

# 基于复杂事件处理的 RFID 辅助实时生产监控

黄 毅, 郑 力, 向 晴

(清华大学 工业工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 将 RFID(radio-frequency identification)技术应用于生产现场监控有 2 个关键: 信息实时性, 即如何将大量标签原始数据高效地转化为对企业有用的复杂事件信息; 逻辑复杂性, 即如何适应监控业务逻辑的复杂多变。目前缺乏系统性的设计和实现方法兼顾这 2 点, 因此该文面向实时生产监控中 RFID 技术的各种应用模式, 提出一种 RFID 实时事件处理系统的设计方法及其实现案例。一方面提供一套形式化的复杂事件建模语言以编程式的方法定义源自生产监控任务的事件逻辑, 支持复杂的时间和空间语义, 并提供事件层级体系降低建模复杂度, 提高重构效率; 另一方面基于复杂事件处理(CEP)等方法实现复杂事件的提炼和推理, 及时挖掘潜在的生产状态或异常。据此开发的原型系统, 在生产现场监控实践测试中表现出较好性能。

**关键词:** 实时生产监控; RFID(radio-frequency identification); 复杂事件处理(CEP); 事件流处理; 物联网

中图分类号: TP 274<sup>+</sup>.2; TP 319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2013)05-0721-08

## RFID integrated real-time manufacturing monitoring based on complex event processing

HUANG Yi, ZHENG Li, XIANG Qing

(Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** RFID (radio-frequency identification) integrated manufacturing monitoring aims to transform primitive RFID events, which are collected in real time, into useful information (complex events) for managers or higher level IS. The process must be efficient and reconfigurable to tackle real-time, complex monitoring tasks. This paper describes an architecture for designing and implementing an RFID real-time event processing system which adapts to manufacturing monitoring applications. A formal complex event modeling language with temporal and space semantics is provided to tailor the monitoring task logic by writing simple scripts. The event hierarchical model also reduces the modeling complexity. Complex event processing (CEP) can then be used for complex event filtering and reasoning. Hidden manufacturing issues and exceptions can thus be detected in a timely manner. A prototype system was developed and tested in a realistic manufacturing scenario.

**Key words:** real-time manufacturing monitoring; RFID (radio-

frequency identification); complex event processing (CEP); event stream processing; Internet of Things.

物联网(the Internet of Things)概念即基于 RFID(radio-frequency identification)、GPS(global positioning system)、红外等传感设备, 按约定协议使任意物件通过互联网相连并进行信息交互, 以实现智能化监控、跟踪和管理<sup>[1]</sup>。基于 RFID 技术的实时生产监控将助力制造企业提升竞争力: 通过嵌入 RFID 电子标签, 产品和生产资源(原材料、人员、设备等)“实时可见”, 生产现场的信息收集、分析和分享能力显著增强, 使企业可更全面地掌握生产状态、更及时地响应生产异常、更精确地跟踪产品质量<sup>[2]</sup>。

RFID 传感器网络实时收集的标签原始事件, 可转换成反映生产资源或生产过程状态的重要事件, 以触发特定响应操作如通知或更新数据库等。复杂事件处理(CEP)和事件流处理(ESP)是提炼信息的主要技术, 许多学者和机构基于 CEP 对 RFID 领域的复杂事件处理进行研究和开发<sup>[3-5]</sup>, 然而聚焦实时生产监控, 可重构性和计算性能是事件处理系统的关键, 事件建模功能需支持各种监控逻辑语义, 并能快速重构以适应监控需求或软硬件环境变化, 同时事件处理过程的效率应满足实时性要求。

因此, 通过归纳 RFID 技术用于实时生产监控的不同模式, 本文提出适用的 RFID 事件建模和处理系统, 使用 RFID 事件层级模型(按事件粒度从小到大分为标签原始事件、可复用的简单事件和可定

收稿日期: 2010-04-04

基金项目: 国家“八六三”高技术项目(2008AA04Z102);

国家自然科学基金资助项目(70771058, 60834004)

作者简介: 黄毅(1982—), 男(汉), 福建, 博士研究生。

通信作者: 郑力, 教授, lzhang@mail. tsinghua. edu. cn

制的复杂事件)对监控任务进行解构,使用 RFID 事件建模语言通过复用、组装等方式进行定义,再使用基于成熟开源模块的 RFID 事件处理模块解析并推理事件模型,执行实时、高效的事件监控。

## 1 基于 RFID 的实时生产监控

### 1.1 监控对象的 RFID 标签嵌入模式

生产监控对象包括产品及现场五要素“人机物法环”。根据对象种类和监控需求,RFID 标签可嵌入单个或一组对象进行唯一标识。监控对象具体有:

**产品** 尤其高价值产品常逐个嵌入 RFID 标签以标识唯一身份,可实时向标签写入重要生产和质量数据,支持产品跟踪追溯能力并增强供应链协作。

**人员** 现场人员可佩戴嵌入 RFID 标签的工作证。

**设备** 生产/维护设备、工/卡/夹具、容器等,可由所嵌入 RFID 标签标识。

**物料** 原材料和半成品可根据种类、价值和监控需求等因素,在单个或一批中嵌入标签。

**工单** 生产/质量/维修等工单(或其条目)是执行特定业务流程的信息载体,可绑定 RFID 标签。

**区域** RFID 标签可置于生产现场特定工作区域(如货位/架、维修区等)某处以标识该区域。

### 1.2 监控区域的 RFID 读写器布置模式

RFID 读写器应按监控需求选择合适的方式布置在现场,实时获取代表某监控对象的 RFID 标签事件。RFID 读写器布置模式可分为 4 类:

**定点模式(固定)** 布置读写器使其持续监控指定区域出现的 RFID 标签。为减小误读率或扩大监控范围,多个读写器可协同负责同一区域。定点模式常见于空间较小的关键区域,如装配台、质量检验台、重点货架等。

**门禁模式(固定)** 把读写器布置在区域出入口,或特定通道关键点上,监控经过该点的标签。门禁模式常只允许标签单向通过(除非读写器能识别标签移动方向)。门禁模式常见于较大区域(如仓库、大型制造单元等)的出入口,或生产资源的移动通道上,如流水线传送带等。

**移动模式(非固定)** 把读写器安装在特定物流设备(如叉车、吊车等),实时、快速地获取设备所工作区域内,代表产品和物料等生产资源的电子标签的数量或信息。

**手持模式(非固定)** 使用掌上电脑 PDA 等手

持式读写器,识别或处理目标电子标签。手持式读写器常采用开关触发,多见于人工参与的应用,如盘点物料、识别生产资源等。

### 1.3 监控任务的 RFID 应用模式

生产实时监控即基于 RFID 读写器网络,实时收集(RFID 绑定)对象在业务流程执行中的“重要”或“异常”状态变化,并检验各状态是否符合业务规则。生产现场的监控任务按工作类型可分为 4 类,即现场作业管理、现场物流管理、现场人员管理和设备维修管理。

#### 1.3.1 现场作业管理

生产作业管理监控模式有:

**跟踪作业执行(A1)** 监控代表生产任务的对象(如单个产品、工单条目或容器)进出定点或门禁模式布置的(读写器)工作区域(如工作台、传送带)的信息。

**跟踪资源使用(A2)** 配合 A1,监控当前可用/使用物料、人员、设备等资源状态是否满足生产任务需求,常在工作台和线边仓等区域用定点模式布置读写器。

**读/写过程数据(A3)** 基于 RFID 标签数据存储量大、存储内容可多次擦写的特性,在定点模式布置的工作台实时记录/读取对象(主要是产品)的定义、生产、质量、物流等数据。

**检验(A4)** A1、A2 和 A3 模式收集的状态信息可用于检验作业执行流程是否符合现场管理策略所定义的业务规则(由逻辑关系和时间约束组成)。

#### 1.3.2 现场物流管理

现场物流管理监控模式有:

**监控物料存放(B1)** 监控单个或一批产品/物料进出某存放区域的信息(关注对象身份和数量),大区域常采用门禁模式布置,而小区域采用定点模式。

**辅助标识区域(B2)** 把代表某区域的标签置于区域出入口,供移动模式或手持模式读写器识别。

**监控范围物料(B3)** 物流设备(移动模式)或手持设备(手持模式)范围内的单个或一批产品/物料信息。

**检验(B4)** B1、B2 和 B3 模式收集的状态信息可用于检验物流业务流程规则。

#### 1.3.3 现场人员管理

现场人员管理包括:

管理人员出勤(C1) 使用门禁模式读写器记录人员进出生产现场的信息。

监控人员位置(C2) 使用门禁或定点读写器监控人员在特定区域的进出或存在信息。

管理人员权限(C3) 根据人员标签预定义的角色属性数据,通过属性约束实现权限控制。

检验(C4) C1、C2 和 C3 模式收集的状态信息可供其余监控任务用于规则检验。

#### 1.3.4 设备维修管理

设备维修管理包括:

读/写设备数据(D1) 支持设备标签中设备规格、性能、状态等数据的实时更新和使用,常用手持模式。

跟踪维修任务(D2) 包括监控维修工单标签,收集相关设备、备件、人员标签信息,以跟踪并检验维修过程的规范性。

检验(D3) 基于 D1 和 D2 的数据信息,可检验维修任务的逻辑关系和时间约束。

## 2 RFID 事件模型

RFID 事件按粒度从小到大分为标签读取事件、简单事件和复杂事件。标签读取事件(tag-read event, TRE)是最原始的 RFID 事件,代表某 RFID 读写器于某时间间隔探测到某电子标签。即便小规模 RFID 案例,也会在短时间产生大量零碎、重复、多余的 TRE,因此应该用筛选、过滤和组合处理,将 TRE 即时提炼为有意义的简单事件,描述单个或一组标签的重要状态。简单事件仅反映简单事实,业务实践更关注一组简单事件间空间和时间的联系,即复杂事件,CEP 和 ESP 是检验简单事件是否满足业务规则的主要方法。以上 RFID 事件处理过程如图 1。值得注意,简单事件和复杂事件都由小粒度事件推理而来,两者区别在于:简单事件的推理规则是通用的,简单事件粒度适中、可复用性高;而复杂事件的推理规则是定制的,由实际业务需求决定。

