

参数依赖型软件参数更动测试策略和方法

魏 波, 张卫祥, 齐玉华, 刘凤菊

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 参数依赖型软件是指初始化时读取并解析配置参数, 并据此进行任务处理的软件, 航天测控软件是典型的参数依赖型软件; 航天测控软件具有明显的领域软件特征, 多采用领域工程分析技术, 实现业务处理逻辑和具体任务参数的分离, 达到仅通过修改任务配置参数而适应高强度型号任务的目的; 通过对参数依赖型软件架构、应用模式的分析, 提出一种对参数依赖特性进行验收测试、参数更动测试的流程、策略和方法; 并基于该方法, 对远程数据交互软件进行了参数依赖特性测试, 测试结果表明, 该方法具有测试覆盖性强、测试重点突出、测试效率高的特点。

关键词: 参数依赖型软件; 参数更动测试; 软件测试; 回归测试; 航天测控软件

Strategy and Method of Parameters Modification Test in Parameters-dependent Software

WEI Bo, ZHANG Weixiang, QI Yuhua, LIU Fengju

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Parameters-dependent software refers to the software that reads and parses the configuration parameters during initialization and processes tasks accordingly, and aerospace tracking, telemetry and control (TT&C) software is typical parameters-dependent software. The aerospace TT&C software has obvious domain specific features, always adopts the domain analysis technology to realize the separation of business processing logic and task configuration data, and achieves the purpose of adapting to high-intensity tasks only by modifying the task configuration data. Through the analysis of parameters-dependent software architecture and application mode, the strategy and method for acceptance test and parameter-modification test are proposed. A typical remote data interaction software is tested by the proposed method, and the results show that this method has the advantages of strong test coverage, high test focus and high efficiency.

Keywords: parameters-dependent software; parameters-modification test; software test; regression test; TT&C Software

0 引言

航天测控中心是航天测控网的重要组成部分, 是航天任务的决策和指挥中心。航天测控中心计算机软件系统部署于航天测控中心, 完成对遥测数据、外测数据的接收、处理、显示, 对测控设备的引导控制, 以及向航天器发送遥控指令等功能^[1-2]。基本的航天测控中心软件系统一般包括数据交换、汇集分发、遥测数据处理、外测数据处理、综合数据处理、监视显示、安控辅助判决、遥控发令等软件配置项^[3-4]。航天发射任务数量日益增多, 任务密度日益加大, 留给软件状态切换和准备时间大幅减少, 对测控中心软件系统提出了新的要求。测控中心软件为了达到仅通过修改任务配置参数而适应高密度型号任务的目的, 大多采用领域工程分析和领域驱动设计技术, 实现业务处理逻辑和任务配置参数的分离。

但是, 软件配置参数更动的正确性在一定程度上依赖操作人员的知识、经验和工作态度, 参数更动需要花费大

量的时间和精力^[5]。研究数据证明, 参数更动过程有时会引入大量的软件问题, 甚至影响到航天任务的成败。依照载人航天工程软件工程化要求, 任务配置参数和软件代码均是软件的一部分, 无论是代码更动还是参数更动均需要通过第三方的测试^[6-9], 并将此作为任务前检查的重要部分。然而, 无论是软件研制单位还是软件用户单位, 对参数更动测试的重视程度不足^[10-12], 参数更动测试的效果不佳。

参数依赖型软件是指初始化时读取并解析配置参数, 并据此进行任务处理的软件, 航天测控中心软件是典型的参数依赖型软件。本文针对参数依赖型软件, 提出了一种覆盖软件验收、软件运行、任务参数更动等阶段的第三方测试验证方法。并基于该方法, 对远程数据交互软件进行了测试实践, 结果表明, 该方法具有测试覆盖性强、测试重点突出、测试效率高等特点, 满足载人航天工程软件工程化技术规范的要求。

第一章分析了参数依赖型软件“代码+参数”的可复

收稿日期: 2022-06-19; 修回日期: 2022-07-01。

基金项目: 国家自然科学基金(61502015)。

作者简介: 魏 波(1975-), 男, 河南睢县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事软件工程和软件评测技术方向的研究。

引用格式: 魏 波, 张卫祥, 齐玉华, 等. 参数依赖型软件参数更动测试策略和方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 76-81.

