

复杂事件处理技术的应用现状及展望

何恒靖, 赵 伟, 黄松岭

(清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 复杂事件处理(CEP)是一种针对实时事件流进行检测、处理、分析和挖掘的有效手段。对 CEP 的核心概念、基本构成要素等进行介绍。梳理 CEP 技术的主要应用,包括物联网、云计算、网格计算、商业过程管理及计算金融等领域。基于上述应用,阐述基于云计算的分布式并行 CEP 技术。通过分析流处理系统的需求,指出基于云计算的 CEP 技术是未来 CEP 系统发展的一个重要方向。提出一些可采用基于云计算的 CEP 技术来进行复杂事件流处理的新领域,包括基于 CEP 技术的电网智能化控制以及仪器控制和智能测量等,对 CEP 技术应用的新领域具有指导意义。

关键词: 复杂事件处理;云计算;仪器控制;测量;数据流处理;物联网;商业过程管理

中文引用格式:何恒靖,赵 伟,黄松岭. 复杂事件处理技术的应用现状及展望[J]. 计算机工程,2017,43(1):20-26,31.

英文引用格式:He Hengjing,Zhao Wei,Huang Songling. Application Status and Prospect of Complex Event Processing Technology[J]. Computer Engineering,2017,43(1):20-26,31.

Application Status and Prospect of Complex Event Processing Technology

HE Hengjing,ZHAO Wei,HUANG Songling

(State Key Laboratory of Power System,Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

[Abstract] Complex Event Processing(CEP) is an effective approach for real-time event stream monitoring,processing,analyzing and mining. Core concepts and basic elements of CEP are introduced. Major areas that utilizing CEP technology are reviewed,such as Internet of Things(IoT),cloud computing,grid computing,Business Process Management(BPM) and computation finance. Based on these applications,cloud based distributed parallel CEP technologies are introduced. By analyzing the requirements of future stream processing systems,it is concluded that such cloud based CEP technology is an important direction for the development of future CEP systems. Potential new areas that require such cloud based CEP system for complex stream event processing are explored,such as power system intelligent control,instrument control and intelligent measurement. Guidance can be provided for the utilization of the CEP technology for now and future.

[Key words] Complex Event Processing(CEP); cloud computing; instrument control; measurement; data stream processing;Internet of Things(IoT);business process management

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2017.01.004

0 概述

随着射频识别(Radio Frequency Identification,RFID)、传感器网络、物联网等技术及应用的快速发展,海量的流式数据从相应的应用系统中不断产生和涌现,并被输入到上层的信息系统中。以往这些流式数据会先被存储到数据库,然后再借助其他工具或应用,离线地被加以处理。然而,近年来,为了从在线数据流中实时提取有用信息,以用于一些特

殊情况的实时(本文的实时与嵌入式系统中的“实时”并不完全相同)响应及相关决策支持,对在线流式数据的处理和挖掘越来越受到关注。为此,一个新的技术即复杂事件处理(Complex Event Processing,CEP)被提出,并已成为检测、处理、分析和挖掘实时事件流数据的一种有效手段。

在 CEP 技术处理的数据流中,包含了事件的一些基本信息,而事件又提供了对相应数据流中所蕴含信息的语义描述。通过事件建模及规则构建,

基金项目:电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室开放基金(SKLD15M02)。

作者简介:何恒靖(1986—),男,博士研究生,主研方向为云计算;赵 伟(通信作者)、黄松岭,教授。

收稿日期:2015-11-09 **修回日期:**2015-12-24 **E-mail:**zhaowei@tsinghua.edu.cn

CEP 技术可从基本事件中推理出复杂事件, 并采取相应措施应对特殊事件。不仅如此, 在 CEP 计算引擎中, 可运行各种数据流挖掘算法和模式识别算法, 从而实现知识发掘。当前, CEP 技术已被应用于越来越多的领域。本文梳理了 CEP 技术在物联网、分布式系统监控、云计算等领域的应用, 并基于这些用例, 探索一些有前景的 CEP 应用领域以及新型的 CEP 技术。本文的研究工作, 旨在为当前及未来 CEP 技术的应用提供借鉴。

1 复杂事件处理

所谓复杂事件处理, 是指用于不同数据源及事件的聚合, 并推理更复杂事件和模式, 以便支持复杂情形下知识获取和决策的实时事件流处理的过程^[1]。通常, CEP 技术主要应用于在线模式识别、系统监控、状态认知和反应等领域。构成 CEP 语义模型的主要元素包括事件、模式、条件、规则及动作等。

一个 CEP 过程通常从对事件的收集开始。不同类型的事件, 也称事件云 (Event Cloud), 是来自不同类型的硬件设备或软件应用, 并且这些事件通常以数据流的形式产生。数据流不可直接用于模式匹配和事件聚合, 而是首先需要以合适的事件模型将原始数据转换为带语义的事件。

从单一数据源收集的基本事件, 通常包含极少信息, 其难以支撑上层应用。为从事件中获取有用信息, 需要定义事件关联逻辑和相关事件模式, 以便将不同类型的事件加以聚合, 并从中提取信息含量更高的事件。当检测到某一事件模式出现时, 将会生成新的复杂事件, 这一事件一般反映着系统状态的改变, 或表示系统中出现了某一特殊状态。多个事件可通过逻辑操作符构成复杂判定条件, 这些条件是状态认知和基于规则做出反应的逻辑基础。

