

多工况条件下测试性试验抽样方法研究

徐睿, 杨晓昆, 章梦媛, 商学敏

(北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 针对传统测试性抽样方法忽略工况因素、导致样本集代表性不足的问题, 提出一种基于工况划分的测试性抽样方法; 该方法首先对系统工况进行划分, 并引入考虑多工况的综合故障率; 随后, 结合覆盖充分性与风险评估, 对各工况进行针对性样本增补; 所得样本集能够同时实现工况、结构与功能的全面覆盖, 显著提升了测试性试验样本的质量与代表性; 实例验证表明, 该方法能够有效提高测试性评估结果的准确性与可信度, 为复杂系统的测试性分析提供了可靠依据。

关键词: 测试性试验; 工况; 抽样方法; 充分性; 故障率

Study on Sampling Method in Testing Under Multiple Working Conditions

XU Rui, YANG Xiaokun, ZHANG Mengyuan, SHANG Xuemin

(Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: Traditional test sampling methods neglect working condition factors, resulting in the insufficient representativeness of sample sets. To address this issue, a novel sampling method based on working condition partitioning is proposed, which first divides the system's working conditions and introduces a comprehensive failure rate with multiple conditions, then supplements samples for each working condition by combining coverage adequacy and risk assessment. On the resulting sample set, the comprehensive coverage of working conditions, structures, and functions is simultaneously achieved, significantly enhancing the quality and representativeness of testability experimental samples. Case verification shows that this method effectively improves the accuracy and credibility of testability assessment results, providing a reliable basis for analyzing complex systems.

Keywords: testability experiment; working condition; sampling method; adequacy; failure rate

0 引言

测试性试验在测试性工程应用中扮演着至关重要的角色, 是确保系统设计、功能、结构以及各类性能达到预期标准的关键环节^[1]。通过开展测试性试验, 能够有效识别出设计阶段可能存在的测试性缺陷, 对测试性设计的有效性进行评价, 并且可以确认系统是否符合既定的测试性要求。这些测试结果为后续的测试性设计优化、改进以及装备定型提供了坚实的理论和实践依据。因此, 测试性试验不仅是一个检测和评估工具, 更是保障系统从设计到实际应用过程中能够顺利投入使用、具备可靠性的必备环节。

在测试性试验过程中, 样本抽样作为其核心环节, 具有极为重要的作用。样本抽样方法的正确性和有效性

决定了试验能够准确反映出系统的真实测试性水平^[2]。如果抽样不当或存在偏差, 可能导致试验结果的失真, 进而影响到对系统整体可靠性和性能的准确评估, 从而对后续设计改进和性能优化造成不良影响^[3-4]。为了确保测试性试验能够有效完成任务, 必须深入探讨并优化样本抽样方法, 从而保证抽样过程的科学性与合理性。这不仅有助于提高测试性试验的效率, 更能为后期的装备决策提供更为可靠的数据支撑。

在实际工程应用中, 工况是系统在使用过程中表现出来的工作状况^[5-7]。工况的定义可以从多个角度进行理解, 主要涉及到系统运行的环境条件、工作负荷、外部输入等因素。不同的工况条件下, 系统所面临的故障模式和故障率可能会发生显著变化^[8]。这是因为, 随着外部条件的变化, 系统的应力、负载、温度、湿度等因

收稿日期: 2025-05-21; 修回日期: 2025-12-16。

作者简介: 徐睿(1985-), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 徐睿, 杨晓昆, 章梦媛, 等. 多工况条件下测试性试验抽样方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(3): 68-75.

素可能导致不同故障模式的产生与发展^[9-10]。因此,工况的多样性与复杂性使得系统在不同工况下的表现具有较强的依赖性。在这种背景下,传统的测试性试验方法常常忽略了工况因素的影响,导致在试验过程中无法充分反映出不同工况下系统的真实表现。例如,在某些工况条件下,某一故障模式的发生概率可能大大增加,而在其他工况下则可能完全不发生,这种差异性如果未能在样本抽样阶段予以充分考虑,试验结果的可信度将大打折扣^[11-12]。

传统的样本抽样方法一般依据预设的标准或通用规则来进行,但这些方法往往假设所有的样本在不同工况下表现一致,忽视了工况因素对测试性试验结果的深远影响^[13-15]。实际应用中,系统在不同工况下的结构、功能、性能要求及测试目标都有所不同,传统的样本抽样方法未能考虑这些差异,因此往往难以准确反映出系统在实际运行条件下的真实性能。这种局限性在一定程度上造成了试验结果的偏差,影响了系统可靠性和安全性的评估,也对设计改进和优化提出了挑战。

