小卫星地面自动测试系统中实时数据库事务优先级分配算法

吴限德 [1] 孙兆伟 [1] 仲惟超 [1]

摘 要 小卫星自动化测试是提高测试效率、缩短研制周期、降低研制成本和保证可靠性的重要手段. 针对测试数据量大、类型复杂和实时性要求高等特点, 设计了小卫星自动测试系统实时数据库方案. 建立测试数据相关的实时数据库事务调度模型, 并在该模型基础上设计了异常数据优先的事务优先级分配算法 (Abnormal data first, ADF). 最后应用数学仿真验证了 ADF 分配算法的执行效率、正确性和有效性. 本文建立的事务调度模型和优先级分配算法兼顾测试数据自身特点和实时性要求, 尤其注重异常数据的处理, 从而提高了测试的全面性和准确性.

关键词 小卫星, 测试, 实时数据库系统, 事务调度, 优先级分配
中图分类号 V554+.3

Priority Assignment Algorithm for Real-time Database Transactions in Micro-satellite Ground Automatic Test System

WU Xian-De[1] SUN Zhao-Wei[1] ZHONG Wei-Chao[1]

Abstract Automatic testing of micro-satellites is an important means to improve the efficiency of testing, shortening development cycle, reducing development costs, and ensuring the reliability. A micro-satellite ground automatic test system real-time database deployment was designed against large quantity test data, complex data types, and tough real-time demand. A test data related real-time database transaction scheduling model was established and an abnormal data first (ADF) priority assignmet algorithm was presented based on the model. Finally, the efficiency, accuracy, and effectiveness of ADF assignment algorithm were validated by using mathematical simulation. The established transaction scheduling model and priority assignment algorithms took into account the characteristics and real-time requirements of test data and emphasized the abnormal data processing, thereby improving the accuracy and comprehensiveness of the test.

Key words Micro-satellite, test, real-time database systems, transactions schedule, priority assignment

小卫星以其集成度高、设计制造周期短、成本低廉、可靠性高等特点迅速成为国内外航天领域研究的重点. 小卫星测试过程始于部件研制阶段, 终于靶场发射完成, 贯穿其研制始终, 是小卫星研制的重要组成部分和高可靠性的重要保证手段. 采用自动测试技术并组建自动测试系统, 能显著降低测试周期, 提高测试效率, 因此成为必然发展方向. 小卫星自动测试的主要目的是通过采集各敏感器和执行机构数据, 发现卫星平台异常, 挖掘整星、分系统和单部件潜在问题.

小卫星自动测试过程需要监视、检测数百个部件 (如载荷、敏感器和执行机构等) 的实时数据和状态, 测试数据量庞大、信号类型复杂、数据实时性、一致性和可靠性要求高、数据随环境变化快, 因此对小卫星自动测试系统数据处理速度和吞吐量等均提出较高要求. 而旨在处理永久、稳定的数据, 强调维护数据的完整性、一致性的传统数据库系统无法满足小卫星自动测试系统需求, 因此兼顾数据处理的实时性、吞吐量和稳定速度等要求的实时数据库系统成为必然选择[1−4]. 利用实时数据库技术, 能够快速保存、实时监视测试数据, 并为后期数据分析、故障诊断和故障复现提供重要数据参考.

事务调度是实时数据库的重要组成部分, 直接决定数据库系统处理效率, 基于优先级的事务调度能够有效降低冲突、提高调度效率[5−7]. 现有实时数据库系统中, 截止期最早优先算法 (Earliest deadline, ED)、价值最高优先算法 (Highest value, HV)、最高回报和最紧急优先算法 (Highest reward and urgency, HRU) 以及弹性高回报算法 (Flexible high reward, FHR) 等事务优先级分配策略只考虑事务时间约束, 对数据自身特性考虑较少[8], 将异常数据和正常数据同等对待, 导致测试过程中异常数据的遗漏[9−10]. 而发现异常数据、挖掘系统潜在问

收稿日期 2008-11-24 收修改稿日期 2009-02-24
Received November 24, 2008; in revised form February 24, 2009
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2007AA702204), 国家自然科学基金 (60704020), 长江学者和创新团队发展计划 (IRT0520) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2007AA702204), National Natural Science Foundation of China (60704020), and Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0520)
1. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所 哈尔滨 150080
1. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00814

题是测试的重要手段, 因此迫切需要兼顾数据时间约束和自身特性的实时数据库事务优先级分配策略, 从而对测试过程中产生的异常数据迅速作出响应, 保证测试过程的高可靠性.

