

基于数字孪生的智能车间系统仿真加速测试方法

成克强^{1,2}, 林家全², 杨东裕², 戴青云³, 王美林¹

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006; 2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610; 3. 广东技术师范大学, 广州 510665)

摘要: 为解决当前制造系统软件可靠性仿真测试时间长、测试环境难以搭建等问题, 提出采用数字孪生技术与智能车间系统仿真加速测试相结合的方法; 建立智能车间高保真数字孪生模型替代现实生产车间系统用于制造系统软件的可靠性仿真测试, 首先要构建包含产品、设备资源、工艺流程等系统级仿真模型; 同时, 为仿真车间生产事件流程, 在模型中, 还需结合生产实际情况, 设置设备间通信协议、通信数据以及生产线事件及队列顺序, 真实模拟系统运行环境; 通过构建步进电机产线数字孪生模型, 仿真加工装配流程, 运行智能车间系统软件, 采用仿真时钟推进机制开展加速测试, 验证了该方法的有效性和实用性, 对开展工业系统软件高保真快速测试评估具有一定的借鉴意义。

关键词: 数字孪生; 仿真加速; 软件测试; 智能车间系统

Simulated Acceleration Testing of Intelligent Workshop System Based on Digital Twin

Cheng Keqiang^{1,2}, Lin Jiaquan², Yang Dongyu², Dai Qingyun³, Wang Meilin¹

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangdong 510006, China;
2. The Fifth Electronics Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangdong 510610, China;
3. Guangdong Polytechnic Normal University, Guangdong 510665, China)

Abstract: In order to solve the problem of long time and difficulty to set up test environment of reliability simulation test of current manufacturing system software, the method of combining digital-twin technology and simulation acceleration test is proposed. To establish the high-fidelity digital twin model of the intelligent workshop instead of the real workshop system for reliability simulation test of the manufacturing system software, the system-level simulation model including products, equipment resources and process flow should be constructed. At the same time, in order to simulate the workshop production events process, the communication protocol and communication data between devices, as well as the sequence of production line events and queues should be set according to the actual production situation to simulate the operating environment of the system. By constructing digital twin model of stepping motor production line, simulating machining assembly process, running intelligent workshop system software, and using simulation clock propulsion mechanism to accelerate testing, the effectiveness and practicability of this method are verified, which can be used for reference in the high-fidelity testing of industrial system software.

Keywords: digital twin (DT); Simulation Speed-up; software testing; Intelligent workshop system

0 引言

当前, 我国正从制造大国迈向制造强国, 作为智能制造的关键支撑, 智能车间系统软件对推动制造业转型升级具有重要的战略意义。随着智能车间数字化、智能化、系统化发展, 系统软件的可靠性、稳定性、开放性直接影响加工生产的质量和效益。然而, 由于软件需求的不确定性, 开发人员的主观局限性, 以及制造系统的复杂性, 系统软件在开发过程中难免会出现缺陷^[1-2]。同时, 随着软件系统长期运行, 系统性能衰减, 占用的资源累增, 造成软

件老化, 导致系统失效或宕机^[3]。为避免出现软件老化现象, Huang等^[4]提出软件再生技术, 采用定期清除内部状态或运行环境, 避免老化引起突发性失效, 但是再生频率不易把握。有学者提出对软件老化趋势进行预测^[5-6], 根据系统运行参数信息, 对系统资源消耗情况进行预测分析, 但难以捕捉老化性能参数的隐藏规律, 导致预测精度低, 预测效果不佳。为提升制造系统软件可靠性, 减缓系统软件老化速度, 更好的服务生产制造, 唯有加强软件仿真测试, 建立高保真测试运行环境, 尽可能的及早挖掘软件

收稿日期: 2020-10-28; 修回日期: 2020-11-23。

作者简介: 成克强(1983-), 男, 湖南永州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事软件质量可靠性、信息获取与控制方向的研究。

戴青云(1965-), 女, 湖南常德人, 教授, 博导, 博士, 主要从事物联网技术、工业互联网等方向的研究。

王美林(1975-), 男, 湖南益阳人, 副教授, 博士, 主要从事智能制造、工业互联网等方向的研究。

通讯作者: 林家全(1995-), 男, 广东潮州人, 助理工程师, 主要从事软件可靠性与数字孪生方向的研究。

引用格式: 成克强, 林家全, 杨东裕, 等. 基于数字孪生的智能车间系统仿真加速测试方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 39-44.