通过检测预设的条件是否满足, CEP 应用系统可确定当前对象系统的状态。当出现某一状态或某一状态发生改变时, CEP 技术将会通知上层应用, 或直接根据定义的规则采取相应措施。规则是 CEP 模块的核心, 可实现系统中的关键逻辑和智能性能。采用基于规则的推理, CEP 应用系统可针对特定情形做出近乎实时的响应。图 1 给出了 CEP 应用系统的典型概念架构。

当前比较成熟的复杂事件处理平台主要有: Esper, Cayuga, PADRES^[2], Storm^[3], Spark Streaming^[4], 以及其他商业 CEP 平台。其中, Esper, Cayuga, PADRES 支持相应的流数据检索语言, 便于数据流的模式识别和监测等。而 Storm 和 Spark Streaming 为开放的流数据处理框架, 其自身并不包含对流数据检索语言的支持, 需要根据事件处理的需求自定义流数据处理的模型框架。

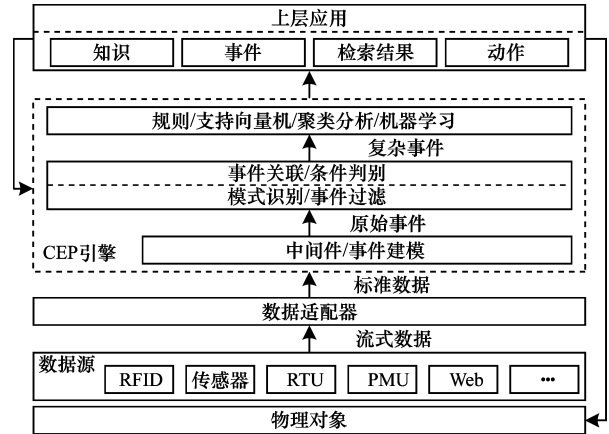


图 1 CEP 应用系统概念架构

与前 3 种 CEP 系统不同, Storm 和 Spark Streaming 是近几年发展起来的分布式、并行流数据处理系统, 其主要面向大规模实时事件流的处理, 是当前应对实时大数据的重要手段。目前, 大多数 CEP 应用系统均基于前述所有比较成熟的 CEP 平台而开发。

对于实际应用, 通常还需要诸如数据适配、事件过滤等一些辅助功能模块。在基本 CEP 系统之上, 还可集成支持向量机、聚类分析等其他技术, 这些技术可用于应对更复杂的应用场景。

2 CEP 应用的主要领域

当前, CEP 系统主要应用于一些涉及不同类型传感器、小型智能设备的领域。传感器和智能设备部署数量庞大, 并往往跨越广泛区域, 但它们自身的功能和计算能力十分有限。CEP 系统会从传感器和智能设备连续收集数据, 然后关联不同数据源的事件流, 并从这些事件中提取出有用的知识和信息。从整个系统的角度看, 所有的计算负荷及主要功能都已转移到 CEP 引擎和上层应用中。

2.1 应用于物联网的 CEP

物联网是连接现实物理世界与数字世界的主要工具, CEP 技术最常见的应用之一, 就是收集和来自物联网系统的实时流式的数据。为获取对现实世界更全面的认知, 智能设备, 如传感器、智能仪表、全球定位接收器、射频识别装置等被大量部署在物理系统中。而负责处理来自这些设备的海量数据和事件的, 就是基于 CEP 技术的信息系统。

例如, 文献[5]为实现建筑智能化, 提出了一种基于分布式 CEP 引擎的物联网系统。具体地, 在用户侧构建该系统, 可为不同用户提供彼此隔离的工作空间, 以便于不同用户开发自己的事件处理应用; 其中的应用程序、操作及数据适配器等, 均具有分布式模块化特点, 并可被部署在不同的服务器中; 不同用户可同时使用该系统中用户侧平台的不同功能模

