

面向船舶软件的仿真测试平台研究

吴立金, 唐龙利, 柴海燕, 韩新宇

(中国船舶工业集团公司软件质量与可靠性测评中心, 北京 100081)

摘要: 软件仿真测试是嵌入式软件黑盒测试领域行之有效且具有广泛应用前景的方法, 为解决船舶软件利用仿真测试环境进行自动化测试问题, 文中分析了舰船作战指挥控制系统中的嵌入式软件的交联环境, 研究了软件测试交联环境协同管理技术; 利用将测试模型转化为 XML 文件并解析驱动的方法实现测试用例的自动执行; 对仿真测试中数据类别分析, 提出了测试数据的自动收集与分析技术。设计并开发了舰船嵌入式软件仿真测试系统, 有效提高了船舶软件测试效率和测试准确性。

关键词: 嵌入式软件; 仿真测试; 测试数据收集; 测试数据分析

Study about Warship Software Simulation Testing System

Wu Lijin, Tang Longli, Chai Haiyan, Han Xinyu

(China Shipbuilding Software Quality & Reliability Testing Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Software simulation testing environment is an acknowledged and effective way to test real-time embedded software. To solve automated test problem of warship software, we analyzed the inter-conjunction environment of Ship Combat Command and Control System, studied the collaboration and management techniques, proposed an automated model-driven testing method based on XML, analyzed the kinds of test data, proposed automatic collection and analysis technique for test data. Finally we designed and implemented The Warship Simulation Testing System, which is feasible and applicable for warship software test.

Keywords: embedded software; simulation test; test data collection; test data analysis

0 引言

软件测试平台^[1]主要集中在军事应用上, 相关机构或大学的学者研究设计或实现了不同的分布式仿真测试环境^[2], 包括在北航可靠性系统工程研究所软件可靠性工程实验室^[3]研究的通用嵌入式软件仿真测试环境 GESTE^[4]、实时分布式仿真测试系统 ESSTDP 航空电子软件仿真测试环境等。目前有 4 种常见的测试嵌入式软件的平台环境: 全实物仿真测试环境、全数字仿真测试环境、半实物开环测试环境、半实物闭环测试环境^[5]。脚本驱动根据结构划分可以分为线形脚本、结构化脚本、共享脚本、数据驱动脚本和关键字驱动脚本等几类^[6-7]。针对舰船嵌入式软件, 研究并构建一个自动的、实时的闭环测试环境——舰船嵌入式软件仿真测试系统, 可以快速构建仿真测试环境、自动驱动测试用例执行以及测试数据的自动收集与分析, 从而完成对舰船嵌入式软件的自动测试。

1 舰船嵌入式软件交联环境分析

1.1 交联环境组成结构

研究的测试系统的适用对象主要包括指挥控制系统中的各种显控台软件、时统系统软件和各种武器的控制系统软件接口形式及协议。舰载装备分布式系统中常用接口形式有:

1) 以太网; 2) RS232/RS422/RS485; 3) AI/AO、DI/DO

1.2 交联设备行为及数据特性分析

1.2.1 行为特性

舰船嵌入式软件交联环境中各交联设备与被测软件的交互行为指交联设备对被测软件的输入及接收被测件的输出。行为特性分析如下:

1) 单个交联设备对被测件的输入行为, 按时间特性可分为事件型输入和周期型输入; 按照与被测件输出有无反馈关系可分存在反馈和不存在反馈。

2) 多个交联设备对被测件的输入行为, 按照是否具有反馈及同步特性可以分为存在时间同步、存在数据同步、存在反馈关系、无相关性 4 种情况。

测试环境中交联设备与被测件之间交互的触发, 主要包括以下两种:

1) 单个条件满足时触发, 条件可能是: 一定时间点/段、上一个测试步骤完毕、本设备/其他设备的状态发生变化、被测件产生了某输出等。

2) 条件的组合满足时触发, 两个及以上的上述条件按照一定的逻辑关系的组合。

1.2.2 数据特性

根据数据的产生来源、是否时序相关、数据内容类型以及发起通信的实体等, 对交联设备及被测软件之间的通信数据可以有多种分类:

1) 按照产生来源可分为静态数据和动态数据;

2) 按照时序特点可分为离散数据和连续数据;

3) 按照传输的数据内容类型可以包括: 无符号整数、有符号整数、BCD 数、IP 数据、时间、编码、字符串、控制字、数组 (包括单一元素类型数组、复合元素类型数组);

