

# 业务过程管理研究现状与关键技术

李洪霞<sup>1,2</sup>, 杜玉越<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛农业大学 理学与信息科学学院, 山东 青岛 266109)

**摘要:** 综述了业务过程管理(BPM, business process management)不同侧面的研究现状, 阐述 BPM 的内容、视图及生命周期, 分析 BPM 在过程模型建模、实施、分析和管理工作方面的关键技术, 概括了模型实例获得、模型的可配置性、模型实例诊断及新实例产生方法等方面的研究进展。同时, 对 BPM 与 web 服务和数据库管理之间的联系进行分析。最后, 从过程管理的数据来源、过程模型的确定、模型与日志的一致性检查问题、模型库的管理以及仿真系统等方面展望了 BPM 下一步的发展方向。

**关键词:** 大数据; 过程模型; 过程挖掘; 事件日志; 工作流管理; 业务过程管理

中图分类号: TP311.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)01-0022-07

## A Survey of Research Issues and Key Technology for Business Process Management

Li Hongxia<sup>1,2</sup>, Du Yuyue<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. School of Science and Information, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

**Abstract:** A research survey was made on various aspects of BPM (business process management) including the research contents, the view and the life cycle. Key techniques for modeling, enacting, analyzing and managing the process model were studied. A summary was made on the recent development in the establishment, configurability, diagnosis and improvement of model instances. The relationship of BPM with web service and database management was discussed. Finally, the directions of future research on BPM are proposed with consideration of data source, process model selection, the conformance checking of model, event log, model repository management, simulation system, etc.

**Key words:** big data; process model; process mining; event log; workflow management; business process management

2012 年, 美国奥巴马政府宣布了“大数据研究计划”(Big Data Research and Development Initiative)。此后, “大数据”引起世界各国的高度关注。在应对大数据的各种技术挑战中, 数据的高效处理、新的表示方法和数据整合存储与检索, 以及合适的大数据分析挖掘工具等是亟待解决的重点和难点问题<sup>[1-3]</sup>。其中, 以海量事件日志和业务过程为基础, 将信息技术与管理技术结合起来的业务过程管理(BPM, business process management), 必将得到进一步发展。BPM 以信息技术和管理技术为基础, 以提高过程管理的效率为出发点, 提高企业竞争能力<sup>[4]</sup>, 因此, 有着广阔的研究空间, 同时也有许多关键问题亟待解决。

业务过程管理是从业务过程的角度出发, 对企业实现全方位管理, 并支持业务过程的持续改进, 目的是为企业提供统一的建模、执行和监控环境<sup>[4]</sup>。业务过程管理从国内开始关注<sup>[5-6]</sup>到现在, 已有多个角度的研

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170078); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金博导类项目(20113718110004); 青岛市科技计划基础研究项目(13-1-4-116-jch); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2011KYTD102)

作者简介: 李洪霞(1979—), 女, 山东乐陵人, 讲师, 博士研究生, 主要从事 Petri 网和业务过程挖掘方面的研究。

杜玉越(1960—), 男, 山东聊城人, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要从事 Petri 网、工作流、过程挖掘等方面的研究, 本文通信作者。E-mail: yydu001@163.com

究;以事件日志为基础,研究模型和可配置过程模型的发现方法<sup>[7-8]</sup>;从模型结构、语义等的相似性出发,研究模型库的检索方法<sup>[9-11]</sup>;文献[12]从拟合度、简洁度、精确度和泛化度四个方面讨论了模型的质量标准;文献[13-14]分别从基于代码的拟合度和针对 SESE(single-entry single-exit)结构模型研究了日志与模型的一致性问题;文献[15-19]讨论了可配置性过程模型的构造方法;文献[20-21]则分别讨论了过程挖掘与 web 服务,过程管理与数据管理之间的关系;文献[22-23]由 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)过程挖掘工作组和 Aalst 对 BPM 过程挖掘的现状、指导原则、面临的挑战等问题进行了细致的讨论。

本文重点分析 BPM 管理中的主要问题,针对这些研究问题给出 BPM 的应用实例。最后,展望 BPM 下一步的研究热点。

## 1 BPM 及其研究内容

workflow 管理 WFM<sup>[24]</sup>(workflow management)的发展为业务过程的自动化做出了重要贡献。但 WFM 技术着眼于业务过程的自动化,很少涉及人员或管理技术方面的内容。如何将信息技术与管理学知识相结合并应用到业务过程管理中,以提高生产率、节约成本,进而提高企业竞争力成为亟待解决的问题。BPM 一方面可以看成是 WFM 的扩展,如从管理的角度通过分析 WFM 建立的模型和仿真来降低企业成本;另一方面用软件来管理、控制与支持企业运作。因此,BPM 是从业务过程的角度出发对企业实现全方位管理,并支持业务过程持续改进的一项技术。