为了克服这一问题,迫切需要在测试性试验中引入工况因素的考虑,从而提高测试性试验结果的精准性和可靠性。通过分析不同工况对故障率、故障模式、系统结构、功能及测试的影响,研究者可以制定出更加精细和科学的样本抽样方法。这些方法能够在不同工况下提供更为准确和代表性的样本,从而使测试性试验结果更为真实、有效,能够充分反映出系统在各种实际工况下的性能表现。

为了实现这一目标,本文从不同工况对故障率的影响以及不同工况对系统结构、功能、测试的影响等角度进行分析,提出了基于多工况条件下的测试性试验样本抽样方法。这一方法不仅考虑到了工况的多样性和复杂性,还能够根据不同的工况条件对样本进行科学抽取,从而提高试验结果的准确性和实用性,为测试性设计的改进与优化提供了理论指导和实践支持。

1 多工况对测试性抽样的影响

多工况条件对故障抽样的影响是测试性试验中的一个重要课题,主要体现在故障率、工作时长和组成结构3个方面。随着系统在不同工况下的表现发生变化,故障的模式和发生概率也会相应改变,因此必须对这些因素加以重视,以提高故障抽样的准确性和有效性。

1.1 故障率

不同工况条件下,系统可能面临不同的环境因素或载荷,从而导致系统的故障模式以及各故障模式的故障率发生显著变化。故障率是衡量系统可靠性的一个重要指标,它直接影响着故障抽样的效果。举例来说,锂离子电池的故障率在不同的环境温度下表现出显著的差

异^[16]。在低温环境中,电池的内阻增大,导致其充放电效率降低,进而增加了故障发生的几率;而在高温环境下,电池可能出现过热、膨胀等现象,也会增加故障的发生概率。因此,锂离子电池在低温、室温和高温这三种不同工况下的故障率是不同的。这一现象表明,在进行故障抽样时,必须首先考虑到工况变化带来的故障率的改变。如果不考虑这些差异,可能会导致试验结果的失真,无法准确反映出系统在不同环境条件下的实际性能。因此,针对不同工况的故障率变化进行抽样,不仅能提高试验的准确性,也能为系统的设计优化提供更有价值的技术支持。

1.2 工作时长

除了故障率的变化外,工作时长也是影响故障抽样的一个关键因素。在不同工况下,各单元参与工作的时长占比不同,导致了系统在不同工况下的故障概率不同。以地铁系统为例,根据行驶阶段的不同,可以将其分为牵引、惰行和制动3个工况。在这3个不同的工况下,刹车制动单元、发动机单元等部件的工作时长是不同的^[17]。尤其是在刹车制动工况下,刹车单元的工作时间要明显长于其它阶段,这就使得刹车单元的故障率比其它单元更高。如果在不同工况下,各单元的故障率相同,但由于工作时长不同,导致了各单元的故障率存在差异,因此,故障抽样的结果也会受到影响。值得注意的是,如果故障率数据是基于某一整段时间的平均故障率,而非特定运行时的故障率,那么这种影响可以忽略不计。然而,若抽样数据未考虑到各单元在不同工况下的实际工作时长,则可能导致故障抽样结果的偏差。因此,必须将不同工况下的工作时长占比进行量化,并将其影响纳入抽样模型中。一种有效的方法是将工作时长作为权重因子,对各工况下的故障率进行加权,从而构建一个能综合反映时间影响的等效故障率指标。本文将在第2章详细阐述如何通过构建“综合故障率”模型来解决这一问题,从而提高故障抽样的精度。

1.3 组成结构

此外,不同工况下系统的组成结构也可能发生变化,这对故障抽样有着重要影响。系统结构的变化会导致系统各部件的工作状态、承受的载荷以及故障模式等发生变化。例如,某些滑翔艇在不同工况下可能由单体形态转变为三体形态,在这两种形态下,系统所涉及的结构单元和部件的工作情况不同^[18]。此外,正激变换器在高匝比模式和低匝比模式下,其结构和工作原理也会发生变化^[19]。同样,风电并网系统在不同的工况下,风电台数的变化可能会导致系统整体结构的改变,从而影响系统的可靠性表现^[20]。在进行故障抽样时,如果未考虑不同工况下系统结构的变化,可能导致样本不具备代表性,从而影响到测试结果的准确性。因此,针对

不同工况下系统结构的变化,进行科学合理的抽样,是确保测试性试验能够真实反映系统可靠性的关键因素。

综上所述,多工况条件对故障抽样的影响是多方面的,包括故障率、工作时长和组成结构等因素。每个因素的变化都可能对故障抽样结果产生影响,因此,必须充分考虑这些因素在不同工况下的变化,合理设计样本抽样方法。本文后续章节将提出一种“综合故障率”的计算方法,该方法能将不同工况下的基础故障率差异、工作时长占比以及因组成结构变化导致的故障模式变化等因素统一量化到一个模型中,从而在多工况条件下准确评估系统的测试性,为后续的设计优化、故障预测和维护策略提供科学依据。