用架构和软件使用模式, 第二章提出针对参数依赖特性的第三方测试流程, 共包括参数依赖特性验收测试、参数更动测试和测试状态维护等 3 个阶段, 并对每个阶段的测试策略、测试重点进行了分析设计。第三章给出了该方法的一个应用实例; 第四章指出了该方法的应用前景, 提出了可能的优化改进方向。本文中, 参数依赖特性定义为与参数初始化、参数解析、参数处理相关的功能、性能、安全性等软件特性。参数依赖特性验收测试是指针对参数依赖特性而进行的用户验收测试。参数更动测试是指因任务状态变化而发生参数更动后, 针对参数更动而进行的软件回归测试。

1 参数依赖型软件架构及使用模式

参数依赖型软件是指初始化时读取并解析运行参数信息, 并据此进行任务处理的软件。航天测控软件是典型的参数依赖型软件, 多采用领域工程分析和领域驱动设计技术, 实现业务处理逻辑和型号任务配置参数的分离^[13]。参数依赖型软件的典型架构如图 1 所示。

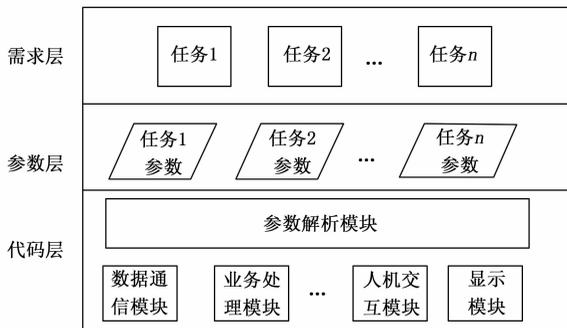


图 1 参数依赖型软件架构

当执行新的型号任务时, 技术人员首先梳理新的任务需求, 进行软件维护可行性分析。分析从 3 个层次依次展开: 软件代码和软件配置均不改变是否可以执行新的任务? 仅修改软件配置是否可以满足任务要求? 是否必须进行代码的更动? 并根据最终的分析结论制定软件维护方案, 给出软件维护的详细内容。具体流程如图 2 所示。

航天测控软件具有较强的软件复用能力, 多数情况下可通过仅修改配置参数来适应新的试验任务。根据载人航天工程软件工程化技术标准的要求, 配置参数更动后需要进行第三方参数更动测试。

2 参数依赖特性测试流程

软件生命周期包括需求、设计、编码、内部测试、验收、软件维护等阶段。软件维护包括纠错性维护、适应性维护和完善性维护等多种类型, 基于任务状态变化的配置参数更动属于典型的适应性维护。任务执行前, 需要根据任务状态变化情况, 对任务软件进行第三方参数更动测试。值得注意的是, 参数更动是有继承关系的, 并非所有的任务更动都是基于验收后的初始版本。在参数更动前, 需要分析本次任务与历史任务的相似程度, 选择配置参数内容