漏洞^[7]。

系统软件可靠性测试是在设定的条件下进行相关操作, 检验系统是否满足规定的需求以及评估预期结果与实际结果的偏差, 往往通过放大可能造成被测对象性能下降的压力因素, 或加速被测产品性能下降速率, 缩短测试时间, 提升软件开发时效性。在测试过程中, 为节省人力、时间及硬件资源, Just R 等^[8]提出采用自动化测试, 但软件测试自动化是一项复杂的任务, 它不仅涉及测试用例的执行, 还涉及适当输入值的生成和相应输出的评估, 在测试时间和运行环境上, 仍然面临很多问题。随着系统软件趋向大型化、高复杂度发展, Holck J 和 Sthl D 等^[9-10]提出针对存在多个依赖关系的大型复杂软件开展持续集成测试, 虽然在开发周期的各个阶段频繁地开展软件测试, 可以提高测试效率和可预测性, 但总体测试时间太长, 耗费高, 也不能全面发掘漏洞。同时, 智能车间系统软件有别于传统软件, 智能车间系统软件的运行非常依赖于与其配套生产设备的交互, 采用传统软件测试方法, 无法真实模拟软件的实际运行情况。当前, 随着个性化定制生产的快速发展, 具备实时调度和精准预防维护等功能的智能车间系统软件对时效性和经济性的要求越来越高。制造系统传统测试方法需要长时间不间断的执行测试, 在测试期间需一直开启生产线, 由于在非加速状态下系统软件的老化失效时间非常长, 完成一次可靠性测试就需要数月甚至更长时间, 耗费非常高。因此, 现有的软件可靠性测试和评估技术已不能满足智能制造系统软件的可靠性测试评估要求, 急需提出一种新的方法来缩短工业系统软件的可靠性测试时间和降低测试成本。

近年来, 随着多学科建模与仿真技术的飞速发展, 数字孪生概念及应用成为研究热点。对于制造系统仿真测试而言, 如能构建生产线的数字孪生模型, 设置与实体产线相同的属性, 从而代替实体生产线与系统软件实时交互, 即可实现高保真测试, 缩短测试时间和节省测试成本。

1 数字孪生技术

数字孪生是一项集多物理量、多尺度、多概率的仿真技术, 通过数字虚拟空间与物理设备之间的高保真虚实映射, 实现数字孪生体与实体设备全生命周期同步演化的过程, 是物理与信息世界的桥梁和纽带^[11-12]。数字孪生概念最早由 Grieves 教授提出^[13], 最初应用于航空航天领域, 现已推广到智能制造、网联汽车测试、装备预防维护、文物保护等领域, 贯穿产品全生命周期的各个阶段^[14]。葛雨明等提出在有限环境下利用数字孪生技术进行自动驾驶汽车的测试和验证, 可以真实模拟复杂道路场景^[15]; Angjeliu 等^[16]将数字孪生技术用于米兰大教堂的维修保护, 通过建立高精度的建筑结构孪生模型, 预测评估结构发展趋势, 并制定相应的预防维护策略或干预措施; 在核电设备运行服务方面, 采用数字孪生技术, 可以检测异常、诊断和评估系统性能, 同时预测设备剩余寿命, 指导运行优化和制

定设备维护方案^[17]; 在飞机运行中, 通过建立综合考虑结构偏差和温度变化的超高保真模型, 在保全飞机结构完整性的前提下, 预测飞机零部件及整机寿命, 数字孪生被誉为“结构寿命预测和管理的再造工程”^[18]; Tao Fei 等^[19]提出利用风力发动机数字孪生模型驱动故障预测与健康管理, 可有效实现孪生模型与实体的交互与融合。

随着仿真建模技术与工业互联网、大数据、人工智能技术的融合发展, 在智能制造领域, 数字孪生技术将大幅推进产品设计、生产、运行维护等全生命周期的变革发展。智能车间是智能制造的主要载体, Tao Fei 等^[20]提出智能车间数字孪生模型构建智方法, 并研究了数字孪生智能车间的运行机制和实现方法; Guo Daqiang 等^[21]提出装配毕业制造系统 (GMS) 数字孪生模型, 针对装配岛的特点及工作流程, 通过设计作业票、安装票、物流票来组织生产活动, 可以有效规范管理人员、操作员的职责, 增强车间管理的可视性。智能车间系统软件是智能制造的核心, 操控着产品全生命周期的数据, 其可靠性和稳定性直接影响产品的生产质量和效益。通过数字孪生技术, 可以在智能车间系统软件开发测试阶段发现漏洞和不足之处, 无需等到实际生产运行阶段再对系统软件进行测试。同时通过建立准确的测试与预测模型, 在软件失效前预先做好防范措施, 可以大幅降低系统软件的商用风险, 提升工业软件的运维能力。

