

基于 TA 的等级转换场景变异测试方法研究

宋 莉¹, 李 飞^{1,2,3}, 赵 瑜¹, 赵 健¹

(1. 马鞍山学院 人工智能创新学院, 安徽 马鞍山 243199;

2. 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要:针对等级转换场景下的变异测试集不完备问题,提出基于时间自动机(Time Automata, TA)的等级转换场景变异测试研究方法。该方法结合时间自动机理论和等级转换操作流程建立 TA 模型,同时设计 15 种变异算子对模型进行变异测试,通过计算加权变异分数评估测试案例集的完备性,并对加权变异分数较低的算子进一步修改补充,最终得到了较为完备的变异测试案例集。

关键词:时间自动机;等级转换;变异测试;测试案例集

中图分类号: U284 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0057-07

等级转换场景是列控系统(Chinese Train Control System, CTCS)典型的运营场景之一,是实现 CTCS-2/CTCS-3 级兼容的技术方法。研究等级转换场景时一般需要考虑 2 种情况,其一是正常情况下在固定地点进行的级间转换,其二是由于特殊原因引起的降级转换。

测试是分析验证系统正确性及可靠性的重要手段,测试用例是测试的基础。近年来,基于模型的测试案例日趋成熟,文献[1]结合时间自动机和一致性关系理论,提出了一种新型列车自动保护系统(Automatic Train Protection, ATP)在线一致性测试方法,并取得了良好的效果;文献[2]基于输入输出时间自动机理论对列控系统中 9 种列车运营模式进行变异测试分析,得到了较为完善的测试案例;文献[3]针对报警系统构建 TA 模型和变异体模型,使用增量算法技术生成测试案例,并对案例集的完备性进行了评估。

本文对列控系统等级转换场景构建 TA 模型和变异体模型,同时借助测试辅助工具 MoMuT,生成测试案例,并补充完善原测试案例集,得到了较为完善的测试案例集。

1 基于 TA 变异分析的测试案例生成方法

1.1 时间自动机理论(TA)

时间自动机理论增加了时间约束机制,每一个系统时钟均可在任意一个位置和状态迁移时对其重置,从而可以有效表达实时系统的时间约束特性^[4]。

时间自动机 TA 可以描述为 $TA = \langle S, S^0, A, X, I, E \rangle$, 在该六元组中, S 为一组有限位置, $S^0 \subseteq S$ 为 TA 的初始位置, A 为一组有限事件, X 为一组有限时钟, $I: S \rightarrow \Phi(x)$ 描述映射, $x \in X$, 任一位置 $s \in S$ 都被指定 $\Phi(x)$ 中的时钟约束 δ , $E \subseteq S \times A \times \Phi(x) \times 2^x \times S$, 表示系统中所有状态迁移的集合^[5]。

列控系统等级转换场景是一个复杂的场景,由多个构成对象构成,因此在建立 TA 模型时,单一模型是无法满足其功能需求的,需要同时建立多个模型同步描述系统行为。此时将等级转换场景划分为不同

收稿日期:2021-11-20 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210243

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61903003);安徽省教育厅轨道交通自动化重点实验室 2020 年度重点科研项目(KJ2020A0847, KJ2020A0846);安徽省自然科学基金青年基金(2008085QE227);特种重载机器人安徽省重点实验室开放课题(TZJQR001-2021)

作者简介:宋莉(1994—),女,助教,研究方向为轨道交通信号与控制。E-mail:18352261556@163.com

宋莉,李飞,赵瑜,等.基于 TA 的等级转换场景变异测试方法研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):57-63.

模块单独建立 TA 模型,同时对各模型增加并行组合与约束条件,实现模型之间的同步通信,进而构成整个系统的时间自动机模型。

UPPAAL 是基于时间自动机的建模验证工具,通过在 UPPAAL 的编辑器中声明通道和共享变量实现等级转换场景中不同模块间的通信,进而构成一个完整的 TA 模型^[6]。任意时刻,并行模块之间的发送器和接收器由通道声明(Chan b)联系在一起,“ $b!$ ”表示发送事件 b 后位置迁移,“ $b?$ ”表示接收事件 b 后位置迁移,“ $b!$ ”和“ $b?$ ”是同时发生的,有发送动作“ $b!$ ”就一定有接收动作“ $b?$ ”。此外,UPPAAL 还用 broadcast chan 声明广播通道,可以实现一发多收的功能,以 broadcast chan d 为例,发生“ $d!$ ”后,系统中所有子模型的“ $d?$ ”都可能发生。设置通道声明实现了不同子模型之间的信息交互,将复杂系统有机关建立起来。