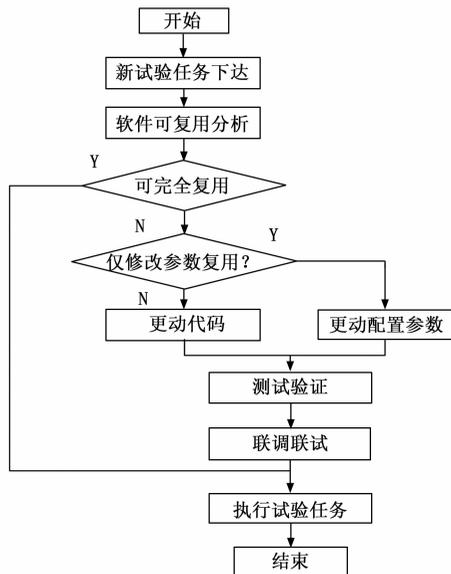


图 2 软件维护流程

相近, 更动代价最小的历史任务作为更动基础版本。典型的任务继承关系如图 3 所示。

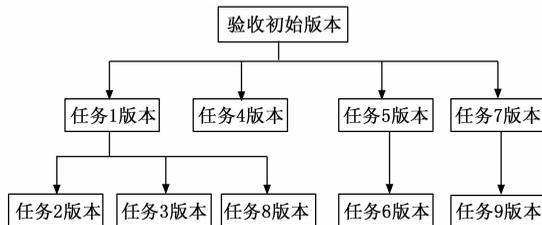


图 3 软件版本继承关系图

本文设计了第三方参数依赖特性测试流程, 规范参数依赖软件从软件验收到软件维护阶段的第三方测试工作。测试流程包括参数依赖特性验收测试、测试状态维护、参数更动测试 3 个部分。测试流程和各部分的工作对象见图 4。

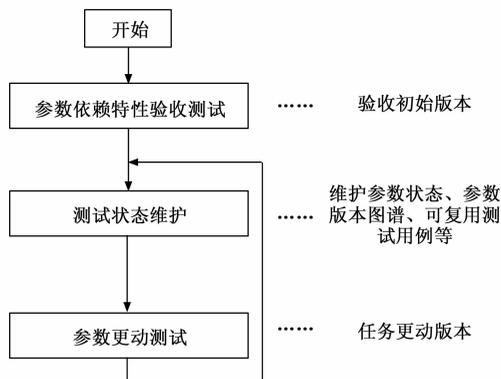


图 4 参数依赖特性测试流程

软件研制完成后, 第三方评测单位应针对软件初始版本进行参数依赖特性验收测试。参数依赖特性验收测试面向的是参数依赖特性的所有软件需求, 需要对参数依赖特

性所涉及的全部功能、性能、容错、人机交互等进行全方位的完整测试。提高测试充分性是参数依赖特性验收测试的核心要求。

配置参数变动测试则是面向型号任务,基于参数变动前后的配置参数比对结果,针对变动及影响域而进行的软件回归测试。在完成参数依赖特性验收测试或配置参数变动测试后,需要进行测试状态维护,包括维护软件版本间的继承关系、维护配置参数状态、记录历次参数变动内容、对测试用例进行复用化处理等。

2.1 参数依赖特性验收测试

参数依赖型软件在软件验收阶段,应该进行参数依赖特性专项验收测试,需要对参数依赖特性所涉及的全部功能、性能、容错、人机交互等进行全方位的完整测试。参数依赖特性验收测试是整个测试流程中的基础,其测试充分性是保证后续参数变动测试有效性的必要条件。

2.1.1 参数依赖特性验收测试策略

本文从测试范围、测试依据、测试思路、用例设计、参与人员和测试时机等属性,提出了测试策略描述框架。参数依赖特性验收测试的测试策略如表 1 所示。

表 1 参数依赖特性验收测试策略

序号	属性名称	具体要求
1	测试范围	应覆盖软件的全部建设需求,包括为软件复用而设计的所有通用配置功能。
2	测试依据	包括软件需求规格说明、接口控制文件、软件安全性分析报告、软件用户手册、配置参数维护手册和软件涉及的领域知识等。
3	测试思路	对参数依赖特性所涉及的功能、性能、容错、人机交互等进行全覆盖测试。
4	用例设计	使用领域分析和逻辑测试技术,保障配置功能的测试覆盖率;另外还应覆盖配置界面测试、文档审查、配置信息容错、配置文件容错、边界覆盖、枚举值覆盖、最大负载测试等要求。
5	参与人员	软件测试人员、软件研发人员、软件总体人员。
6	测试时机	软件研制成功,正式交付用户前。

2.1.2 参数依赖特性验收测试的充分性保证措施

提高测试充分性是参数依赖特性验收测试的核心要求。保障参数依赖特性验收测试充分性主要通过以下 3 个措施:

1) 提高配置参数功能设计的合理完备:测试人员应与总体设计人员、软件操作人员充分沟通,使用领域分析的方法,从使用需求出发,分析配置参数功能设计是否合理完备。必要时应补充遗漏的配置参数功能,避免软件因设计不充分而带来的配置参数功能的不完善,提高软件复用能力。

2) 对参数依赖代码进行逻辑测试:逻辑测试是对程序代码逻辑设计的合理性、实现的正确性进行测试。利用程序代码内部的逻辑结构及相关信息设置监测点,在测试用例执行过程中记录监测点的状态,并给出测试覆盖率信息。逻辑测试是提高测试充分性和实现精准测试的有效手段。

参数依赖特性验收测试应根据软件编程语言和运行环境,选择适合的逻辑测试工具,通过插桩代码、执行测试用例、分析语句/分支覆盖率和补充测试等流程,提高对配置参数及其取值范围的测试覆盖率^[14-17]。测试中需重点关注以下几点:

(1) 确保软件代码实现了软件需求和设计要求的所有配置参数功能。

(2) 确保软件代码中的所有配置参数及其处理分支均得到测试。

(3) 控制流覆盖不仅要关注软件初始化时配置文件读取部分,还要关注使用配置参数进行控制处理的不同执行路径。

(4) 在进行代码插桩前,应通过人工代码走查的方式,标识出参数依赖相关的代码。插桩时仅对参数依赖代码进行插装,后续测试中仅关注参数依赖代码的测试覆盖率。

3) 针对软件高发缺陷进行重点测试:通过对历年二十余个参数依赖型软件测试项目分析,我们发现参数相关的软件缺陷大多集中分布在软件特定位置。因此除了依照需求进行功能、性能等常规测试外,验收测试还需重点关注以下内容,详见表 2。

表 2 验收测试重点及技术要求

序号	测试重点	技术要求
1	文档审查	确保配置参数维护手册、配置文件和软件代码对配置参数描述的一致。配置参数维护手册一定要详细、准确、无歧义,因为该手册是后续进行参数变动的重要依据。
2	数据审查	对配置参数数据的完整性、有效性、格式规范性进行审查。
3	配置界面测试	如果软件提供用户界面或辅助工具进行配置参数编辑,应进行配置界面测试,关注界面对配置参数的校验和错误提示能力。
4	配置信息容错	初始化代码中应进行参数格式和规则检查,对错误配置参数的处理逻辑要合理,配置参数错误提示要准确、详尽,以便出错后问题排查。
5	配置文件容错	软件对配置文件格式错误、缺少配置文件等情况,应给出错误提示。
6	参数边界覆盖	对数值型参数,例如处理系数、缓冲区大小、缓冲区数量等,应针对配置参数的取值范围,测试其上下边界。
7	参数枚举覆盖	对枚举类型的配置参数,测试应覆盖其每一个枚举值。
8	最大负载测试	软件因配置不同,其性能往往差异很大。应对潜在任务需求进行梳理,依照资源消耗最大的配置参数,进行软件的性能测试。
9	配置参数冗余	一般情况,不允许配置参数具有冗余信息。确有需要的,冗余信息的位置应相对独立,且有明确注释。
10	控制准确性	用于控制的配置参数,应根据控制要求,对参数的精度、门限、阈值的合理性、数据用于控制过程的准确性进行测试。
11	数据安全性	配置参数具有不可更改性等安全保护措施。

以上为参数依赖型软件验收测试的通用要求, 具体软件可根据自身特点和数据依赖程度, 对以上要求进行选择和裁剪。

2.2 参数更动测试

2.2.1 参数更动测试策略

软件在进行任务参数更动后, 应进行参数更动测试。与验收测试不同, 参数更动测试属于软件回归测试, 更关注参数更动内容及对软件功能、性能等特性的影响。参数更动测试的总体策略如表 3 所示。