2 数字孪生模型实现框架

数字孪生模型是根据系统的物理实体在虚拟空间上建立数字孪生体, 从而实现对实体全生命周期的映射。制造系统生产线的数字孪生模型结构框架如图 1 所示。

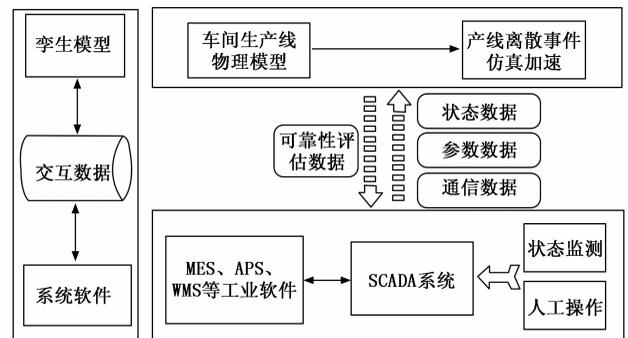


图 1 生产线数字孪生模型结构框架

在框架中, 数字孪生虚拟模型基于生产线的物理模型进行构建, 通过对实际物理模型的三维结构、通信数据、通信接口等进行建模, 实现生产线的数字孪生模型离散事件仿真加速测试。车间系统软件与数字孪生模型通过数据采集与监控系统 (SCADA) 进行交互, 包括下发业务流程、反馈模型状态数据等。

建立生产线高保真数字孪生模型替代实际的生产车间系统用于制造系统软件的可靠性仿真测试, 需要构建包括产品、设备资源、工艺流程等系统级仿真模型。为实现孪

生模型与系统软件之间的交互功能, 模型应具备交互、计算和控制等属性。以构建步进电机生产线数字孪生模型为例, 需实现模型中设备间、SCADA 系统与车间系统软件 (MES、APS 等) 之间的交互能力; 通过分析计算实际采集的机床主速、切削力、温度等实时数据, 在仿真软件中实现机床孪生模型的加工过程和行为。另外, 还具备对产线资源的控制功能, 即利用所构建的车间模型, 结合设备生产情况, 在数字孪生模型中实现真实场景下的生产加工过程。

3 仿真加速测试

步进电机生产线系统是一种典型的离散事件系统, 在构建车间系统产线数字孪生模型后, 为使孪生模型具有仿真加速可靠性测试评估的能力, 采用离散事件系统仿真方法开展测试。根据模型中的加工流程、工艺要求以及与车间系统软件的交互事件情况, 确定事件到达模型、服务模型和排队模型等信息, 运用离散事件仿真加速方法实现生产线的数字孪生模型执行生产过程的加速效果, 缩短可靠性测试评估时间。结合产线系统特点, 拟采用进程交互法的建模方法, 通过提升加速系统仿真时钟运行速度开展仿真测试。

3.1 离散事件进程交互法

按照进程交互法思想, 生产线中各个设备及产品的数字孪生模型视为离散事件系统仿真中的实体, 其中产品为系统中的临时实体, 设备为系统中的永久实体。整个仿真系统的动态运行过程表现为: 随着系统的执行, 临时实体不断产生和达到, 在永久实体的作用下, 与系统交互完成全部活动, 最终离开系统。进程交互法通过设置和执行未来事件表与当前事件表来实现相关流程。未来事件表包括将来某个时刻发生事件的记录, 现阶段被推迟但下次执行时间已确定的事件的记录也在其中, 每一个记录包括当前位置、下一个位置、优先权标志等信息; 当前事件表是指执行时间在当前仿真时刻内的事件记录, 包括前期被推迟但执行时间在此刻的事件记录。进程交互法流程如图 2 所示。

