文章编号:1007-6735(2017)04-0358-10 DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2017.04.010

基于Petri网的生产系统建模与分析研究

秦江涛
(上海理工大学 管理学院,上海 200093)

摘要:针对生产管理模式的选择及Petri网建模规模较小等问题,根据生产物流控制的原理,在对基本制造单元进行模块化建模的基础上,应用模块化、层次化的技术构建了推式、拉式等生产管理模式的Petri网模型,然后应用参数化的技术对模型进行了改进,应用IDEF1X方法(icam definition methods,IDEF系列分析方法中的数据建模方法)对着色Petri网的颜色集进行了设计,弥补了Petri网建模的不足,并通过对这些方法的集成应用,建立了具有较强通用性的大规模复杂生产系统的Petri模型.最后,通过直接对所建Petri网模型的仿真和对仿真过程中所采集数据的统计计算,对生产系统的性能进行了分析,验证了上述建模方法的正确性和通用性.该方法为制造企业进行生产模式选择提供了有效的工具.

关键词:Petri网;生产系统建模;性能分析;模块化;IDEF1X;仿真
中图分类号:TP 301.6 **文献标志码**:A

Modeling and Analysis of Production Systems Based on the Petri Net

QIN Jiangtao
(*Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: Aiming at the option of production management model and the solution of problems such as the small scale of Petri net modeling, etc., according to the principle of production logistics control, basing on the modular modeling of the basic manufacture unit, as well as applying the modular and hierarchical techniques, the Petri net production management models of push type, pull type, etc. were built. Then the parametric technology was used to make improvement in the model, and the design of a color set of the colored Petri net was made with the application of the IDEF1X method (icam definition methods, data modeling method in IDEF series analysis method) to make up the shortcomings of Petri net modeling. The Petri model for a large scale complex production system with a stronger universality was established through the integrated application of these methods. At last, the performance of the production system is analyzed by the Petri net model's simulation and the statistical calculation of the data collected in the simulation process. The correctness and universality of the above modeling methods were tested and verified. The method

收稿日期:2017-03-06
基金项目:教育部人文社科基金资助项目(14YJCZH218);上海理工大学博士启动项目(1D-10-303-002)
第一作者:秦江涛(1966-),男,副教授.研究方向:信息管理、先进制造系统等.E-mail:qinjiangtao_usst@126.com

can serve as an effective tool for manufacturing enterprises in choosing production models.

Keywords: *Petri net*; *production system modeling*; *performance analysis*; *modularized*; *IDEF1X*; *simulation*

目前,制造企业中存在多种生产管理模式,这些生产管理模式各有优缺点,并且具有不同的适用条件和局限性.即使对于同一种生产管理模式来说,当环境因素(原材料供应、订单需求、机器故障等)发生变化时,原来最优的生产管理模式也可能不再最优.因此,对于制造企业而言,如何选择适合企业自身特点的生产管理模式就显得尤为重要.大多数学者对各类生产管理模式研究都关注于概念介绍和分析,取得了很多成果,但对于企业如何通过某些有效的方法和工具选择适合自身特点的生产管理模式,这方面的研究则略显不足[1-5].

生产系统由于其自身的特点和复杂性,直接试验的方法具有一定的风险,通过数学方法建模研究往往又很困难,因此,基于模型的仿真研究是分析和设计生产系统的有效工具.Petri 网是用于描述分布式系统的一种模型,它既能描述系统的结构,又能模拟系统的运行,提供了比其他建模工具更为丰富的模型信息,现在越来越多地应用到制造系统仿真、调度、控制建模及性能分析中[6].但在生产系统的仿真方面,Petri 网常常只被用于调试、验证和分析系统的逻辑正确性,或者仅应用于对问题进行描述,而在分析时却需使用其他仿真软件(Witness,Arena 等)来进行[7-9].显然,运用其他仿真软件进行后续分析必须重新建模,这样则无法避免出现歧义或语义的改变,无法确保前后两个仿真软件所研究的生产系统是一致的.另外,从目前 Petri 网的应用来看,它还只是一种小规模的、针对于某个具体问题的建模工具.大规模复杂系统节点众多,模型庞大,而且系统的组合状态数会随节点数呈指数增长,出现所谓的组合爆炸问题,如果单纯使用 Petri 网进行建模研究则存在很大的局限性.

因此,本文尝试运用模块化与层次化技术,以及 IDEF1X(icam definition methods,IDEF 系列分析方法中的数据建模方法)等技术和方法,对 Petri 网的建模能力进行扩展[10].利用 CPN tools 工具[11-12],首先对生产系统进行建模,然后通过对所建 Petri 网模型的直接仿真,对不同生产管理模式的生产系统性能进行分析.试图建立一种工程化的方法,对复杂的生产系统进行分析、设计、建立模型,为制造企业选择适合自身特点的生产管理模式提供有效的方法和工具.

1　基于生产管理模式的 Petri 网建模

1.1　生产管理模式

目前,制造企业中存在多种生产管理模式,从生产物流控制的角度,可归结为以物料需求计划(material request planning,MRP)为代表的推式(Push)管理模式和以准时生产制(just in time,JIT)为代表的拉式(Pull)管理模式,以及由这两种方式相结合而形成推拉(Push / Pull)混合管理模式.

