



中国科学院软件研究所

杰出青年人才发展专项计划中期考核报告

姓名	乔颖	课题名称	面向复杂反应式系统的实时推理技术研究
资助金额	160 万	支持周期	2010 年 1 月—2013 年 12 月
资助类别	应用基础研究	所在部门	人机交互与智能信息处理实验室

研究工作进展总体情况

（内容包括：已完成的科研目标、成果及其在该领域的应用和所处地位）

（一）已完成的科研目标

本课题目前已完成的科研目标包括：

（1）复杂实时反应式系统中的分布式实时推理方法研究

本课题对反应式系统的实时规则推理模型进行了研究，提出了实时主动规则推理的形式化定义；研究并提出了一系列面向复杂实时反应式系统的主动规则推理算法，包括：一种基于启发式搜索的具有时间约束的主动规则推理算法；一种面向反应式系统的硬实时主动规则推理方法；以及一种主动规则分布式推理机制。

（2）主动规则推理实时性分析方法研究

本课题对推理任务最坏情况运行时间的分析方法进行了研究，提出了一种基于分层结构的主动规则推理的最坏运行时间分析方法，从而提高了复杂反应式系统推理的可预测性。

（3）复杂反应式系统实时推理机原型与案例研究

本课题集成所提出的一系列实时推理算法与推理最坏运行时间分析方法，研发了复杂反应式系统实时推理机原型，并将其应用在了实时老人家庭监护这一应用案例中。

（二）已取得的研究成果

在上述内容的研究中，本课题取得了如下成果：

（1）基于启发式图搜索的具有时间约束的主动规则推理算法（RTEIA）

该算法（RTEIA）以事件流为输入，可根据推理系统中的 Event-condition-action(ECA) 规则，推理出响应事件的动作，并使规则的推

理延迟截止期尽可能地得到满足。

在该算法中，推理系统的 ECA 规则被表示为规则图。ECA 规则图是一个有向图，其结点表示 ECA 规则中的事件、条件与动作。若两个结点间需要传递令牌，则用一条有向边进行连接。规则图中入度为 0 的结点被称为入口结点，表示系统中的原子事件；出度为零的结点被称为出口结点，表示规则中的动作。推理过程实际上是一个寻找从入口结点到出口结点路径的过程。当一个出口结点被找到，该出口结点所对应的动作将被作为一个推理结果输出。

我们采用基于规则图的启发式搜索，寻找入口结点到出口结点的一条“预期路径”使响应事件的动作能及时被推理机输出，从而使规则的推理延迟截止期能尽可能地得到满足。为此，我们为每一个事件/条件结点定义了目标函数来指导这个搜索过程。假设 v 是一个事件（或条件）结点。 v 的目标函数 $H(v)$ 的定义如下：

$$H(v) = \min_{1 \leq s \leq L} (\sum_{v_j \in PE_s} WT(v_j) + W * LST(A_s))$$

在这里， PT 是一个从结点 v 到所有出口结点的路径集， $PT = \{pt_1, pt_2, \dots, pt_L\}$ ，其中， L 是路径数。 PE_s 是 PT 中第 s 条路径上的事件结点集。 $LC(v_j)$ 是 v 的左子结点， $RC(v_j)$ 是 v 的右子结点。 $WT(v_j)$ 表示 v_j 结点所表示事件的预期等待时间，即反映了 v_j 结点所表示事件需要多长时间会出现。 A_s 是 pt_s ($1 \leq s \leq L$) 上的出口结点。 $LST(A_s)$ 是 A_s 所代表的动作的最晚开始时间。 $LST(A_s) = D(A_s) - E(A_s)$ ，其中， $D(A_s)$ 是动作节点 A_s 所对应的规则的推理延迟截止期， $E(A_s)$ 是 A_s 所代表的动作的运行时间。 W 是权重。对于一个结点来说，目标函数值越小说明若该结点被激活加入预期路径，则及时找到出口结点，并使其所对应的规则的推理延迟截止期被满足的可能性越大。