表 3 参数更动测试策略

序号	属性名称	具体要求
1	测试范围	基于型号任务的配置参数更动需求。
2	测试依据	包括软件维护可行性分析报告、软件更动维护方案、软件用户手册、配置参数维护手册。
3	测试思路	比对更动前后的配置参数, 针对参数更动项及更动影响域进行回归测试。
4	用例设计	检查配置参数文件是否与软件更动维护方案一致; 针对配置的更动, 测试受影响的性能指标; 针对重点参数更动错误类型进行用例设计: 数值错误、参数拼写错误、参数格式错误、取值范围错误、参数类型错误、更动遗漏错误、更动不彻底、配置文件格式错误、配置冗余错误等。
5	参与人员	软件测试人员、软件研发人员、软件总体人员、软件操作人员。
6	测试阶段	参数更动后, 任务执行前。

配置参数比对是配置参数更动测试的关键步骤。首先与软件更动维护方案比对, 确保已经正确完成了软件更动维护方案要求的更动项, 没有偏差和遗漏。同时与更动前的配置参数进行比对, 识别出软件更动维护方案中没有描述, 但实际实施了更动, 并将其纳入到参数更动测试范围内。

针对识别出的配置参数更动内容, 进行影响域分析。对受影响部分逐项进行测试分析, 在之前回归测试中确实已经覆盖的更动内容, 可以仅通过配置文件检查来验证, 之前没有测试或测试不充分的更动内容, 通过选用之前的可复用测试用例, 或重新设计测试用例来验证。测试设计时应重点关注典型的更动错误类型。

某些情况下, 配置参数的更动分析和更动实施不是由软件研发人员完成, 而是由软件操作人员完成, 此时应该将软件操作人员纳入配置参数更动测试的参与人员中, 以保证配置参数比对工作的效果和效率。

2.2.2 参数更动的典型错误

对近年来航天测控中心计算机系统配置参数更动错误进行了梳理和分析, 典型的参数更动错误如表 4 所示。测试设计时应重点关注典型更动错误, 提高测试的针对性和有效性。

表 4 参数更动的典型错误

序号	测试要求	详细内容
1	数值错误	依照软件更动维护方案进行更动时, 因疏忽导致填写错误; 或者因手册与代码中对某参数定义不一致, 虽然严格按照软件更动维护方案进行更动, 仍然导致软件错误。
2	参数拼写错误	包括配置参数项名称错误、字符串型参数值拼写错误等。
3	参数格式错误	更动或添加配置参数项时, 没有遵从格式约定导致软件错误。
4	取值范围错误	更动后的参数值超出了设计范围。该错误一般是由于配置参数维护手册缺少对该配置参数的取值范围描述所致。
5	参数类型错误	更动后的参数使用了错误的类型。该错误一般是由于配置参数维护手册对该配置参数的类型描述错误所致。
6	更动遗漏错误	追加参数更动需求时容易发生该错误。
7	更动不彻底	没有修改关联参数导致错误。主要由参数关联性引起, 包括配置参数取值的一致性、依赖性、取值范围的相互制约等。
8	配置文件格式错误	修改配置参数时破坏了配置参数文件结构, 或改变了配置参数文件名称或类型, 导致读取配置文件失败。
9	配置冗余错误	配置参数文件中包含有与本次任务无关的配置参数。一般应当删除冗余配置, 以免引发未知的处理错误。

2.3 测试状态维护

参数依赖型软件验收测试阶段完成, 或参数更动测试完成后, 应转入测试状态维护阶段。测试状态维护阶段应进行配置参数状态维护和可复用配置参数测试用例维护。

2.3.1 配置参数状态维护

测试结束后, 测试人员应督促软件研发人员、软件操作人员, 根据软件最新状态, 编制或维护配置参数维护手册, 配置参数维护手册也可以作为软件使用手册的单独一章提供。配置参数维护手册应详细描述修改配置参数的方法、注意事项, 明确各配置参数的值域范围、参数类型约束、参数间关联约束等。另外在软件代码初始化配置参数和使用配置参数处, 增加明确的注释, 注释内容应与配置参数维护手册保持一致。