导致异常数据被遗漏的主要因素有优先级分配选取算法不当和数据库模型设计不好等[11−12]. 由于优先级分配算法选取不当, 异常数据产生后, 其所对应的数据库事务未能获得较高优先级, 从而未能获得被处理的机会, 导致其被遗漏; 数据库模型设计缺陷导致异常数据被遗漏, 如未按照数据特点将其分类处理, 不同类型和不同时间特性的实时数据杂揉在一起, 导致异常数据未能获得较高优先级.

本文针对产生异常数据被遗漏的因素, 设计了小卫星自动测试系统实时数据库模型, 结合测试数据特点, 建立了数据变化趋势相关的实时数据库事务调度模型 (Data related transaction scheduling model, DRTSM), 并在此基础上设计异常数据优先的实时数据库事务优先级分配算法 (Abnormal data first, ADF), 保证测试过程中对异常数据的准确、及时处理, 从而提高测试准确性和可靠性. 最后对本文算法进行仿真实验, 结果表明, ADF 算法在保证一定数据吞吐量和平均响应时间情况下, 能够显著降低异常数据错过率 (Miss rate, MR).

1　自动测试实时数据库 DRTSM 模型

测试平台与其他应用不同, 测试的唯一目的是通过一定方法, 尽量挖掘部件或分系统的潜在问题, 即找出并修正系统瑕疵, 以保证小卫星的高可靠性. 而系统问题通常通过测试数据的极值点、奇异点表现出来, 该类数据在测试过程中应被优先处理. 本节首先设计了小卫星自动测试系统中实时数据库系统框架, 然后给出实时数据库事务调度相关定义和定理, 在此基础上设计异常数据优先的实时数据库事务优先级分配算法.

1.1　小卫星自动测试系统实时数据库框架

由于小卫星具有集成度高、设计制造周期短、成本低廉等特点, 对测试时间、可靠性、覆盖性等均提出较高要求. 应用数据库技术能够保存全面测试信息, 提高数据检索速度, 并为后期分析和重现提供重要的数据参考.