推式管理模式采用集中式控制方式,通过对未来需求的预测来组织生产.拉式管理模式采用分散式控制方式,生产根据实际需求来组织.两种管理模式各有长短,因此人们一直探索如何集成二者的优点,将它们有机结合起来,CONWIP (constant work in process)管理模式就是这样一种方法.在大规模定制(mass customization,MC)生产环境下,在区分客户需求中的共性与个性成分时,需要确定大规模定制中产品的区分点.产品区分点也称为客户订单分离点(customer order discoupling point,CODP),也是企业由基于预测的库存生产,转向客户定制需求的定制生产的转换点.因此,通过客户订单分离点可以把推式和拉式两种管理模式有机结合起来,形成能满足大规模定制生产的生产管理系统[13-15].

1.2　基本制造单元的模块化 Petri 网模型

基本制造单元是生产系统的构成元素,因此,本文首先构建基本制造单元的 Petri 网模型.一般地,基本制造单元的 Petri 网模型[6,16]如图 1 所示(见下页),模型中的库所和变迁所代表的意义如表 1 所示(见下页).

显然,上述 Petri 网是一个广义随机 Petri 网(generalized stochastic Petri nets,GSPN).当生产系统比较庞大,构成生产系统的制造单元比较多,产品的工艺路线复杂,利用上述基本制造单元的 Petri 网模型来建立生产线和制造系统的 Petri 网模型将会出现巨大的困难.对于这样的模型,即使我们能够生成出来,使用和理解这样的图形也是非常困难的,

几乎不可能基于这种模型进行讨论、决策和实施.因此,在不影响上述基本制造单元的Petri网模型的结构和行为的前提下,根据Petri的抽象折叠原理[17],运用模块化技术,对上述基本制造单元的Petri网模型进行抽象,对上述基本制造单元的Petri网模型进行"元素"化的表示.例如,对图1所示的模型进行抽象所得到的模型如图2所示.

在图2所示模型中,库所Jobs和Parts所表示的

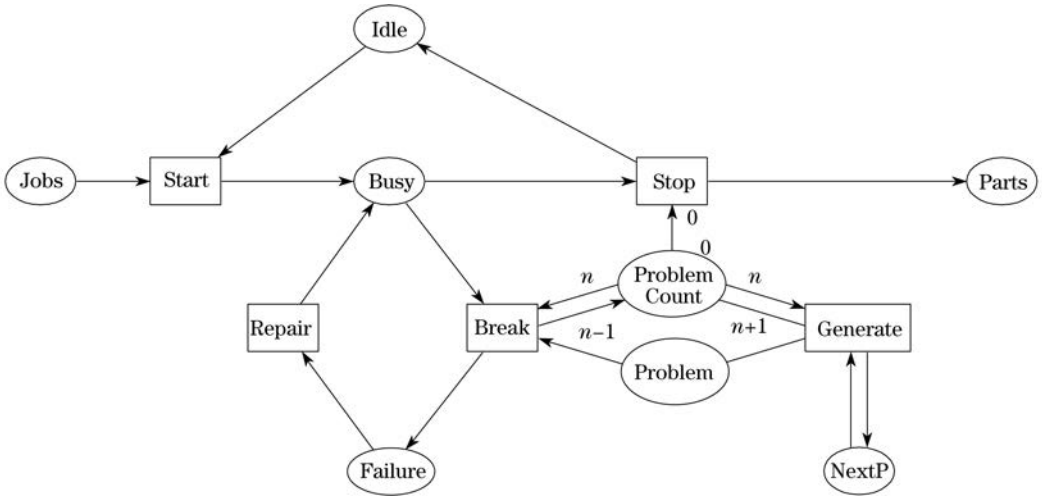

图1 一个基本制造单元的Petri网模型

Fig.1 Petri net model of a basic manufacturing unit

表1 图1模型中的库所和变迁所代表的意义

Tab.1 Explanation of places and transitions in Fig.1

库所	库所代表的意义	变迁	变迁代表的意义
Jobs	待加工的工件	Start	进入加工
Idle	机器处于空闲状态	Stop	结束加工
Busy	机器处于加工状态	Break	出现故障
Failure	机器处于故障(修理)状态	Repair	机器维修
Parts	完工的部件(成品)	Generate	产生机器故障
Problem	机器故障		
ProblemCount	机器故障计数		
NextP	下一个机器故障		

图2 制造单元的模块化Petri网模型

Fig.2 Modularization Petri net model of the basic manufacturing unit

意义不变,即分别表示制造单元加工前的工件和被制造单元加工完工后的产品(或半成品).与单实线矩形所表示的变迁不同的是,双实线矩形所表示的变迁Process即为"替换变迁(substitution transitions)",它类似于模块化技术中的"模块",它抽象概括地描述了制造单元的加工功能.为了清楚地表示基本制造单元模型的抽象过程,图3描述了这样的抽象过程,把图1的模型放在下方进行对照,即图1模型中虚线框内的部分由"替换变迁"进行表示.

上述基本制造单元的模块化抽象模型,给出了实际制造单元的模型化表示,即一个制造单元可以由一个制造加工模块(即替换变迁"Process")和一个输出缓冲(库所"Parts")的组成表示,其中制造加工模块可以包含工件在模块内的等待和加工过程,可以由一台机器组成,或者由一组机器并联或串联组成,或者是一组机器组成的子系统.因此,在不需要仔细分析制造单元内部结构和活动的情况下,可以用上述模块化抽象模型来描述基本制造单元.

由此,根据上述模块化的制造单元以及推式生产管理的原理,可以建立推式生产管理模式的Petri网模型如图4所示.