此外, 要建立任务参数更动图谱, 维护参数版本间的继承关系、更动内容, 并纳入配置管理。

2.3.2 可复用配置参数测试用例维护

参数更动测试本质上是软件回归测试。对于新的配置参数更动测试, 应通过将更动需求与复用库中类似软件需求进行匹配筛选, 检索并形成可复用测试用例集, 经适当

修改完善后快速生成参数更动测试的测试用例集,从而大幅提高参数更动测试用例设计效率^[18-20]。

因此,测试状态维护阶段需要整理本轮测试中与配置参数相关的测试用例,对测试用例进行可复用化处理,建立可复用配置参数测试用例库。测试用例复用化处理的关键是建立测试用例与所测试配置参数的索引,下轮配置参数更动测试可根据配置参数索引,复用相关测试用例。

3 实验结果分析

使用本文提出的参数依赖特性测试策略和方法,对某航天测控中心计算机系统远程数据交互软件进行了第三方测试。该软件主要完成测控中心内外数据的接收、格式转换和分发。数据收发规则保存在配置文件中,软件完成数据收发规则的解析,实现内外数据正确转发。

软件验收测试阶段,采用领域分析、逻辑测试和重点测试等技术,设计并执行了配置参数相关测试用例 72 个,对参数相关源代码的语句和分支覆盖率均达到 100%。发现与配置参数相关软件问题 5 处,问题包括不能转发某雷达测角数据、接收缓冲区数量配置错误导致软件异常、存在冗余配置参数信息、配置文件格式异常没有进行容错处理、模式控制参数配置异常给出的提示不正确等,详见表 5。

表 5 验收测试用例设计与缺陷分布表

序号	用例类型	用例数量	缺陷数量	缺陷描述
1	通用测试:参数功能测试	47	1 ^①	不能转发某雷达测角数据
2	重点测试:文档审查	1	0	——
3	重点测试:数据审查	1	0	——
4	重点测试:配置界面测试	2	0	——
5	重点测试:配置信息容错	2	1	模式控制参数配置异常给出的提示不正确
6	重点测试:配置文件容错	2	1	配置文件格式异常没有进行容错处理
7	重点测试:参数边界覆盖	5	1	接收缓冲区数量配置错误导致软件异常
8	重点测试:参数枚举覆盖	6	1 ^①	不能转发某雷达测角数据
9	重点测试:最大负载测试	1	0	——
10	重点测试:配置参数冗余	1	1	存在冗余配置参数信息
11	重点测试:控制准确性	3	0	——
12	重点测试:数据安全性	1	0	——
	小计	72	5 ^②	

①“不能转发某雷达测角数据”软件缺陷的原因在于代码与配置参数文件对数据标识枚举值的定义不一致,该缺陷在通用测试和重点测试中均被发现。

②缺陷总数对重复缺陷不累计。

从表 5 可以看出,验收测试共设计通用参数功能用例 47 个,发现软件缺陷 1 处,缺陷发现率(发现缺陷数/总缺陷数)为 25%。设计重点测试用例 25 个,发现软件缺陷 5 处(1 处在通用测试中同时发现),缺陷发现率为 100%。数

据表明,针对验收测试重点进行用例设计,可以有效提高测试的有效性和针对性。

在后续某型号任务的配置参数更动测试中,依照配置参数文件更动前后的比对结果和该中心提交的软件维护方案,进行了更动影响域分析和回归用例设计。设计并执行回归测试用例 12 个,测试中发现遥测数据转发方向配置错误、某门限参数类型错误等 2 处缺陷,参数更动测试缺陷分布详见表 6。软件修正错误后成功执行多次型号任务,没有出现软件问题。与以往同类软件配置参数更动回归测试相比,本次参数更动测试用例数减少 60%,测试时间缩短 40%,测试用例在覆盖全部更动影响影响域的基础上,具有更强的测试针对性。

表 6 参数更动测试缺陷分布表

序号	典型用例类型	缺陷数量	缺陷描述
1	参数值错误	1	遥测数据转发方向配置错误
2	参数拼写错误	0	——
3	参数格式错误	0	——
4	取值范围错误	0	——
5	参数类型错误	1	某门限参数类型错误
6	更动遗漏错误	0	——
7	更动不彻底	0	——
8	配置文件格式错误	0	——
9	配置冗余错误	0	——
	小计	2	

