

Event-Based Production Process Traceability Model

Fucheng Pan, Hui Peng, Haibo Shi

Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016

(E-mail: pfc@sia.ac.cn)

Abstract—Precision tracing of complex production process is one of the difficult problems in Manufacture Execute System. In this paper, an event-based production process traceability model is proposed, the key idea of which is to define several meta event according to the characteristics of production process and draw a composite event from real production activities, then divide the composite event into several meta event and use attribute of event to create links with relevant events. Finally, the traceability information can be acquired by searching the event link set.

Keywords—event, production process, traceability, MES

基于事件的生产过程跟踪模型

潘福成 彭慧 史海波

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

摘要 在制造执行系统(Manufacture Execute System)中对复杂生产过程的精细跟踪是MES系统一直面临的难题之一,本文提出了一种基于事件的生产过程跟踪模型EPTM,其基本思想是根据生产过程的特点定义了若干元事件,并将实际生产过程中相关的活动抽象为由一系列元事件组成的复合事件,通过对事件进行关联操作形成事件关联记录,利用事件的属性标识及相关特征属性对关联记录进行遍历搜索得到跟踪路径集合,从而实现了复杂生产过程的跟踪。经过实际应用证明EPTM模型能够较好的解决复杂生产过程的跟踪难题。

关键词 事件, 生产过程, 跟踪, MES

1. 概述

跟踪是生产过程控制的基础,是实现自动化控制及相关产品质量控制的关键。其重要性体现在各个行业,例如在食品行业由于其产品的质量对消费者带来严重的不良后果以及也会对公司销售造成极大的负面影响,因此在食品行业十分重视生产过程中的跟踪管理以提高其产品的质量进而提高其市场占有率^[1];在汽车行业由于产品设计、制造等方面的原因在某一批次、型号或类别的产品中普遍存在的同一缺陷而需要进行召回,这就要求对汽车产品提供全生命周期的生产过程跟踪以确定缺陷部件所在的批次、型号及供应商^[2];在钢铁行业中进行钢板轧制生产过程中,为了对整个轧制生产过程进行控制和管理,必须动态跟踪每块钢板的不同生产情况,针对其在轧线上当时所处的加工环节和状况,在线进行相应的自动控制^[3]。

通过以上案例可知生产过程中的生产过程跟踪具有非常重要的意义,同时由于各行业生产模式的多样化导致生产过程跟踪模型的复杂性,因此需要研究生产过程跟踪模型来描述各种跟踪的需求,在此应用背景下各研究机构开展了跟踪方法的研究以适应精确过程跟踪的客观需求,现有的模型主要有记录过程数据及记录关键过程帧数据两类模型,例如M.H. Jansen-Vullers等人提出了参考数据跟踪模型(Reference Traceability Models),该模型通过记录各批次的关系及相关工序的数据形成语义网络,该模型能有效解决前向跟踪、后向跟踪^[4];Massimo Bertolini等学者采用FMECA(Failure Model and Effects Criticality Analysis)方法通过分析生产过程中出现的失效、停机和设备故障等因素来进行依赖于这些关键帧的过程跟踪方法进行生产过程的跟踪^[5],该方法能有效对现场关键生产过程进行回溯并且具有信息记录较少的优点。但现有模型大都同应用背景关系密切并且对于复杂过程的精细跟踪表

辽宁省博士启动基金资助项目(资助号:L050517)

现不足，不能满足 MES 系统的复杂过程跟踪的需求，因此本文针对生产过程的上述特点提出了一种基于事件的生产过程跟踪模型（简称 EPTM）解决实际生产过程中的复杂生产跟踪问题，并将该模型实际应用于陕西 FAST 的装配 MES 项目中，实践证明该模型可以很好的解决实际的生产跟踪问题，为生产跟踪提供了一个新的跟踪模型。