图4中,替换变迁Process$i$($i=1,2,3$)表示第i个制造单元(生产车间或工序).每个制造单元的行为是相似的,但每个制造单元的可用资源数以及它们对工件的加工时间等都可能是不相同的.制造单元所对应的子图如图1所示,这里不再赘述.库所Part$i$($i=1,2,3$)表示第i个制造单元加工完成的工件.库所RawMaterial表示生产所需的原材料,替换变迁Supply模拟原材料的供应过程;变迁GenerateDemand模拟客户需求的到达状态,它和客户订单到达系统的时间延迟相关联,按照所关联的时间延迟分布在库所Demand中产生令牌;库所Demand表示客户需求(销售订单),库所中的令牌

数为当前尚未满足的订单数,即当前的缺货数.替代变迁 Delivery 模拟产品的销售交货过程.由于不影响问题的讨论,替换变迁 Supply 和替代变迁 Delivery 所描述的系统行为及其子图本文不再展开.根据前面对推式生产过程的分析可知,图 4 模型所描述的系统行为是:当客户订单到达系统后,根据客户需求产生生产任务进入首道工序 Process1 排队进行加工,完成一道工序后,工件按预定流程进入下一道加工工序,直到完成所有加工工序,最后进入交货阶段完成产品销售.

同样,根据上述原理可以建立拉式生产管理模式的 Petri 网模型如图 5 所示.

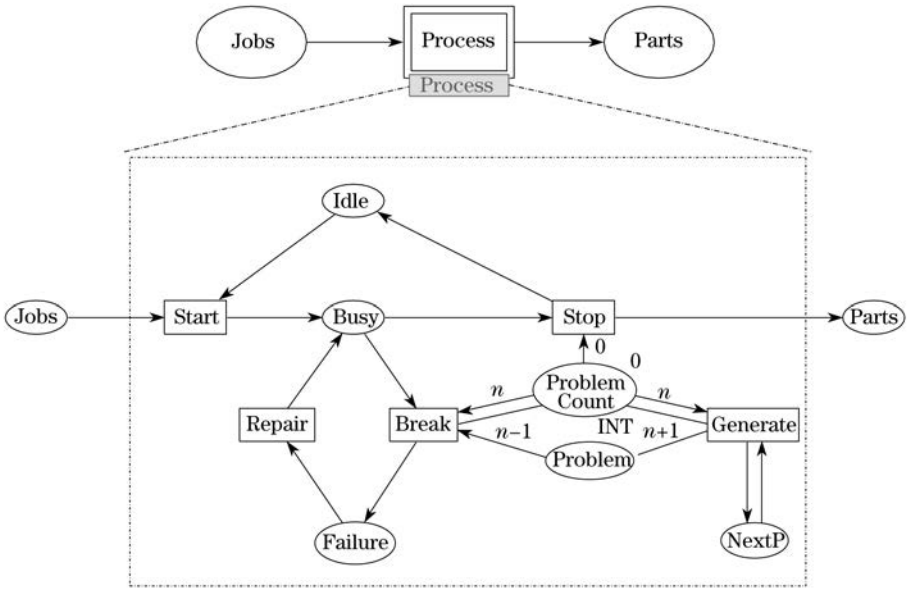

图 3　基本制造单元抽象的 Petri 网模型

Fig.3　Abstract Petri net model of the basic manufacturing unit

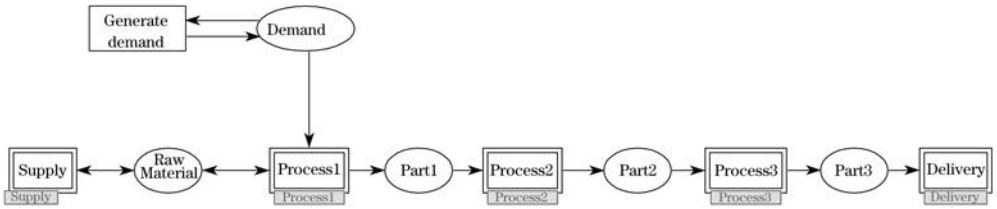

图 4　推式生产管理模式的 Petri 网

Fig.4　Petri net model of the pushing-type production management

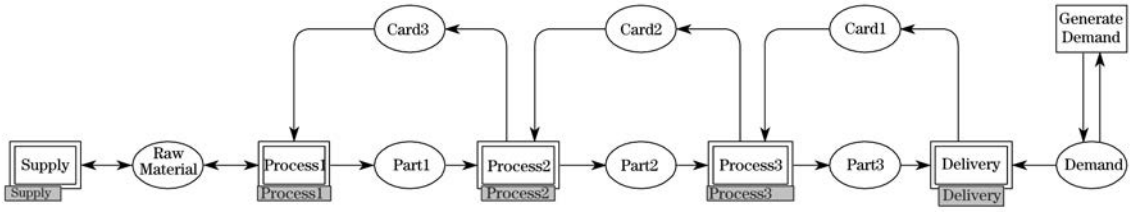

图 5　拉式生产管理模式的 Petri 网

Fig.5　Petri net model of the pulling-type production management

图 5 中,除库所 Card$i$(i=1,2,3)外,其他替换变迁(及其子图)、变迁,及库所的含义均与图 4 中的相同.图 5 所示的拉式生产控制模式的 Petri 网模型与图 4 所示的推式生产控制模式的 Petri 网模型关键的区别在于增加了表示看板的库所 Card$i$(i=1,2,3).显然,拉式生产控制模式 Petri 网模型与推式生产控制模式的 Petri 网模型的系统行为截然不同.在拉式生产控制模式 Petri 网模型中,当客户订单到达系统后,如果系统中有满足客户的产品(即库所 Part3 中有相应的令牌),替换变迁 Delivery 在进

行交货的同时产生相应的看板(即在库所 Card3 中产生令牌),对上一道工序发出生产指令;上一道生产工序使能条件下(即有相应的原材料和看板指令),激发进行生产时重复相应的动作,这样从最后一道工序开始,逐步向上一道工序"拉动"发出生产指令.显然,从库所 RawMaterial 开始,经过变迁 Process1,Process2,Process3 到达库所 Part3,反映了生产过程中物流过程;而从库所 Card1 直到 Card3,反映了触发生产(或补货)的信息传送过程.