块,而平台负责协调不同用户之间的操作。图2给出了该基于 CEP 技术的物联网系统的基本架构。

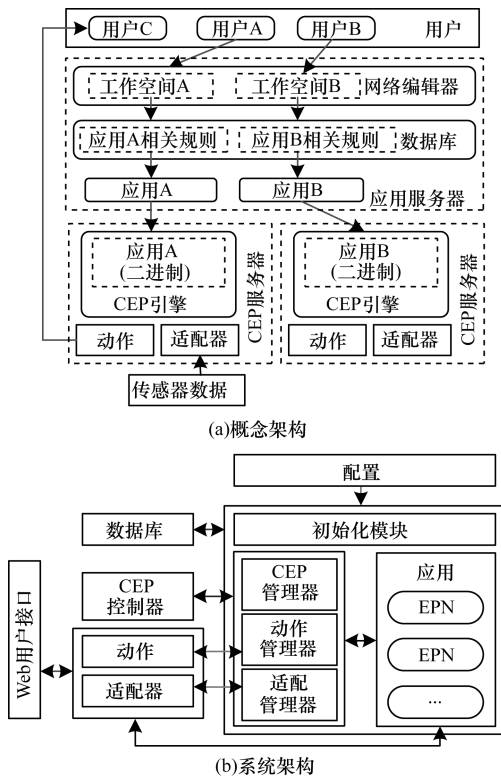


图2 基于 CEP 技术的智能建筑物联网系统架构

如图 2(a)所示,用户 A 和 B 可同时在用户侧平台上搭建应用程序,而用户 C 则可通过操作网关获取用户 A 应用程序给出的通知。传感器数据及外部输入,如开关状态等信息,可通过适配器输入该系统。从图 2(b)可见,该系统能将各应用程序变换成事件处理网络(Event Processing Network, EPN),并将其部署在 CEP 引擎中;而 EPN 网络可在不同服务器中并行运行。搭建应用程序所需的规则和基本元素,均被存储在 MySQL 数据库中。然而,文献[5]虽提出了基于分布式 CEP 引擎的物联网系统架构,但却未涉及事件模型及相关处理模型。

文献[6]提出了一种基于上、下文认知的 CEP 技术(Context Aware CEP, CACEP),旨在用于对物联网中事件云的处理。该技术基于模糊本体理论构建事件相关的上、下文,以及上、下文的推理过程,从而实现了对事件的处理。CACEP 方法将事件建模为概率基本事件和概率复杂事件,每种模型中均包含一个用于描述物联网系统中事件不确定度的参数。由模糊概念、模糊属性、模糊规则和对象集合组成的模糊本体,被用来定义事件集合的上、下文。在文献[6]中,一组对象集合的模糊上、下文可表示为 $FC = \langle Nc, No, Np \rangle$,其中, Nc 是模糊概念集合; No 表

征对象集合; Np 为模糊属性集合。模糊事件上、下文由不同时间的模糊上、下文组成的序列构成。为了给事件提供语义描述,模糊属性中包含相关的语言变量,同时定义了事件与其语言表述之间的映射关系。除对象集合外,模糊本体中的其他集合要素,均有一些特殊定义的集合运算,如集合减法等。由于模糊事件上、下文在复杂事件发生时可能会改变,因此其可用于对复杂事件的发现,同时也可用于相应的推理。这一特性对复杂事件监测和处理具有重要意义。图 3 给出了基于 CACEP 技术构建的复杂事件处理系统的基本架构。

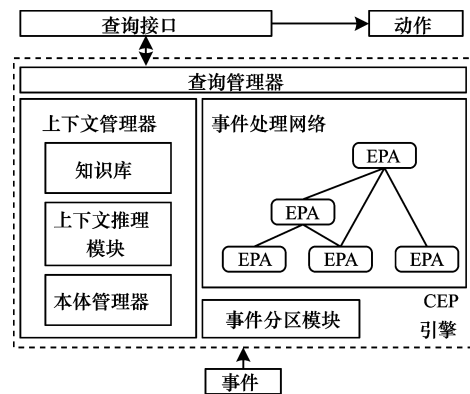


图3 基于 CACEP 的复杂事件处理系统

在图 3 中,事件被划分到不同区域,且每个区域内的事件由相应的事件处理代理(Event Processing Agent, EPA)实施处理。EPA 网络构成处理逻辑,且它是该系统 CEP 引擎的核心部分。

物联网中通常会部署两类设备,即射频识别 RFID 标记设备^[7]和传感器,因而当前的很多研究都在关注装设有这两类设备的各类应用系统。

RFID 技术依托电磁场传递数据,实现对物品的识别和跟踪。通常装设有 RFID 元件的物品可以实时传送数量有限的自身特性信息,而且这些信息一般无法直接使用,因此,需要依靠中间件来提取知识并进行推理。当前,大多数中间件均采用了 CEP 技术。

为配备有 RFID 技术的医院,文献[8-10]提出并搭建了基于 CEP 技术的上层信息系统。他们将 CEP 技术用于对病人的识别和跟踪,以及对药品或手术的管理。具体地,病人及相关医疗设备均带有 RFID 标签,以记录病人的身份和健康状况信息。如此,借助 CEP 技术,医院可实时监测病人的特殊状态或异常行为,例如可发现某病人进入到禁止进入的危险区域或房间等,从而及时采取相应措施,以保护该病人的生命安全。不仅如此,通过关联病人、医疗设备或药品的 RFID 事件,医院可实现高效的管理,

避免诸如药品分发出错或手术安排错误等问题的发生。在图 4 中, 根据文献[8]中系统的数据流, 给出了该系统的层次结构。

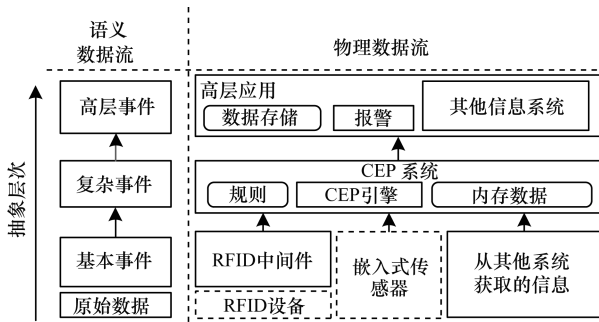


图 4 配备 RFID 的 CEP 系统架构

上述的 CEP 应用, 通常采用类似 SQL^[10] 或自定义语句来进行事件的过滤、聚合, 以及对规则的描述。当前, 很多 CEP 应用系统均采用了类似 SQL 的语言, 以便于对事件的查询和推理, 但面对一些特殊情况^[11], 因效率或其他原因, 还需要自定义逻辑操作符和语言, 才能对事件或过程给出准确、有效的描述。