过程模型是业务过程管理中的重要概念,通过对现有业务过程进行建模来描述业务活动之间的关系。除了从控制流角度,过程模型还可以从资源、组织关系、决策等方面进行建模。当前,过程模型有许多表示方法,如 Petri 网、UML(unified modeling language)、WF-nets(workflow-nets)、EPCs(event-driven process chains)和 BPMN(business process modeling notation)等。业务过程管理以过程模型为基础,研究其发现、校对、检索、简化以及持续改善等。现代信息技术的发展,特别是 WFM 技术支持的自动化业务过程的执行,留下了大量事件发生的轨迹(或数据)。大数据技术中数据的表示、存储、检索等方法的研究为这些事件数据的处理提供了可能。利用这些事件数据来发现事实存在的过程模型,与理想的模型进行校对,可以发现问题的根源,并改善这些业务过程。同时,事件日志中存在的如资源、时间等信息可以用来分析过程模型的性能,这些都是 BPM 研究的重要内容。

## 2 BPM 视图和生命周期

图 1 从视图角度给出 BPM 的四种主要活动:建模、实施、分析与管理<sup>[2]</sup>。首先,建立一个用于分析与实施的模型,然后,以模型为基础来控制和支持具体的实例进行执行。分析是对过程模型和/或事件日志从功能、性能等方面来进行的。同时,执行环境的改变可能会引起业务过程的适应或产生新的分析方法,因此 BPM 是一个持续不断的过程,需要在模型执行和分析后继续对其进行管理。

BPM 在整个生命周期中,会同时涉及到模型和数据的分析。图 2 给出了基于模型和基于数据的分析在 BPM 生命周期中的作用。在业务过程设计阶段,进行的是基于模型的分析。设计完成后,过程模型在实现/可配置阶段转换到一个可执行的系统中运行。在其运行/调整阶段,对运行所产生的数据进行分析。然后基于这些分析,对过程进行重新设计。

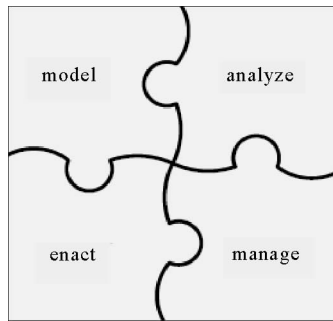


图 1 BPM 视图:建模、实施、分析与管理  
Fig. 1 A view on BPM: modeling, enaction, analysis and management

### 3 BPM 关键技术

依据 BPM 视图,从建模、实施、分析与管理四个方面给出 BPM 中的关键技术及存在的问题。

#### 3.1 过程模型的建立

过程模型可以是手工建立的,也可以是从事件日志中挖掘出来的。建立的模型是后续阶段(分析、执行和管理)的基础。因此,如何建立或挖掘一个“好”的模型是至关重要的。

模型建立的关键是模型的选择。现有的 BPM 中常用的模型表示方法有:Petri 网,BPMN,UML,EPCs,WF-nets 等。因为每种模型在表达能力上都

有其优势与局限性,如 Petri 网适合描述异步并发系统,但处理较大系统时容易出现状态空间爆炸。选定一种模型时就意味着要接受它本身的特点,所以,模型的选择要以具体应用环境和模型自身的特点为依据。

同时,单纯以过程为中心或以数据为中心的建模方式难以很好地表达业务过程。于是,出现了平衡过程和数据的建模方法——面向对象的建模和以 artifact 为中心的建模<sup>[25-26]</sup>。

#### 3.2 过程模型的实施

过程模型的实施是 BPM 系统的核心,指对通过设计工具得到的业务模型加以实施,它决定了 BPM 的目的、方式、时间与执行者。近年来,SOC(service-oriented computing)和 SOA(service oriented architecture)的发展对业务过程的实施产生了重要影响。在 SOC 和 SOA 大环境下,可将业务应用提供的功能封装成服务,其他应用程序或服务来调用这些服务。当业务过程有大量并发程序时,可以将其外包给其他服务来完成。