依此类推,可以建立 CONWIP 模式以及推拉混合模式等不同生产管理模式和不同生产控制策略的 Petri 网模型,限于篇幅和不影响问题的讨论,故不再展开.

2 生产系统 Petri 网建模

2.1 参数化的模型改进

在前面所建立的不同生产管理模式的模型中,每个制造单元(Process)的行为是相似的,因此,这些制造单元的子模块应该可以复用,即这些制造单元可以调用一个公共模块来实现各个制造单元的功能(即每个制造单元得到一个自己的公共模块实例).但由于每个制造单元可用的资源(如机器设备)以及每个制造单元对不同工件的加工时间等都可能不相同,在目前的情况下,这些制造单元直接调用一个公共模块将只能得到一个相同的公共模块实例,这显然与系统的定义不一致.因此,必须把每个制造单元可用的资源以及每个制造单元对不同工件的加工时间等环境因素参数化,对前面所建立的不同生产控制模式的 Petri 网模型进行参数化调用改进,才能实现不同制造单元的差异化调用.推式生产管理模式的参数化调用改进如图 6 所示.

在图 6 的模型中,对每个表示制造单元增加了两个库所,一个库所(Resource)表示制造单元的资源数,另一个库所(Processtime)表示加工每个产品的加工时间.同样,可以对其他生产控制模式的 Petri 网模型进行改进,本文不再一一列出.

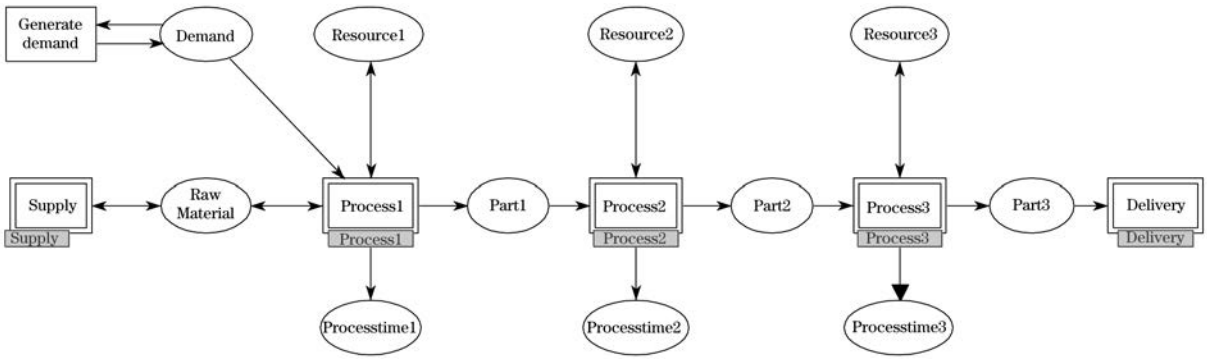

图 6 推式生产管理模式改进后的 Petri 网

Fig.6 Improved Petri net model of the pushing-type production management

但是,这种改进还不能满足工程化的应用需要.在实际的生产系统中,一个成品或半成品是经过一系列工序加工而得到的,这一工序序列是根据产品的技术约束条件在工艺设计时确定的.如在半导体的生产中,其工序数将到达 120 个以上[18].一般地,某一工序还可以采用多种方法进行加工(当然加工的结果是相同的),而且不同产品的工艺流程也各不相同.这样,不同产品的不同工艺流程便构成了一个复杂网络.即使采用上述模块化的方法,理论上可以逐一地描述每个生产工艺流程,但这样的模型将是不可阅读和进行分析的.而当产品或工艺流程等需要变更时,对这样的模型进行修改也非常困难.因此,不仅需要对每个制造单元可用的资源以及每个制造单元对不同工件的加工时间等环境因素进行参数化改进,同时还必须对产品的工艺流程也进行参数化改进.对图 6 所示的推式生产管理模式的 Petri 网模型进行产品的工艺流程参数化改进后的模型如图 7 所示.

在图 7 模型中,变迁 Accept 表示工件的工艺设计过程,形成工件的加工工序序列.变迁 Dispatch 表示工件投产过程.变迁 Dispatch 激发时,将根据库所 Production 中的令牌所表示的当前加工工件,在库所中查询相应的加工时间 t,变迁的时间延迟 @ + t 在输出库所 WIP 中生成所需加工时间戳的令牌.变迁 Check 检测相应完工的工件是否完成所需的加工工序:如未完工,则继续加工;如完工,则入库,全部加工任务完成.图 7 模型中库所的含义如表 2 所示.