4) 按照发送时机可分为周期型数据和事件型数据;

5) 按照传输方向可分为输入数据和输出数据。

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-09-18。

作者简介: 吴立金 (1987-), 男, 山东人, 主要从事软件测试与软件可靠性方向的研究。

唐龙利 (1977-), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要从事软件测试方向的研究。

2 软件测试交联环境协同管理技术

2.1 仿真测试环境基本原理

面向分布式体系结构，舰船嵌入式软件分布式仿真测试系统的物理框架如图 1 所示，包括：测试主控机（主控节点）、Windows 仿真节点、VxWorks 仿真节点、测试数据服务器、以及各种通信协议。各仿真节点通过交换机相连，具备以太网、串口、AI/AO、DI/DO 通信接口。

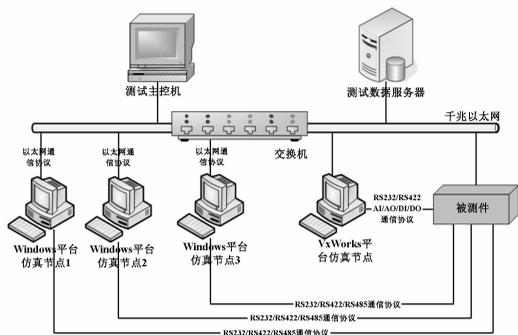


图 1 测试交联环境框架

测试系统中主控节点进行仿真节点的集中管理与控制，各仿真节点协同完成测试激励及数据采集。基本原理为：1) 测试执行前，由测试主控机创建及管理不同的舰船嵌入式软件所需要的仿真测试交联环境模型，创建及管理不同的测试用例模型，完成之后，将仿真测试交联环境模型信息及测试用例模型信息下发至各仿真节点，各仿真节点根据模型信息初始化自身的软硬件接口，为测试执行做准备；2) 测试执行时，由测试主控机进行集中控制，协调各仿真节点驱动接口按照通信协议完成测试激励及数据采集，并暂存采集的数据；3) 测试执行完成后，各仿真节点将暂存的数据返回至测试主控机，由测试主控机存入测试数据服务器，测试数据服务器根据采集到的数据进行分析，判定测试用例是否通过。

2.2 舰船嵌入式软件测试交联环境管理

舰船嵌入式软件测试交联环境管理是指对构建的仿真测试交联环境模型及测试用例模型的管理，为进行自动化测试做好基础工作。根据仿真测试交联环境的功能及软件测试的需要，舰船嵌入式软件测试交联环境管理主要涉及 3 个方面：1) 仿真测试交联环境模型的配置管理，包括节点选择及配置，仿真节点接口配置，接口通信协议配置；2) 测试用例模型管理，包括测试用例的形式化转换及存储、测试执行策略、测试数据收集方案；3) 项目基本信息管理。

2.3 舰船嵌入式软件测试交联环境协同

舰船嵌入式软件测试交联环境协同，指的是协同节点间的时序和数据——用时序同步来保证测试交联环境中各个节点在测试执行过程中的时间统一，以及在统一控制流下的测试任务的协调；用数据同步来保证各节点上的数据在测试执行过程中的一致性，并能实时更新。

1) 时间协同：测试仿真系统只在测试执行前自动对所有仿真节点进行时间同步，或必要时由用户手动启动时间同步。

2) 仿真节点协同调度：交联环境仿真系统必须采用有效的调度策略协调各仿真节点之间的实时运行。设计测试用例时给出每一步骤的执行方式以及相应的执行时间，仿真节点根据测试用例测试步骤中设置的延时或周期执行时间依次执行相应

的测试步骤，从而保证测试用例各步骤执行的时序协调性。

3) 数据同步：在测试交联环境中执行测试用例的过程中，各个仿真节点可能共享一些数据。系统借鉴操作系统的存储机制和读写锁机制来分别保证系统间的数据一致性和系统内数据的一致性。

3 软件测试用例自动驱动技术

测试用例自动驱动的基本思路如图 2 所示，包括以下两个步骤：

1) 对被测软件的外部交互数据及行为进行分析，进而对测试用例进行建模。分为两步步骤：(1) 对测试用例的数据和行为进行要素分解；(2) 对这些要素进行描述，得到数据模型和行为模型，由这两类模型组合为测试用例模型。