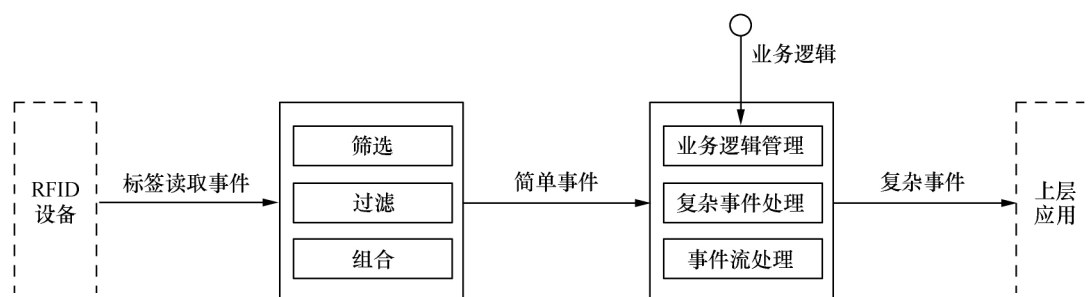


图 1 RFID 事件处理框架

### 2.1 标签读取事件

TRE 由机器产生,表示特定标签的瞬时时间和空间状态,记为  $TRE\langle e, r, t \rangle$ , 其中  $e$  指标签(对象),  $r$  指所在 RFID 读写器(空间),  $t$  指事件发生时间。TRE 提炼为简单事件的处理操作包括:

- 1) 不被感兴趣的标签的事件皆可忽略(筛选);
- 2) 多个读写器覆盖相同区域所产生的空间重复事件可过滤(过滤);
- 3) 表示标签持续停留在某区域的一组 TRE 所反映的重要信息往往只是标签进入和离开该区域这 2 个时刻(过滤);
- 4) 许多应用关注特定区域特定时刻某类标签的数量或集合,而忽略每个标签个体事件(组合)。

### 2.2 简单事件

简单事件代表单个或一组标签的状态。TRE 经上 2.1 节第 1、2 步处理得到存在事件(OE),描

述标签  $e$  在时刻  $t$  存在于监控区域  $l$  的实时空间状态,记为  $OE\langle e, l, t \rangle$ 。大部分 OE 是无用信息,继续进行第 3 步处理可获得进入事件(AE)和离开事件(DE),前者描述标签  $e$  在时刻  $t$  从无到有出现在监控区域  $l$ , 记为  $AE\langle e, l, t \rangle$ , 后者描述标签  $e$  在时刻  $t$  从有到无从监控区域  $l$  消失,记为  $DE\langle e, l, t \rangle$ 。OE、AE 和 DE 均为瞬时事件。

业务流程实例关注标签单次停留在监控区域的过程,即停留事件(SE),记为  $SE\langle e, l, t_s, t_e \rangle$ , 其中:  $e$  指标签,  $l$  指停留区域,  $t_s$  和  $t_e$  分别指标签进入和离开  $l$  的时刻, SE 源自邻接的  $AE\langle e, l, t_s \rangle$  和  $DE\langle e, l, t_e \rangle$ 。SE 使用频繁,用 CEP 进行时间推理将浪费不必要的计算资源,因此被归为简单事件。对应的消失事件(EE)描述标签  $e$  消失到重新出现在区域  $l$  的过程,记为  $EE\langle e, l, t_s, t_e \rangle$ , 其中  $t_s$  和  $t_e$  分别指标签消失和重新出现的时刻, EE 源自邻接的  $DE\langle e, l', t_s \rangle$  和  $AE\langle e, l, t_e \rangle$ 。SE 和 EE 均为非瞬时

事件。

物流管理实例关注某类标签在监控区域的数量,即集合事件(CE),记为  $CE\langle E, l, t \rangle_{(E, \text{type}="S")}$ , 其中  $E$  指标签集合,  $E.size$  指集合的标签数量,  $l$  指区域,  $t$  指事件时刻,下标表达式定义 CE 的属性约束,如  $(E, \text{type}="S")$  定义约束条件: 标签类别为 S。

### 2.3 复杂事件

复杂事件反映符合特定规则的一组事件,这些事件称为子事件,可能是简单事件或复杂事件,规则由事件运算符定义。本文在多位学者的复杂事件语义体系<sup>[3,6-8]</sup>基础上归纳整理出适合生产实时监控的 RFID 事件建模语言运算符如下:

逻辑与  $X \wedge Y$  定义  $X$  和  $Y$  事件都发生(无时间约束),  $(X \wedge Y)^T$  使用  $T$  定义  $X$  和  $Y$  事件间最大的发生间隔时间。