搜索从入口结点开始。在搜索中，通过计算结点的目标函数值来选择扩充预期路径所需的结点：当搜索到达任一结点时，优先选择目标函数值最小的可达结点加入被搜索路径，直至在图中找到出口结点（即，获得了推理结果）。也就是说，RTEIA 将保证哪些匹配所需花费时间少且推理延迟截止期紧迫的规则被优先匹配。

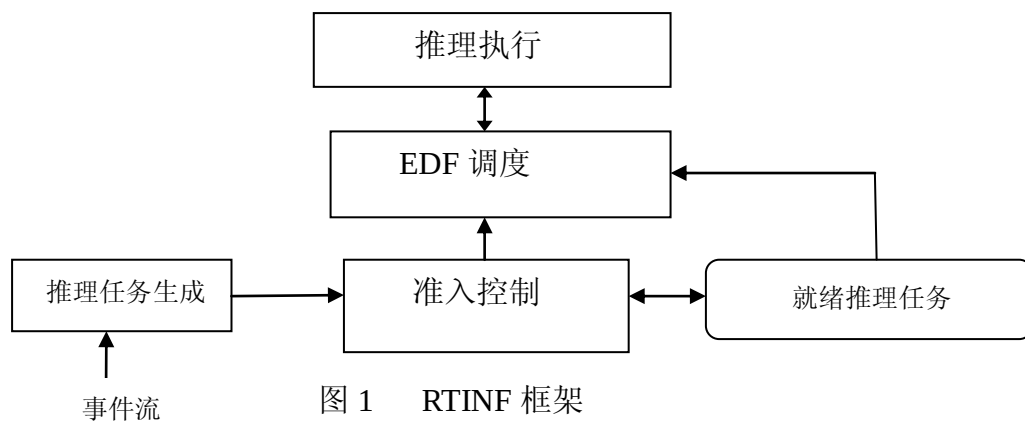
我们在随机生成 ECA 规则集的基础上，对 RTEIA 进行了模拟验证，并将该算法的推理成功率与传统深度优先搜索算法的推理成功率进行了比较。结果显示，RTEIA 的推理成功率始终优于深度优先搜索算法的推理成功率。RTEIA 的推理成功率随着 ECA 规则集规模的增大（即规则条数的增大）而减少，但对规则条数的变化反应并不敏感；另一方面，随着规则中动作运行时间的增大，RTEIA 的推理成功率将减少，且在动作的运行时间足够小时，RTEIA 的推理成功率对动作运行时间的变化并不敏感，而当动作运行时间超过了某一长度，则 RTEIA 的推理成功率对动作运行时间的变化变得非常敏感。这表明 RTEIA 适用

于动作运行时间较短的系统，这对于大多数的实时反应式系统来说，都是有意义的。

该算法是第一个考虑了主动规则推理的时间约束的推理算法。相关成果已被 ACM Research in Applied Computation Symposium (ACM RACS) 录用。该会议是 ACM Applied Computing 领域 (SigAPP) 最重要的两个会议之一。

(2) 面向反应式系统的硬实时主动规则推理方法 (RTINF)

对于航空航天、智能电网、生产过程控制等硬实时应用来说，推理的实时约束必须予以保证，否则将产生严重后果；而推理过程的不可预测性，则对此提出了极大的挑战。为应对这一挑战，本课题首次提出了面向反应式系统的硬实时主动规则推理方法 (RTINF)。该方法首次将实时调度理论与主动规则推理过程相结合，从而保证了规则推理延迟截止期的满足。图 1 给出了 RTINF 的框架。



在 RTINF 中，基于规则图搜索的推理过程被转化为一系列具有硬实时约束的非周期(Sporadic)推理任务，每个推理任务则可基于规则子图的搜索完成相应规则的匹配。通过对事件流施加时间滑动窗口，根据窗口中所出现的事件，生成相应的推理任务（以及任务实例）；采用经典的 Earliest Deadline First (EDF)调度算法对就绪的推理任务进行调度以控制整个推理过程的执行。同时，采用基于处理器合成利用率(synthetic utilization-based)的在线可调度分析方法，对新释放的推理任务进行准入控制，从而保证推理系统中各规则的推理延迟截止期得到满足。

模拟实验结果表明（如图 2-5），RTINF 在推理系统产生过载时，可有效避免错失规则的推理延迟截止期的发生；同时，RTINF 即便在规则数很多时，其效率也可达到 90%。