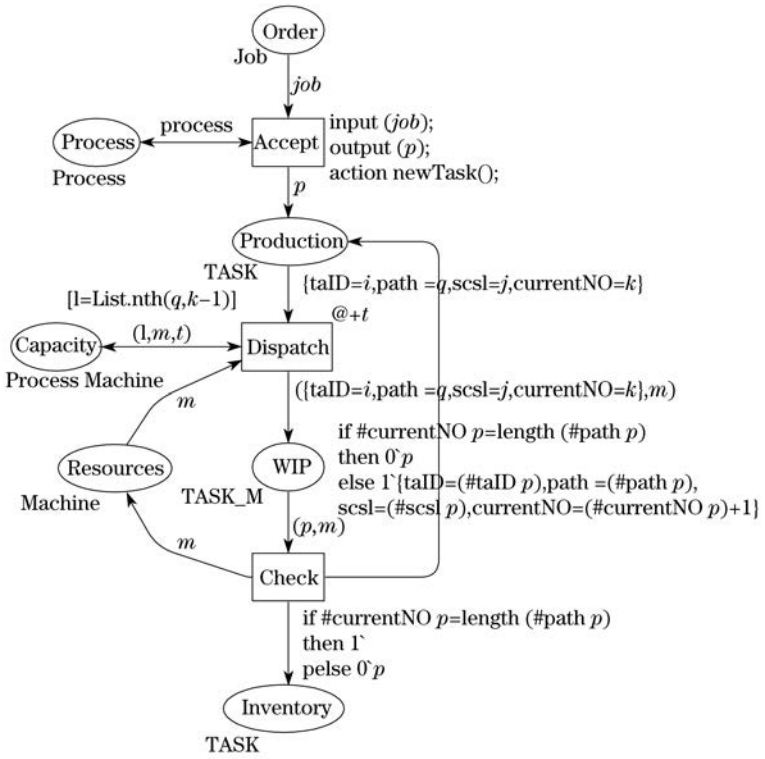

图 7　参数化后的推式生产管理模式 Petri 网模型

Fig.7　Parameterized Petri net model of the pushing-type production management

表 2　推式生产管理模式 Petri 网模型的库所含义

Tab.2　Explanation of places in the pushing-type production management

库所	意义	颜色集
Order	包含工件的订单	Job
Process	企业的标准工序	Process
Production	生产任务	Task
Capacity	加工能力	ProcessMachine
Resources	可用资源,这里指机器	Machine
WIP	订单的加工状态	Task_M
Inventory	工件的库存状态	ProcessMachine

同样,根据上述原理对拉式生产管理模式的参数化调用改进如图 8 所示(见下页).

同理,可以对 CONWIP 模式以及推拉混合模式等不同生产管理模式和不同生产控制策略的 Petri 网模型进行改进,限于篇幅和不影响问题的讨论,故不再展开.

2.2　着色 Petri 网的颜色集设计方法

在应用 Petri 网进行建模时,为了减少 Petri 网的节点数,在基本 Petri 网中引入“颜色”概念后,大大地增强了 Petri 网的表达能力.但是,正如 Petri 网的特点所体现的,Petri 网在建模过程中注重的是业务流程的刻画和表现.尽管它通过库所把数据和活动较好地集成在一个整体中,但却没有给出相应的方法来定义和规范库所及库所的颜色集.在进一步应用 Petri 网模型进行深入的研究分析中(特别是后面直接对 Petri 网仿真进行定量分析),库所的颜色集定义直接影响到后续研究工作的进行.如果等到后面碰到问题再回过头来修改前面建立的模型,反反复复,不仅容易出现混乱,也大大地降低了工作的效率,不利于解决大规模复杂系统的问题和工程化的应用.例如图 7 和图 8 的模型仅给出该基本制造单元需要涉及到工件、机器等实体对象,而对于工件、机器等这些实体对象该如何定义和规范则未涉及.从本文后面应用 Petri 网对生产系统的研究中可以看出,工件的“类型”、“型号”、“工艺要求”,机器的“加工能力”以及机器对工件的“加工时间”等数据是应用 Petri 网仿真来分析制造系统性能所必须的数据.如果等到发现缺少这些数据时,显然现阶段所做的工作就需要重新修改,现在所定义的颜色集则需要重新定义,甚至为了保证模型的一致性可能还需要对模型进行修改,Petri 网模型则需要重新验证,这些都需要大量的时间和精力.

对于数据模型的建立,有许多表达方法,本文应用成熟的 IDEF1X 方法[19].图 9(见下页)显示了应用 IDEF1X 方法建立的上述生产系统的数据模型(为了

使模型简洁直观，且不影响问题的讨论，图9的模型中仅给出必要的部分），同时直观地显示了IDEF1X模型中的实体与Petri网模型（图7）中库所颜色集之间的对应关系（图中用虚线表示这种对应关系）.