2 考虑多工况的故障率确定方法

在进行故障抽样分析之前,首先需要获取产品的任务剖面,这包括了不同工况下的运行时间和各工况下的故障模式及其故障率。这些数据为后续的故障抽样分析提供了必要的基础。通过这些数据,能够深入理解不同工况条件对系统运行的具体影响,并为故障抽样方法的优化提供理论依据。

为了有效地衡量不同工况对故障模式故障率的影响,考虑利用工况时间占比进行权重分配。基于时间占比对不同工况下的故障模式故障率进行加权,进而得出该故障模式在多工况下的“综合故障率”,如式所示:

$$\lambda'_i = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{t_s} \lambda_{ij} \quad (1)$$

式中, m 为总的工况种数; t_j 为第 j 种工况的运行时间; t_s 为各工况运行时间总和,即 $t_s = \sum_{j=1}^m t_j$; λ'_i 为第 i 种故障模式的综合故障率; λ_{ij} 为第 i 种故障模式在第 j 种工况下的故障率。

上述定义为该故障模式在全工况下的综合故障率。该故障模式在单一工况下的综合故障率定义为:

$$\lambda'_{ij} = \frac{t_j}{t_s} \lambda_{ij} \quad (2)$$

式中, λ'_{ij} 为第 i 种故障模式在第 j 种工况下的综合故障率。

综合故障率定义的理论依据如下:

设该装备运行工况分为工况 1 与工况 2,各工况运行时间分别为 t_1 、 t_2 ,设装备仅有故障模式 A,在工况 1 下的故障率为 λ_{a1} ,在工况 2 下的故障率为 λ_{a2} ,由可靠性与故障率的关系可知,系统在工况 1 运行阶段的可靠度为:

$$R_{a1} = e^{-\lambda_{a1} t_1} \quad (3)$$

在工况 2 运行阶段的可靠度为:

$$R_{a2} = e^{-\lambda_{a2} t_2} \quad (4)$$

该装备不同工况运行阶段符合串联模型关系,因此

该装备总的故障率为:

$$R = R_{a1} \cdot R_{a2} = e^{-(\lambda_{a1} t_1 + \lambda_{a2} t_2)} \quad (5)$$

由此可得该装备由工况 1 与工况 2 合成的整个运行阶段的故障率为:

$$\lambda_a = \frac{\lambda_{a1} t_1 + \lambda_{a2} t_2}{t_1 + t_2} \quad (6)$$

可见这正是本文提出的全工况下的综合故障率。需要说明的是,采用不同工况下的运行时间占比作为权重,对各工况故障率进行加权平均,得到系统在多工况下的“综合故障率”,是可靠性工程领域普遍采用的分析思路。该方法能够准确反映系统在整个任务周期内的平均故障风险,具有明确的物理意义和理论基础。

基于各个故障模式的综合故障率,可以进一步计算出各故障模式的综合故障率与总故障率之间的比值,从而得到各故障模式的综合相对发生频率。通过这一计算过程,可以在故障抽样时有效地考虑到多工况因素对系统可靠性的影响,确保抽样过程中的每个故障模式的发生频率能够与其在各个工况下的实际发生概率相匹配。通过式和式的定义,本方法利用各工况运行时间作为权重,成功地将 1.2 节所讨论的“工作时长”因素量化并整合进抽样模型中,同时也解决了 1.1 节和 1.3 节中因工况变化导致的故障率与结构变化问题。

这种方法不仅能够优化故障抽样过程,还能够为后续的系统设计改进、故障预防和维修决策提供坚实的理论依据。

3 基于工况划分的覆盖充分性与风险方法结合抽样方法

使用考虑风险的抽样方法能够得到符合故障率关系的故障样本集,但该方法未能充分考虑工况、结构和功能等方面的覆盖充分性。为此,当样本量可以扩展时,应采用基于工况划分的覆盖充分性与风险的方法进行抽样,以确保工况、结构和功能的全面覆盖。

基于工况划分的覆盖充分性与风险方法结合抽样,首先利用综合故障率进行风险抽样,然后对各工况进行充分性增补。这种方法在度量充分性时加入了工况因素的考虑,因为不同工况下系统的结构、功能和测试需求会发生变化,从而影响故障模式等价集合的构建。传统的覆盖充分性抽样方法和结合风险方法的抽样方法,仅考虑了故障模式与结构、功能、测试的映射关系,但未能在多工况条件下包含工况信息,因此抽取出的故障模式无法合理地分配到各工况中。

因此,在多工况条件下,除了考虑结构和功能的覆盖充分性,还需要考虑工况因素。在建立故障模式等价集合时,应对每个工况单独进行分析,将故障模式等价集合与工况、工况单元及工况功能相结合。通过这种方法,故障抽样能够实现工况、结构和功能的全面覆盖。图 1