2) 测试用例模型建好后，按照一定协议转换为 XML 文件。当测试开始时，由主控节点将这些 XML 文件下发至各仿真节点，仿真节点收到这些 XML 形式的测试用例后，进行指令解析，识别出其中的各执行指令。由主控节点和仿真节点协调合作，驱动测试用例各步骤的自动执行，从而实现测试用例的自动执行。

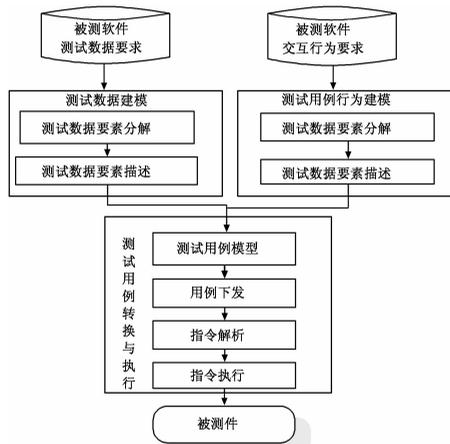


图 2 测试用例模型驱动过程

4 测试数据自动收集与分析技术

4.1 仿真测试中数据类别分析

仿真测试环境对嵌入式软件系统进行测试时，产生的数据如图 3 所示，图中箭头连接线表示各类数据产生源及产生原因，数据可以归纳为以下 4 类数据。

1) 模型数据：在测试过程中包括 3 种模型数据：测试交联环境模型、测试用例模型和数据收集模型。

2) 测试项目执行数据：测试项目执行数据包括两种：一种是测试控制指令数据，另一种是测试用例执行序列数据。

3) 步骤结果数据：测试步骤结果数据主要是指每一测试步骤实际输出数据。步骤结果数据包括以下属性：测试用例标识、测试步骤号、预期输出变量、预期输出变量值、实际输出变量、实际输出变量值。

4) 变量时序数据：变量时序数据是指在测试用例执行过程中采集的被测系统输入和输出变量值。变量时序数据包含以下属性：测试用例标识、采集时间、变量名和变量值。

4.2 测试数据自动收集技术

测试数据自动收集技术包括确定数据收集的要求、确定数

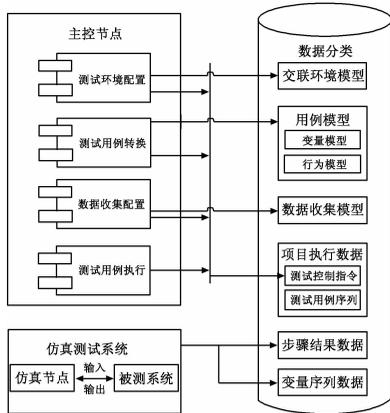


图 3 测试数据分类

据收集方法, 以及测试数据存储等。其中数据收集的要求包括要确定需要收集的数据类别和范围、收集时机、收集配置方案。测试数据自动收集技术方案如图 4 所示。

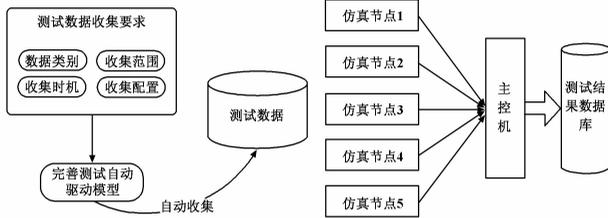


图 4 测试数据自动收集技术方案

测试数据收集的自动执行过程是: 1) 仿真节点自动执行收集配置方案, 仿真节点与被测系统测试结果数据暂时缓存于仿真节点; 2) 仿真节点再将这些结果数据文件返回给主控节点; 3) 主控节点将各仿真节点收集的数据进行汇总、集成, 然后统一导入写入测试服务器中存储。

4.3 测试数据自动分析技术

测试数据自动分析的主要任务是测试步骤结果的自动化比较和测试变量时序数据的处理和分析。测试数据分析技术建立在数据收集的基础上, 完成测试数据的收集后, 系统对收集到的测试数据进行分析。测试数据分析首先要对测试数据库进行查询, 然后对返回的结果数据进一步进行处理和分析。测试数据分析主要涉及到数据显示、数据筛选、结果判定、趋势分析、比例转换五种分析技术。测试数据分析技术方案如图 5 所示。