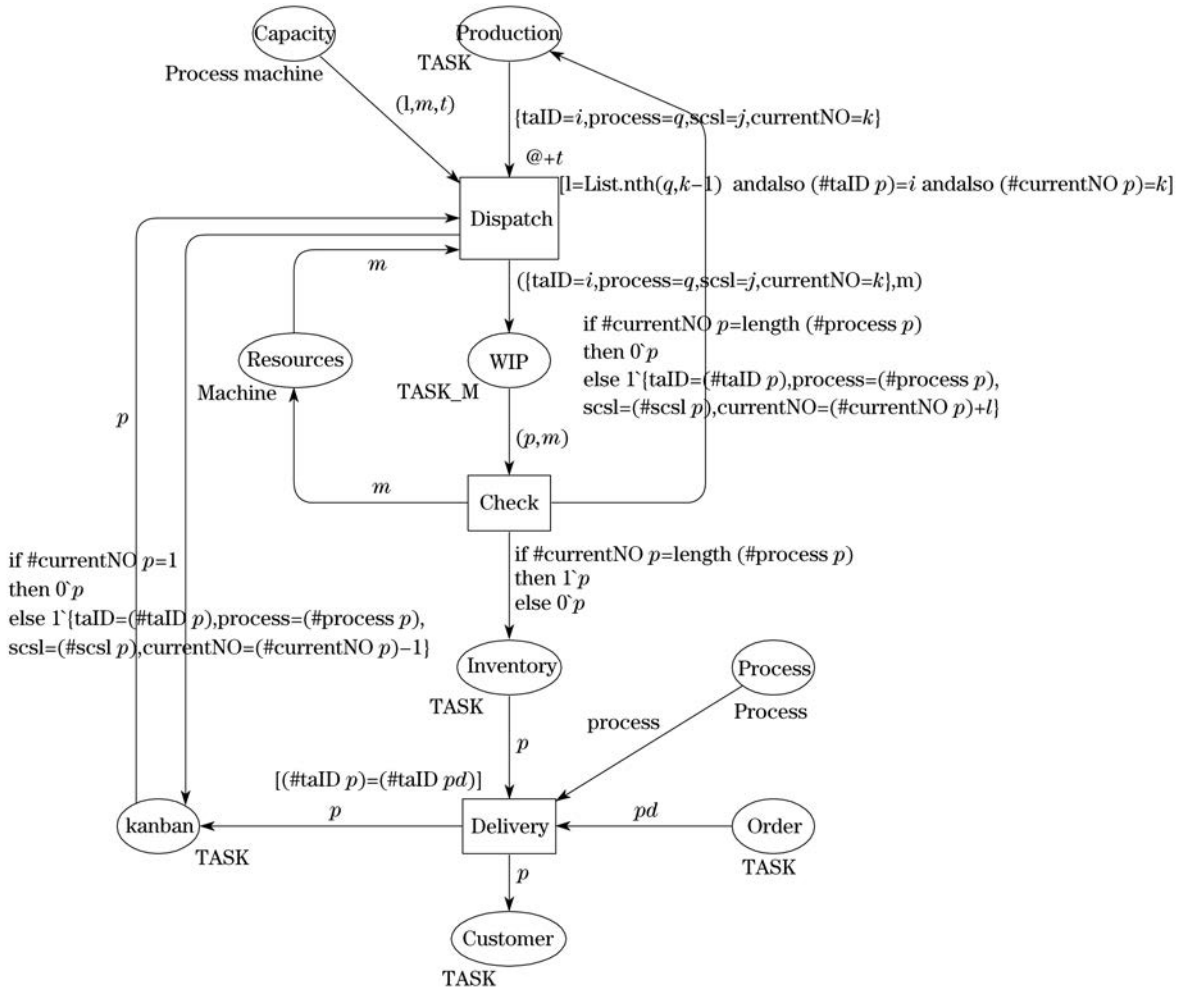

图8 参数化后的拉式生产管理模式Petri网模型

Fig.8 Parameterized Petri net model of the pulling-type production management

图9中Petri网模型颜色集Machine，Process，Job，ProcessMachine，Task，Task_M分别与IEDF1X模型的实体“机器”、“工序”、“工件”、“工序_机器”、“工艺路线”、“工序加工”对应，标准元语言的颜色集描述如下：

```
colset Route = list STRING;
colset Machine = INT;
colset Process = product INT * STRING;
colset Job = product INT * STRING;
colset ProcessMachine = product INT * INT * INT;
colset Task = record taID:INT * path: Route * scsl:
INT * currentNO:INT timed;
colset Task_M = product Task * INT timed;
```

2.3 复杂生产系统建模

根据上述改进后的各种生产管理模式的Petri网模型，可以建立满足推、拉生产管理模式及其混合管理模式生产需要的生产管理系统的Petri网模型，如图10所示. 在模型中，替换变迁PushProcess和PullProcess分别表示上述推式和拉式的生产过程，替换变迁Group表示成组生产过程. 根据生产管理的需要和组织方式，模型中在客户订单分离点之前采用推式的大批量生产方式，在客户订单分离点分离之后采用拉式的定制化生产方式，因此，替换变迁Decompose实现从成组生产到定制生产的拆分，它是替换变迁Group的还原过程. 其他库所和变迁所表达的含义与前面的模型相同.

上述通过模块化技术建立的生产系统的Petri网模型的优点是每张图中的结点数相对较小，便于直观理解和把握. 当然，在模块化的Petri网模型中，结点总数并未减少，图数增加了，又增加了图和