采用离散事件进程交互法开展数字孪生模型仿真测试时, 通过初始化各参数, 扫描孪生模型中未来事件表的事件记录, 取出满足条件的事件加入当前事件表, 推进仿真时钟。按照拟定规则, 逐项扫描孪生模型中的当前事件表。通过判断当前事件所属进程以及在进程中的位置信息等, 尽可能的向前推进该事件, 直到不满足继续执行的条件为止。然后对当前事件表的下一个事件进行同样操作。在推进事件的执行过程中, 对被延迟执行的事件的位置做好记录, 并指出后续可能被激活的时间。当事件执行完毕, 则在当前事件表中删除相关信息。扫描完当前事件表中所有事件后, 返回到未来事件表中, 重新推进仿真时钟, 进行下一轮操作。对车间仿真系统而言, 一旦执行某加工流程, 只要满足其相应条件, 就要实现所有永久实体与临时实体的交互, 孪生模型才能反映物理车间的真实场景。同时,

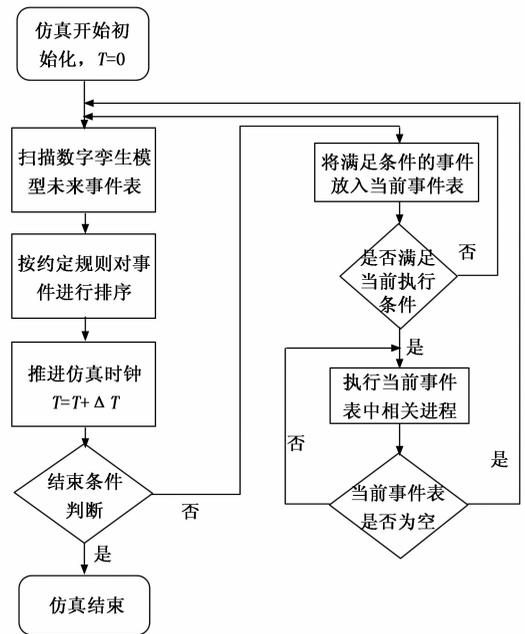


图 2 进程交互法流程图

在推进仿真时钟的过程中, 要尽可能的做到车间系统软件与车间虚拟设备的真实交互, 时钟推进间隔的选取直接影响仿真的逼真程度

3.2 智能车间系统软件仿真加速测试

智能车间系统软件的可靠性直接关系到车间生产产品的质量和效率, 同时也影响车间管理的成本控制和排产计划, 因此在系统投产时, 需加强对系统软件的可靠性测试验证。运用产线数字孪生模型开展系统软件仿真加速测试, 待测系统软件直接与产线孪生模型按照实际业务流程进行数据交互。生产线的数字孪生模型包含生产相关的事件队列, 记录事件发生顺序及事件的执行时间。仿真加速测试时根据事件队列与当前仿真时间设置未来事件表与当前事件表。为准确计算总测试时间, 仿真加速测试采用固定步长时间推进机制方式进行仿真时钟加速。以 200 倍加速为例, 即在现实中每隔 5 毫秒, 仿真时钟便推进 1 秒, 以此推动事件队列的加快执行。待测系统软件与部分数字孪生模型及其事件的交互流程, 如图 3 所示。

从以上示意图可以看出, 智能车间系统软件仿真加速测试主要实现系统软件在车间层的执行速度。待测系统软件根据实际业务流程与数字孪生模型进行数据交互。通过加速离散事件仿真系统中的车间层虚拟事件, 加快孪生设备执行与响应速度, 缩短软件系统因等待生产线设备响应执行的时间, 提高软件系统与孪生设备交互通信频率。在测试过程中, 通过缩短孪生系统中每个业务流程的完成时间, 最终实现缩短系统软件的可靠性评估验证时间。

4 步进电机产线数字孪生模型构建及系统软件测试分析

采用数字孪生技术开展智能车间系统软件仿真加速测

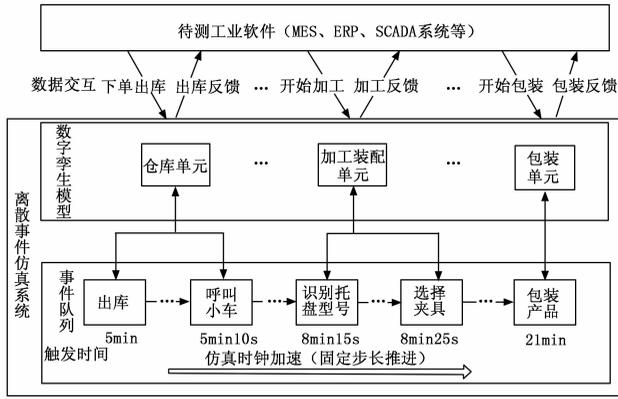


图 3 智能车间系统软件仿真加速测试示意图

试, 在选取测试用例时, 考虑产线需涵盖大部分工业软件及流水线的业务流程, 使测试结果更具普遍性和通用性, 因此, 选用典型的步进电机加工装配生产过程作为车间系统生产线开展测试验证。该车间生产线包括出库、AGV 输送、加工、装配、检测、包装等常见生产流程, 同时, 车间系统软件涵盖了目前智能车间中常见的功能如柔性生产、工艺修改、生产排程、仓库管理等, 保证了该测试过程及结果具有一定的参考意义。