展示了考虑多工况因素的故障模式等价集合选取示例。

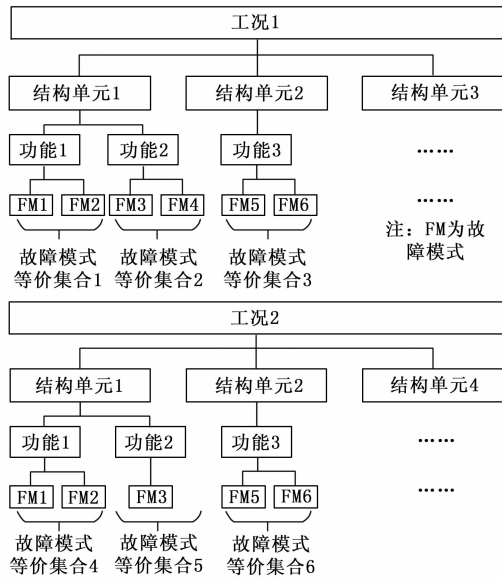


图 1 考虑多工况的故障模式等价集合选取示例

3.1 使用综合故障率的样本集抽取

基于工况划分的覆盖充分性与风险方法结合抽样方法, 首先以各工况下各故障模式的综合故障率为权重, 进行随机抽取得到初始样本集, 再对初始样本集进行充分性度量和增补, 得到最终数据集。

本文利用比例分层抽样方法进行样本量分配, 得到初始样本集。

1) 组成单元抽样权重分配:

按照组成单元的故障综合相对发生频率把确定的样本量 n 分配到产品各组成单元。若该组成单元仍然可分, 则可使用同样的方法将组成单元的样本量分配给其组成部件。计算方法如下所示:

$$C_{pk_0} = \frac{\sum_k (\sum_j \lambda_{ijk} \cdot t_j)}{\sum_k [\sum_i (\sum_j \lambda_{ijk} \cdot t_j)]} = \frac{\sum_k (\sum_j \lambda'_{ijk})}{\sum_k [\sum_i (\sum_j \lambda'_{ijk})]} \quad (7)$$

式中, C_{pk_0} 为第 k_0 个单元的故障综合相对发生频率; λ_{ijk} 为第 k 个部件的第 j 个工况下的第 i 个故障模式的故障率; t_j 为第 j 个工况的持续时间; λ'_{ijk} 为第 k 个部件的第 j 个工况下的第 i 个故障模式的综合故障率。

以故障综合相对发生频率为权重, 以权重为概率进行随机抽取, 将样本量分配到各组成单元中。

2) 故障模式抽样权重分配:

将组成单元分配的样本量分配至其故障模式, 以故障模式的综合相对发生频率为权重随机抽样, 选出要注入的故障模式。计算方法为:

$$C_{pi_0, k_0} = \frac{\sum_j \lambda'_{ijk_0}}{\sum_i (\sum_j \lambda'_{ijk_0})} \quad (8)$$

式中, C_{pi_0, k_0} 为第 k_0 个单元的第 i_0 个故障模式的故障综合相对发生频率; λ'_{ijk_0} 为第 k_0 个部件的第 j 个工况下的第 i_0 个故障模式的综合故障率。

3) 将故障模式样本量分配至各工况:

将故障模式分配的样本量分配到其各工况内, 以该故障模式在各工况下的综合相对发生频率为权重随机抽样, 选出要注入的工况。计算方法为:

$$C_{pi_0, j_0, k_0} = \frac{\lambda'_{i_0, j_0, k_0}}{\sum_j \lambda'_{i_0, j_0, k_0}} \quad (9)$$

式中, C_{pi_0, j_0, k_0} 为第 k_0 个单元的第 i_0 个故障模式的故障综合相对发生频率; λ'_{i_0, j_0, k_0} 为第 k_0 个部件的第 j_0 个工况下的第 i_0 个故障模式的综合故障率。

通过这种方式, 得到各组成单元的各个故障模式在各个工况下的样本量, 为后续故障注入试验提供基础。

3.2 样本集充分性度量

由于不同工况下系统的结构、功能和测试条件可能会发生变化, 导致每个工况下样本集在结构覆盖、功能覆盖和测试覆盖等方面的充分性要求也各不相同。因此, 必须提出一种适用于多工况条件的样本集充分性度量方法, 以确保抽样结果能全面反映系统在不同运行条件下的特性。

1) 单特性充分性度量:

首先, 可以选择结构、功能或测试中的任一特性进行充分性度量, 其流程图如图 2 所示。具体流程如下: 假设系统共有 m 个不同的工况。根据产品的设计资料, 确定第 j 个工况下的要素 $I_{U_j} = (F_{U_j}, A_{U_j}, P_{U_j})$: 即该工况下的故障模式集合 F_{U_j} 、特性取值集合 A_{U_j} 和相应的映射关系 P_{U_j} 。通过这些信息, 可以确定第 j 个工况下的故障模式等价集合。