BPM 实施中还涉及到可靠性问题。理想情况下,业务过程系统应该满足 ACID (atomicity, consistency, isolation and durability)属性,即原子性、一致性、隔离性和持久性。过程模型级别的 ACID 原则意味着业务过程在不可靠的环境和组件或通信设施失效的环境下仍然能够运行,即在任何时间都能处理异常并维护系统的完整性。与可靠性相关联的还有安全性,安全性应确保只有被授权的人才能执行活动和访问数据。

#### 3.3 过程模型分析

基于模型的分析可以从功能和性能两个方面入手,主要涉及验证和性能分析问题:验证是从功能性方面入手,关心的是过程或系统的正确性;性能分析则着眼于流程时间、等待时间、利用率与服务水平等。

用来评价模型的常用属性是合理性(soundness),这个概念对 WF-nets 更为适用。在 WF-nets 中,合理性指系统存在唯一的输入/输出库所,不存在死变迁且模型总是趋向于结束的。另一种验证是两个模型比较,对此存在不同的等价概念,如迹等价(trace equivalence)、分支互模拟(branching bisimilarity)等。其中,迹等价指两个模型如果执行顺序一样的话,则对应的变迁系统也是等价的。分支互模拟是更具体的概念,指一个模型总是能够模拟另一个模型的任何一个动作。当一组过程模型等价或相似时,这些模型可以用一个可配置模型(configurable model)来表示。常见的可配置语言有 C-EPCs,C-WF-nets,C-SAP,C-YAWL 等。

基于模型的分析不仅限于模型的正确性,从管理的角度而言,性能分析也是十分重要的。过程模型常见的性能指标有时间、耗费和质量等。其中:时间包括流程时间、服务时间、等待时间和同步时间等;耗费指使用的资源类型、资源的利用率和活动的持久性等;质量可以从顾客的满意度、顾客投诉率等方面进行衡量。通过对模型性能进行分析,可以得到系统瓶颈,为进一步改善系统性能做准备。

#### 3.4 过程模型管理

业务过程支持的信息系统日益复杂,大量的事件信息被记录下来。过程模型的管理就是从这些记录的事件信息出发,从不同角度挖掘出过程模型相关联的信息,进而从新的角度来改善过程模型。

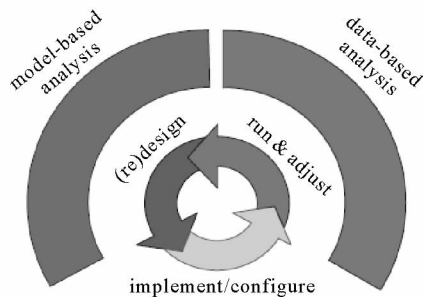


图 2 BPM 生命周期:(重)设计、执行/配置、运行和调整

Fig. 2 The BPM life cycle: (re)design, implement/configure and run & adjust

文献[22-23]给出了过程挖掘三种类型的应用场景,包括发现、符合性检查和增强,如图3所示。其中,过程发现是从事件日志(已有并被记录的活动轨迹)出发,构造出可以描述这些事件日志的模型。符合性检查是检查发现的过程模型与事件日志之间的吻合程度。当两者不完全符合时,进行调整(adjustment):可以根据日志来校准模型,也可以根据模型来校准日志。在实际的研究中,除了发现模型与事件日志的校准外,还有发现模型与原模型的校准(当事件日志由已有模型产生时)等。增强指通过过程模型与事件日志的符合性检查,构建新的过程模型或是对原有的过程模型进行改善。

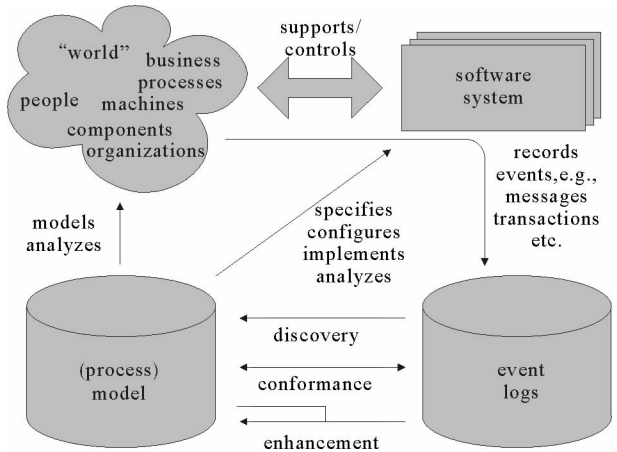


图3 三种类型的过程挖掘场景:发现、符合性检查和增强  
Fig. 3 Positioning of the three main types of process mining: discovery, conformance and enhancement