虽然 RFID 技术可用于对物品的实时识别, 但其既无法感知周围环境, 也难以实现长距离监测。而传感器网络的出现, 恰可弥补 RFID 技术的不足。

与 RFID 系统相比, 传感器网络具有更复杂的功能, 且传感器网络依托数字通信技术, 可支持距离更远的数据传输。但相对于 RFID 系统, 传感器网络的反应速度慢、成本高, 并且所传输数据的结构也更复杂。很多情况下, RFID 技术和传感器网络或无线传感器网络 (WSN), 通常被结合在一起使用, 以应对复杂的应用场景^[12]。

在传感器网络中, 也需要利用 CEP 技术来实现针对实时流式数据的过滤、聚合、推理、查询及其他处理过程。截至目前, 事件驱动架构已被引入到基于事件的多重应用之中^[13-16]。图 5 给出了文献[15]中提出的基于 CEP 技术的传感器网络所采用的事件驱动架构。

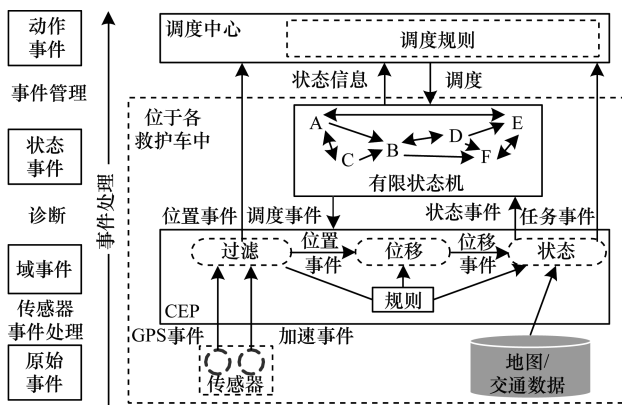


图 5 基于事件驱动 CEP 系统的传感器网络

在图 5 中, 根据事件处理流程, 事件被分成 4 个类别, 其中域事件由 CEP 引擎进行分析和推理, 而状态事件则被输入到有限状态机中以便判别当前车辆状态, 从而为调度中心提供车辆调度的基本依据。

在文献[14]中, 当进行传感器网络复杂事件处理时, 事件采用本体进行建模, 事件处理语言 (EPL) 被用来处理事件, 而基于 SQL 的方法则用于对流式事件的连续查询。

基于 CEP 技术的传感器网络, 可用于对交通^[14,17] 和环境状况的监测, 同时, 也可用于对工业生产状态的管理^[18]。例如, 在实时监测公路上的行车数量方面, 基于 CEP 技术可推测当前的交通情况和有否交通事故发生, 同时可生成事件, 以提醒交警采取相应疏导措施。不仅如此, 借助诸如状态机、专家系统等, 以 CEP 技术还可提升智能系统的自动化水平, 使其可直接根据状态认知采取相应行动, 或为其操作人员提供知识或经验支撑。

除上述应用外, CEP 技术也可服务于基于 WSN 的目标追踪及入侵检测^[19]、由移动设备的传感器组成的分布式传感网络的管理^[20-21], 以及其他与传感器网络相关的应用。

2.2 基于 CEP 的云计算及网格计算监测

CEP 的另一个应用领域是云计算和网格计算监测, 具体主要用于与云计算、网格计算以及高性能计算相关的动态资源和服务的监测、入侵和故障的检测等^[22]。在这些应用场景中, 传感器和用于收集硬件、平台 and 应用程序状态数据的软件, 均被当做传感器和事件源而被处理。基于 CEP 技术构建的监测系统, 可为数据查询、事件关联、趋势分析等提供更先进的技术支撑, 从而为高层决策提供支持。

文献[23]给出了 Bartosz Balis 等人研发出的一种基于 CEP 技术的网格实时监测系统 GEMINI2。该系统满足网格监测的三大基本要求, 即: 能近乎实时地获取监测数据, 具有高级查询功能, 仅花费最小的开销。如图 6 所示, GEMINI2 中具有事件调度引擎, 并被分别安装在服务节点和工作节点中, 成为 CEP 子系统的核心部分。

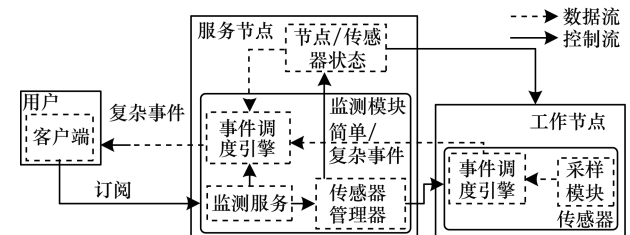


图 6 GEMINI2 的整体架构

相对于网格计算, 云计算是一种较新的信息技术,

并已被应用于越来越多的领域。目前已有不少有关 CEP 技术在实时云计算环境监测中应用,其中最典型的是对云资源和云性能的监测^[24],且应用范围从基础设施即服务 (IAAS) 到软件即服务 (SAAS)^[25]。