使用综合故障率的样本集抽取方法获取初始样本集 F_S , 并根据映射关系进一步明确样本集的特性取值集合 A_S 。最后, 利用相应的充分性度量计算公式求出在第 j 个工况下的充分性度量 M_{A_j} 。

根据得到的充分性度量结果可以确定样本集的充分程度, 据此可以在试验前评价样本集是否具有代表性。如果在所有工况下的充分性度量均满足预定标准, 则说明样本集在特性 A 上对各工况具有充分性, 否则不充分。进一步地, 可以通过式计算在多工况下样本集关于特性 A 的综合充分性度量 M'_A :

$$M'_A = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{t_s} M_{A_j} \quad (10)$$

式中, t_j 为第 j 种工况的运行时间; t_s 为各工况运行时间总和, 即 $t_s = \sum_{j=1}^m t_j$ 。

2) 综合充分性度量:

在综合充分性度量中, 首先需要确定分析的第 j 个

工况的典型特性 A_{Dj} 、 A_{Gj} 、 A_{Tj} ，并根据产品设计资料确定模型 I_{Uj} 的所有相关要素，并得到典型特性 A_{Dj} 、 A_{Gj} 、 A_{Tj} 的所有故障模式等价集合 F_{aj} 。

然后，得到已确定的初始样本集 F_S 的模型 I_S 中关于典型特性的要素。

在此基础上，进一步计算出在第 j 个工况下的典型充分性度量 M_{Dj} 、 M_{Gj} 、 M_{Tj} 和综合充分性度量 M_{Uj} 。

如果在所有工况下均满足充分性要求，则样本集在结构、功能和测试等三项特性上均具有充分性。最终，可以通过式计算基于不同工况的样本集的综合充分性度量：

$$M'_I = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{t_s} M_{Uj} \quad (11)$$

式中， t_j 为第 j 种工况的运行时间； t_s 为各工况运行时间总和，即 $t_s = \sum_{j=1}^m t_j$ 。

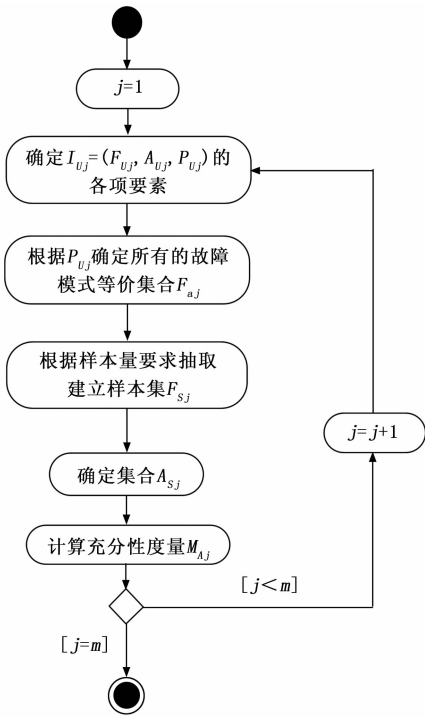


图 2 不同工况下样本集的单特性充分度量流程

3.3 样本集充分性择优

当试验的样本量 n 无法更改时，有时需要通过重复抽样多次产生 r 组样本集，并对每一组样本集进行充分性度量计算。根据不同工况下的充分性度量结果，选择充分性度量值最大的样本集作为最终的试验样本集。

1) 单特性充分度量：

可以选择结构、功能或测试中的某一特性来进行充分性度量，从而对样本集进行择优，计算基于不同工况的各样本集关于特性 A 的充分性度量 M'_A ，选择 M'_A 最大的样本集作为最终样本集。

2) 综合充分性度量：

在选择最终样本集时，也可以结合结构、功能和测试三种特性的综合充分性度量。通过计算每组样本集的综合充分性度量 M'_I ，选择综合充分性度量值最大的样本集作为最终的试验样本集。

3.4 样本集充分性增补

当试验的样本量 n 可以增加时，若初始样本集未能满足充分性要求，则需进行增补。此过程需确立一个明确的判断基准（即充分性阈值），以决定是否启动增补以及何时停止增补。

在本方法中，该充分性判断阈值设定为 1。这意味着，只有当样本集完全覆盖了某工况下所有故障模式等价集合时，才认为其在该工况下是充分的，无需增补。设定此阈值的理论依据在于：故障模式等价集合代表了系统在该工况下所有已知的、需要被测试的结构单元、功能路径或测试项目的最小完备集。因此，一个能够覆盖全部等价集合的样本集，在定义上即被认为是充分反映了该特性多样性的代表性样本集。基于对系统设计知识的不确定性全覆盖保证了该度量方法的有效性。