实践证明,本文提出的参数依赖特性测试策略和方法具有测试覆盖性强、测试重点突出、测试效率高等特点,并满足载人航天工程软件工程化技术规范的要求。

4 结束语

本文分析了参数依赖型软件“代码+参数”的可复用架构和使用模式,制定了针对参数依赖特性的第三方测试规范和流程,提出了参数依赖特性验收、参数更动等测试阶段的测试策略、测试重点等技术要求,对参数更动测试中应重点关注的错误类型进行了归纳,分析了错误原因。本文提出的参数依赖特性测试方法,已经在多个航天测控软件第三方测试中得到应用和验证,该方法具有测试覆盖性强、测试重点突出、测试效率高、可操作性好等特点。后续,作者将对基于配置文件的测试用例辅助生成、参数相关代码的自动识别做进一步的研究,提高本方法的自动化水平。

参考文献:

- [1] 魏波,张慧颖,司倩然.基于数据源和驱动分析的软件系统测试方法[J].计算机测量与控制,2021,29(9):73-77.
- [2] 于志坚.航天测控系统工程[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [3] ZHANG W X, LIU W H, WEI B. Software system testing method based on formal model [C] //2017 2nd IEEE International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis

- (ICCCBDA 2017), Chengdu, 2017, 4: 410-416.
- [4] 张卫祥, 张 敏, 窦朝晖, 等. 基于过程与场景分析的航天应用软件测试方法 [J]. 测控技术, 2020, 39 (1): 30-35.
- [5] 陈 伟, 黄 翔, 乔晓强, 等. 软件配置错误诊断与修复技术研究 [J]. 软件学报, 2015, 26 (6): 1285-1305.
- [6] LAN SOMMERVILLE. Software Engineering, Tenth Edition [M]. Pearson Education, Inc. 2016: 86-165.
- [7] 总装备部载人航天工程办公室. CMS-RW, 载人航天工程软件工程化技术标准 [S]. 2014.
- [8] PATTON R. 软件测试 [M]. 张小松, 等译, 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15532—2008, 计算机软件测试规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 侯成杰. 航天器软件参数修改的测试策略研究 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (3): 126-129.
- [11] 漆莲芝, 周昱瑶, 等. 测控软件数据接口测试与典型缺陷分析 [J]. 测控技术, 2017, 36 (9): 109-113.
- [12] 董 燕, 侯成杰, 邱 芳. 一种基于更动影响域分析的回归测试方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2013, 39 (4): 49-52.
- [13] 饶 冬, 孙甲琦, 贾林巧, 等. 基于 Linux 的航天地面站测控软件架构设计 [J]. 遥测遥控, 2015, 36 (4): 31-36.
- [14] 李树芳, 安金霞, 刘 洋, 等. 采用 Clang/LLVM 的 C++ 源代码覆盖率分析插装方法 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (11): 191-194.
- [15] 左万娟, 董 燕, 黄 晨, 等. 航天嵌入式软件代码逻辑分析 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30 (8): 274-280.
- [16] 黄 晨, 董 燕, 于 倩, 等. 基于目标码的测试覆盖不可达分析方法 [J]. 测控技术, 2017, 36 (1): 100-107.
- [17] 左万娟, 虞砺琨, 王小丽, 等. 航天嵌入式软件测试用例典型设计缺陷研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 36-40.
- [18] 马贤颖, 陈 青, 司倩然. 遥测软件测试用例复用技术研究及应用 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (16): 29-33.
- [19] 夏传林, 郑 巍, 谭莉娟, 等. 基于知识图谱的测试用例复用方法 [J]. 计算机工程与设计, 2022, 43 (5): 1273-1279.