4.1 构建车间生产线数字孪生模型

基于 windows 系统, 采用 Demo3D 软件构建步进电机生产线数字孪生模型。

4.1.1 构建生产设备的三维模型

根据步进电机车间生产线生产加工特点, 结合关键设备的物理结构, 构建相关设备的三维模型。三维模型应满足其大小、位置、形状等与实际设备比例相同, 动作逻辑与生产线设备保持一致。步进电机车间生产线的部分设备物理模型及其对应三维模型如表 1 所示。

4.1.2 确定设备接口及通信协议

根据设备用户手册或说明文档, 确定实际生产线中设备与所用软件间的通信协议、API 接口、通信地址, 并在模型中设置相同的协议和地址, 部分通信地址及协议如图 4 所示。

设备号	名称	通讯驱动	本地参数	远程参数	数据类型	开始
01	System					0
02	主产线	STTCP	[default]	192.168.0.101, 57-1200.1	# - 中间状态	1200
03	仓储区A	STTCP	[default]	192.168.0.111, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
04	加工区	STTCP	[default]	192.168.0.121, 57-1200.2	DB - 数据块	100 0
05	检测区	STTCP	[default]	192.168.0.131, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
06	包装区A	STTCP	[default]	192.168.0.141, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
07	包装区B	STTCP	[default]	192.168.0.151, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
08	检测区B	STTCP	[default]	192.168.0.161, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
09	包装区C	STTCP	[default]	192.168.0.171, 57-1200.1	DB - 数据块	100 0
10	检测区C	STTCP	[default]	192.168.0.181, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
11	加工区B	STTCP	[default]	192.168.0.191, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
12	检测区D	STTCP	[default]	192.168.0.121, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
13	包装区数据	STTCP	[default]	192.168.0.151, 57-1200.1	DB - 数据块	4 0
14	检测区数据	STTCP	[default]	192.168.0.161, 57-1200.1	DB - 数据块	05 4660
15	包装区数据Q	STTCP	[default]	192.168.0.141, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
16	检测区数据Q	STTCP	[default]	192.168.0.151, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
17	检测区CQ	STTCP	[default]	192.168.0.161, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
18	检测区DQ	STTCP	[default]	192.168.0.171, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
19	包装区Q	STTCP	[default]	192.168.0.181, 57-1200.1	Q - 数字输出	100
20	主站OP	STTCP	[default]	192.168.0.131, 57-1200.1	DB - 数据块	1 2
201	201	OPCXMLA		192.168.0.200, 5015, 变量交互!	OPCXA变量	0
202						
203						

图 4 数字孪生模型与 SCADA 系统的通信地址及协议

表 1 步进电机生产线主要设备三维模型

设备名称	设备三维模型	设备物理模型
AGV 小车		
包装单元		
仓库单元		
加工单元		

4.1.3 确定通信数据

结合系统软件开发需求, 确定生产线设备在运行时与车间系统软件或车间其他生产线设备通信的具体数据内容。在步进电机产线孪生模型中, 车间系统软件与数字孪生模型间的交互数据经过 SCADA 系统下发和上传。在 SCADA 系统和数字孪生模型中, 定义的部分数字孪生设备的数据类型变量和模型模拟变量如图 5 和图 6 所示。

4.1.4 确定生产线事件及队列顺序

根据步进电机产线生产流程, 确定生产过程中的下单、备料、出库、加工等主要事件, 并确定这些事件在生产过程中的先后顺序、到达时间及事件发生逻辑等信息。图 7 为产品加工装配流程图。根据流程图确定事件的发生顺序, 同时, 将事件相关信息记录到进程交互法的未来事件表与当前事件表中。