基于此判断标准，样本集充分性增补的具体流程如下：

首先需要确定各工况下未被覆盖的特性取值。然后，基于这些未覆盖的取值，进行有针对性的样本补充选择，以保证样本集的覆盖充分性。具体的增补算法流程图如图 3 所示。

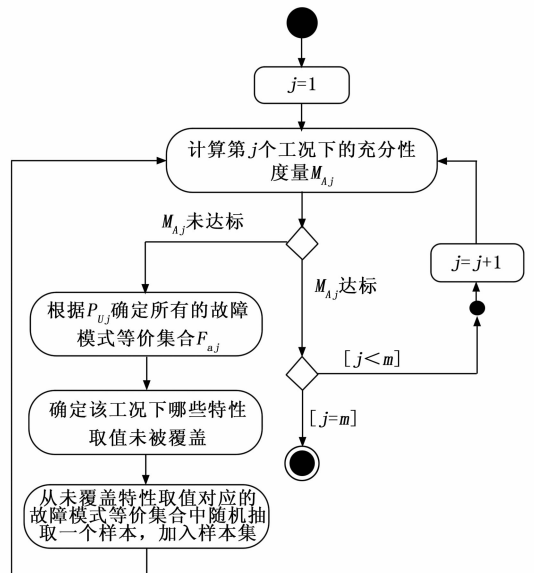


图 3 样本集充分性增补算法流程图

1) 单特性充分性增补：

可以选择结构、功能或测试中的某一特性进行充分性度量，以便对样本集进行增补。首先，根据产品设计资料确定第 j 个工况下的各项要素和其所有故障模式等

价集合, 并对现有样本集进行充分性度量计算。如果某工况下的充分性度量满足要求, 则跳过后续增补步骤, 继续对下一个工况进行处理。如果充分性度量未满足, 则需要确定该工况下哪些特性取值未被覆盖, 随后在其故障模式等价集合中选择一个样本进行增补, 将该增补样本加入样本集。然后, 重新计算基于不同工况的样本集在特性 A 上的充分性度量。如果满足充分性要求, 则认为样本集充分, 选择该样本集作为最终的试验样本集。

2) 综合充分性增补:

可以选择结构、功能和测试等全部特性进行综合充分性度量对样本集进行增补。首先, 确定需要分析的第 j 个工况的典型特性, 并根据产品的设计资料得到模型的所有相关要素及其典型特性对应的故障模式等价集合。接着, 对样本集进行充分性度量计算。如果该工况下的充分性度量满足要求, 则跳过后续增补步骤, 继续对下一个工况进行处理。如果不满足充分性度量, 则需要分析该工况下哪些典型充分性准则未得到满足, 并从相应的故障模式等价集合中抽取一个样本进行增补, 将其合并到样本集中。最后, 计算基于不同工况的样本集的综合充分性度量 M'_j 。如果样本集满足综合充分性要求, 则选择该样本集作为最终的试验样本集。

4 实例应用

本文通过一个算例, 考虑了 3 个不同工况, 各工况的运行时长分别为 20 分钟、30 分钟和 10 分钟。表 2 展示了使用基于工况划分的覆盖充分性与风险方法结合抽样方法得到的抽样结果。该算例的特点是不同工况下系统结构发生变化, 其中单元 3 仅在工况 2 和工况 3 下工作。通过考虑风险的样本量确定方法, 共需抽取 30 个故障样本。

所选用的充分性度量方法为综合充分性度量, 要求满足结构充分性覆盖和功能充分性覆盖。故障模式等价集合的信息如表 1 所示。首先, 计算各故障模式的综合故障率, 并根据故障模式的综合相对发生频率对各单元进行样本的随机抽取。随后, 通过对各故障模式等价集合进行充分性增补, 确保样本集满足充分性覆盖要求。通过充分性增补, 样本集补充了 6 个样本, 最终样本量达到了 36 个。

本算例的分析结果, 凸显了本文方法在处理特定复杂系统时的适用性。传统测试性抽样方法, 通常建立在系统结构与故障模式保持不变的静态模型假设之上。然而, 本算例所研究的系统具有显著的动态特性, 即单元 3 仅在特定的工况下工作, 这导致系统的整体结构随工况发生改变。