如图 1 所示, 测试平台由三台实时数据库系统、

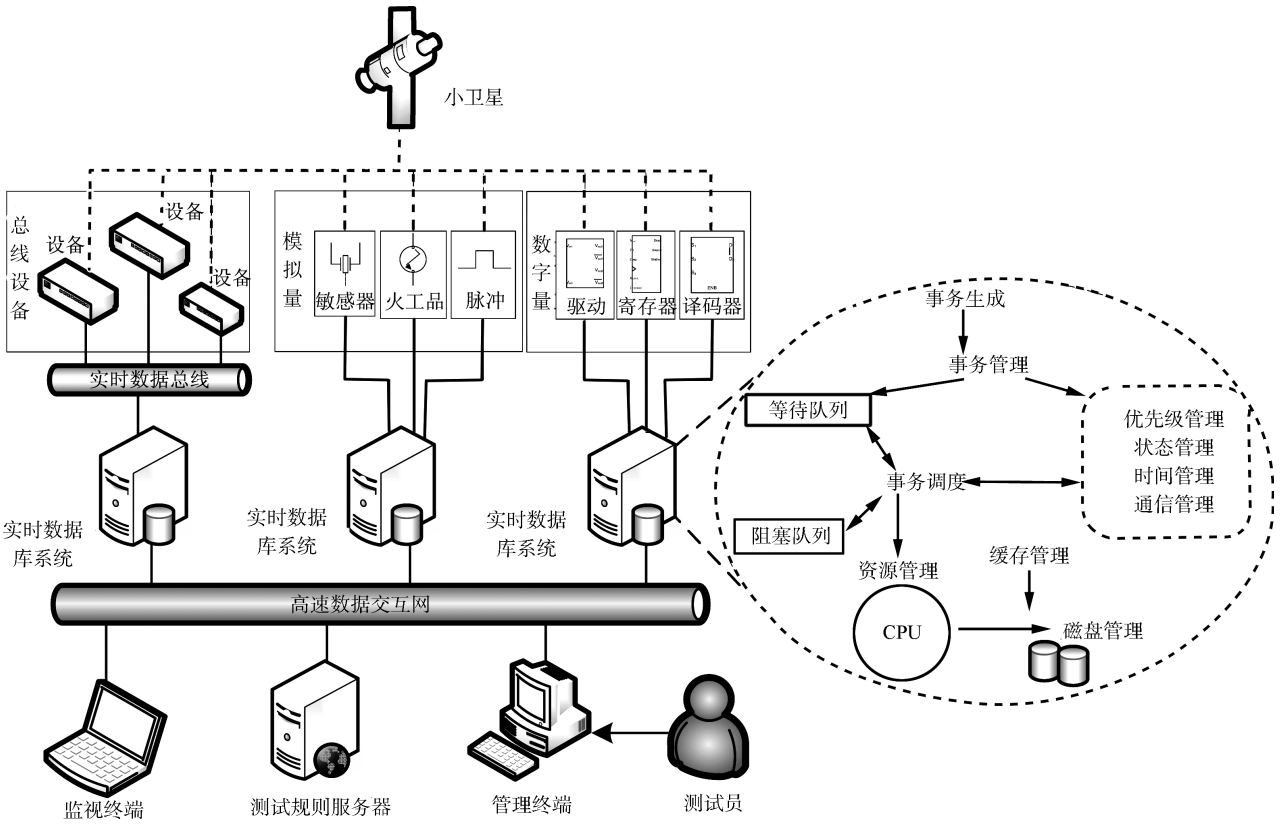

图 1　小卫星测试平台逻辑视图

Fig. 1　Logic view of micro-satellite testbed

监视终端、测试规则服务器和管理终端组成. 三台实时数据库系统分别负责总线实时数据采集, 模拟量数据实时采集和数字量实时采集; 监视终端完成对测试数据的曲线显示和自动监视等功能; 测试规则服务器存储测试流程、规范、标准、方法和测试序列等知识信息; 管理终端通过人机界面为测试人员提供测试系统管理、测试指令发出和测试结果收集等功能.

测试人员通过管理终端向测试平台发送测试指令, 管理终端结合规则服务器中的知识信息将用户操作解释成计算机指令, 按照协议发向平台内各主机, 实时数据库系统根据管理终端指令, 完成对相应设备的数据采集等工作, 并将各部件、分系统的实时数据向数据交互网络广播, 最后结果以曲线或声音等形式返回测试人员, 完成一个测试周期.

实时数据库系统完成事务生成、管理和调度等事务相关操作和资源管理操作, 事务管理主要包括事务状态管理、时间管理和通信管理等, 资源管理主要包括处理器资源管理、缓存管理和磁盘管理等. 状态管理按照事务状态调度图 (如图 2) 完成事务生成、提交、通信、等待、执行、返回和撤销等状态转移, 事务由本机调度为通信状态时, 进入另一台机器的等待队列, 成为等待状态. 时间管理记录事务相关的时间信息, 如生成时间、提交时间、等待时间、执行时间和截止时间等.