逻辑或  $X \vee Y$  定义  $X$  和  $Y$  事件任一发生皆可。

逻辑非  $\neg X$  常与时间窗运算符同时使用,即  $\neg X^T$ , 定义在  $T$  时间间隔中无  $X$  事件发生。

属性约束  $X_C$  约束表达式  $C$  由子句和运算符组成,运算符包括: 与“ $\wedge$ ”、或“ $\vee$ ”、非“ $\neg$ ”, 子句的属性主要包括: 标签唯一编码( $e.id$ )、标签类别( $e.type$ )、所在区域( $l$ )、事件时刻( $t$ )、持续时间( $T = t_e - t_s$ )和标签集合( $E$ )等。例:  $SE_{(e.id="001") \wedge (e.type="laptop") \wedge (l="L1") \wedge (T < 30s)}$  表示编码为 001、类别为笔记本的标签停留在 L1 区域且时长小于 30 s 的事件。

选择  $X^S$  定义符合选择关键字  $S$  的事件。有  $X^{LAST}$ 、 $X^{FIRST}$ 、 $X^n$  和  $X^{ALL}$  分别表示最后一个、第一个、第  $n$  个和所有事件实例。

组合 定义一组事件实例(的属性)的统计信息,有  $COUNT(X)$ 、 $SUM(X, f)$ 、 $MAX(X, f)$ 、 $MIN(X, f)$ 、 $AVG(X, f)$  等函数操作符分别统计实例个数、各实例  $f$  数值属性的和、最大值、最小值和平均值。同为组合语义,简单事件的 CE 描述相同时间、相同区域的标签集合,而此处组合运算符与其他运算符配合描述定制的组合语义。

时间窗  $X^T$  定义复杂事件的有效时间范围,其中  $T$  表示时间窗时长,单位有 s、min、h 等。

时间约束 事件时间运算符如表 1, 是在 Allen 等提出的运算符<sup>[6]</sup>基础上,结合时长语义整理而成。其中子事件可能是非瞬时事件( $t_s$  和  $t_e$  分别为开始和

结束时刻)或瞬时事件( $t = t_s = t_e$ ),  $T_i$  指时长。

表 1 时间约束运算符

运算符	语法	描述
before	$X < Y_{[T_1, T_2]}$	$T_1 < = Y.t_s - X.t_e < = T_2$
after	$X > Y_{[T_1, T_2]}$	$T_1 < = X.t_s - Y.t_e < = T_2$
meets	$XmY_{[T]}$	$ Y.t_s - X.t_e  < = T$
met-by	$XmiY_{[T]}$	$ X.t_s - Y.t_e  < = T$
overlaps	$XoY_{[T_1, T_2]}$	$T_1 < = X.t_e - Y.t_s < = T_2$
overlapped-by	$XoiY_{[T_1, T_2]}$	$T_1 < = Y.t_e - X.t_s < = T_2$
finishes	$XfY_{[T]}$	$ Y.t_e - X.t_e  < = T$
finished-by	$XfiY_{[T]}$	$ Y.t_e - X.t_e  < = T$
during	$XdY_{[T_1, T_2, T_3, T_4]}$	$T_1 < = X.t_s - Y.t_s < = T_2$ 及 $T_3 < = Y.t_e - X.t_e < = T_4$
includes	$XdiY_{[T_1, T_2, T_3, T_4]}$	$T_1 < = Y.t_s - Y.t_s < = T_2$ 及 $T_3 < = X.t_e - Y.t_e < = T_4$
starts	$XsY_{[T]}$	$ Y.t_s - X.t_s  < = T$
started-by	$XsiY_{[T]}$	$ Y.t_s - X.t_s  < = T$
equals	$X = Y_{[T_1, T_2]}$	$ Y.t_s - X.t_s  < = T_1$ 及 $ Y.t_e - X.t_e  < = T_2$

### 2.4 生产监控事件体系

生产监控中,简单事件总是客观发生的事实,描述单个或一组被监控对象的状态,由 TRE 提炼而成,用于推理根据监控逻辑所定制的复杂事件或触发特定业务活动(如数据库操作),1.3 节归纳的监控任务模式中收集的简单事件如表 2 所示。

表 2 生产监控任务中收集的简单事件

监控任务	收集的简单事件
A1	生产任务标签在工作区域的 AE、DE 或 SE, 在工作通道门区域的 SE。
A2	生产资源标签在工作区域的 AE、SE 或 CE, 物料在线边仓的 OE 或 CE。
A3	产品标签的 AE 或 DE。
B1	产品/物料标签在货位出入口区域的 SE 或 CE, 或在定点货位区域的 AE、DE 或 CE。
B2	代表区域的标签在移动/手持模式的 OE。
B3	产品/物料标签在移动/手持模式的 OE 或 CE。
C1	人员标签在工作区域出入口的 SE。
C2	人员标签在工作区域的 AE、DE、SE 或 EE。
D1	设备标签在移动/手持模式的 OE。
D2	维修工单及资源标签在移动/手持模式的 OE 或 CE, 或在维修区的 AE、DE、SE 或 CE。