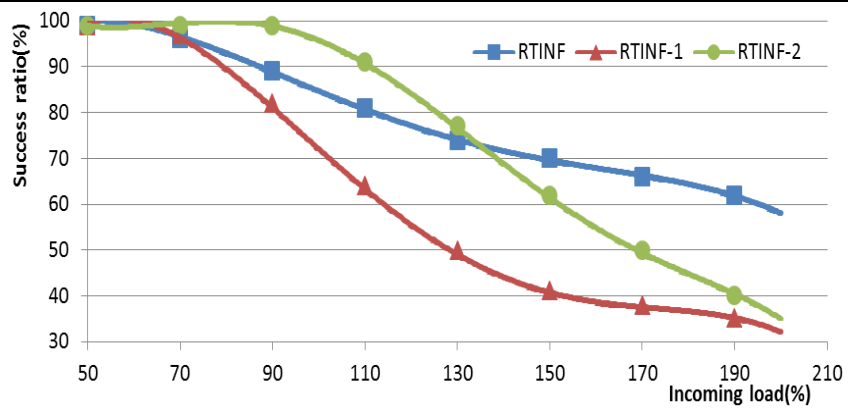


图 2 RTINF 的成功率

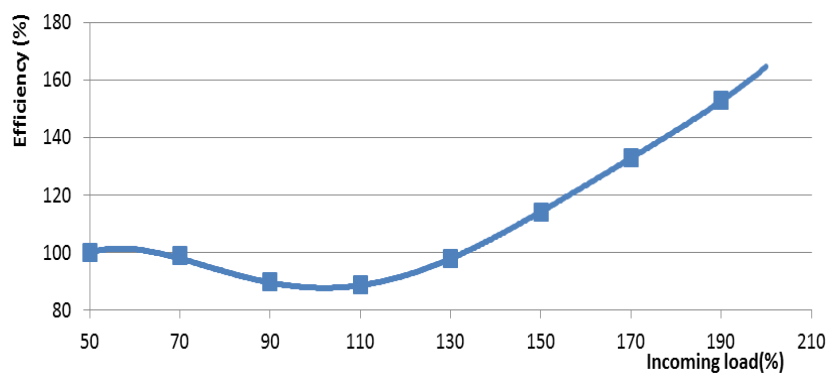


图 3 RTINF 的效率

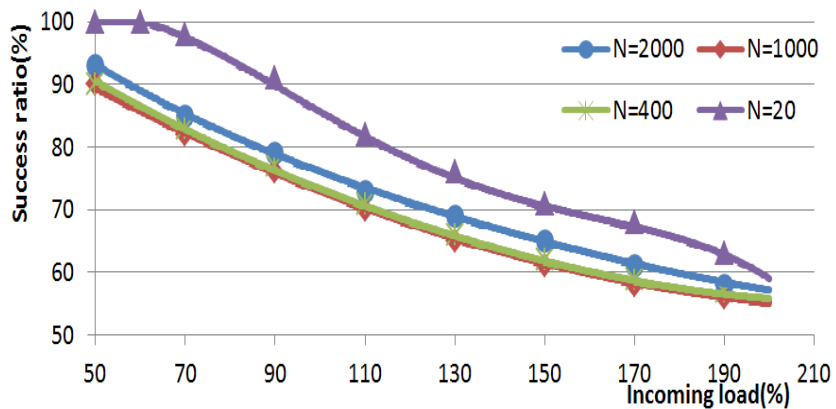


图 4 规则数对 RTINF 成功率的影响

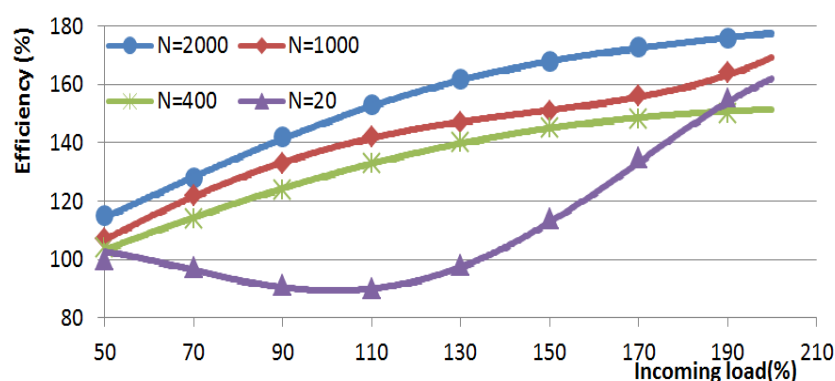


图 5 规则数对 RTINF 效率的影响

RTINF 是第一个可以保证推理时间约束的规则推理算法，对提高硬实时反应式系统的智能性具有重要意义。该成果已被整理成学术论文“A Novel Inference Approach for Hard Real-time Reactive System”，备投 IEEE Real-time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)。该会议是国际上实时计算领域最具影响力的会议之一。

(3) 基于分层结构的主动规则推理的最坏运行时间分析方法

经典的估算任务最坏运行时间的方法分为两种，静态分析及动态测量。动态测量的结果不能保证安全性。而静态分析方法包括三类，基于结构、基于路径及基于整数线性规划的方法。但是，所有这些方法都只适合于分析具有简单控制流的程序，而用来分析复杂的智能推理程序准确度很低。为此，本课题在传统的线性规划的估算方法基础上，提出了基于分层结构的 ECA 规则推理算法的最坏运行时间估算方法，针对 RTEIA 算法，给出了 ECA 规则推理系统在包含 N 个事件的事件风暴模型下的最坏运行时间的估算方法。图 6 给出了最坏运行时间估算的分层框架。