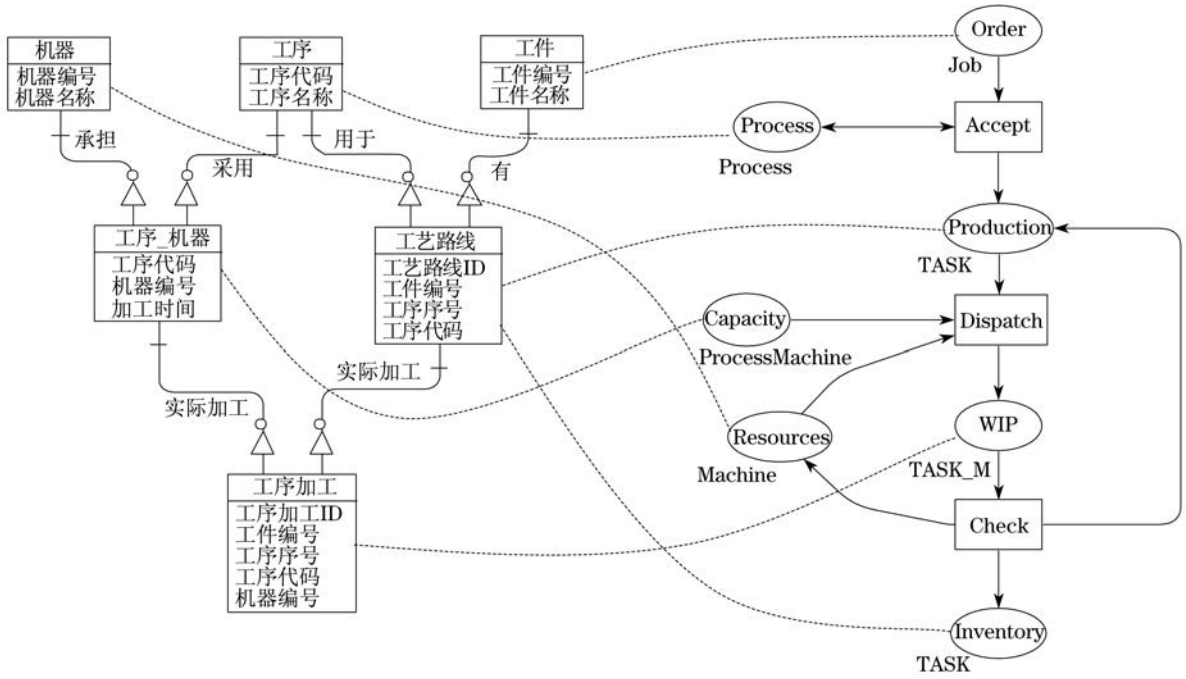

图 9　数据模型(IDEF1X)与 Petri 网模型对应关系图

Fig.9　Correspondence relationship of the IDEF1X model and Petri net model

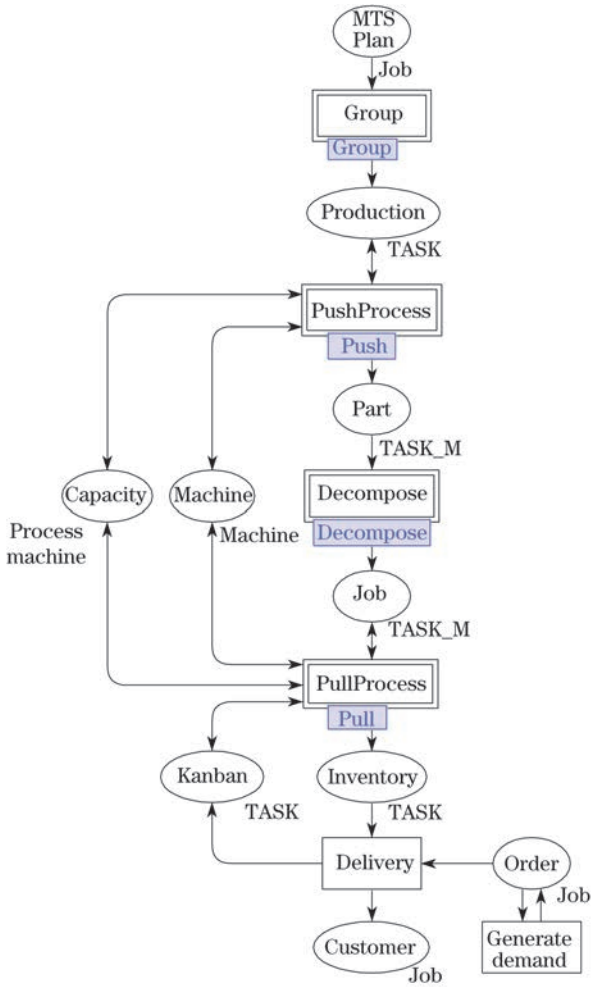

图 10　生产系统 Petri 网模型

Fig.10　Petri net model of the production system

图之间的关系,因此也会带来一些需要解决的问题.因此,在应用模块化技术进行层次化的 Petri 网设计时,为保证企业流程的系统特性不变,不仅要保证父、子网之间的输入输出接口是一致的,而且还要保证父、子网的性质不变,父、子网的行为在模块化前后保持一致,因此应特别注意子网的限制和约束.

显然,上述所建立的生产系统 Petri 网模型具有较强的通用性,不会随着机器数、工件数及其工序数的变化而发生变化.当模型中机器数、工件数及其工序数发生变化时,只要设置模型的初始值即可,而无需对模型的结构作任何改动,这也为利用 Petri 网模型进一步深入研究分析实际的生产系统的系统结构特征及其性能特点等奠定了基础.

3　基于 Petri 网仿真的生产系统分析

生产系统模型作如下假设:生产系统中机器性能相同,可用机器数为 M;输入缓冲区的容量为 K,输入缓冲区中工件的排队方式(如先进先出、后进先出等)对生产系统的性能不会产生影响;当系统中已有 $K+M$ 个工件(即 K 个工件正在缓冲区中排队等候加工,M 个工件正在机器上接受加工)时,则到达生产系统需要接受加工的工件另做处理;需要加工的工件到达系统的概率为 p,与系统中工件是否

加工完成无关;系统中机器对工件的加工时间为 q,工件被加工完成后即刻离开生产系统.该生产系统如图11所示.