## 4 应用实例

业务过程管理的四种活动及每种活动所涉及到的工作是以粗粒度的形式给出 BPM 中的主要问题。这一节打破各种活动的界限,以细粒度方式给出具体应用中需要讨论的各种应用实例。

### 4.1 获得模型实例

1)模型设计 过程设计是建立过程最常见的形式,一般是由设计人员从无到有地建立一个过程。模型一般具有描述性、规范性与可执行性的特点。描述性指模型描述的“当前应当是”或“将来应将是”的状态。当描述的都是希望发生的行为时称模型为规范性的。规范性模型能够用软件来实现时,称为具有可执行性。因此,模型的这三个特点具有层次递进关系。

2)模型发现 指利用过程挖掘的相关技术从已有事件日志自动产生过程模型。如  $\alpha$  算法及各种改进算法就是从记录的事件日志中挖掘一个能描述这些事件日志的 Petri 网模型。当前常用的挖掘算法有启发式挖掘、遗传式挖掘及基于域的挖掘等。这些挖掘算法对于一般的结构都能够挖掘出来,但如隐藏任务、重复任务及非自由选择结构等的挖掘尚需进一步研究。隐藏任务指虽然实际存在但在日志中没有记录的任务;重复任务指两个节点都表示同一任务,因而难以区分;非自由选择结构中任务的选择不是局部可以决定的,而是要受全局的影响。这些任务及结构自身的特点增大了模型发现的难度。已有工作致力于这方面的研究<sup>[27]</sup>,但日志自身的不完备性和噪声的存在使模型发现工作还有待于进一步改进。

3)模型选择 模型选择就是先对模型库中的模型进行分类管理,然后从模型库中检索出与需求匹配度最高的模型。模型的选择涉及到模型的相似性问题,常用的方法是根据流程、语义等进行比较与匹配。

### 4.2 模型实例的可配置性

与普通模型不同,可配置模型不是一个单独的可执行模型,而是一组功能和结构相似的模型。通过一系列操作,可配置模型可以得到不同的具体可执行模型。可配置模型的获得主要有以下几种方式。

1)设计可配置的过程 可配置模型可以和普通模型一样从无到有进行设计,也可以由合并事件日志挖掘出来<sup>[28]</sup>。但因涉及诸如 hiding 和/或 blocking 操作,所以要防止模型出现行为异常、死锁、活锁等问题。

2)合并模型为可配置模型 获得可配置模型常用的方法是利用现有模型(称为模型变体)根据结构、语义的相似性进行合并而成。在合并的过程中,同样要保证模型的正确性,避免出现异常行为。而可配置模型又可通过 hiding 和/或 blocking 以及追溯等方法得到具体的模型。

### 4.3 事件数据抽取诊断信息实例

#### 1) 用事件数据诊断性能

当从事件日志挖掘出模型后,可以通过“重放”(replay)检查事件日志与过程模型是否符合。在过程模型与事件日志进行符合度检查时,衡量的主要性能指标有拟合度、泛化度、简洁度、精确度等。其中,拟合度指发现模型与事件日志的吻合程度,又分为过拟合与欠拟合两种情况。模型具有良好的拟合度指事件日志中的迹都能在过程模型中进行重放。精确度指模型尽可能少地反映事件日志以外的信息。泛化度指的是模型有多大程度允许事件日志以外的情况。简洁度是根据“奥卡姆剃刀”原则采用满足条件的尽可能简单的模型。当一个模型具有良好的精确度时,必然泛化度较低,同时可能会引起过拟合;而当模型具有良好的泛化度时,又意味着精确度欠佳,同时可能会引起欠拟合。因此,需要在这四项质量指标之间作出权衡。而且,当模型或事件日志有偏差时,可以进一步诊断出现偏差的位置以及原因<sup>[29]</sup>,起到“审计”功能,如用来发现欺诈或误操作。

#### 2) 用事件数据分析性能

事件日志中的数据往往包含时间、耗费等性能信息,可用于分析模型性能。如将事件日志在模型上进行“重放”时,可以计算出两个连续活动之间的延迟时间和多个同步活动之间的同步时间。这些信息可用来分析出关键路径或系统瓶颈,为下一步决策、改善或预测仿真等提供支持。已有的耗费信息,可以在决策时起到一定的指导作用。

### 4.4 基于诊断或事件数据产生新模型的实例

1) 模型修复 通过获得诊断信息,可以对模型进行细微的改变来获得更高质量的模型<sup>[30]</sup>。修复后的模型既要保留原模型信息,又要更好地反映现实世界。