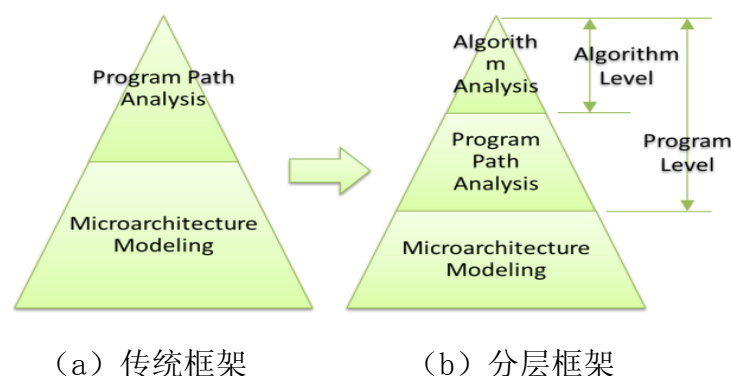


图 6 最坏运行时间估算框架

如图 6(a)，传统的基于整数线性规划的估算方法分为程序路径分析及硬件

模型分析两步。由于 ECA 规则推理程序的控制流非常复杂，在程序路径分析中难以发现线性约束影响准确度。如图 6(b)，我们增加了算法分析步骤，分析程序的算法逻辑结构归纳线性约束。这一分析分为算法分析层及程序分析层。在算法分析层，估算算法逻辑模块访问次数，线性约束源于算法分析步骤；在程序路径分析层，估算程序语句执行条数，线性约束源于算法分析及程序路径分析。目前本课题尚未涉及硬件模型分析。

在算法分析层，分析的目标是估算最坏情况下的规则图中所有节点处理令牌的个数。假设节点 v_i 的输出的令牌个数是 x_i ，则所有规则图节点处理的总次数是：

$$\sum_{v_j \in V - V_{Ext}} (b_j \sum_{i \in I_j} x_i) + \sum_{v_i \in V_{Ext}} b_i x_i, \text{ 其中前项是非叶节点的处理次数，后项是叶节点}$$

的处理次数， V_{Ext} 是叶节点集。在事件风暴模型下，输入的事件个数是 N 。所以，对于叶节点，所有的输入满足输入约束：

$$\sum_{v_i \in V_{Ext}} x_i = N.$$

在规则中，节点决定如何处理令牌，不同类型的节点对令牌的处理方式不同。我们采用自动机来表示各类复合事件类型所对应的节点处理令牌的过程，并根据自动机中的“最小路径”可以归纳出算法结构约束： $x_{output} \leq \text{Min}(x_A, x_B, x_C)$ 。