这种动态特性对传统方法的直接应用构成了挑战。若试图应用传统方法, 将面临模型构建的内在矛盾: 无

表 1 算例故障模式等价集合信息表

工况	结构	功能	故障模式	故障模式等价集合	故障模式等价集合故障率($\times 10^{-6}$)
工况 1	单元 1	功能 1	FM01	等价集合 1	1.4011297
			FM03		
			FM04		
	单元 2	功能 2	FM05	等价集合 2	2.3446096
			FM06		
			FM07		
		功能 3	FM09	等价集合 3	1.0833891
			FM10		
		功能 4	FM11	等价集合 4	1.0189133
	FM12				
	单元 4	功能 6	FM16	等价集合 5	2.2578607
			FM17		
FM18					
功能 7		FM19	等价集合 6	1.439787	
	FM20				
工况 2	单元 1	功能 1	FM02	等价集合 7	2.5391829
			FM03		
			FM04		
	单元 2	功能 2	FM05	等价集合 8	1.1972698
			FM06		
			FM07		
			FM08		
		功能 3	FM09	等价集合 9	0.4933268
			FM10		
	功能 4	FM11	等价集合 10	0.4182334	
		FM12			
	单元 3	功能 5	FM13	等价集合 11	1.9690001
FM14					
FM15					
单元 4	功能 6	FM16	等价集合 12	0.7301178	
		FM18			
	功能 7	FM19	等价集合 13	1.1842577	
		FM20			
工况 3	单元 1	功能 1	FM01	等价集合 14	2.0068599
			FM03		
			FM04		
	单元 2	功能 2	FM05	等价集合 15	0.5087526
			FM06		
			FM07		
			FM08		
		功能 3	FM09	等价集合 16	0.2427201
			FM11		
	功能 4	FM12	等价集合 17	1.6057055	
		FM13			
	单元 3	功能 5	FM14	等价集合 18	1.0030276
FM15					
FM16					
单元 4	功能 6	FM18	等价集合 19	0.5233061	
		FM19			
	功能 7	FM20	等价集合 20	1.300834	
		FM20			

表 2 基于工况划分的覆盖充分性与风险方法结合抽样方法样本量分配表

所属单元	故障模式							合计分配 样本量	合计补充 样本量
	编码	名称	工况	该工况下故 障率($\times 10^{-6}$)	工况分配 样本量	工况补充 样本量	综合故障率		
单元 1	FM01	故障模式 1	1	0.819 483 4	1		0.825 166 4	2	
			3	0.836 532 5	1				
单元 1	FM02	故障模式 2	2	0.952 839 3	3		0.952 839 3	3	
单元 1	FM03	故障模式 3	1	0.473 473 9	0		0.595 128	1	
			2	0.647 211 8	1				
			3	0.682 185	0				
单元 1	FM04	故障模式 4	1	0.108 172 5	0		0.586 980 5	1	
			2	0.939 131 8	1				
			3	0.488 142 4	0				
单元 2	FM05	故障模式 5	1	0.991 757 7	2		0.339 468 2	2	
			2	0.010 763 4	0				
			3	0.021 003 7	0				
单元 2	FM06	故障模式 6	1	0.757 744 6	1		0.483 053 1	1	
			2	0.400 846 8	0				
			3	0.180 289 1	0				
单元 2	FM07	故障模式 7	1	0.300 610 3	0		0.141 185 4	0	
			2	0.079 660 6	0				
			3	0.006 910 4	0				
单元 2	FM08	故障模式 8	1	0.294 497	1		0.501 256 8	2	1
			2	0.705 999 1	1				
			3	0.300 549 5	0	1			
单元 2	FM09	故障模式 9	1	0.913 570 3	1		0.513 485 2	1	2
			2	0.337 016 7	0	1			
			3	0.242 720 1	0	1			
单元 2	FM10	故障模式 10	1	0.169 818 8	1		0.161 713 5	1	
			2	0.156 31	0				
单元 2	FM11	故障模式 11	1	0.690 855 3	1		0.456 343 4	1	1
			2	0.246 495 8	0	1			
			3	0.616 862 3	0				
单元 2	FM12	故障模式 12	1	0.328 058	0		0.360 028 7	2	
			2	0.171 737 6	0				
			3	0.988 843 2	2				
单元 3	FM13	故障模式 13	2	1.085 682 5	2		0.570 602 1	2	
			3	0.166 565 4	0				
单元 3	FM14	故障模式 14	2	0.525 563 8	1		0.304 938 1	2	
			3	0.252 937 3	1				
单元 3	FM15	故障模式 15	2	0.357 753 8	1		0.414 196 6	1	
			3	0.583 524 9	0				
单元 4	FM16	故障模式 16	1	0.735 931 6	1		0.615 539 8	2	1
			2	0.610 737 1	1				
			3	0.389 164 2	0	1			
单元 4	FM17	故障模式 17	1	0.661 473 3	2		0.661 473 3	2	
			1	0.860 455 8	1				
			2	0.119 380 7	0				
单元 4	FM18	故障模式 18	1	0.134 141 9	0		0.368 865 9	1	
			2	0.506 718 6	1				
			3	0.968 482 7	1				
单元 4	FM19	故障模式 19	1	0.506 718 6	1		0.717 493 8	2	
			2	0.968 482 7	1				
			3	0.386 077 1	0				
单元 4	FM20	故障模式 20	1	0.933 068 4	1		0.571 369 8	1	1
			2	0.215 774 9	0				
			3	0.914 756 9	0	1			