2) 扩展模型 事件数据包含的信息除了可以进行流程挖掘,还可以进行如时间性能、资源利用、组织关系、决策点<sup>[31-32]</sup>等的挖掘;同时,利用这些信息可以实现对原有模型的扩展。

3) 改善模型 有关性能方面的分析可以用来改善模型,如减少耗费,缩减响应时间等;同时,这些模型可以用来做假设分析。

关于模型的实例,还有诸如模型执行、基于模型的分析等,在此不一一列举。

## 5 BPM 与 web 服务和数据库管理

BPM 与 web 服务和数据库管理技术的发展存在着相互促进的关系。

1) BPM 与 web 服务 平台无关性、分布式及松耦合等特点使得 web 服务迅速发展起来。这些特点在简化应用逻辑的同时,也为面向 web 服务的系统设计与分析带来困难。过程挖掘技术的发展为利用服务遗留的痕迹(也称事件日志)来发现、分析与改善这些过程模型提供了可能。同时,web 服务的发展也使得业务过程可以进行分散或外包,从而降低过程的复杂性。

2) BPM 与数据库管理 传统的 BPM 方法主要着眼于过程方面,对业务过程中数据的访问与管理重视程度不够。一种新的基于业务 artifacts 的 BPM 方法将数据和过程并重,指出如何从数据库的角度看待过程模型,这种以数据为中心支持多样化应用的方法可能成为下一代 BPM 的基础<sup>[21,25-26]</sup>。

## 6 展望

BPM 结合 WFM 技术与现代管理技术的特点,支持业务过程的持续改进,进而影响企业运行的整个过程。工业界和学术界从不同的侧面对 BPM 进行研究,并从理论及实际应用的角度提出了相应的实施技术和改进策略。就 BPM 关键技术的研究而言,尚存在很多有待解决的问题。

1) 过程管理的数据来源:如何从不同的数据源得到相应的事件信息;事件日志的表示方式的确定;从系统运行轨迹中得到完备、消噪的事件日志的策略。

2) 过程模型的确定:由系统特点进行模型选择的原则;利用 web 服务降低业务过程复杂性的技术;过程模型的正确性定义及性能分析;对特殊任务及结构的挖掘机制研究。



3)模型与日志的一致性检查问题:发现模型与日志拟合时新的性能指标确定以及在拟合度、泛化度、简洁度及精确度之间平衡的原则;当模型与日志出现偏差时,以模型或日志为基准进行校对的确定原则;模型与日志的校对及优化技术。