2. 过程跟踪问题描述

2.1 过程跟踪的定义

为了阐述方便，有必要对跟踪进行定义。本文对于生产过程跟踪给出的定义为：

通过记录实体标识，使系统能够追溯实体的生产历史、使用情况及位置的能力（基于 ISO 9001:2000 标准）。该定义中的实体可以是实际的零件、物料等实际物体，还可以是某种操作，甚至可以代表特定的关系例如物料的位置及流向。

2.2 过程跟踪类型

不同行业的过程跟踪系统，其所关心的回溯过程数据各不同，进而导致跟踪系统在制造执行系统中的使用方式各不相同，根据使用方式大致可以分为如下几个跟踪类型：

- 前向过程跟踪（Forward Traceability）

前向过程跟踪通过对所记录的关系进行统计分析，获得跟踪目标产品所消耗的各种原材料的数量、批次及时间等信息的过程。该类型的跟踪最早由 Petroff 和 Hill 于 1991 年提出^[6]。图 1 说明了此种类型的跟踪过程：

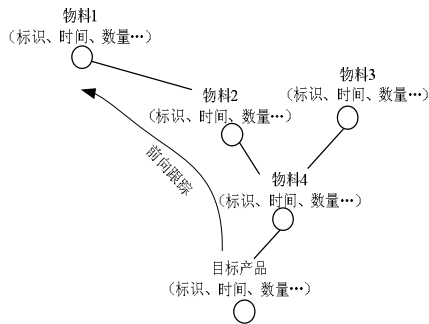


图 1 前向过程跟踪示意图

- 后向过程跟踪（Backward Traceability）

后向跟踪通过对所记录的关系进行统计分析，获得特定批次或特定标识号的物料在制造过程中消耗的时间、数量等信息的过程。该类型的跟踪最早也是由 Petroff 和 Hill 于 1991 年提出^[6]。图 2 说明了此种类型的跟踪过程：

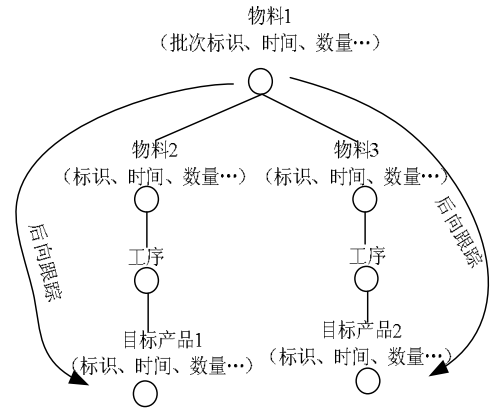


图 2 后向过程跟踪示意图

3. 基于事件的生产过程跟踪模型（EPTM）

3.1 应用 EPTM 的制造系统的体系结构

为了便于阐述基于事件的过程跟踪模型，现给出其应用于制造执行系统的典型结构以便于理解模型的作用，其体系结构入图 3 所示：

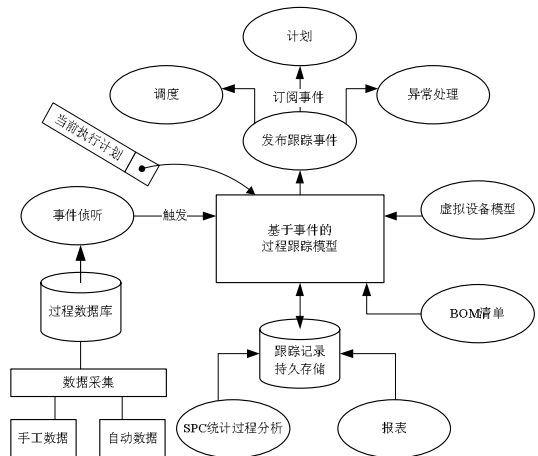


图 3 应用 EPTM 的制造系统体系结构

系统的工作流程为：数据采集模块采集手工数据或自动数据，并将采集到的数据传输到过程数据库中，事件侦听模块检测到相关数据标签的变化后，将标签的变化抽象为生产过程中的特定事件并触发 EPTM 模型，EPTM 模型将事件进一步抽象为若干元事件并根据实际生产业务逻辑对各元事件进行关联操作进而生成了事件间的关联关系，然后通过跟踪算法实现了生产过程的跟踪。