除对云资源、云性能的监测外,向基于 CEP 技术的云管理系统还可添加一些规则和推理逻辑,以实现该管理系统功能的自动扩展^[26]、恢复和自愈^[27]。图 7 展示了相应的系统架构^[26]。可见,其同时具备基于 CEP 技术的云管理系统的监测和反应功能。

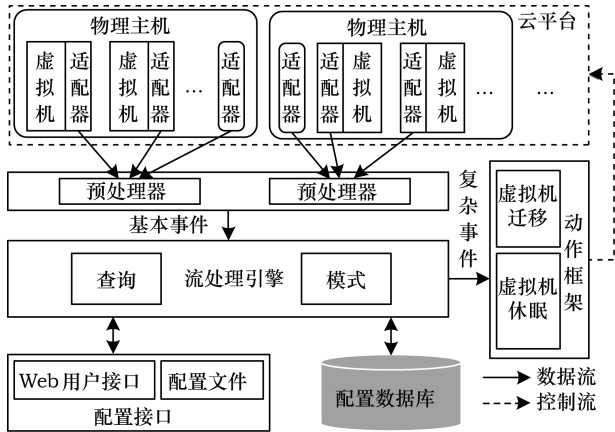


图 7 基于 CEP 的云计算监测系统

2.3 用于商业和计算金融的 CEP

在商业过程管理 (Business Process Management, BPM) 和计算金融中,也可使用 CEP 技术处理实时事件流。在 BPM 中,由传感器、RFID 和网页产生的事件流,可采用 CEP 技术进行处理,并生成更复杂的事件,以用于对相关商业过程的调控。

文献[28]为将之前研究的系统,即商业过程建模和标记 2.0 (BPMN) 系统加以扩展,引入了事件流处理单元 (Stream Processing Unit, SPU),以完成基于 CEP 技术的商业过程建模。他们研发出了用于事件驱动过程链 (EPCs) 和 BPMN 的 SPU 模型,并提供了两种系统中 SPU 模型的映射关系。借助 SPU,商业过程可按 CEP 模式建模,从而使实时过程监测和实时调整成为现实。与之类似,文献[29]提出一种基于 CEP 技术的框架,旨在实现对动态商业过程的实时调整。CEP 技术均被用于特定场景的检测,具体地,当所预设的事件发生时,该框架可提供当前过程向备用过程的动态切换。因此,管理系统可根据当前的状态动态地调整处理逻辑,以达到最优性能。

计算金融的发展也依赖实时数据流的处理,如根据股票价格进行价格预测,从而实现股票的自动交易。此外,模式识别及流式数据查询对金融分析也非常重要。通常,这些应用需要处理大量实时数据,且对时间很敏感,对此,在当前采用 CEP 技术是最好的选择。

3 新兴 CEP 技术及 CEP 应用领域

3.1 基于云计算的 CEP 技术

随着源于诸如传感器、RFID 设备、智能仪表等数据量的激增,大量的事件从这些数据源中产生。搜集和处理这些海量、异构的数据流,已成为诸如 CEP 等流处理系统最大的挑战^[30]。当前,基于云计算的分布式并行 CEP 平台,是处理大规模复杂事件的最有效方法。

云计算可为上层计算平台和框架提供弹性的计算和存储资源。这种灵活的计算模式,可提高资源利用率并降低投资,同时,能满足计算负荷变化时动态扩展资源的需求。利用这些特性,部署在云平台中的 CEP 应用程序,可根据输入事件流的负荷自动调整所需的资源^[31]。

为应对大规模流事件处理中出现的挑战,一些带有容错机制的新型分布式并行可伸缩 CEP 架构相继诞生^[3,32]。在这些架构均部署在集群中,且多个 CEP 任务可并行地执行,从而可极大提高事件处理速度。而借助容错机制,这些框架就可在有节点发生故障、退出运行的情况下仍能维持正常、连续运行。当前很多机构都在研发和使用基于云计算的分布式并行 CEP 技术^[33],并且随着大数据技术及其应用的不断拓展,这一趋势仍将继续。

3.2 对电力系统的智能化控制

根据文献[34-35],将 CEP 技术已应用于对电网的智能控制和管理。文献[34]提出一种基于 CEP 技术的实时数据流挖掘方法,可用于挖掘电网中源自相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 的相位数据。与传统的离线挖掘方法 (如 MapReduce) 相比,采用该方法可带来较大的性能提升,具体地,基于 CEP 技术的决策树模型被部署于所研发并采用的 CEP 引擎中。有了 CEP 技术及数据流挖掘算法,操作人员可获取对电网运行状态的更好认知,从而使其能采取更有效的措施来维持电力系统,即使处在异常状态,仍能保持长期稳定性。图 8 展示了有人研发的相应系统和所提出算法的原理框图^[34]。由于测量设备,如 PMU 的数量庞大,因此文献[34]建议应采用分布式并行处理框架,如 Apache Storm 作为未来进行大规模流式电力系统数据挖掘的计算平台。