UPPAAL 的验证器使用了 BNF (Backus-Naur Form) 语言验证模型的性质,BNF 是一种简洁、方便的描述语言,其定义如下: $Prop ::= E \langle \rangle p \mid A \square p \mid E \square p \mid A \langle \rangle p \mid p \rightarrow q$ 。各语句的含义如表 1 所示。

表 1 BNF 语句及其含义

语句	含义
$E \langle \rangle p$	存在一条路径,最终使得 p 成立
$E \square p$	存在一条路径,使得 p 一直成立
$A \square p$	对于所有路径,使得 p 一直成立
$A \langle \rangle p$	对于所有路径,最终使得 p 成立
$p \rightarrow q$	只要 p 成立, q 必定成立

1.2 TA 变异

模型变异通过对系统中某些特定部分做微小改动来充分模拟系统所有的潜在危险,是一种基于缺陷的软件技术。在变异测试中,针对时间自动机模型,通过设计 2 类变异算子生成变异体:时间性变异算子(Timed Mutation Operator, TMO)和功能性变异算子(Functional Mutation Operator, FMO)。时间性变异算子通过改变系统时钟约束使其发生时间性错误,继而构造变异模型。功能性变异算子通过改变系统模型中的位置、迁移、函数等使其发生功能性故障,继而构造变异模型^[7]。在列控系统等级转换场景中,设置 15 种变异算子,包括 5 种时间性变异算子和 10 种功能性变异算子。表 2 列举了这 15 种变异算子。

表 2 变异算子

时间性变异算子	描述	功能性变异算子	描述	功能性变异算子	描述
NCR	缩小时间约束	NUF	删除更新函数	CE	通道互换
WCR	扩大时间约束	AUF	附加更新函数	ESE	额外状态错误
SCR	移动时间约束	WIS	初始状态错误	TM	迁移丢失
FCR	重置时钟	SM	状态丢失	CGC	改变规则集约束
CCR	取消重置时钟	SE	状态互换	CUP	改变更新参数

1.3 TA 变异分析与评估

设存在时间自动机模型 $TA \langle S, S^0, A, X, I, E \rangle$ 及对应的测试案例集 $TestCaseSet = \{tc_1, tc_2, \dots, tc_n\}$ 。用 $Execute(TA, TestCaseSet) = \sum_{i=1}^n Execute(TA, tc_i)$ 表示在 TA 上执行测试案例集 $TestCaseSet$ 中的测试案例。设 M 为 TA 的一个变异体,则 $Execute(TA, TestCaseSet) = \sum_{i=1}^n Execute(TA, tc_i)$ 表示在变异体 M 上执行测试案例集 $Execute(M, TestCaseSet)$ 。比较测试案例 tc_i 在 M 和 TA 上执行后的输出是否一致可判断是否杀死变异体 M 。

(1) 若 $\exists i \in [1, n]$, 使得 $Execute(TA, tc_i) \neq Execute(M, tc_i)$, 即执行测试案例后, TA 与变异体 M 之间不存在一致的路径交集, 称作杀死变异体 M , 此时在测试集中就可以删除该测试案例以节省测试成本。

(2) 若 $\forall i \in [1, n]$, 都有 $Execute(M, tc_i) = Execute(TA, tc_i)$, 称作未杀死变异体 M , 此时需要对变异体 M 做非法判断和等价判断; 若判断结果为非法变异体和等价变异体, 则称作无效变异体。

2 等级转换场景变异测试

在列控系统中,等级转换场景是实现 CTCS-2 级和 CTCS-3 级兼容的技术方法,研究等级转换场景时一般需要考虑 2 种情况,其一是正常情况下在固定地点进行的级间转换,其二是由于特殊原因引起的降

级转换^[8]。下面详细介绍在等级转换场景下时间自动机建模及变异分析和测试案例集完备研究。

2.1 基于 TA 的等级转换场景建模

基于时间自动机理论和等级转换场景的工作流程,建立列控系统等级转换 TA 模型。主要涉及 4 个模块,无限闭塞中心(RBC)、车载系统(Onboard)、司机(Driver)和应答器(Balise)。利用时间自动机积的定义构建网络自动机的模型,记为 RODB 模型,如图 1 所示。