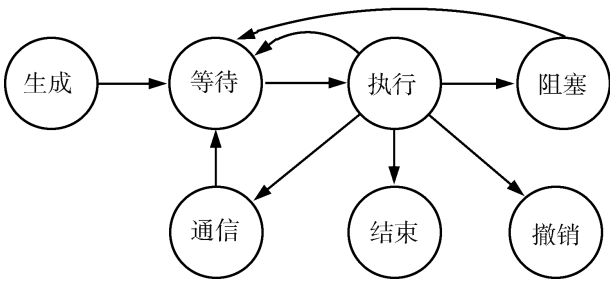

图 2 事务状态转移图

Fig. 2 State shift map of transactions

1.2 DRTSM 模型基本定义

定义 1. 实时数据库系统事务集合 T, $t_i \in T$ 表示第 i 个事务, $i \in \mathbf{Z}^+$, $start(t_i)$ 表示 t_i 的开始时间, $deadline(t_i)$ 表示 t_i 的截止时间, $curtime(t_i)$ 表示 t_i 的当前时间, $exectime(t_i)$ 表示 t_i 的预计执行时间.

定义 2. 事务状态集合 S, 包括事务产生、提交、传输、等待、执行、返回和无效等状态, $S(t_i) \in S$ 表示事务 t_i 的当前状态, 其中 $t_i \in T$, $i \in \mathbf{Z}^+$.

定义 3. 实时数据库总采集路数 TS, 该数值与实时数据库系统固有参数和实际应用相关. 对于具体应用, TS 取值为实际采集的实时数据路数; 而对于分析数据库系统性能, TS 取值为实时数据库固有参数.

定义 4. 事务相关的实时数据变化趋势集合 TR, $TR_{ij} \in TR$ 表示事务 t_i 产生时刻, 第 j 路实时数据变化趋势, $PTR_{ij} \in TR$ 表示第 j 路实时数据上次采样时的变化趋势, 其中 $i, j \in \mathbf{Z}^+$ 且 $0 \le j \le TS$.

定义 5. 事务相关的实时数据集合 V, $V_{ij} \in V$ 表示事务 t_i 产生时刻, 与该事务相关的第 j 路实时数据值, $PT(v_j), PV(v_j) \in V$ 分别表示第 j 路上一次采集的时间和数据值, $PPT(v_j), PPV(v_j) \in V$ 分别表示第 j 路上二次采集的时间和数据值, 其中 $i, j \in \mathbf{Z}^+$ 且 $0 \le j \le TS$.

定义 6. 数据异常因子集合 $DA \subseteq \mathbf{R}^+$, $DA(t_i) \in DA$ 表示事务 t_i 相关数据的值与其变化趋势 TR_{ij} 的偏离程度, 其中 $t_i \in T$, $i \in \mathbf{Z}^+$.

定义 7. 事务优先级集合 $P \subseteq \mathbf{R}^+$, $P(t_i) \in P$ 表示事务 t_i 优先级, 其中 $t_i \in T$, $i \in \mathbf{Z}^+$.

定义 8. $F(t_i)$ 为事务 t_i 相关的第 j 路实时数据的执行失败率, 其值随数据库系统运行而不断变化.

测试系统中的采样数据均为时序数据, 其值在一定时间限内有效, 并且采集的数据量较大. 降低等待队列中事务数量, 能够提高事务响应速度, 因此通过任务时间信息去除无效任务.

定理 1. 对于事务 t_i, 若 $curtime(t_i) > deadline(t_i)$, 则撤销关于 t_i 的所有操作, 并将 $S(t_i)$ 置成无效状态, 其中 $S(t_i)$ 为事务 t_i 的状态.

定理 2. 对于事务 t_i, 若 $start(t_i)+exectime(t_i) > deadline(t_i)$, 则该任务为无法完成任务, 将 $S(t_i)$ 置成无效状态, 其中 $S(t_i)$ 为事务 t_i 的状态.

实时数据库事务调度的主要参考依据是事务的优先级, 对数据变化异常的事务在测试系统中应优先被处理, 以提高异常事件的监听效率. 因此引入事务数据变化趋势 TR_{ij} 和采样数据值 V_{ij}, 在此基础上研究数据变化, 确定与其相关事务的优先级.