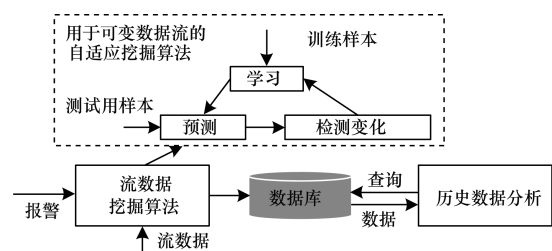


图 8 基于 CEP 的智能电网状态认知系统

文献[35]提出一种基于 CEP 技术的智能电网管理框架。该框架采用基于知识的事件驱动架构, 以用于对电力系统的控制。来自 PMU、电压表及其他电工测量仪器仪表的实时数据流, 由 CEP 软件代理模块进行处理, 这些软件代理模块由代理模块生成器根据预设的策略生成。CEP 代理模块分布在电力系统不同的节点和位置。该框架还定义了一套语言, 用以描述不同的处理逻辑。当电网发生异常或事故时, CEP 代理模块会发出警告, 并同时触发智能电网管理系统, 以及时采取相应措施。

为便于在电力系统中应用 CEP 技术和事件驱动框架, 文献[36]针对电力系统定义了一组上层事件的本体模型。电力系统事件模型标准化, 可增加电网信息系统中不同子系统之间的交互性。文献[36]中定义的事件本体模型的主要概念如图 9 所示。

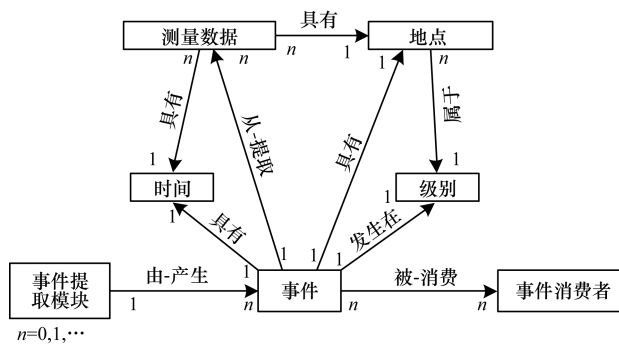


图 9 CEP 技术用于电力系统的本体模型

在图 9 中, 每个基本概念都有对应的事件本体模型, 且可由上层本体模型导出下层本体模型。该事件本体模型可用于 CEP 中事件的建模, 而使用该模型的不同子系统可彼此交互, 以实现电力系统的智能控制。

3.3 仪器控制和智能测量

虽然 CEP 技术主要用于事件处理, 但其也可用于其他很多需要实时处理数据流的行业和领域, 其中一个潜在的应用领域就是仪器控制和智能测量。当前, 尚未见有文献对 CEP 技术在仪器控制及测量领域中的应用进行探索性研究。

与传感器、RFID 和物联网中其他的智能设备相比, 测量仪器的功能更为复杂, 且在它们当中, 十分需要硬件与测量软件之间的交互。但测量仪器输出数据以及给测量仪器输入的指令, 均是以数据流的方式进行传输的, 因此, CEP 技术也适用于对测量仪器的控制和测量数据的智能化处理。由于云计算与分布式并行 CEP 技术的结合, 非常适用于大型系统, 因此本文认为采用 CEP 技术进行测量仪器控制和智能测量, 最有利的一点就表现在, 基于 CEP 技术构建

包含大量测量仪器和传感器的大型测量系统要比以前简单得多。

除上述优点外, 与文献[37]类似, 基于 CEP 技术的测量应用程序可被封装成模块, 而这些模块在构建其他测量程序时可被重用, 如此, 可大大简化相关测量程序的开发。将基于 CEP 的测量系统部署在云中, 就可根据需要, 得到近乎无限量的计算资源和存储资源, 且还可大大降低在这些资源上的投入。不仅如此, 并行计算模式还为加快流式数据处理速度提供了有效途径。另外, 接入云中的测量仪器, 也可像计算和存储设备一样被当作资源使用, 这也意味着, 测量仪器可被多用户所共享。

然而, 实际构建基于 CEP 的智能测量和仪器控制系统仍面临着许多挑战, 例如网络延时、采用 CEP 技术带来的额外开销以及如何处理不同的被测对象等, 均还有待更深入系统的研究。

4 结束语

CEP 技术为实时流式数据的处理和挖掘, 尤其是在物联网等系统中提供了非常有效的手段。目前大多数应用 CEP 技术的研究领域均与传感网络和含有大量智能设备的系统相关。CEP 技术是一种实时处理来自这些系统数据的有效方法。随着设备数激增, 从设备实时获取的数据量也呈现出几何级的增长。为满足实时海量数据处理的需求, 未来 CEP 同云计算技术将进一步融合, 以提升处理海量数据的速度和效率。CEP 技术还为其他一些涉及流式数据或事件处理的领域提供了新的、可能的发展方向, 仪器控制和智能测量就是其中之一。目前, 笔者正在从事相关交叉领域的探索性研究, 旨在开辟 CEP 技术应用的新领域。但要达到实际应用的标准, 还需要做大量深入、具体的研究。

参考文献

- [1] 刘卓扬. 复杂事件处理中时间窗口的改进[J]. 计算机工程, 2010, 36(19): 50-52.
- [2] Fülöp L J, Tóth J, Rácz R, et al. Survey on Complex Event Processing and Predictive Analytics [EB/OL]. [2015-12-07]. http://www.inf.u-szeged.hu/~gtoth/research/cep_pa_tech2010.pdf.
- [3] Toshniwal A, Taneja S, Shukla A, et al. Storm@Twitter[C]//Proceedings of 2014 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Snowbird, USA: [s. n.], 2014: 147-156.
- [4] Zaharia M, Das T, Li Haoyuan, et al. Discretized Streams: An Efficient and Fault-tolerant Model for Stream Processing on Large Clusters[C]//Proceedings