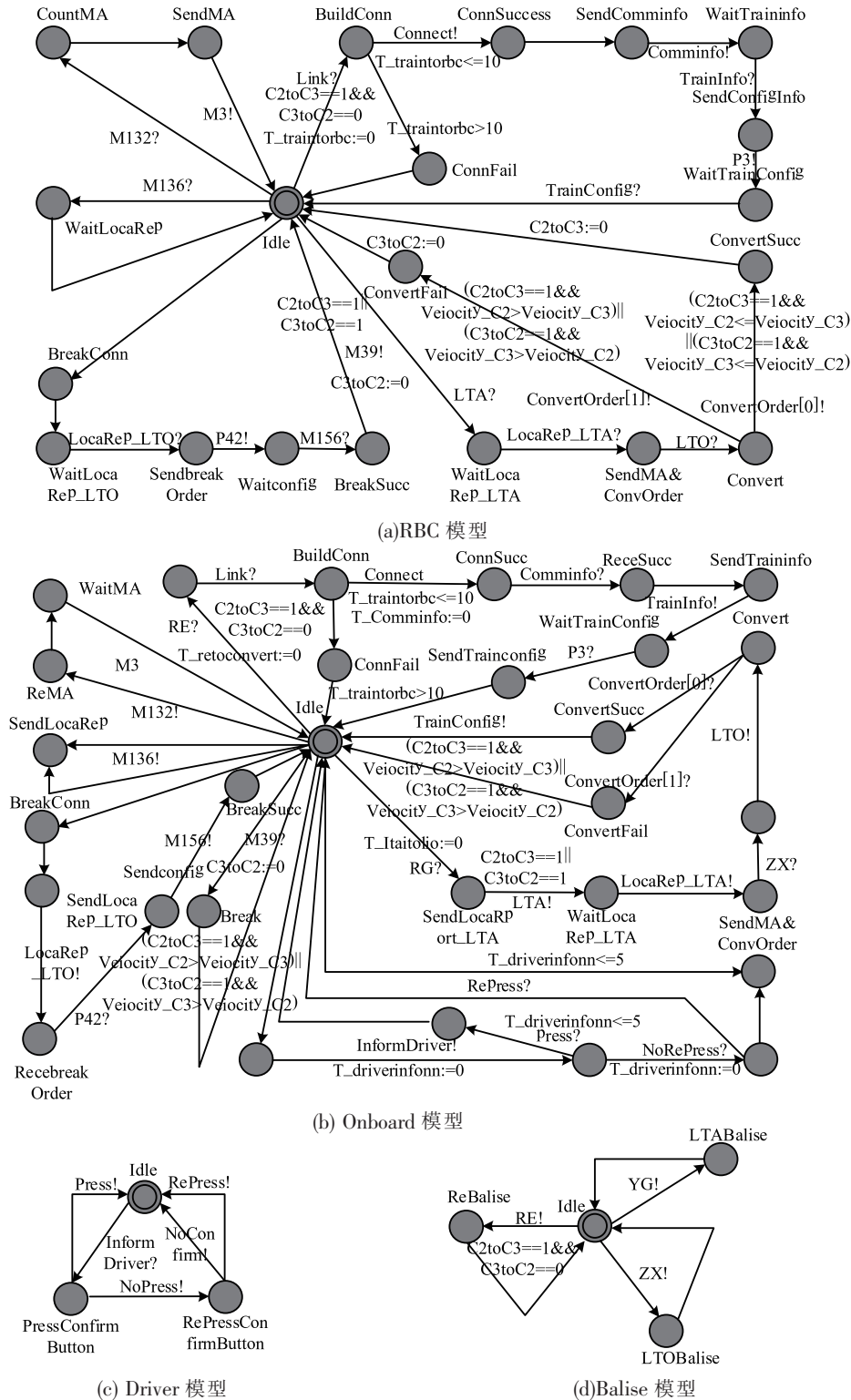


图 1 RODB 时间自动机模型

设 RODB 模型的事件集合为 Σ , 则有: $\Sigma = \sum_{RBC \& \text{Onboard}} \cup \sum_{\text{Onboard} \& \text{Driver}} \cup \sum_{\text{Balise} \& \text{Onboard}}$