3.2 相关概念的定义及描述

- 事件

事件是对制造过程中生产活动的一种抽象描述，事件用 E 来描述。其有多种表现形式，如将物料配送到现场料架过程产生物料配送事件；事件也可以表示抽象实体如生

产过程中的计划更改产生计划变更事件。在现实中事件的发生以某一或一系列的数据标签的变化为触发条件。

● 事件属性

事件属性是对事件某一特性的描述，事件通常具有多个属性，这些属性构成事件的属性集。设 P 表示属性则对于事件 E_i 的属性集表示为 $P(E_i) = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\}$ 其中 P_i 代表事件 E_i 的第 i 个属性。事件的属性可根据实际应用进行随意扩展。

● 元事件

元事件是对事件进行逻辑划分的最小单位，在制造过程中存在各种各样的同制造过程相关的事件，有的事件可以由一个基本逻辑事件或几个相关的基本逻辑事件复合而成，这些基本逻辑事件称其为元事件。

● 事件关联

事件关联用于描述事件 E 同事件 E' 的关联关系，用 $Link(E, E')$ 来表示这种关系，若事件 E 和事件 E' 是直接关联的则表示为 $E \rightarrow E'$ ，其中 \rightarrow 表示事件为直接关联，若事件 E 和事件 E'' 不是直接关联，而是通过中间事件进行关联例如 $E \rightarrow E' \rightarrow E''$ ，则事件 E 和事件 E'' 的关联为间接关联，间接关联记为： $E \Rightarrow E''$ 。

● 关联属性

关联属性是对事件关联特性的描述，一个事件关联存在多个属性，这些属性构成了事件关联的关联属性集合，记为： $P_{link}(E, E'') = \{P_1, P_2, P_i, \dots, P_n\}$ 。

3.3 EPTM 跟踪模型描述

3.3.1 EPTM 静态模型

EPTM 跟踪模型将制造执行过程中的生产活动建模为五种基本类型的元事件，即同计划相关的计划变更元事件 α 、同物料相关的物料元事件 β 、同报警相关的报警元事件 γ ，同废品相关的事件 μ ，同具体生产相关的生产元事件 η 以及同设备相关的停机元事件 σ 。则对于任一复合事件可用集合表示为： $E = \{e_1, e_2, e_i, \dots, e_n\}$ ，其中 e_i 为元事件，根据元事件的定义可知 $e_i \in \{\alpha, \beta, \gamma, \mu, \eta, \sigma\}$ 。

在制造过程中各类型元事件所抽象的实体类型不同，因此对于各自的属性也存在着差异，EPTM 模型只对基本属性进行定义，具体应用中可根据实际需要进行相关属性扩展。

对于元事件 α 定义基本属性集为：

$P(\alpha) = \{EvtId, Status, PlanOrder, ProductId, Amount, PreStar, PreEnd, ActStart, ActEnd, Priority, TimeStamp\}$

其中 $EvtId$ 为事件的唯一标识； $Status$ 为计划的状态；

$PlanOrder$ 为计划的订单号或计划批次号； $ProductId$ 为计划生产的产品标识； $Amount$ 为计划生产的数量； $PreStar$ 为计划预计开始事件； $PreEnd$ 为计划预计结束事件； $ActStart$ 为计划的实际开始时间； $ActEnd$ 为计划的实际完成时间； $Priority$ 为计划执行的优先级； $TimeStamp$ 为创建事件的时间戳。

对于元事件 β 定义基本属性集为：

$P(\beta) = \{EvtId, Status, MaterialId, LotId, Amount, LeftAmount, Unit, RackId, LocationId, TimeStamp\}$