- of the 4th USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing. Boston, USA: [s. n.], 2012: 10-15.
- [5] Yu Chen Ching, Hsi Fu Jui, Sung T, et al. Complex Event Processing for the Internet of Things and Its Applications[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Taipei, China [s. n.], 2014: 1144-1149.
- [6] Wang Yongheng, Cao Kening. Context-aware Complex Event Processing for Event Cloud in Internet of Things[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Huangshan, China: [s. n.], 2012: 1-6.
- [7] 王永恒, 杨圣洪, 郭波. 高效的射频识别数据流层次复杂事件检测[J]. 计算机工程, 2010, 36(6): 84-85, 88.
- [8] Yao Wen, Chu Chao-Hsien, Li Zang. Leveraging Complex Event Processing for Smart Hospitals Using RFID[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(3): 799-810.
- [9] Zappia I, Ciofi L, Paganelli F, et al. A Distributed Approach to Complex Event Processing in RFID-enabled Hospitals[C]//Proceedings of EMTC'. Naples, Italy: [s. n.], 2014: 1-6.
- [10] Zappia I, Paganelli F, Parlanti D. A Lightweight and Extensible Complex Event Processing System for Sense and Respond Applications [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(12): 10408-10419.
- [11] Hu Wenhui, Ye Wei, Huang Yu, et al. Complex Event Processing in RFID Middleware: A Three Layer Perspective [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. Busan, South Korea: [s. n.], 2008: 1121-1125.
- [12] Wang Weixin, Sung Jongwoo, Kim Daeyoung. Complex Event Processing in EPC Sensor Network Middleware for Both RFID and WSN[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-time Distributed Computing. Orlando, USA: [s. n.], 2008: 165-169.
- [13] Anicic D, Fodor P, Stuhmer R, et al. Event-driven Approach for Logic-based Complex Event Processing [C] // Proceedings of International Conference on Computational Science and Engineering. Vancouver, Canada: [s. n.], 2009: 56-63.
- [14] Dunkel J. On Complex Event Processing for Sensor Networks[C]//Proceedings of International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. Athens, Greece: [s. n.], 2009: 1-6.
- [15] Bruns R, Dunkel J, Billhardt H, et al. Using Complex Event Processing to Support Data Fusion for Ambulance Coordination[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Information Fusion. Salamanca, Spain: [s. n.], 2014: 1-7.
- [16] 何浪, 史维峰, 董建刚. 基于事件驱动的面向服务计算模型[J]. 计算机工程, 2010, 36(18): 57-59, 66.
- [17] Tarnaucă B, Puiu D, Damian D, et al. Traffic Condition Monitoring Using Complex Event Processing [C] // Proceedings of 2013 International Conference on System Science and Engineering. Budapest, Hungary: [s. n.], 2013: 123-128.
- [18] Zhou Peng, Cheng Bo, Chen Junliang. A Complex Event Processing Based Alarm System for Coal Mine Safety Monitoring[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology. Harbin, China: [s. n.], 2011: 943-947.
- [19] Bhargavi R, Vaidehi V, Bhuvaneshwari P T V, et al. Complex Event Processing for Object Tracking and Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision. Singapore: [s. n.], 2010: 848-853.
- [20] Zhang Guojin, Yao Kewen, Zhang Xiaoli, et al. Complex Event Process Infrastructure in Mobile Distributed System[C]//Proceedings of International Conference on RFID-technology and Applications. Guangzhou, China: [s. n.], 2010: 57-60.
- [21] Saleh O, Sattler K U. Distributed Complex Event Processing in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Mobile Data Management. Milan, Italy: [s. n.], 2013: 23-26.
- [22] Gal Z, Tajti T. Complex Event Processing in Supercomputer Environment Sensor and Neural Network Based Analysis [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Infocommunications. Budapest, Hungary: [s. n.], 2013: 735-740.
- [23] Balis B, Kowalewski B, Bubak M. Real-time Grid Monitoring Based on Complex Event Processing [J]. Future Generation Computer Systems, 2011, 27(8): 1103-1112.
- [24] Mdhaffar A, Halima R B, Jmaiel M, et al. A Dynamic Complex Event Processing Architecture for Cloud Monitoring and Analysis [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science. Bristol, UK: [s. n.], 2013: 270-275.
- [25] Leitner P, Inzinger C, Hummer W, et al. Application-level Performance Monitoring of Cloud Services Based on the Complex Event Processing Paradigm [C] // Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Service-oriented Computing and Applications. Taipei, China: [s. n.], 2012: 1-8.
- [26] Saleh O, Gropengiesser F, Betz H, et al. Monitoring and Autoscaling IaaS Clouds: A Case for Complex Event Processing on Data Streams[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Utility and Cloud Computing. Dresden, Germany: [s. n.], 2013: 387-392.