2.2 RODB 变异体模型建立

借助 15 种变异算子对已建立的 RODB 模型进行变异, 形成相应的变异体模型。此处以“从 Onboard 向 RBC 建立联系”为例, 通过改变约束时间, 说明变异体模型的形式。

“从 Onboard 向 RBC 建立联系”的时间自动机模型为 TA_A_0 , 其表示“在输入行为 Link 后, 系统从位置 idle 迁移到 q_1 , 在 $T_trainto\ rbc \leq 10$ 的约束条件下输出行为 Connect, 进而迁移到位置 q_2 , 最后经输出 CommInfo 行为将位置迁移到 WaitTrainInfo”。对 TA_A_0 进行改变约束, 即将约束条件 $T_trainto\ rbc \leq 10$ 分别变异为取消约束条件、 $T_trainto\ rbc \geq 10$ 、 $T_trainto\ rbc > 10$ 、 $T_trainto\ rbc \leq 20$, 产生的变异体分别为 TA_M_1 、 TA_M_2 、 TA_M_3 、 TA_M_4 , 如图 2 所示。

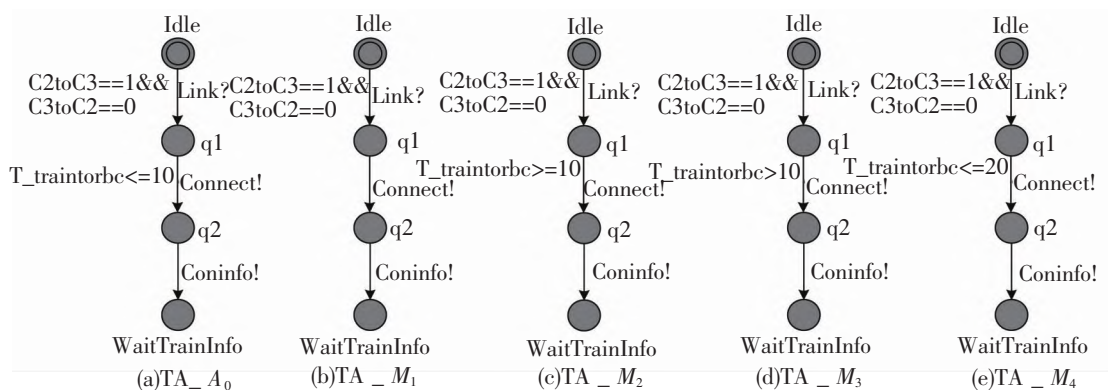


图 2 变异体模型

2.3 测试辅助工具 MoMuT: : TA

MoMuT: : TA 是一种支持时间自动机建模语言, 研究实时系统而开发的黑盒测试案例生成工具, 能够自主完成 TA 模型的变异及生成基于变异模型的测试用例。首先, MoMuT: : TA 通过输入 UPPAAL 中的原始模型 XML 文件, 并分析 XML 文件中的基本因子, 形成启用模型, 添加变异算子使得模型变异, 得到变异体。其次, 通过一致性检查/k 界模型检验方法将生成的变异体模型与 TA 模型反复判定得到有效变异体, 最终将获取的有效变异体应用于测试案例生成算法中, 得到测试案例。图 3 为借助测试辅助工具 MoMuT: : TA 生成变异体和测试案例的工作流程。