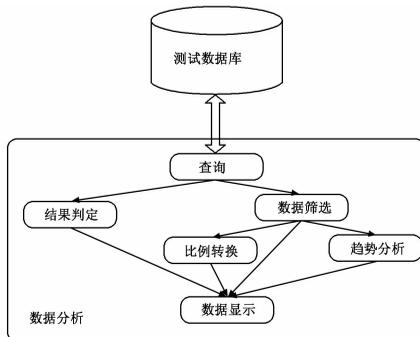


图 5 测试数据自动分析技术方案

数据自动分析的 5 种方法不是孤立的, 它们之间有一定的输入、输出关系, 例如, 数据筛选的输出为比例转换和趋势分析的输入, 比例转换和趋势分析的输出为数据显示的输入。

5 软件仿真测试系统研发

5.1 仿真测试系统设计

舰船嵌入式软件仿真测试系统软件分 4 层: 网络通信层、数据层、业务层和展现层。软件各层次的功能模块分布如图 6 所示, 其中测试数据库、VxWorks 仿真节点上位机部署到主控节点计算机。

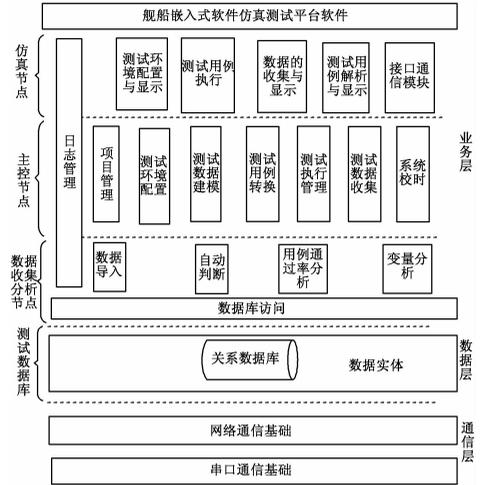


图 6 软件分层结构

测试系统以分布式的网络结构为框架, 包括 1 个主控节点、5 个 Windows 仿真节点、1 个 VxWorks 仿真节点和 1 个测试数据服务器节点。Windows 仿真节点用于完成一般的输入任务, VxWorks 用于完成实时性高的输入任务, 在主控节点的控制下, 6 个仿真节点相互协同, 驱动测试用例执行和测试数据收集。本文实现的仿真测试系统的主要进步点主要体现在: 1) 通过多个节点的交联环境仿真, 可避免在交联环境复杂的情况下, 单节点受软硬件性能限制而难以实现交联环境的性能要求; 2) 采用项目管理模式, 可实现测试数据多次复用, 大大提高回归测试的效率; 3) 测试环境的模块化配置可实现测试环境的快速构建; 4) 测试数据的自动收集与分析, 可提高测试效率。

5.2 仿真测试系统实现

仿真测试系统的主控节点主要包括 7 个功能模块: 项目管理、测试环境配置、测试数据建模、测试用例转换、测试用例执行策略、测试数据收集, 系统校时。仿真节点界面主要包括 4 个区域: 菜单栏区, 信息组织区、信息配置显示区、输出区。Windows 仿真节点主界面避免用户操作过多, 主要以显示为主, 主界面中显示仿真节点名称、IP 地址、串口配置信息, 串口配置参数, 日志信息、测试用例信息、输出数据信息。对于 VxWorks 仿真节点主控机调用 VxNodeStart 函数先启动 FTPServer, 再启动 VXWORKS 节点程序, 启动时无界面。

嵌入式软件仿真测试系统通过环境配置能够快速建立被测软件外围测试环境, 通过用例驱动能够自动加载并执行测试用

于 0，则判定两条纹相同。

由图 6 可知，提取的投射条纹为非封闭的凹凸线图形，无法用描述封闭图形的傅里叶描绘子等方法提取形状特征，本文通过提取条纹的周长 L 、形状复杂度 D 、凹凸性 E 等区域形状特征^[11]构成向量进行相似性计算。

形状复杂度 D 的计算式为：

$$D = \frac{L^2}{S} \tag{5}$$

凹凸性 E 的计算式为：

$$E = \frac{S_c}{S} \tag{6}$$

其中， S 为投射条纹面积； S_c 为投射条纹凹形面积。

3 实验与分析

在实验室条件下，取一段总长 35 m，直径 20 mm，捻距 24 mm，绳股数为 6 的钢丝绳进行测长实验，各次实验中均随机加入了行进速度变化、抖动等干扰因素，实验结果如表 1 所示。

表 1 系统实验结果

序号	实测长度/mm	系统测长/mm	误差率/ (%)
1	35.011	35.074	0.18
2	34.989	35.054	0.18
3	34.996	35.063	0.19