参考文献

- [1] Mell P, Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing[J]. Communications of the ACM,2009,53(6): 1-50.
- [2] Voorsluys W, Broberg J, Buyya R. Introduction to Cloud Computing[M]. New York, USA; Wiley Press, 2001.
- [3] Shrivastava V, Zerfos P, Lee K W, et al. Application-aware Virtual Machine Migration in Data Centers[C]// Proceedings of INFOCOMM' 11. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2011: 66-70.
- [4] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. A View of Cloud Computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50-58.
- [5] Zhao Liang, Sakr S, Liu A, et al. Cloud Data Management[M]. Berlin, Germany; Springer, 2014.
- [6] 曾婉琳, 陈兴蜀, 罗永刚. Hadoop 节点资源参数优化策略[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 1-6.
- [7] Chowdhury M, Kandula S, Stoica I. Leveraging Endpoint Flexibility in Data-intensive Clusters[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 231-242.
- [8] Kathpal A, Kulkarni M, Bakre A. Analyzing Compute vs. Storage Tradeoff for Video-aware Storage Efficiency[C]// Proceedings of the 4th USENIX Workshop on Hot Topics in Storage and File System. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2012: 1-5.
- [9] Dean I, Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters[J]. Communications of the ACM, 2008, 51(1): 107-113.
- [10] Lsard M, Prabhakaran V, Currey J, et al. Quincy: Fair Scheduling for Distributed Computing Clusters [C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGOPS Symposium on Operating Systems Principles. New York, USA; ACM Press, 2009: 261-276.
- [11] Xu Gaochao, Dong Yushuang, Fu Xiaodong. VMs Placement Strategy Based on Distributed Parallel Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2015, 9(2): 873-881.
- [12] 于珊珊, 陈冬林, 李伟, 等. 基于 SLA 的云计算多数据中心任务调度算法[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2014, 36(3): 345-349.
- [13] Zaharia M, Konwinski A, Joseph A D, et al. Improving Map Rduce Performance in Heterogeneous Environments[C]// Proceedings of USENIX OSDI' 08. San Diego, USA; USENIX, 2008: 1-7.
- [14] Alicherry M, Lakshman T V. Optimizing Data Access Latencies in Cloud Systems by Intelligent Virtual Machine Placement [C]// Proceedings of INFOCOM'13. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2013: 647-655.
- [15] Kuo J, Yang H, Tsa M. Optimal Approximation Algorithm of Virtual Machine Placement for Data Latency Minimization in Cloud Systems [C]// Proceedings of INFOCOM' 14. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2014: 1303-1311.
- [16] Corradi A, Fanelli M, Foschini L. VM Consolidation: A Real Case Based on OpenStack Cloud [J]. Future Generation Computer Systems, 2014, 32(1): 118-127.
- [17] Cook S. The Complexity of Theorem Proving Procedures[C]//Proceedings of the 3rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York, USA; ACM Press, 1971: 151-158.
- [27] Mdhaftar A, Halima R B, Jmaiel M, et al. CEP4 Cloud: Complex Event Processing for Self-Healing Clouds [C]// Proceedings of the 23rd International WETICE Conference. Parma, Italy; [s. n.], 2014: 62-67.
- [28] Appel S, Kleber P, Frischbier S, et al. Modeling and Execution of Event Stream Processing in Business Processes[J]. Information Systems, 2014, 46(1): 140-156.
- [29] Hermosillo G, Seinturier L, Duchien L. Using Complex Event Processing for Dynamic Business Process Adaptation [C]// Proceedings of International Conference on Services Computing. Shanghai, China; [s. n.], 2010: 466-473.
- [30] Cortés R, Bonnaire X, Marin O, et al. Stream Processing of Healthcare Sensor Data: Studying User Traces to Identify Challenges from a Big Data Perspective [J]. Procedia Computer Science, 2015, 52(1): 1004-1009.
- [31] Astrova I, Koschel A, Schaaf M. Automatic Scaling of Complex-event Processing Applications in Eucalyptus [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Computational Science and Engineering. Nicosia, Cyprus; [s. n.], 2012: 22-29.
- [32] Carbone P, Vandikas K, Zaloshnja F. Towards Highly Available Complex Event Processing Deployments in the Cloud [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies. Prague, Czech Republic; [s. n.], 2013: 153-158.
- [33] Kamburugamuve S, Christiansen L, Fox G. A Framework for Real Time Processing of Sensor Data in the Cloud[J]. Journal of Sensors, 2015, 2015(2): 1-11.
- [34] Dahal N, Abuomar O, King R, et al. Event Stream Processing for Improved Situational Awareness in the Smart Grid[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(20): 6853-6863.
- [35] Srinivasagopalan S, Mukhopadhyay S, Bharadwaj R. A Complex-event-processing Framework for Smart-grid Management [C]// Proceedings of IEEE International Multi-disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support. New Orleans, USA; [s. n.], 2012: 272-278.
- [36] Pradeep Y, Khaparde S A, Joshi R K. High Level Event Ontology for Multiarea Power System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 193-202.
- [37] Obweiger H, Schiefer J, Suntinger M, et al. Complex Event Processing off the Shelf-Rapid development of Event-driven Applications with Solution Templates [C]// Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control & Automation. Corfu, Greece; [s. n.], 2011: 631-638.

编辑 金胡考

编辑 索书志

(上接第 26 页)