令数据变化趋势

$$TR_{ij} = \frac{V_{ij} - PV(v_j)}{start(t_i) - PT(v_j)}$$

$$PTR_{ij} = \frac{PV(v_j) - PPV(v_j)}{PT(v_j) - PPT(v_j)}$$

其中 V_{ij}、$PV(v_j)$ 和 $PPV(v_j)$ 分别表示当前采样数据、前一采样周期数据和前两周期采样数据, $start(t_i)$、$PT(v_j)$ 和 $PPT(v_j)$ 分别表示本次事务开始时间、前一次任务开始时间和前两周期任务开始时间, 由于系统时间随测试进行单调递增, 因此 $start(t_i) - PT(v_j) > 0$, $PT(v_j) - PPT(v_j) > 0$.

在实际应用中, 测试系统采样周期为固定值 Δt, 因此, $start(t_i)-PT(v_j)=PT(v_j)-PPT(v_j)=\Delta t$, 由此得出定理 3.

定理 3. 如果 $TR_{ij}\times PTR_{ij}<0$, 或 $TR_{ij}\times PTR_{ij}=0$ 且 TR_{ij} 和 PTR_{ij} 不同时为零, 则实时数据变化趋势改变; 如果 $TR_{ij}\times PTR_{ij}>0$ 或 TR_{ij} 和 PTR_{ij} 同时为零, 则数据变化趋势不变.

定理 4. 如果 $|TR_{ij}-PTR_{ij}|>C$, C 为用户定义常数, 则称 V_{ij} 变化加剧, 否则 V_{ij} 变化在合理区间内, 其中 TR_{ij} 为事务 t_i 产生时刻, 第 j 路实时数据的变化趋势, PTR_{ij} 为第 j 路实时数据上次采样时的变化趋势.

定义 9. 如果数据 V_{ij} 变化趋势改变或变化加剧, 则称 V_{ij} 变化异常.

2　异常数据优先的优先级分配算法

ED 算法中, $P(t_i)\leftarrow 1/deadline(t_i)$; HV 算法中, $P(t_i)\leftarrow V(t_i)$, $V(t_i)$ 为事务的价值. 这两个算法单纯地强调事务的截止期和完成事务的价值本身. 在小卫星测试中, 不同部件和分系统返回的数据变化区间具有明显差别, 如姿态四元数变化区间为 [0, 1], 磁强计遥测数据变化区间通常为 [−60 000, 60 000], 因此 ED 算法和 HV 算法无法保证测试数据的正确采集和入库. 本文的 ADF 算法利用当前和已保存的最近两个采样周期实时数据的值, 根据定理 3 和定理 4 首先确定数据变化趋势, 再根据定理 5 计算异常因子, 确定数据异常情况, 最后根据定理 6 确定该实时数据对应事务的优先级. ADF 算法主要依据数据的变化率, 而非数据值本身, 因此能够较好地适用于变化区间不同的多路实时数据情况.

定理 5. 令

$$DA(t_i)=\mathrm{e}^{-TR_{ij}\times PTR_{ij}}\times W_{1j}+|TR_{ij}-PTR_{ij}|\times W_{2j}$$

其中, W_{1j},W_{2j} 为第 j 路实时数据权重系数, 则当 W_{1j},W_{2j} 选择恰当值时, V_{ij} 趋势改变时的 $DA(t_i)$ 大于 V_{ij} 趋势不变时的 $DA(t_i)$.

证明. 由定理 3 知, V_{ij} 趋势改变时, $TR_{ij}\times PTR_{ij}<0$, 或 $TR_{ij}\times PTR_{ij}=0$ 且 TR_{ij} 和 PTR_{ij} 不同时为零, 因此 $\mathrm{e}^{-TR_{ij}\times PTR_{ij}}\geq 1$; 而 V_{ij} 趋势不变时, $TR_{ij}\times PTR_{ij}>0$, 因此 $\mathrm{e}^{-TR_{ij}\times PTR_{ij}}<1$. 由定理 4 知, V_{ij} 变化加剧时, $|TR_{ij}-PTR_{ij}|$ 具有较大值. □

定理 6. 令

$$P(t_i)\leftarrow\frac{1}{deadline(t_i)}\times F(t_i)+DA(t_i)$$

则当 V_{ij} 异常和失败率增加时, 该事务具有较高优先级.