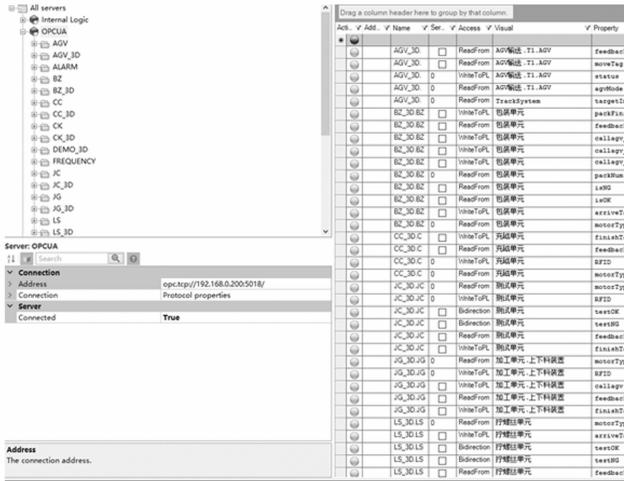


图 5 数字孪生模型变量

索引	AB - 模拟读写变量	DB - 内开关闭变量	VA - 内部模拟变量	VO - 内部开关变量	VT -				
23	CE_CALL_AGV_ST1	1	BZ_BO35	0	NEEDSTART-STATE	0	NEED加急	0	NEEDPATH
24	CE_KC	0	BZ_BO36	0	NEEDALB-NEEDS	90000	NEED自修	0	NEEDTDMER
25	CE_INIT_TYP1	5	BZ_BO37	0	NECORD	27	IS_ALARM_ID	0	NEEDTDMER
26	CE_M	0	BZ_BO38	0	NECORD-COUNT	4766	IS_START	0	NEED
27	CE_MFE1	0	BZ_BO39	0	NECTYPFE	0	IS_START_ID	1	NEEDKAME
28	CE_TRAN_MOTOR_C	0	BZ_STOP_STATUS	0	NECT(2)	0.15684964	IS_STATUS	1	WV1
29	CE_V_A	0	BZ_TRAV_AGV_BEACH	0	NOTAL-NEEDS	323635	IS_STATUS_ID	1	WV2
30	CE_V_B	0	CC_ALARM_STATUS	0	NOBACKALMOUNT	0	AGV_ALARM_ID	0	WV3
31	CE_V_C	0	CC_DOME1	0	NECES-INDEX	0	AGV_CONFIGID	0	WV4
32	CE_MOTOR_A	0	CC_DOME1	0	WPA1	0	AGV_DOME1	0	NEED_RECEIVERNAME
33	CE_MOTOR_ALARM	0	CC_STOP_STATUS	0	WPA2	0	AGV_DOME1	0	NEEDREP
34	CE_MOTOR_SPEED	0	CC_TR_V_SET	0	WPA3	0	AGV_DOME2	0	NEEDPATH
35	CE_MOTOR_A	0	CC_ONLINE_RESET	0	WPA4	0	AGV_BEACH	0	NEEDOK
36	CE_MOTOR_ALARM	0	CC_ONLINE_START	0	WPA5ABLE-PUMPER	615	AGV_BEACH	0	NEEDCODE
37	CE_MOTOR_SPEED	0	CC_ONLINE_STATUS	0	WPA6-LOGGINGREQ	0	AGV_BEACH	0	NEEDSTARTID
38	CE_A	0	CC_ONLINE_STOP	0	WKEEOP	4	AGV_START	0	NEEDSTARTID
39	CE_ALARM_TYP1	0	CC_RESET_STATUS	0	WME+2	2	AGV_START_ID	1	NEEDPLAN
40	CE_B	0	CC_BO31	0	WME+1	7471	AGV_START1	0	NEEDPLAN
41	CE_C	0	CC_BO32	0	WME+1	2520	AGV_START2	0	NEEDSTARTID
42	CE_D	0	CC_BO33	0	WME-1	2520	AGV_STATUS	0	NEEDREFNAME
43	CE_E	0	CC_BO34	0	WME-0	0	AGV_STATUS_ID	1	NEED_RECEIVE_CODE
44	CE_F	0	CC_STOP_STATUS	0	WNEAR	2020	AGV_STATUS1	0	NEED_RECEIVE_TEST