其中 $EvtId$ 为事件的唯一标识， $Status$ 为物料的使用状态； $MaterialId$ 为物料标识； $LotId$ 为物料的批次号； $Amount$ 为物料的数量； $LeftAmount$ 为物料的剩余数量； $Unit$ 为物料的计量单位； $RackId$ 为料架或容器等设备的标识； $LocationId$ 为料架的位置标识； $TimeStamp$ 为创建事件的时间戳。

对于元事件 γ 定义基本属性集为：

$P(\gamma) = \{EvtId, Status, PUIId, ReasonCode, TagId, Priority, TimeStamp\}$

其中 $EvtId$ 为事件的唯一标识； $Status$ 为报警状态； $PUIId$ 为生产单元的唯一标识； $ReasonCode$ 为报警原因代码； $TagId$ 为报警标签标识，可通过该标签获得报警时该标签值； $Priority$ 为报警事件的优先级，系统根据给定的优先级进行调度； $TimeStamp$ 为创建事件的时间戳。

对于元事件 σ 定义基本属性集为：

$P(\sigma) = \{EvtId, Status, PUIId, DownReasonId, StartTime, EndTime, TimeStamp\}$

其中 $EvtId$ 为事件的唯一标识； $Status$ 为停机事件的状态； $DownReasonId$ 为停机的原因标识，可通过该标识获得进一步的原因、责任者等信息； $StartTime$ 为停机开始时间； $EndTime$ 为停机结束时间； $TimeStamp$ 为创建事件的时间戳。

对于元事件 η 定义基本属性集为：

$P(\eta) = \{EvtId, Status, PUIId, EvtNum, PPEvtId, Amount, VarSetId, TimeStamp\}$

其中 $EvtId$ 为事件的唯一标识； $Status$ 为事件的状态，用于控制生产事件的生命周期； $PUIId$ 为生产单元标识； $EvtNum$ 为事件号，用于标识跟踪目标有意义的编码信息； $PPEvtId$ 为同该生产事件相关联的计划事件 α 的 $EvtId$ ； $Amount$ 为生产的数量； $VarListId$ 为同本次事件相关联的工艺参数集的标识； $TimeStamp$ 为创建该事件的时间戳。

对于元事件 μ 定义基本属性集为：

$P(\mu) = \{EvtId, Status, WasteId, Amount, ReasonId, TimeStamp\}$

其中 EvtId 事件唯一标识; Status 为废品事件的状态 ; Wasteld 为废品事件唯一标识, 其标识同事件 β 或 η 的 EvtId 相关; 其中 Amount 为废品数量; ReasonId 为废品原因标识, 可获得废品的详细原因; TimeStamp 为时间戳。

为了更精细的跟踪, 模型通过元事件的 Status 属性对事件的生命周期进行控制, 由于每一元事件所代表的过程不同, 因此 Status 意义也不同, 各状态属性的值域如下。

α . Status \in {Waiting, Suspended, Active, Canceled, Completed} 其中 Waiting 表示该计划处于等待执行中; Suspended 表示计划在执行过程中被挂起; Active 表示计划正在执行; Canceled 表示该计划被取消; Completed 表示该计划执行完毕。各状态间的转换如图 4 - (a) 所述。

β . Status \in {Inventory, Consumed} 其中 Inventory 表示该物料处于库存状态; Consumed 表示物料已经在生产过程中被消耗。各状态间的转换如图 4 - (b) 所述。

γ . Status \in {InAlarm, Canceled} 其中 InAlarm 表示事件处于报警状态, 外界没有对该报警进行处理; Canceled 表示事件报警结束, 该报警已经由外界进行处理。各状态间的转换如图 4 - (c) 所述。

δ . Status \in {Stop, Running} 其中 Stop 表示生产设备 (包括虚拟逻辑设备) 处于停机状态; Running 表示设备停机状态结束。各状态间的转换如图 4 - (d) 所述。

η . Status \in {InProduction, Suspended, Rejected, Canceled, Finished, Consumed} 其中 InProduction 表示该事件所代表的实际生产过程开始; Suspended 表示该生产过程暂停中断; Rejected 表示该过程被拒绝; Canceled 表示该生产过程被取消; Finished 表示该生产过程已经完成; Consumed 表示该产品 (或中间产品) 被作为下一级生产的物料而消耗。各状态间的转换如图 4 - (e) 所述