定义监控任务的核心是定制复杂事件。以下例子描述部分生产监控中的定制复杂事件。

**实例 1** 假设在工作台 S001 监控产品工艺编号为 P4021 的生产步骤,要求工人级别为 A 级,原料 M2001 需 2 个, M2003 需 4 个,要求加工时间在 1 min 之内。可定义复杂事件检验生产步骤启动后 1 min 内,如工人或原料异常,则执行警报处理。

$$\begin{aligned} & (AE_{(e, type="product")} \wedge (e, sn="P4021") \wedge (t="S01") < \\ & \neg OE_{(e, type="worker")} \wedge (e, level="A") \wedge (t="S01") )_{[0,1m]} \wedge (AE_{(e, type= \\ & "product")} \wedge (e, sn="P4021") \wedge (t="S01") < \\ & \neg CE_{(E, size=2) \wedge (E, type="mat") \wedge (E, sn="M201") \wedge (t="S01") } )_{[0,1m]} \wedge \\ & (AE_{(e, type="product")} \wedge (e, sn="P4021") \wedge (t="S01") < \\ & \neg CE_{(E, size=4) \wedge (E, type="mat") \wedge (E, sn="M203") \wedge (t="S01") } )_{[0,1m]} \end{aligned}$$

**实例 2** 假设产品装箱工作台 S021,需根据装箱单 po 核对装箱产品,并检验总质量是否超 50 kg,可定义复杂事件如下监控装箱单所有条目 po.items 的组合事件以确认装箱单产品数量、重量满足要求。

$$\begin{aligned} & ((\wedge po.items (CE_{(E, size=po.items[i].quantity) \wedge (E, type=po.items[i].type) \wedge (t="S021")})) \\ & \wedge CE_{(E, size=po.itemsTotalQuantity) \wedge (t="S021")}) \wedge (SUM(OE_{(t="S021"), \\ & 'e.weight')} < 50kg))^{10s} \end{aligned}$$

### 3 RFID 事件处理系统实现

RFID 事件处理系统含两部分:由 TRE 提炼简单事件,并根据简单事件推理复杂事件。实现如图 2 所示。

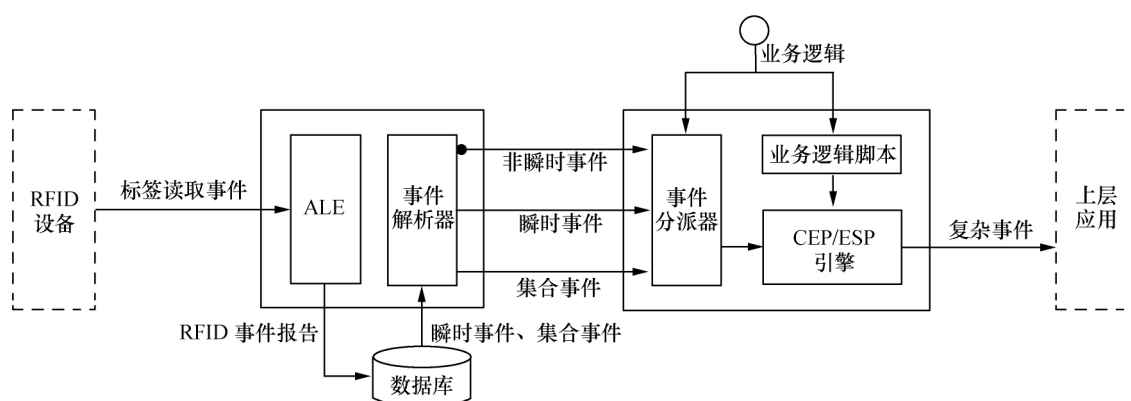


图 2 RFID 事件处理系统实现

#### 3.1 生成简单事件

TRE 处理模块的实现基于应用层事件(application level events, ALE)<sup>[9]</sup>——由 EPCglobal 发布的定义 RFID 物理基础架构与企业应用间信息传递接口的国际标准。ALE 按时间间隔等条件收集来自 RFID 数据源的 TRE,剔除并过滤重复、无关的事件数据,进行组合操作,定时发送汇总的事件报告。

ALE 定义的“事件报告”包含简单事件定义的 AE、DE、CE 及 OE,此外还应根据 AE 和 DE 计算 SE 和 EE。系统 TRE 处理模块在 LogicAlloy ALE Server 基础上实现,支持 GID-96、SGTIN-96 等标签编码,支持图形界面辅助管理 Alien、Symbol 等主要厂商的 RFID 物理设备,支持图形界面定制 ALE 事件报告参数(如 CE 的运算规则)。

经配置实时收集的 TRE,经过筛选、过滤和组合,生成事件报告,通过 JDBC 协议把实时生成的事件报告发送至 MySQL 数据库。随后,“事件解析器”模块实时从数据库读取事件报告中的瞬时事件

和 CE,计算相应的 SE 和 EE,以 Java 对象的形式将所有简单事件输出至复杂事件处理模块。RFID 简单事件类模型如图 3 所定义。

#### 3.2 处理复杂事件

近年许多学者、机构和技术公司就 CEP 和 ESP 的算法和实现进行了深入研究,推出许多成熟的 CEP 引擎以构建高质量、高性能的基于事件的企业级应用。本系统的复杂事件处理模块在 JBoss Drools Fusion 基础上实现,Drools 是一个 Java 业务逻辑开发平台,Fusion 是其专注于 CEP 和 ESP 的组件<sup>[10]</sup>。