证明. 由于 $deadline(t_i)$ 随系统运行而单调递增, 因此在 $DA(t_i)$ 相等的情况下, 截止期越小的事务 t_i 具有越高的优先级, 同时事务 t_i 相关的第 j 路实时数据 V_{ij} 的执行失败率 $F(t_i)$ 越大, 事务 t_i 优先级越高. 在

$$\frac{1}{deadline(t_i)}\times F(t_i)$$

相同的情况下, 由定义 8 和定理 5 知, 当事务 t_i 相关的第 j 路实时数据 V_{ij} 变化异常时, $DA(t_i)$ 值较大. 因此当 V_{ij} 变化异常时具有较高优先级. □

算法 1 (异常数据优先的实时数据库事务优先级分配算法 (ADF)).

输入数据. 事务 t_i 相关的第 j 路实时数据 V_{ij}.

全局变量. $F(t_i)$, 第 j 路实时数据权重系数 W_{1j},W_{2j}, 变化趋势 TR_{ij} 和 PTR_{ij}, 上一次采集的时间 $PT(v_j)$ 和数据值 $PV(v_j)$, 第 j 路上二次采集的时间 $PPT(v_j)$ 和数据值 $PPV(v_j)$.

输出数据. 事务 t_i 优先级 $P(t_i)$.

步骤 1. 如果是第 1 次执行算法, 则配置全局变量 W_{1j},W_{2j} 和 $F(t_i)$, 置 $PV(v_j)$ 和 $PPV(v_j)$ 为 V_{ij}, $PT(v_j)$ 和 $PPT(v_j)$ 为 $start(t_i)$, 将 TR_{ij} 和 PTR_{ij} 置成预设值, 为事务 t_i 分配预设优先级 $P(t_i)$;

步骤 2. 如果是第 2 次执行算法, 计算 $F(t_i)$, 置 $PV(v_j)$ 为 V_{ij}, $PT(v_j)$ 为 $start(t_i)$, 将 PTR_{ij} 置成预设值, 为事务 t_i 分配预设优先级 $P(t_i)$;

步骤 3. 根据定理 5 计算 $DA(t_i)$, 根据定理 6 计算 $P(t_i)$, 更新全局数据:

$$PPV(v_j)\leftarrow PV(v_j)$$

$$PPT(v_j)\leftarrow PT(v_j)$$

$$PT(v_j)\leftarrow start(t_i)$$

$$PV(v_j)\leftarrow V_{ij}$$

根据执行结果重新计算 $F(t_i)$;

步骤 4. 算法结束, 输出事务 t_i 优先级 $P(t_i)$.

3　仿真验证

事务错过率是衡量实时数据库优先级分配算法和事务调度策略的重要指标. 系统负载定义为事务总执行时间 $\sum_{i=1}^{n}exectime(t_i)$ 和事务总调度时间与系统总执行时间的比值[13].

在每个周期创建事务数从 100 个事务/采样周期增加到 600 个事务/采样周期, 事务平均执行时间为 3 单位时间, 等待队列长度为 1 000, 事务平均截止期为 1 000 单位时间, 数据库采样间隔为 2 000 单位时间的情况下, ADF 算法的错过率从 5 % 增大到

25 %. 从图 3 仿真结果知, ADF 算法在负载变化过程中均优于 ED 算法和 HV 算法.

在实时数据采样间隔为 1 000 单位时间, 事务平均截止期从 100 单位时间增加到 800 单位时间的过程中, 事务错过率与截止期的关系如图 4 所示. 当事务截止期较短时, ADF 算法的性能优于 ED 算法和 HV 算法; 当事务平均截止期较长时, 三种算法的性能均接近于 10 %.