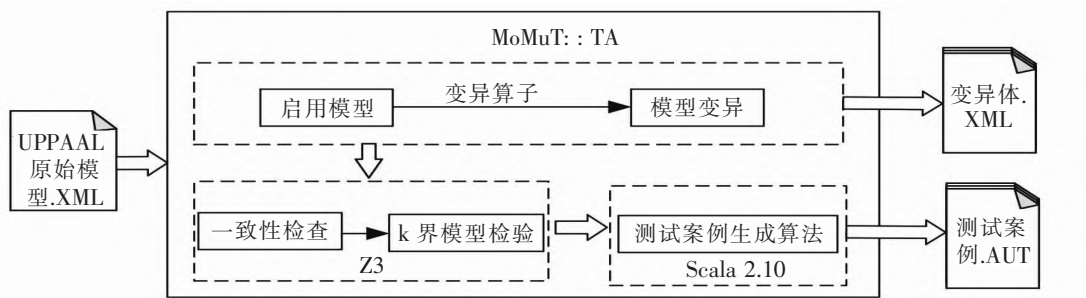


图 3 MoMuT: : TA 生成变异体和测试案例的工作流程

3 等级转换变异测试与完备性评估

基于对等级转换场景的工作流程及信息交互的分析, 构建了 RODB 模型。结合 15 种变异算子, 对无限闭塞中心 RBC、车载系统、司机操作和地面应答器 4 个子模块分析构建变异体模型, 基于 RODB 模型和变异体模型, 评估测试案例的完备性。

3.1 测试案例的筛选归并

列控系统是一个复杂且庞大的系统, 通过查阅《CTCS-3 级列控系统测试案例(V3.0)》可知, 共包含 469 个测试案例, 主要研究等级转换场景下变异测试分析, 故首先需从这 469 个测试案例中筛选出与等级

转换相关的测试案例。

根据设定的等级转换场景和已建立的 RODB 模型,共筛选出与之相关的 44 个测试案例。为了减少测试案例的数量,降低变异测试的成本,根据测试的性质和目的将部分相似度较高的测试案例进行分类归并,简化测试案例集。

3.2 变异体的生成

生成 RODB 模型的变异体之前,基于变异算子的规则对原模型进行变异分析,借助辅助工具 Mo-MuT:TA 对变异对象进行分析并生成变异体。在进行变异测试之前,通过一致性检查/k 界模型检验剔除测试中的非法变异体和等价变异体,分析研究的主体为剩余的有效变异体^[9]。表 3 为变异体模型信息统计结果。

表 3 变异体模型信息统计结果

时间性变异算子	变异体个数	功能性变异算子	变异体个数	功能性变异算子	变异体个数
NCR	96	NUF	4	CE	160
WCR	94	AUF	108	ESE	40
SCR	20	WIS	29	TM	40
FCR	165	SM	30	CGC	54
CCR	7	SE	38	CUP	3

3.3 变异分析的执行和结果

将测试案例集的参数信息分别反复输入到 RODB 原模型和变异体中,比较两者的输出,统计各类变异体的个数,结合变异分数公式,评估测试案例集的完备性,为完善测试案例集提供依据。

表 4 给出了 RODB 模型变异测试的数据,表中 M 为生成的总变异体数, E 为等价变异体数, N 为非法变异体数, L 为活变异体数, K 为模型中杀死的变异体数, P 表示计算的变异分数, α 表示变异算子的序号, $\alpha=1,2,\cdots,15$ 。

表 4 变异测试数据

序号	变异算子	M_{α}	E_{α}	N_{α}	L_{α}	K_{α}	P_{α}
1	NCR	96	0	10	—	—	—
2	WCR	94	0	0	—	—	—
3	SCR	20	0	0	—	—	—
4	FCR	165	0	0	13	152	0.92
5	CCR	7	0	0	0	7	1.00
6	NUF	4	0	0	1	3	0.75
7	AUF	108	72	0	1	35	0.97
8	WIS	29	0	0	0	29	1.00
9	SM	30	0	11	3	16	0.84
10	SE	38	0	0	0	38	1.00
11	CE	160	1	0	5	155	0.97
12	ESE	40	10	0	2	28	0.93
13	TM	40	0	7	2	31	0.94
14	CGC	54	0	5	20	29	0.59
15	CUP	3	0	0	0	3	1.00

由表 4 可知,共生成了 888 个变异体,包括 83 个等价变异体和 33 个非法变异体。在本次变异测试

中,时间性变异算子 NCR、WCR 和 SCR 没有获得有效数据,因此得到有效变异体 $S = \sum_{a=4}^{15} (M_a - N_a - E_a) = 572$ 个。定义加权变异分数为测试案例集完备性的评价指标,表示测试案例集的完备性程度。加权

变异分数 $= \frac{\sum_{a=4}^{15} (M_a - N_a - E_a) \times P_a}{\sum_{a=4}^{15} (M_a - N_a - E_a)} = \frac{\sum_{a=4}^{15} K_a}{S}$, 经计算,加权变异分数为 0.92,说明该模型的测试