本模块支持程式地定制复杂事件逻辑,每个复杂事件对应一段脚本,运行时解析逻辑脚本,接收输入的简单事件,随后 Fusion 引擎使用 Rete 算法<sup>[11]</sup>执行 CEP 运算,实时检测复杂事件。实现复杂事件处理过程的关键在于:1)实现简单事件定义(见第 2.2 节)及其输入机制;2)实现 RFID 复杂事件语义(见第 2.3 节)与逻辑脚本语法的映射。

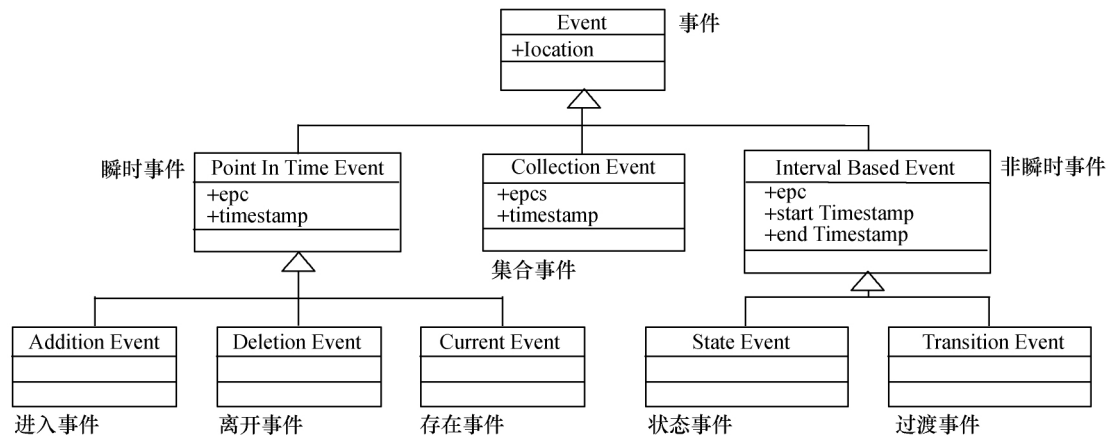


图3 RFID简单事件类图

“事件分派器”模块把从“事件解析器”接收到的简单事件 Java 对象输入对应的事件处理通道。每个事件处理通道代表一组内部相关、对外独立的复杂事件逻辑，由一段逻辑脚本实现，实时收集的简单事件被分组输入通道进行运算以推理复杂事件，再通过 JDBC/JMS 协议将事件信息存入数据库或消息队列，供上层企业系统使用。因此，按 RFID 生产监控模式分组，可将监控任务分配到不同的事件处理通道，在分布式软/硬件技术的协助下有利于提升系统面对大规模问题的可伸缩性。

RFID 事件建模语言可完全映射至 Fusion 逻辑脚本，表 3 列举部分事件运算符的逻辑脚本代码片段。

表3 Fusion 复杂事件逻辑脚本实现(部分)

事件语义	JBoss Drools Fusion 业务逻辑脚本片段
$X \wedge Y$	AE( \$id; e. id, l = "S1") && AE( e. id = \$id, l = "S2")
$\neg X$	not ( AE( l = "S1") ) ...
$X_c$	SE( e. id = "001" && e. type = "laptop" && l = "S3" && duration < 30s )
$(X < Y)_{[T_1, T_2]}$	&ev1; SE( \$id; e. id, l = "S1") SE( e. id = \$id, l = "S2", this before [0, 30s] \$ev1 )
$(X \text{ m } Y)_{[T]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this meets [5s] \$ev1 )
$(X \text{ o } Y)_{[T_1, T_2]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this overlaps [5s, 30s] \$ev1 )
$(X \text{ f } Y)_{[T]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this finishes [5s] \$ev1 )
$(X \text{ d } Y)_{[T_1, T_2, T_3, T_4]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this during [2s, 6s, 4s, 10s] \$ev1 )

(续表)

事件语义	JBoss Drools Fusion 业务逻辑脚本片段
$(X \text{ s } Y)_{[T]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this starts [5s] \$ev1 )
$(X = Y)_{[T_1, T_2]}$	SE( e. id = \$id, l = "S2", this coincides [5s, 5s] \$ev1 )
$X^T$	AE( l = "S1" ) over window: time( 2m )
$X^{\text{LAST}}$	\$ev1; AE( l = "S1" ) not ( AE( l = "S1", this after \$ev1 ) )
$X^n$	\$ev1; AE( l = "S1" ) Number( intValue = n - 1 ) from accumulate( AE( l = "S1", this before \$ev1 ), count )
COUNT(X)	from accumulate( AE( l = "S1" ), count )
MAX(X, f)	From accumulate( AE( l = "S1", \$w: e. weight ), max( \$w ) )
AVG(X, f)	from accumulate( AE( l = "S1", \$w: e. weight ), average( \$w ) )