变量 x_i 与 y_i^j 之间的关系，称之为连接约束。假设 y_i^{call} 是 v_i 的控制流图的入口访问次数， $y_i^{trigger}$ 是 v_i 输出令牌次数。那么，连接约束为：

$$y_i^{call} = \sum_{j \in OP_i^{begin}} y_i^j = \sum_{j \in IP_i^{end}} y_i^j, \quad \begin{cases} y_i^{call} = x_i, v_i \in V_{Ext} \\ y_i^{call} = \sum_{j \in I_i} x_j, v_i \in V - V_{Ext} \end{cases},$$

$y_i^{trigger} = y_i^{jt, mjt}$ 是创建新信元的模块，以及 $y_i^{trigger} = x_i$ 。

程序的顺序、分支、循环结构，分别可以有如下约束： $y_i^0 = y_i^1$ ， $y_i^0 = y_i^1 + y_i^2$ ， $y_i^1 = y_i^0 + y_i^2 = y_i^2 + y_i^3$ 。在循环结构中，应该有功能性约束，

$$\begin{cases} y_i^j \geq (\text{lower loop bound} + 1) * \sum_{k \in IP_i^{j, outside}} y_i^k \\ y_i^j \leq (\text{upper loop bound} + 1) * \sum_{k \in IP_i^{j, outside}} y_i^k \end{cases}$$

在此基础上，我们对以上的整数线性规划问题进行了优化，降低了求解时间，并将其进一步转化为线形规划问题，从而可以在多项式时间求得有效解。

为了验证所提出的最坏运行时间估算方法的有效性，本课题对其进行了模

拟实验。在这里，我们选用不准确度 $p = T_{Analysis}/T_{Real}$ 作为实验的指标。其中 $T_{Analysis}$ 是估算值， T_{Real} 是真实值。实验结果表明，当规则图中节点数增加时，叶节点数减少时，或者最大子节点数增加时，所提出的估算方法的不准确度基本保持稳定，并比传统的估算方法在准确度上提高了一个以上数量级。

该方法是第一个对智能推理程序进行最坏运行时间分析的方法，对提高实时推理系统的可预测性具有重要意义。相关成果所形成的学术论文已被全国数据库学术会议（NDBC）录用，并将发表于《计算机研究与发展》。

（4） 分布式主动规则推理机制

本课题提出了一种基于规则图分解的分布式主动规则推理方法。在该方法中，推理系统的规则被表示为已在前面描述过的规则图，采用贪心算法在规则图上对规则进行划分，从而将规则分配到各子推理系统中并使网络负载尽可能小。每个推理子系统则采用基于图的启发式搜索算法完成对这些规则的匹配。同时，通过全局动作实施系统，对各子推理系统所获得的推理结果（即，响应事件所需采取的动作）进行整合，从而获得最终推理结果。图 7 给出了分布式主动规则推理机制的框架。