案例具有较好的完备性,但变异算子 NCR、WCR 和 SCR 并没有获得准确数据,CGC、NUF 的变异分数也较低,需要进一步完善提高。

4 测试案例集的完善

为了研究等级转换场景中变异测试和完备性评估存在的问题,对测试中的 37 个未杀死变异体进行分析,找出变异体未被杀死的原因,其中有 33 个未杀死变异体指向测试案例“超速制动防护处理”覆盖不全,4 个未杀死变异体指向测试案例对模型遍历不全,根据分析结果,补充完善相关的测试案例,基于对变异模型的分析研究,再次借助辅助工具 MoMuT: : TA 验证可得到,NCR、WCR 和 SCR 均获取了有效测试数据且变异分数达到了 1.00。除此之外,表中的 CGC、NUF 变异算子的变异分数均提高到了 0.95 以上,其余变异算子的变异分数也得到了相应提高。表明现有的测试案例集完备性较好。

表 5 补充和完善后的变异测试数据

序号	变异算子	M_a	E_a	N_a	L_a	K_a	P_a
1	NCR	96	0	10	0	86	1.00
2	WCR	94	0	0	0	94	1.00
3	SCR	20	0	0	0	20	1.00
4	FCR	165	0	0	9	156	0.95
5	CCR	7	0	0	0	7	1.00
6	NUF	4	0	0	0	4	1.00
7	AUF	108	72	0	0	36	1.00
8	WIS	29	0	0	0	29	1.00
9	SM	30	0	11	1	18	0.95
10	SE	38	0	0	0	38	1.00
11	CE	160	1	0	0	159	1.00
12	ESE	40	10	0	1	29	0.97
13	TM	40	0	7	1	32	0.97
14	CGC	54	0	0	2	52	0.96
15	CUP	3	0	0	0	3	1.00

5 结论

对等级转换场景下的变异测试方法进行研究。首先,基于时间自动机理论,利用 UPPAAL 工具对等级转换场景建立 TA 模型;其次,对所建立的 TA 模型进行变异测试并依据加权变异分数定量评估其完备性;最后,分析完善原测试案例集,使所有的变异分数均提高到了 0.95 以上,从而得到了较为完善的测试案例集。

参 考 文 献

- [1]郭昊男,吕继东,柴铭,等. 基于在线一致性测试理论的 CRTC 车载 ATO 功能测试研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 93-103.
- [2]魏柏全,吕继东,陈柯行,等. 基于 TAIO 变异的 CTCS-3 列控系统测试案例生成方法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 937-945.
- [3]BENEŠ N, HENZINGER T A. Complete composition operators for IOCO-testing theory [C]//Proceedings of ACM International Sigsoft Symposium on Component-Based Software Engineering. New York: ACM, 2015: 101-110.

- [4]袁磊,吕继东,刘雨,等.一种全覆盖的列控车载系统测试案例自动生成算法研究[J].铁道学报,2014,36(8):55-62.
- [5]李腾.基于时间自动机的 CTCS-3 级列控系统变异测试方法研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [6]Chen Y G, Yang L, Wang D. Modeling research of train tracing based on UML sequence diagram and UPPAAL[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(2): 157-167.
- [7]魏柏全.基于 TAIO 变异分析的新型列控系统安全功能测试评价研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [8]邓飞跃,强亚文.基于稀疏编码和极限学习机的设备故障诊断方法及应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 30-35.
- [9]张俊甲,马增强,王建东,等.变分模态分解和形态学滤波在滚动轴承故障诊断中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 52-57.

Research on Mutation Test Method of Level Conversion Scenario Based on TA

Song Li¹, Li Fei^{1,2,3}, Zhao Yu¹, Zhao Jian¹

(1. School of Artificial Intelligence Innovation, Ma'anshan University, Ma'anshan 243199, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

3. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the incompleteness of the mutation test set in the level conversion scenario, a TA-based research method for the mutation test of the level conversion scenario was proposed. This method combined the theory of time automata and the operation process of level conversion to establish a TA model. At the same time, 15 kinds of mutation operators were designed to perform mutation test on the model. The completeness of the test case set was evaluated by calculating the weighted mutation score, and the operators with lower weighted mutation score were further modified and supplemented. Finally, a relatively complete variation test case set was obtained.

Key words: time automata; level conversion; mutation test; test case set