μ . Status \in {Waste, Reused} 其中 Wasted 表示生产活动导致了废品的产生; Reused 表示产生的废品可以被回用。各状态间的转换如图 4 - (f) 所述。

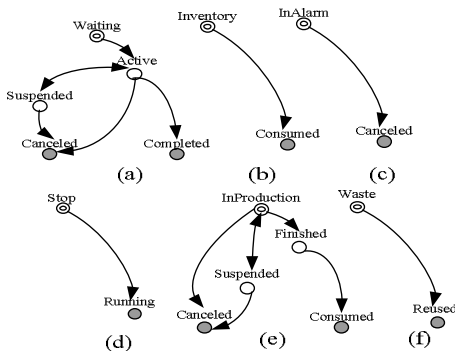


图 4 各元事件状态转换图

3.3.2 EPTM 动态模型

● 基本操作原型

EPTM模型对各元事件定义了Create, Update, Link三种基本操作原型, 对于产生的各事件记录永久存储。其中 Create原型用于创建元事件; Update用于对元事件属性的更新操作; Link用于元事件的关联, EPTM模型的关联属性集为 {LinkId, ParentId, ChildId, Status, Amount, TimeStamp}, Status控制关联有效性, 其中 Link.Status \in {valid, Invalid}, Link操作通过各元事件的EvtId属性对各事件进行关联, 生成事件间的关联关系, Link关联过程示例如图5所示:

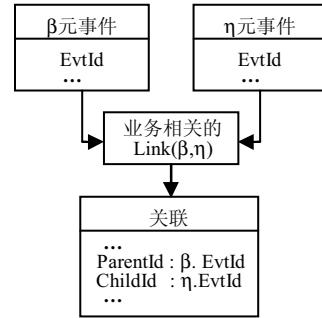


图 5 关联过程示例图

EPTM模型只提供Link操作原型, 具体应用过程中需要整合业务逻辑来实现具体的Link操作。例如在图5所示的关联过程中, 根据元事件的定义可知 β 元事件映射为实际生产过程中的物料输入流, 而 η 元事件是生产过程中具体生产活动 (例如: 在装配生产线上, 某一装配工序的相关装配动作可以映射为 η 元事件) 的抽象, 则这里的Link操作需要将该生产活动同消耗的物料情况关联起来, 同时根据 β 元事件的属性MaterialId 查询BOM信息, 通过Update操作减少 β 元事件的leftAmount属性的值 (代表实际的物料数量), 并更新 η 元事件的属性Status值为Finished (意味着装配动作完成), 因此EPTM模型的Link原型操作的实现同具体业务逻辑密切相关。

● 跟踪算法

跟踪过程是跟踪路径搜索的过程, 跟踪路径是有序事件关联的集合, 用 $TP(E_i, E_n) = (Link(E_i, E_2), \dots, Link(E_{n-1}, E_n))$ 表示从事件 E_i 到事件 E_n 的跟踪路径。在EPTM模型中, 由于将生产过程诸多要素都建模为各种事件, 因此无论对于前向过程跟踪还是后向过程跟踪都可抽象为从源事件到目标事件的搜索过程即为寻找跟踪路径的问题, 现给出 EPTM跟踪模型的跟踪路径搜索算法:

(1) 将源事件 E_i 逻辑抽象为由一系列元事件组成的事件

集合，表示为 $E_i = \sum_{k=1}^n e_k$ ，其中对于任意的 e_k 都有

$$e_k \in \{\alpha, \beta, \eta, \lambda, \mu, \delta\};$$

(2) 根据业务逻辑，依据事件 e_k 的属性特征（例如：对于元事件 η ，属性 EvtNum 记录条码号或者批次号等特征信息）确定事件 e_k 所在特定类型元事件记录中的 EvtId 标识。