#### 2.4 节实例 1 的复杂事件逻辑脚本定义如下：

```

$e1: AE( e. type = "product", e. sn = "P4021", l = "S001" ) from entry-point "C1"
not OE( e. type = "worker", e. level = "A", l = "S001", this after [0, 1m] $e1 ) from entry-point "C1"
not
CE( es. size = 2, es. type = "material", es. sn = "M2001", l = "S001", this after [0, 1m] $e1 ) from entry-point "C1"
not
CE( es. size = 4, es. type = "material", es. sn = "M2003", l = "S001", this after [0, 1m] $e1 ) from entry-point "C1"
  
```

## 4 RFID 事件处理实验分析

RFID 事件处理系统被集成至某 RFID 辅助生

产现场的 MES 中,负责实时监控现场的复杂事件。该生产系统包括混装流水装配线(工作台和线边仓定点模式布置读写器)、自动化仓库(门禁、移动和手持模式配合)和分拣中心(货架和分拣台定点模式),嵌入 RFID 标签的对象有产品(>50, 平均标签数)、原材料(>500)、人员(约 15)和托盘(>70)。本事件处理系统负责的实时监控功能包括: 1) 检验装配线工作台生产步骤、原材料以及人员是否规范; 2) 线边仓是否需补料; 3) 分拣过程产品种类和数量是否与分拣单一致; 4) 仓库移出的货物是否与运料单一致并及时到达指定区域; 5) 工人的位置、工作效率、工作时长是否满足要求; 等等。

RFID 事件处理的性能是执行实时生产监控的关键,因此基于上述生产监控现场进行性能实验。实验把复杂事件建模语义分为时间相关语义(包含时间约束和时间窗运算符)和非时间相关语义(其余运算符),这是因为时间相关语义需处理有效时间段内的所有历史事件,性能需分开比较。

实验中,每隔  $T$  时间间隔,系统把 TRE 处理模块输出的简单事件输入复杂事件处理模块,假设每次输入简单事件数为  $M$ , 复杂事件定义数为  $N$ , 执行运算,处理时间  $T_c$  为稳定运行时连续 20 次处理的时间平均值。系统配置为 AMD Athlon II X2 245(2.91 GHz)的 CPU, 内存为 2.75 GB。

首先仅考虑非时间相关语义,实验结果如图 4, 可知复杂事件定义数对处理时间影响不大,实验 10 万事件输入, 20 个复杂事件定义,处理时间约 3 s。

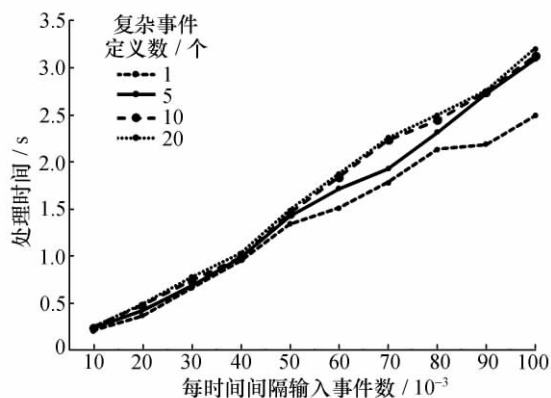


图4 复杂事件处理性能实验(非时间相关语义)

时间相关语义需考虑有效时间段内的历史事件,影响其处理性能的主要参数是  $R = T_{\text{MAX}}/T$ , 其中最大时间窗  $T_{\text{MAX}}$  表示复杂事件定义中的最大有

效时长,由事件失效时间、时间约束时长值和时间窗值决定。图 5a 实验固定复杂事件逻辑脚本使  $R$  为 10, 图 5b 实验则固定每时间间隔输入事件数为 500, 实验结果显示处理时间与输入事件数  $M$ 、复杂事件数  $N$  和  $R$  成正比。值得注意,时间相关语义的推理运算应对的问题规模相对较小,如  $T=5\text{ s}$ ,  $T_{\text{MAX}}=50\text{ s}$ ,  $M=200$ ,  $N=10$  的处理时间约为 3 s, 因此在定制时间相关语义时,一方面应尽可能缩小  $T_{\text{MAX}}$ , 避免过多无效事件耗用计算资源,另一方面则考虑将复杂事件定义分解到多个通道,使用并行或分布式处理。

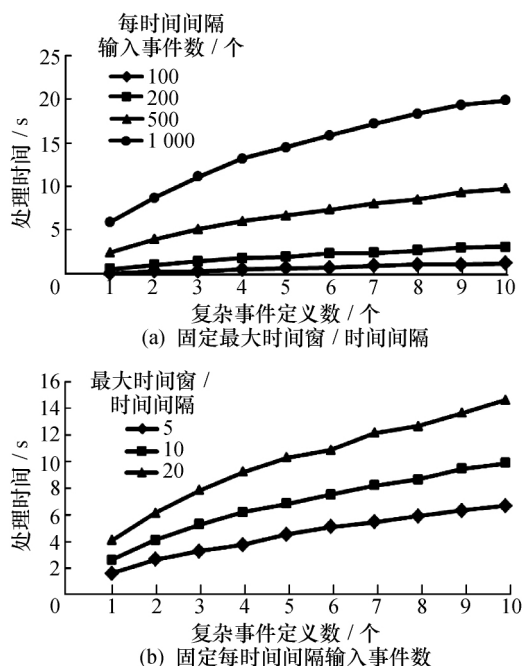


图5 复杂事件处理性能实验(时间相关语义)