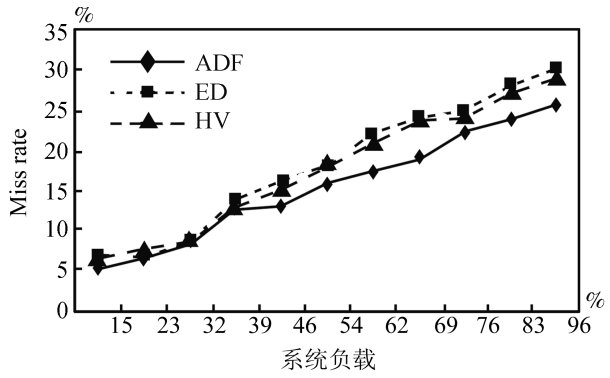

图 3 事务错过率与负载关系图

Fig. 3 Relationship between miss rate and payload

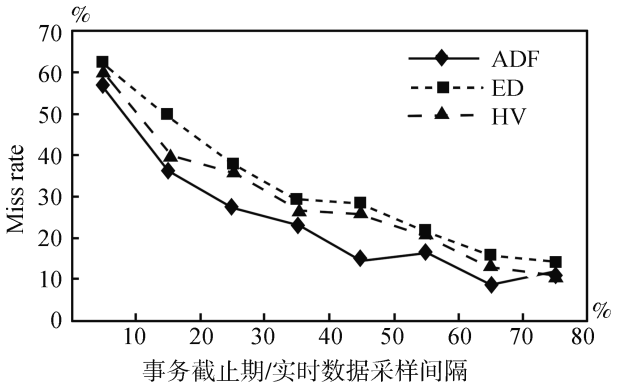

图 4 截止期对事务错过率的影响

Fig. 4 Influence between miss rate and deadline

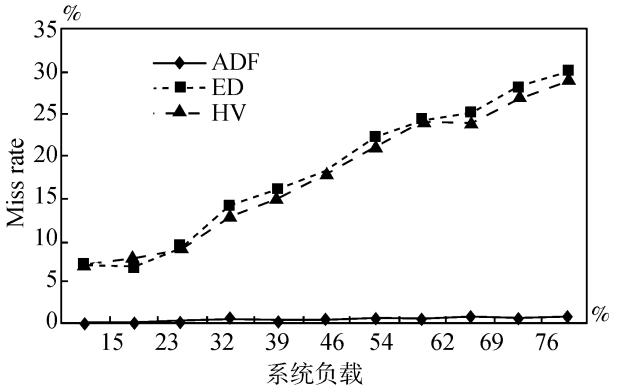

图 5 异常数据错过率与负载关系

Fig. 5 Relationship between abnormal data miss rate and payload

对于小卫星测试系统, 测试过程中的异常数据是发现研制过程中存在问题的重要参考. 本文设计的实时数据库 ADF 算法注重异常数据的优先调度, 以保证异常数据的及时处理. 由图 5 可以看出, ADF 算法对于异常数据的错过率受数据库系统负载影响较小, 即使负载 90 % 以上, 仍能保证不到 1 % 的错过率, 远低于 ED 算法和 HV 算法.

实时性是实时数据库的重要性能指标, 因此事务调度中优先级分配算法的实时性也是衡量算法优劣的重要指标. 本文 ADF 算法的优先级计算在 ED 算法或 HV 算法的基础上增加了 1 次指数运算和 4 次乘法运算, 对于目前高性能处理器而言, 这些操作的时间开销不大, 因此本文 ADF 算法与 ED 和 HV 等算法的实时性相当.

4 结论

本文研究了小卫星自动测试系统中实时数据库事务优先级分配问题, 针对测试过程中异常数据突出的重要性, 建立了数据变化趋势相关的实时数据库事务调度 DRTSM 模型, 并在此基础上设计了异常数据优先的实时数据库事务调度 ADF 算法. 结合工程实际, 设计了小卫星自动测试系统实时数据库方案. 最后数学仿真结果表明, 本文 ADF 算法在不同的系统负载和事务截止期情况下均优于 ED 算法和 HV 算法, 在对异常数据的处理方面, ADF 算法受系统负载影响较小, 在各种负载下均保持较低错过率, 从而保证了对测试中异常数据的准确、及时处理, 进一步提高了测试的全面性和小卫星的可靠性, 因而具有一定的工程应用价值.