- [20] 李 昊, 柳 溪. 基于知识图谱的雷达软件测试用例复用研究 [J]. 测控技术, 2021, 40 (6): 18-26.
- ***
- (上接第 75 页)
- [2] 魏东亮, 周迪斌, 张家瑜, 等. 微型齿轮的机器视觉检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 46-52.
- [3] 刘 卓, 汤 健, 柴天佑, 等. 基于多模态特征子集选择性集成建模的磨机负荷参数预测方法 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (8): 1921-1931.
- [4] 蔡改贫, 刘 鑫, 罗小燕, 等. 基于多尺度模糊熵和改进极限学习机的球磨机负荷状态识别 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (6): 2055-2067.
- [5] 罗小燕, 戴聪聪, 程铁栋, 等. 基于改进 EWT-多尺度熵和 KELM 的球磨机负荷识别方法 [J]. 化工学报, 2020, 71 (3): 1264-1277.
- [6] 卿宗胜, 高云鹏, 吴 聪, 等. 基于自适应 VMD 和改进功率谱估计的球磨机负荷特征提取 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (5): 234-241.
- [7] 高纯生, 周小云, 黄祥海. 基于 CEEMDAN-多尺度模糊熵和 ISRNN 的球磨机负荷识别 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40 (4): 141-146.
- [8] 盛晓晨, 史旭东, 熊伟丽. 改进粒子群优化的极限学习机软测量建模方法 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (6): 1683-1687.
- [9] 赵立杰, 邹世达, 郭 烁, 等. 基于正则化随机配置网络的球磨机工况识别 [J]. 控制工程, 2020, 27 (1): 1-7.
- [10] 李 珏, 高云鹏, 卿宗胜, 等. 基于谐波小波包和改进功率谱的球磨机振动信号特征提取 [J]. 仪表技术与传感器, 2020 (5): 93-98.
- [11] 蔡改贫, 赵小涛, 张丹荣, 等. 基于 ASOS-ELM 的湿式球磨机负荷软测量方法 [J]. 振动·测试与诊断, 2020, 40 (1): 184-192, 211.
- [12] 关长亮. 基于 POS-BP 的磨矿过程磨机负荷智能分析方法研究 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2020 (4): 63-69.
- [13] 汤 健, 乔俊飞, 刘 卓, 等. 面向磨机负荷参数预测的多通道机械信号分析评估与优化组合 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46 (9): 997-1007.
- [14] 周金民, 赵彦杰, 王 洋, 等. 陕西某铅锌选矿厂球磨自动化系统设计与应用 [J]. 采矿技术, 2021, 21 (2): 163-166.
- [15] 李和付, 叶国华, 李平定. 优化球磨机工艺参数的研究 [J]. 云南冶金, 2020, 49 (1): 80-84.
- [16] 杨 帆, 王钰涌, 张沛航, 等. 基于 Expert-PID 算法的矿山球磨机物联网控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 120-125.
- [17] 杜宇浩, 阎高伟, 李 荣, 等. 基于局部线性嵌入的测地线流式核多工况软测量建模方法 [J]. 化工学报, 2020, 71 (3): 1278-1287.
- [18] 徐岳清, 陈 旗. 基于自适应极限学习机的磨机负荷智能控制研究 [J]. 中国矿业, 2020, 29 (9): 82-86.
- [19] 汤 健, 乔俊飞, 刘 卓, 等. 磨矿过程的球磨机研磨机理数值仿真及磨机负荷参数软测量综述 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44 (11): 1459-1470.
- [20] 余 刚, 汤 健, 刘 卓, 等. 磨机筒体振动单模态子信号选择方法研究 [J]. 中国科技论文, 2020, 15 (12): 1422-1428.
- [21] 罗小燕, 郁 慧, 方正沛, 等. 基于改进 EWT-精细复合多尺度散布熵和 GG 聚类的球磨机负荷识别方法 [J]. 噪声与振动控制, 2020, 40 (6): 52-58, 66.
- [22] 赵立杰, 邹世达, 郭 烁, 等. 基于正则化随机配置网络的球磨机工况识别 [J]. 控制工程, 2020, 27 (1): 1-7.