4)模型库的管理问题:利用聚类方法对模型进行分类管理,分析模型之间的关联及语义关系,从而实现模型的高效检索、组合策略研究;模型在不同环境中的可移植策略。

此外,针对不同系统的特点开发相应的仿真工具并加以实现,也是下一步要进行的工作。

#### 参考文献:

- [1]李国杰. 大数据研究的科学价值[J]. 中国计算机学会通讯,2012,8(9):8-15.  
Li Guojie. The scientific value of big data research[J]. Communications of the CCF,2012,8(9):8-15.
- [2]王元卓,靳小龙,程学旗. 网络大数据:现状与展望[J]. 计算机学报,2013,36(6):1125-1138.  
Wang Yuanzhuo, Jin Xiaolong, Cheng Xueqi. Network big data: Present and future[J]. Chinese Journal of Computer, 2013, 36(6):1125-1138.
- [3]冯登国,张敏,李昊. 大数据安全与隐私保护[J]. 计算机学报,2014,37(1):246-258.  
Feng Dengguo, Zhang Min, Li Hao. Big data security and privacy protection[J]. Chinese Journal of Computer, 2014, 37(1): 246-258.
- [4]van der Aalst W M P. Business process management: A comprehensive survey[J]. ISRN Software Engineering, 2013(2013): 507984.
- [5]曾庆田. 过程挖掘的研究现状与问题综述[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):275-280.  
Zeng Qingtian. A survey of research issues and approaches on process mining[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16):275-280.
- [6]谭伟,范玉顺. 业务过程管理框架与关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统,2004,10(7):737-743.  
Tan Wei, Fan Yushun. Architecture and key technology for business process management[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(7):737-743.
- [7]Leemans S J, Fahland D, van der Aalst W M P. Discovering block-structured process models from event logs: A constructive approach[C]//Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Berlin Heidelberg: Springer, 2013:311-329.
- [8]Mans R S, van der Aalst W M P, van Wersch R J B, et al. Process mining in health care: Data challenges when answering frequently posed questions[C]//Process Support and Knowledge Representation in Health Care. Berlin Heidelberg: Springer, 2013:140-153.
- [9]Jin T, Wang J M, Wen L J. Efficient retrieval of similar workflow models based on behavior[C]//Web Technologies and Applications. Berlin Heidelberg: Springer, 2012:677-684.
- [10]Jin T, Wang J M, La Rosa M, et al. Efficient querying of large process model repositories[J]. Computers in Industry, 2013, 64(1):41-49.
- [11]金涛,闻立杰. 业务过程模型库索引技术[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(8):1580-1586.  
Jin Tao, Wen Lijie. Indexing technology for business process models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(8):1580-1586.
- [12]Buijs J C A M, van Dongen B F, van der Aalst W M P. On the role of fitness, precision, generalization and simplicity in process discovery[C]//On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM. Berlin Heidelberg: Springer, 2012:305-322.
- [13]Adriansyah A, van Dongen B F, van der Aalst W M P. Conformance checking using cost-based fitness analysis[C]//15th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. Helsinki, Finland, Aug. 29-Sep. 2, 2011:55-64.
- [14]Jorge M G, Carmona J, van der Aalst W M P. Single-entry single-exit decomposed conformance checking[J]. Information Systems, 2014, 46:102-122.
- [15]Li C, Manfred R, Andreas W. Discovering reference models by mining process variants using a heuristic approach[C]//Business Process Management. Berlin Heidelberg: Springer, 2009:344-362.
- [16]van der Aalst W M P, Dumas M, Gottschalk F, et al. Preserving correctness during business process model configuration [J]. Formal Aspects of Computing, 2010, 22(3/4):459-482.
- [17]Michael R, van der Aalst W M P. A configurable reference modelling language[J]. Information Systems, 2007, 32(1):1-23.

- [18] La Rosa M, Dumas M, Ter H, et al. Configurable multi-perspective business process models[J]. *Information Systems*, 2011, 36(2): 313-340.
- [19] La Rosa M, Dumas M, Vba R, et al. Business process model merging: An approach to business process consolidation[J]. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2013, 22(2): 1-46.
- [20] van der Aalst W M P. Service mining: Using process mining to discover, check, and improve service behavior[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2011(11): 1-13.
- [21] Hull R, Su J W, Vaculin R. Data management perspectives on business process management[C]//2013 ACM SIGMOD/PODS. New York, June 22-27, 2013: 943-947.
- [22] van der Aalst W M P, et al. Process mining manifesto[C]//BPM 2011 Workshops Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 169-194
- [23] van der Aalst W M P. Process mining: Discovery, conformance and enhancement of business processes[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 9-25.
- [24] Leymann F, Roller D. Production workflow: Concepts and techniques[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1999: 34-63.
- [25] 刘海滨, 刘国华, 王颖, 等. 面向 Artifact 的业务流程行为相似性度量方法[J]. 小型微型计算机, 2013, 34(3): 475-479.  
Liu Haibin, Liu Guohua, Wang Ying, et al. Behavior similarity measure method for artifact-oriented business process[J]. *Journal of Chinese Computer System*, 2013, 34(3): 475-479.
- [26] Lu X X. Artifact-centric log extraction and process discovery[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2013: 51-62.
- [27] Wen L J, Wang J M, Sun J G. Mining invisible tasks from event logs[C]//Advances in Data and Web Management, Lecture Notes in Computer Science (4505). Berlin: Springer-Verlag, 2007: 358-365.
- [28] Buijs J C A M, van Dongen B F, van der Aalst W M P. Mining configurable process models from collections of event logs [C]//Business Process Management, Lecture Notes in Computer Science(8094). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 33-48.
- [29] Adriansyah A. Aligning observed and modeled behavior[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2014: 109-128.
- [30] van Eck M. Alignment-based process model repair and its application to the evolutionary tree miner[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2013: 13-22.
- [31] Maggil F M, Montali M, van der Aalst W M P. An operational decision support framework for monitoring business constraints[C]//Fundamental Approaches to Software Engineering, Lecture Notes in Computer Science(7212). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012: 146-162.
- [32] 胡海洋, 张笑菲, 胡华, 等. 基于流程挖掘的决策支持方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(8): 1755-1770.  
Hu Haiyang, Zhang Xiaofei, Hu Hua, et al. Decision support method based on process mining[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(8): 1755-1770.

(责任编辑: 吕文红)