, Tan Mengying, et al. A testability modeling study of Markov process incorporating Bayesian network [J/OL]. (2023-02-21)[2023-03-25]. https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230092.

[6] 王鹏, 于永利, 李星新, 等. 多状态系统测试建模与测试点选取方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(6): 54-62.
Wang Peng, Yu Yongli, Li Xingxin, et al. Multi-state system test modeling and test point selection method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(6): 54-62.

[7] 姜晨, 宋帆. 机载装备测试性模型设计与优化[J]. 测控技术, 2019, 38(12): 77-82.
Jiang Chen, Song Fan. Design and optimization of testability model for airborne equipment[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(12): 77-82.

[8] 郭丹, 秦思渊, 韩超. 基于系统工程的装备测试性设计确认验证方法[C]//第 17 届中国航空测控技术年会论文集. 北京:中国航空学会测试技术分会, 2020: 438-442.
Guo Dan, Qin Siyuan, Han Chao. A method for confirming and verifying equipment testability design based on systems engineering [C]//Proceedings of the 17th China Aviation Measurement and Control Technology Annual Conference Beijing: Testing Technology Branch of the Aviation Society of China, 2020: 438-442.

[9] Peter M, Kormanec P. Developing the integrated approach of Kano model and failure mode and effect analysis[J]. Total Quality Management & Business Excellence, 2020, 31(15/16): 1788-1810.

[10] 孙园园, 刘飞, 李丽. 基于 Kano-QFD 的个性化产品属性指标重要度确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(11): 2697-2704.
Sun Yuanyuan, Liu Fei, Li Li. Importance determining method of personalized product attributes based on Kano-QFD integration model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(11): 2697-2704.

[11] 任立明, 何国伟, 周海京. 可靠性工程师必备知识手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Ren Liming, He Guowei, Zhou Haijing. Essential knowledge manual for reliability engineers[M]. Beijing: China Standards Press, 2009.

[12] 张晓. 基于波及效应的卫星故障风险分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
Zhang Xiao. Research on fault risk analyzing method of satellite baesd on spreading effect[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.

[13] 罗承昆, 陈云翔, 何桢, 等. 基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 155-162
Luo Chengkun, Chen Yunxiang, He Zhen, et al. Evaluation method of aviation equipment's structure contribution rate to system-of-systems based on fault tree analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 155-162.

[14] 陈云翔. 可靠性与维修性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Chen Yunxiang. Reliability and maintainability engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.