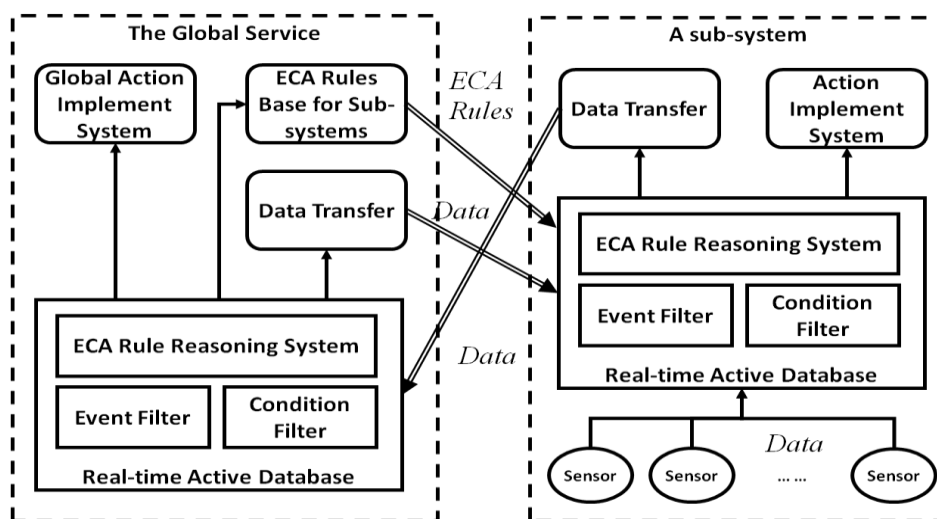


图 7 分布式主动规则推理机制框架

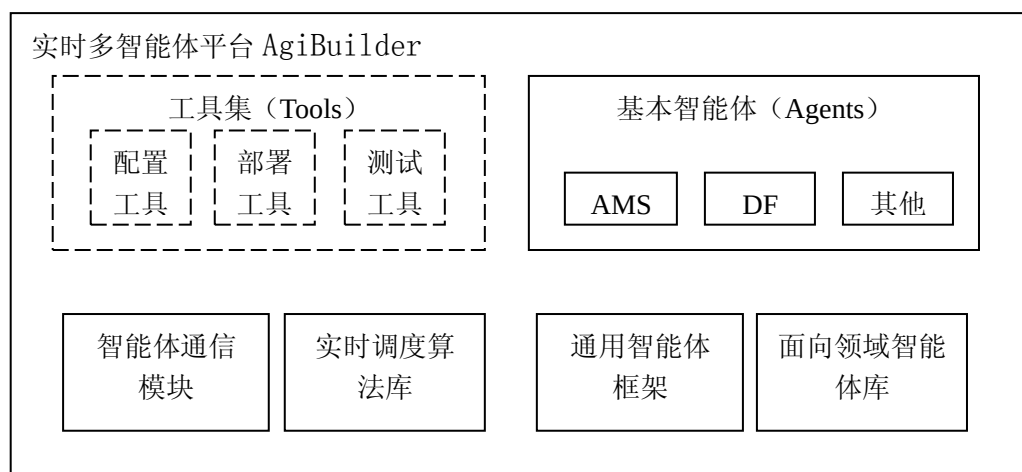
我们将所提出的分布式主动推理机制应用在了老人智能家庭监护系统中，从而验证了该机制的有效性。

相关成果被发表在 International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS)上，该会议是数据库与信息领域的重要会议之一，在

CiteSeer 中的排名为 top 40%。

(5) 实时多智能体平台 AgiBuilder

实时多智能体平台AgiBuilder为分布式规则推理提供了实现框架。该平台提供了开发实时智能体系统的基本框架和功能，包括智能体和任务模型、网络通讯、智能体管理以及实时调度机制。其中，在对AgiBuilder实时调度机制的研发中，本课题针对多智能体系统的任务特点，提出了面向资源的调度方法。该方法给出了实时智能体内的硬实时任务调度算法以及智能体间的任务迁移方法，相对于传统的以处理器为唯一资源的调度，更具通用性。图8描述了AgiBuilder的总体框架。



实时多智能体平台AgiBuilder已获得软件著作权，并正被应用于国家电网智能配电网自愈控制系统的研发中，为智能配电网自愈控制系统高级应用提供软件开发平台。

(6) 实时主动规则推理系统 RERS

该系统可针对输入的事件，根据规则库中的ECA规则，推理出响应事件的动作决策。同时，用户可在线地对规则库中的规则进行增加、修改与删除，且在此期间，推理机不必停机。系统的主要部件包括：基于ECA规则的实时推理引擎、ECA规则制定工具、ECA规则推理可视化工具以及规则调试与分析工具。

实时推理引擎是RERS的核心，通过可配置的动力图结构以及相应的回滚机制，采用基于启发式图搜索的具有时间约束的主动规则推理算法，完成ECA规则的匹配，并在此过程中支持ECA规则的在线修改。ECA规则制定工具提供

了 ECA 规则的图形化描述语言，以及 ECA 规则的自动编译，使用户可根据需求以图形化方式定义推理系统的规则集。ECA 规则推理可视化工具可支持对规则推理过程的可视化展示；规则调试与分析工具则集成了基于分层结构的推理最坏运行时间估算方法，可提供对推理系统最坏运行时间的分析与预测。