(3) 根据步骤2确定的 EvtId 标识遍历事件的关联记录，找到同 EvtId 关联的所有元事件或找到目标元事件的 EvtId，并对关联的元事件进行相同的遍历操作，最终形成以目标元事件为叶子节点的树结构。

(4) 对 $E_i = \sum_{k=1}^n e_k$ 中的每一元事件 e_k 重复执行步骤2、3，最终形成若干个以目标元事件为叶子节点的树结构。即对于每一根节点存在到叶子节点的跟踪路径 $TP(e_i, d_n) = (Link(e_{i1}, f_2), \dots, Link(g_{n-1}, d_n))$ 其中 d_n 代表目标元事件。

(5) 对步骤4形成的各叶子节点，根据 EvtId 值进行节点合并。最终形成不重复的目标事件集合 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 及跟踪路径集合 $\{TP(e_1, d_1), TP(e_2, d_2), \dots, TP(e_n, d_n)\}$ 。

(6) 根据需要抽取跟踪路径集合中的部分路径，应用业务逻辑知识对组成跟踪路径的关联事件进行归纳分析从而得出整个受控生产过程的跟踪信息。

5. EPTM 模型应用案例

在变速箱装配过程中，经常需要根据用户的个性化需求对某一产品进行个性化的装配，在个性化装配工序之前均具有相同的产品特性，因此需要对整个产品的装配过程进行跟踪监控，以保证特定用户的个性化要求得以正确的装配，其简化的装配过程如图 6 所示：

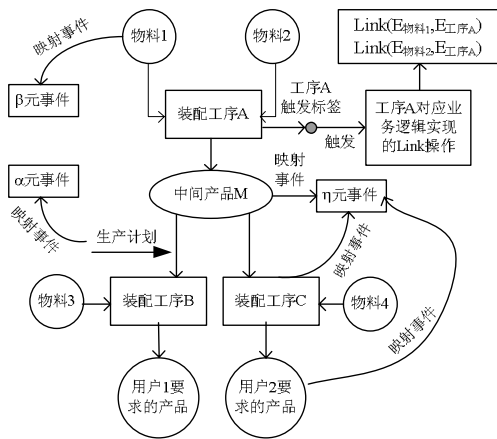


图 6 个性化装配生产的简化装配过程
若对该生产流程进行过程跟踪，只需根据 EPTM 模型

中的事件类型对实际的生产活动进行相关类型元事件的映射，并在每一工序处利用标签触发相应的 Link 操作实现事件的关联，最后应用跟踪算法搜索跟踪路径即可实现上述装配过程的跟踪。

6. 结论

EPTM 跟踪模型是基于事件的跟踪模型，其基本原理是根据生产过程的特点定义了若干元事件，并将实际生产过程中相关的活动抽象为由一系列元事件组成的复合事件，通过对事件进行 Link 操作形成事件关联记录，利用事件的 EvtId 属性标识及相关特征属性对关联记录进行遍历搜索得到跟踪路径集合，从而获得生产过程的跟踪信息，同其它跟踪算法相比具有灵活通用的特点。目前 EPTM 模型已经成功应用于陕西法士特齿轮传动有限公司的装配 MES 的生产过程跟踪模块。

参考文献

- [1] Codex Alimentarius Commission (1999). Codex Alimentarius. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization.
- [2] 周惠琴, 采用跟踪管理法预防汽车召回事件的发生, 汽车科技, 2003.2 48-50
- [3] 丁修堃, 轧制过程自动化[M].北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [4] M.H. Jansen-Vullers, Managing traceability information in manufacture, International Journal of Information Management 23 (2003) 395 - 413
- [5] Massimo Bertolini, FMECA approach to product traceability in the food industry, Food Control 17 (2004) 137 - 145
- [6] Petroff, J. N., & Hill, A. V. H. (1991). A framework for the design of lot-tracing systems for the 1990s. Production and Inventory Management Journal, 32(2), 55 - 61.