法建立一个单一的静态模型来准确描述整个运行过程,而不产生信息失真。例如,以任何单一工况为基准进行建模,都将无法兼顾其他工况下的系统状态,从而导致抽样结果出现系统性偏差,无法保证样本的代表性。因此,传统方法对此类动态系统问题的适用性存在固有限制。

本文所提方法的核心,在于通过引入“工况”维度,建立了一个能够描述系统动态变化的分析框架。该框架通过综合故障率的定义,将不同工况下的风险进行量化与整合;并通过分工况的充分性度量与增补,确保样本集能够覆盖系统在所有运行状态下的关键特性。算例结果表明,该方法为解决因工况变化导致系统动态改变的测试性抽样问题,提供了一条具备可操作性的技术路径,是对现有测试性理论体系的有益补充。

5 结束语

本文针对传统测试性抽样方法在处理因工况变化而导致系统动态改变这类问题时适用性受限的情况,提出了一种多工况条件下的测试性试验抽样方法。该方法综合考虑了不同工况对产品测试性试验抽样的影响。通过首先定义多工况条件下的综合故障率,并利用这一综合故障率进行考虑风险的抽样,该方法有效地将工况因素纳入抽样过程中。基于此,所提方法进一步对各工况进行充分性度量和增补,确保了最终所得样本集在各工况下均能够满足结构、功能和工况的覆盖充分性。

该方法的实施能够为后续的测试性指标评估提供坚实的基础,显著提升了测试性试验结果的准确性和可信度。通过有效地结合多工况因素,本文弥补了传统抽样方法在多工况数据处理中的不足,为复杂系统的故障分析和测试性试验提供了一种更为科学、全面的解决方案。

参考文献:

- [1] 田仲,石君友. 现有测试性验证方法分析与建议 [J]. 质量与可靠性, 2006 (2): 47-51.
- [2] 石君友,康锐,田仲. 测试性试验中样本集的测试覆盖充分性研究 [J]. 测控技术, 2004 (12): 19-21.
- [3] 杨金鹏,连光耀,邱文昊,等. 装备测试性验证技术研究现状及发展趋势 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (2): 186-192.
- [4] 王旋,狄鹏,谢经伟. 基于多源先验数据的装备测试性评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (11): 144-148+157.
- [5] HOU D, CHEN J H, CHENG R, et al. A bearing remaining life prediction method under variable operating conditions based on cross-transformer fusioning segmented data cleaning [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 245: 110021.
- [6] FANG Z, WANG W, CAO Y, et al. Reciprocating compressors intelligent fault diagnosis under multiple operating conditions based on adaptive variable scale morphological filter [J]. Measurement, 2024, 224: 113778.
- [7] MA K, DU J, LIU Y, et al. Torsional vibration attenuation of a closed-loop engine crankshaft system via the tuned mass damper and nonlinear energy sink under multiple operating conditions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 207: 110941.
- [8] GE Y, ZHANG F, REN Y. Adaptive fault diagnosis method for rotating machinery with unknown faults under multiple working conditions [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 177-184.
- [9] BALADEH A E, TAGHIPPOUR S. Reliability optimization of dynamic k-out-of-n systems with competing failure modes [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 227: 108734.
- [10] RATHORE M S, HARSHA S P. Rolling bearing prognostic analysis for domain adaptation under different operating conditions [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106414.
- [11] CHENG Y, WANG C, WU J, et al. Multi-dimensional recurrent neural network for remaining useful life prediction under variable operating conditions and multiple fault modes [J]. Applied Soft Computing, 2022, 118: 108507.
- [12] 马天霖,孙良海,韩冰,等. 基于部分域适应的旋转机械跨工况故障诊断 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (6): 479-486.
- [13] 赵靖,吴栋. 测试性试验样本量按比例分层抽样补充分配方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (10): 161-165.
- [14] 赵淑明,刘红波,刘斌全,等. 基于二项分布的测试性试验方案优化设计与评估 [J]. 环境技术, 2023, 41 (8): 108-112.
- [15] 石君友,康锐,田仲. 基于信息模型的测试性试验样本集充分性研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (8): 874-878.
- [16] 孙琦,彭豪,孟庆国,等. 极限工况下储能电池包热适应性 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13 (6): 2039-2043.
- [17] 吴杨帆,吴萌岭,田春,等. 多工况融合电机机械制动关键部件疲劳寿命分析 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (4): 60-64.
- [18] 毕效笙,马潇健,王大鹏,等. 变结构滑行艇斜浪航行耐波性数值分析 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6 (3): 286-292.
- [19] 张绪,嵇保健,李俊. 变结构有源钳位正激变换器 [J]. 电气传动, 2021, 51 (11): 33-39.
- [20] 刘冬,郁冶,傅冲,等. 风电次同步振荡的多工况分析 [J]. 电工电气, 2023 (8): 6-11.