RERS 系统作为面向智能配电网自愈控制系统高级应用的软件开发环境的一部分，正被应用于国家电网智能配电网自愈控制系统的研发中。

发表学术论文论著情况

完成论文情况：

1. Ying Qiao, Hongan Wang, Xiang Li, Kang Zhong, “An Event-oriented Inference Algorithm with Timing Constraints”, ACM Research in Applied Computation Symposium, 2012. (Accepted)
2. Jian Shi, Ying Qiao, Hongan Wang, “Visualizing inference Process of a Rule Engine”, International Symposium on Visual Information Communication, Hong Kong, China, August 2011.
3. Xiang Li, Ying Qiao, Hongan Wang, “A Cyber-physical System for Elders Monitoring”, International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), Funchal, Madeira, Portugal, June 2010.
4. 李想, 乔颖, 王宏安, “实时复杂事件处理的最坏响应时间估算”, 计算机研究与发展/全国数据库学术会议, 2012 (已录用)。
5. 李想, 乔颖, 王宏安, “基于实时复杂事件处理的智能家居监控系统”, 计算机研究与发展/全国数据库学术会议, 2012 (已录用)。
6. 李想, 乔颖, 李欣, 王宏安, “主动数据库中的实时 ECA 规则推理算法”, 计算机研究与发展增刊, 2010。
7. 李欣, 乔颖, 李想, 杰艺, “基于 ECA 规则推理的故障诊断技术”, 计算机工程与设计, No.3, 2011。
8. Ying Qiao, Hongan Wang, Chang Leng, “A Novel Inference Approach for Hard Real-time Reactive System”, Submitted to 2013 IEEE Real-time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS).
9. Ying Qiao, Hongan Wang, Chang Leng, “Enhancing Event Stream Processing for Hard Real-time Reactive System”, Submitted to 2013 International Conference on Very Large Data Bases (VLDB).
10. Qinan Han, Ying Qiao, Keming Zhang, Kang Zhong, Hongan Wang, “A Multi-agent based Testing Platform for Power Grid System”, submitted to 2013 ACM International Symposium on Applied Computing (SAC).
11. Chang Leng, Ying Qiao, Hongan Wang, “Distributed Inference with Hard Deadlines”, submitted to 2012 IEEE Real-time System Symposium (RTSS/WIP session).

软件著作权与专利申请情况：

1. “AgiBuilder 实时多智能体软件开发系统 V1.0”，软件著作权，2012R11S003485
2. “ECA 规则图形化制定工具”，软件著作权（In preparation）
3. “实时主动规则推理系统”，软件著作权（In preparation）
4. “面向反应式系统的硬实时推理方法”，专利（In preparation）
5. “主动规则推理的最坏运行时间估算方法”，专利（In preparation）

外部经费争取情况

1. 作为主要人员，争取到国家电网重大科技项目“智能配电网自愈控制技术研究”的子课题“智能配电网自愈控制系统高级应用软件及系统测试软件开发”，项目经费：190 万。
2. 正在申请国家自然科学基金面上项目“面向复杂反应式系统的实时推理方法研究”，项目经费：80 万。

获表彰奖励情况

经费使用情况
课题总经费 160 万元，现共支出 69.83 万元，其中设备费 8.73 万元，主要用于设备的购置；材料费 2.5 万元，用于项目过程中基本材料及设备相关专用材料的购买；测试化验加工费 3.40 万元；燃料动力费 5 万元，主要用于设备耗电和空调运行费用；差旅费 6.67 万元，用于项目差旅交通费用；会议费 2.1 万元；用于举办项目交流会等会议费用的支出；国际费用 1.2 万元，用于邀请国外教授来所作报告的支出；出版费用 5.2 万元，主要用于出版、文献、信息传播及知识产权事务费；劳务费 26.63 万元，支付学生及聘用职工劳务费以及间接费用 8.4 万元。
存在的问题、建议及其他需要说明的情况
Empty space for content

备注：1、杰出青年人才入选者应实事求是地填写此报告，禁止弄虚作假；
2、此报告作为专项计划跟踪、管理的主要依据，报送人力资源处；
3、此报告将在所网站对外发布。