## 5 结 论

本文提出了一套 RFID 实时事件处理系统的设计和实现方法,适用于对信息实时性和逻辑复杂性有较高要求的生产现场监控的信息处理。包括:

1) 提出一种形式化的复杂事件建模语言,对基于 RFID 技术的实时生产监控的各类要素进行系统性分析和解耦,构建其层级事件体系,之后可有目的地组合这些层级事件和复杂事件运算符,从而高效地定义复杂多变的生产监控业务逻辑。

2) 基于该复杂事件建模语言实现了一个复杂事件处理平台,采用高效的 CEP 算法构建,能及时地从大量采集数据中提炼出生产状态或异常信息,该平台在生产现场监控实践测试中表现出较好性能。

## 参考文献 (References)

- [1] Gershenfeld N, Krikorian R, Cohen D. The Internet of Things [J]. *Scientific American*, 2004, **291**(4): 76-81.
- [2] Gunther O, Kletti W, Kubach U. RFID in Manufacturing [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [3] WANG Fusheng, LIU Shaorong, LIU Peiya. Complex RFID event processing [J]. *The VLDB Journal*, 2009, **18**(4): 913-931.
- [4] WU Eugene, DIAO Yanlei, Shariq R. High-performance complex event processing over streams [C]//Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Chicago, USA: ACM Press, 2006.
- [5] 臧传真, 范玉顺. 基于智能物件的实时企业复杂事件处理机制 [J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(2): 22-32.  
ZANG Chuanzhen, FAN Yushun. Complex event processing of real time enterprise based on smart items [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(2): 22-32. (in Chinese)
- [6] Allen J F. Maintaining knowledge about temporal intervals [J]. *Communications of the ACM*, 1983, **26**(11).
- [7] Bennett B, Galton A. A unifying semantics for time and events [J]. *Artificial Intelligence*, 2004, **153**(1-2): 13-48.
- [8] Yoneki E. ECCO: Data Centric Asynchronous Communication [D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2006.
- [9] EPC Global. The Application Level Events (ALE) Specification, Version 1.1.1 [Z/OL]. (2009-10-13), [http://www.gsl.org/gsm/kc/epcglobal/ale/ale\\_1\\_1\\_1-standard-core-20090319.pdf](http://www.gsl.org/gsm/kc/epcglobal/ale/ale_1_1_1-standard-core-20090319.pdf).
- [10] Bali M. Drools JBoss Rules 5.0 Developer's Guide [M]. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2009.
- [11] Forgy C. Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern matching problem [J]. *Artificial Intelligence*, 1982, **19**(1): 17-37.
- [15] 蔡晔, 顾俊, 刘德启, 等. 平原河网结构改造与水体有机物自净效果的实验研究 [J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(5): 114-117.  
CAI Ye, GU Jun, LIU Deqi, et al. Experimental study on the relations between transformation of plain river network and effects of organic matter self-purification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(5): 114-117. (in Chinese)
- [16] GB3838-2002. 地表水环境质量标准 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002.  
GB3838-2002. Environmental Quality Standards for Surface Water [S]. Beijing: State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2002.
- [17] Mitrovic S M, Oliver R L, Rees C, et al. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 164-174.
- [18] Hamrick J M. User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code [R]. Gloucester Point, USA: The College of William and Mary, 1996.
- [19] Ambrose R B, Wool T A, Martin J L. The water quality analysis simulation program, WASP5 model documentation and user manual [R]. Athens, USA: US Environmental Protection Agency, 1993.
- [20] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS与地表水水质模型 WASP5 的集成 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2001, **41**(8): 125-128.  
JIA Haifeng, CHENG Shengtong, DU Wentao. Integration of GIS with the surface water quality model WASP5 [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2001, **41**(8): 125-128. (in Chinese)
- [21] 唐迎洲, 阮晓红, 王文远. WASP5 水质模型在平原河网区的应用 [J]. *水资源保护*, 2006, **22**(6): 43-47.  
TANG Yingzhou, RUAN Xiaohong, WANG Wenyuan. Application of water quality model WASP5 in water environment simulation of plain river network areas [J]. *Water Resources Protection*, 2006, **22**(6): 43-47. (in Chinese)
- [22] 贾海峰, 张岩松, 何苗. 北京水系多藻类生态动力学模型 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, **49**(12): 1992-1996.  
JIA Haifeng, ZHANG Yansong, HE Miao. Multi-species algae eco-dynamic model for the Beijing water system [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2009, **49**(12): 1992-1996. (in Chinese)
- [23] Robert V. Thomann. Verification of water quality models [J]. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1982, **108**(EE5): 923-940.

(上接第 672 页)