图 6 SCADA 变量

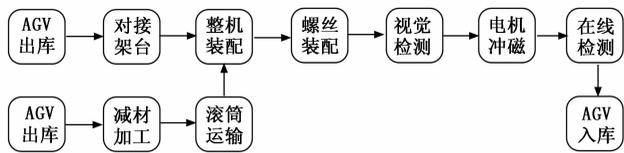


图 7 步进电机加工装配流程

4.1.5 确定事件与数字孪生模型之间的联系

生产线设备的数字孪生模型为事件发生的载体。根据产线生产过程, 确定每个事件发生的载体, 同一个事件可能有多个载体, 同一个载体也可能产生多个事件。图 8 为步进电机产线数字孪生与相关事件的联系图。

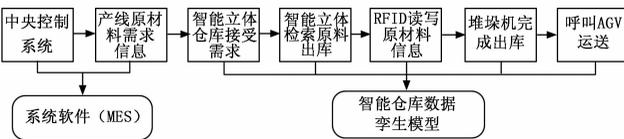


图 8 步进电机产线数字孪生模型与事件的关系

最终构建的步进电机产线数字孪生模型, 如图 9 所示。

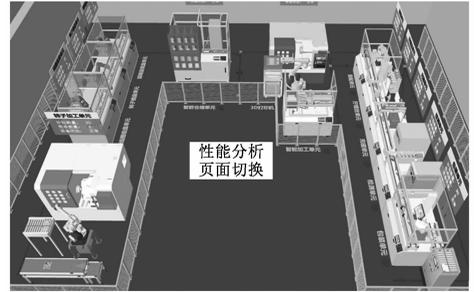


图 9 步进电机产线数字孪生模型

4.2 仿真测试

在构建的步进电机产线数字孪生模型上运行车间系统管理软件, 采用仿真加速测试方法, 缩短系统软件可靠性评估时间。经过多次试验测试, 因受限于仿真服务器的硬件性能, 系统软件在步进电机数字孪生生产线模型中的加速运行速度最大维持在 200 倍运行。各倍速下每 5 分钟内系统软件与生产线通讯次数情况如图 10 所示。不同倍速下的车间系统软件所在服务器的系统内存占用情况如图 11 所示。

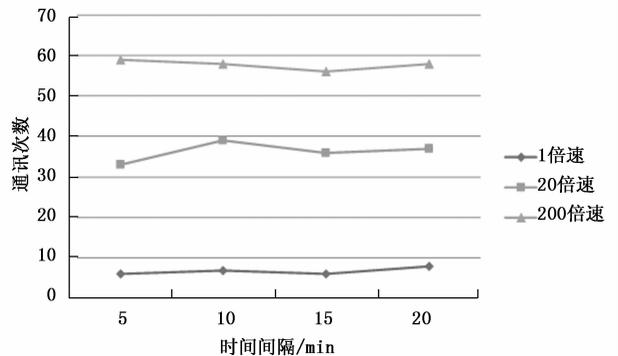


图 10 不同倍数加速测试状态下系统与产线通讯次数

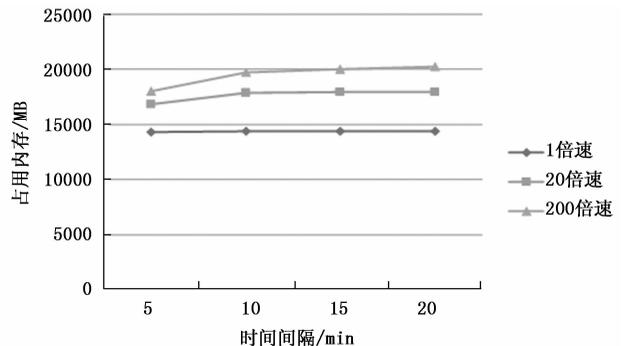


图 11 各倍数加速测试时系统内存占用情况

在不同加速倍数的车间系统数字孪生仿真加速测试下, 被测系统软件与生产线的通讯次数和服务器上的内存消耗情况差异明显。可以看出, 在 1 倍速、20 倍速、200 倍速下, 在相同测试时间内, 随着加速倍速的提高, 运行系统软件占用的内存明显提升, 通讯次数也显著增加了。在相

同时间内,提高系统运行速度,相当于加快了系统软件的老化速度。采用数字孪生仿真加速方法,可以有效缩短系统软件可靠性测试时间。同时,通过加速测试,影响软件可靠性的其他因素如操作系统资源的耗尽、碎片以及错误的积累速度也会相应的加快,有助于在较短时间内挖掘系统软件存在的漏洞。