测长误差主要来源于线结构光投射位置和角度的偏差，导致分割的投射条纹形状不准确，造成累加绳长的时刻出现偏差。实验证明，系统在实验室条件下可达到 0.2% 的精度要求。

(上接第 1453 页)

例，能够满足舰船系统以太网连接设备所含的嵌入式软件的测试要求，从应用效果来看，测试执行效率和自动化程度大大提高，达到了预期效果。

6 小结

本文研究的面向船舶软件的仿真测试系统具有功能性、通用性、可扩展性、实时性等基本特性，使用本仿真测试环境有以下 5 个优点：

- 1) 仿真测试环境真实再现了嵌入式软件的实际运行环境，保证了测试的有效性；
- 2) 在仿真测试环境中，对于输入的控制更为灵活，可以模拟输入各种正常及异常情况，避免了对真实运行环境中相关软硬件设备的依赖，降低了测试成本，也提高了测试的充分性；
- 3) 仿真测试环境的建立使得在软件研制完毕时即可以开始测试，而不需等待相关联的设备都研制完毕，保证了充裕的测试时间，也使得软件有充足的修改及回归测试时间，从而提高软件质量；
- 4) 在仿真测试环境中，更容易获取嵌入式软件运行过程中对其交联设备输入的响应和返回的中间结果，可以更好的进行测试数据分析；
- 5) 在仿真测试环境中，可以更有效的开展自动化测试技

4 结束语

本文提出的钢丝绳在线非接触测长系统解决了传统接触式测长固有的打滑、磨损等问题，且不受钢绳在线速度变化、捻距误差等因素的影响，实验证明，可达到预期的精度要求；本文采用的图像处理算法简单，数据量小，执行效率高，效果较好，可满足系统的实时性要求。下一步工作将在实际生产线上进一步完善和改进系统。

参考文献：

- [1] 鲁建勇. 钢丝绳长度测量方式及其比较 [J]. 金属制品, 2009, 35 (6): 37-38.
- [2] 马洪飞, 王毅, 徐殿国. 非接触式钢丝绳计长仪 [J]. 金属制品, 1999, 25 (6): 37-39.
- [3] 唐跃林, 肖沙里, 丘柳东, 等. 钢丝绳实时测长系统 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (9): 813-815.
- [4] 周宴, 肖沙里, 丘柳东, 等. 钢缆绳在线测长系统 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27 (10): 118-120.
- [5] 孟祥武, 白文科. 钢丝绳长度计量机的设计 [J]. 橡塑技术与装备, 2003, 29 (11): 32-36.
- [6] 孟祥武, 王铁宏, 李树. 钢丝绳长度计量机的设计 [J]. 金属制品, 2003, 29 (5): 30-32.
- [7] 李昔华, 邢宏, 严学书. 钢丝绳在线测长仪的研制 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2006, 23 (3): 263-265.
- [8] 陈军, 佟巨山. 智能钢绳测长仪 [J]. 仪表技术与传感器, 1998 (4): 20-22.
- [9] 李前桂. 钢丝绳生产 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1959.
- [10] 柴华. 目标形状特征提取方法 [J]. 计算机与现代化, 2013, 53 (4): 108-109.
- [11] 贾永红. 数字图像处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

术，包括测试用例的自动执行，测试数据的自动收集与分析，从而可以提高测试效率、测试准确性，大大降低人为操作造成的时间消耗和不精确性，降低测试成本。

参考文献：

- [1] 陈哲. 软件自动化测试系统的研究与实现 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2008.
- [2] 林丹丹. 嵌入式软件仿真测试系统开发 [J]. 信息技术, 2012 (10).
- [3] 刘斌, 高小鹏, 陆民燕, 等. 嵌入式软件可靠性仿真测试系统研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000 (3): 490-493.
- [4] 通用嵌入式软件测试环境 GESTE 介绍及用户指南 [Z]. 北京航空航天大学.
- [5] 张丽波. 软件自动化测试的设计和实现 [J]. 佳木斯大学学报, 2004, 22 (4): 568-572.
- [6] 姚实颖, 肖沙里, 等. 软件测试自动化中建立可维护脚本的技术 [J]. 计算机工程, 2003, 29 (11): 79-81.
- [7] Paul Baker, Zhen Ru Dai. Model- Driver Testing [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 27-35.
- [8] 刘斌. 软件可靠性仿真测试环境的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [9] 崔小乐. 嵌入式软件仿真测试系统及仿真模型 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.