References

1 Shanker U, Misra M, Sarje A K. Distributed real time database systems: background and literature review. *Distributed and Parallel Databases*, 2008, **23**(2): 127−149

2 Haritsa J R, Ramamritham K. Real-time database systems in the new millenium. *Real-Time Systems*, 2000, **19**(3): 205−208

3 Pamamritham K, Son S H, Dipippo L C. Real-time databases and data services. *Real-Time Systems*, 2004, **28**(2-3): 179−215

4 Hu Kan, Liu Yun-Sheng. A submission mechanism for synergic real-time database transactions in sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2007, **30**(6): 916−923
(胡侃, 刘云生. 传感器网络中协作实时数据库事务的提交控制. 计算机学报, 2007, **30**(6): 916−923)

5 Gruenwald L, Banik S M, Lau C N. Managing real-time database transactions in mobile AD-Hoc networks. *Distributed and Parallel Databases*, 2007, **22**(1): 27−54

6 Bhalla S. Parallel concurrency control activity for transaction management in real-time database systems. *The Journal of Supercomputing*, 2004, **28**(3): 345−369

7 Lee V C S, Lam K Y, Kao B. Priority scheduling of transactions in distributed real-time databases. *Real-Time Systems*, 1999, **16**(1): 31−62

8 Chen H R, Chin Y H. Efficient priority assignment policies for distributed real-time database systems. In: Proceedings of the 2007 Annual Conference on International Conference on Computer Engineering and Applications. Gold Coast, Australia: World Scientific and Engineering Academy and Society, 2007. 207−211

9 Li Guo-Hui, Wang Hong-Ya, Liu Yun-Sheng. Updates dissemination in mobile real-time database systems. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, **42**(11): 2004−2009
(李国徽, 王洪亚, 刘云生. 移动实时数据库系统中的更新分发. 计算机研究与发展, 2005, **42**(11): 2004−2009)

10 Liu Yun-Sheng, Li Guo-Hui. The effect of real-time database data characteristics on transactions. *Journal of Computer Research and Development*, 1999, **36**(3): 364−368
(刘云生, 李国徽. 实时数据库数据特征对事务处理的影响. 计算机研究与发展, 1999, **36**(3): 364−368)

11 George B, Haritsa J R. Secure buffering in firm real-time database systems. *The International Journal on Very Large Data Bases*, 2000, **8**(3-4): 178−198

12 Gustafsson T, Hansson J. Dynamic on-demand updating of data in real-time database systems. In: Proceedings of the Symposium on Applied Computing. Nicosia, Cyprus: ACM, 2004. 846−853

13 Król V, Pokorny J. The V4DB tested: evaluating of real-time database transaction processing strategies. In: Proceedings of the 11th World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Computers. Agios Nikolaos, Greece: World Scientific and Engineering Academy and Society, 2007. 20−25

吴限德 哈尔滨工业大学卫星技术研究所博士研究生. 2002 年获中南大学应用数学学士学位. 主要研究方向为飞行器多学科协同仿真, 飞行器测试和飞行器系统建模. 本文通信作者.
E-mail: xiandewu@hotmail.com
(**WU Xian-De** Ph. D. candidate at the Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology. He received his bachelor degree from Centrol South University in 2002. His research interest covers multidisciplinary modeling and simulation, ground test, and system modeling of spacecraft. Corresponding author of this paper.)

孙兆伟 哈尔滨工业大学航天学院教授. 主要研究方向为飞行器建模与仿真, 置信度评估和飞行器测试.
E-mail: sunzhaowei@vip.sina.com
(**SUN Zhao-Wei** Professor at the Astronautics School, Harbin Institute of Technology. His research interest covers spacecraft modeling and simulation, and micro-satellite test.)

仲惟超 哈尔滨工业大学航天学院硕士研究生. 主要研究方向为卫星姿轨控系统建模与仿真.
E-mail: heropanda@hit.edu.cn
(**ZHONG Wei-Chao** Master student at the Astronautics School, Harbin Institute of Technology. His research interest covers satellite attitude and orbit control system modeling and simulation.)