在案例中,假设以现实中的一年为测试周期,设定仿真加速测试的加速倍数为 200 倍,则仿真时钟内的一年为现实中的 43.8 小时。在整个测试过程中,系统软件因调度流程中对叉车信号变量处理存在误差,最终导致叉车在仓库单元出货口停止运行。在重启软件系统清除数据后,软件正常运行,重启及清除数据所花费的现实时间为 24 分钟。则最终该软件的可靠性指标:MTBF(平均故障间隔时间)与 MTTF(平均无故障时间)由下式计算得出:

$$MTBF = \frac{\text{总运行时间}}{\text{总故障次数}} = \frac{365 \times 24}{1} = 860(\text{小时/次})$$

$$MTTF = \frac{\text{总无故障运行时间}}{\text{总故障次数}} =$$

$$\frac{365 \times 24 - 0.4}{1} = 859.6(\text{小时/次})$$

以上说明采用数字孪生模型仿真加速验证车间系统软件可靠性的方法具有一定的可行性。

5 结束语

智能车间系统软件的可靠性和开发软件的时效性对推动生产制造个性化、智能化、系统化发展至关重要。提升软件可靠性的有效方式是开展测试评估,而开展软件测试验证需要耗费大量时间,影响系统上线的时效性,同时,智能车间系统软件执行时需要与生产线设备频繁交互。为解决以上问题,本文采用基于数字孪生的仿真加速测试方法对车间系统软件进行测试验证。通过构建步进电机产线数字孪生模型,搭建车间系统软件运行时的高保真环境,实现物理场景与孪生模型的有效映射,采用离散事件仿真加速方法,缩短系统软件在生产线的运行时间,提升系统与产线通信频率,加速系统软件的老化速度,验证了采用数字孪生技术加速系统软件可靠性测试的有效性。后续将进一步结合数字孪生技术,针对产线性能提升开展研究,拟通过注入故障信息,开展仿真加速测试,快速准确定位故障位置,实现故障预警等功能。

参考文献:

- [1] Tretmans J. Model based testing with labelled transition systems [J]. Formal Methods and Testing Part of the LNCS, 2008, 4949: 1-38.
- [2] Famelis M, Salay R, Chechik M. Partial models: towards modeling and reasoning with uncertainty [A]. Proc of the 34th International Conferences on Software Engineering [C]. Zurich: ICSE Press, 2012: 573-583.
- [3] Yan Yongquan. A novel variance analysis of software aging problems [J]. IET Software, 2018, 12 (1): 41-48.

- [4] Huang Y, Kintala C, Kolettis N, et al. Software rejuvenation: analysis, module and applications [A]. Proc of the 25th International Symposium on Fault-Tolerant Computing [C]. Pasadena: IEEE Press, 1995: 381-390.
- [5] Araujo J, Matos R, Maciel P, et al. Software rejuvenation in eucalyptus cloud computing infrastructure: A method based on time series forecasting and multiple thresholds [A]. Proc of the 3rd International Workshop on Software Aging and Rejuvenation [C]. IEEE Press, 2011: 38-43.
- [6] Jia Shiqing, Hou Chunyan, Wang Jinsong. Software aging analysis and prediction in a web server based on multiple linear regression algorithm [A]. Proc of the 9th IEEE International Conference on Communication Software & Networks [C]. IEEE Press, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSN.2017.8230349>.
- [7] Tian J. Software quality engineering: testing, quality assurance, and quantifiable improvement [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [8] Just R, Schweiggert F. Automating unit and integration testing with partial oracles [J]. Software Quality Journal, 2011, 19 (4): 753-769.
- [9] Holck J, Jrgensen N. Continuous integration and quality assurance: a case study of two open source projects [J]. Australian Journal of Information Systems, 2003, 11 (1): 40-53.
- [10] Sthl D, Bosch J. Modeling continuous integration practice differences in industry software development [J]. Journal of Systems and Software, 2014, 87: 48-59.
- [11] Tao Fei, Cheng Jiangfeng, Qi Qinglin, et al. Digital twin driven product design, manufacturing and service with big data [J/OL]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. <http://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [12] Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles [A]. Proc of the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]. Hawaii: AIAA Press, 2012: 1-14.
- [13] Apriao. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. <http://www.apriso.com>, 2014.
- [14] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based productions systems [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 291-307.
- [15] 葛雨明, 汪洋, 韩庆文. 基于数字孪生的网联自动驾驶测试方法研究 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26 (1): 25-29.
- [16] Angjeliu G, Coronelli D, Cardani G. Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality [J/OL]. Computers and Structures, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106282>.

(下转第 49 页)