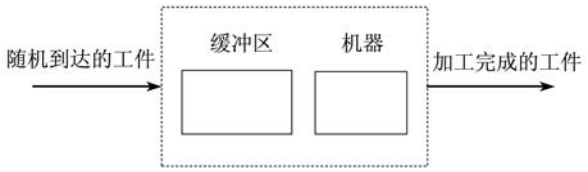

图11 生产系统示意图

Fig.11 Production system

生产过程不仅受到系统中可用的机器数 M 及其加工效率、系统输入缓冲容量 K 等可控因素的影响,还受到原材料的供应、机器的设备故障等不可控因素的干扰.为便于说明问题,下面仿真时不可控因素仅考虑原材料的供应、机器的设备故障及其组合对生产系统的影响,其他因素因不影响问题的讨论,不再一一展开.其次,为了对各种生产管理模式进行评价,本文采用下面的性能指标进行分析:平均在制品数量、平均生产率、平均等待时间、平均作业率.

为了进行性能指标的分析,如果将上述模型用其他仿真软件进行分析,很难避免在转换过程中不出现语义的改变.而利用CPN Tools中的"监视器(monitor)"等功能来采集在仿真过程中Petri网产生的数据信息,则可以通过对上述所建Petri网模型的直接仿真来实现生产系统的性能分析."监视器"并不改变Petri网模型的任何结构,它只是被用来观察、检查、控制,或修改(如某一个特定值的变量绑定到变迁时更新数据文件时)Petri网的仿真运行时的一种观测设置.这样,根据需要设置好相应的"监视器"并定义好相应的函数后,通过对仿真过程中采集到的相应库所中队列的平均长度、库所内的令牌总数、变迁的激发次数、变迁的激发时刻等数据进行相应的统计分析计算,从而实现上述性能指标的分析.

仿真时,工件到达系统的概率 p 假设服从均值为54的指数分布,生产系统中机器对工件的加工时间 q 见表3.

表3 工序对工件的加工时间

Tab.3 Processing time

工序	工件1	工件2
1	Expo (16)	Unif (3,5)
2	Unif (2.3,2.6)	Tri (5,8,10)
3	Pois (4.6)	Norm (22)
4	Tri (8,12,16)	Expo (19)

应用CPN Tools进行仿真时,为了得到有意义的结果,本文用1 000个时间单位来表示1个具体的现实时间(分钟).表3中的Expo()表示指数分布,Unif ()表示均匀分布,Norm()表示正态分布,Pois ()表示泊松分布,Tri() 表示三角分布.

原材料的供应无约束、机器设备无故障的仿真结果见表4.

表4 设备无故障的仿真结果(置信区间90%)

Tab.4 Simulation result without mechnical failure (confidence interval 90%)

管理模式	平均在制品数量	平均生产率	平均等待时间	平均作业率
推式(push)	130.929 069±8.860 852	0.026 131±0.000 174	2 740.143 541±145.688 717	0.529 025±0.003 868
拉式(pull)	39.924 105±0.011 921	0.026 137±0.000 213	1 482.005 770±10.991 444	0.483 492±0.002 057
CONWIP	24.397 347±0.087 589	0.022 983±0.000 112	997.253 375±7.293 989	0.469 264±0.001 855

在原材料的供应无约束但设备有故障的情况下(假设工序3发生故障,其故障发生概率服从均值为140的指数分布,维修时间服从均值为20的指数分布),其仿真结果见表5.

表5 设备有故障的仿真结果(置信区间90%)

Tab.5 Simulation result in the case of mechnical failure (confidence interval 90%)

管理模式	平均在制品数量	平均生产率	平均等待时间	平均作业率
推式(push)	175.380 688±8.042 424	0.022 773±0.000 214	3391.014 539±115.453 117	0.487 447±0.004 186
拉式(pull)	39.903 454±0.006 162	0.022 749±0.000 269	1 702.292 294±19.948 090	0.423 469±0.004 488
CONWIP	24.585 390±0.008 363	0.020 228±0.000 130	1 149.703 470±8.330 346	0.408 692±0.003 082

同理,可以根据不同的需求组合成不同的方案进行仿真.而在按照不同的需求组合进行仿真时,如上所述,无需对模型的结构作任何改动,只需要设置模型的初始值和对相应的参数进行调整即可.同时,通过对Petri网模型直接仿真得到的性能指标分析,我们可以对不同生产模式的特点进行评价.例如,从仿真的结果可以看出,对于上述特定环境下的生产系统,在Push生产管理模式下,因为是按计划

生产,机器产能得到了较好的利用,但在制品数量较高,高库存的在制品数量并未给系统带来高产出,工件在系统中的等待时间却大大增加了;由于原材料的供应无约束,如果采用最优混合策略:即在生产线的初始阶段采用推式生产模式,而在其后续阶段采用拉式生产管理模式,其仿真结果也并未表现出最优.而且,如果采用大规模定制的策略:即把客户订单分离点逐步从供应商端向客户端后移,仿真结果也未表现出趋势性或规律性的反应.

4　结　论

首先,上述基于 Petri 网的生产系统的仿真表明:对于各种生产模式来说,尽管每一种生产管理模式都有自身的特点,但在实际的生产过程中,制造企业应根据自身的特点和具体的生产环境来进行选择,因此,一个能帮助制造企业有效地进行生产模式选择的方法和工具就显得十分必要.

其次,对于生产系统的建模来说,由于基本 Petri 网(包括着色赋时 Petri 网)只是一个没有任何子结构的平面结构,并没有任何机制来支持层次化建模,不能表达系统的层次结构,其弱点是试图用一个大而全面的平面网结构来刻画系统的所有行为,这种平面的 Petri 网模型通常也不便于管理.例如用这种平面结构的 Petri 网对上述生产管理模式和生产系统进行建模,如果在一个平面中把所有的细节都表达出来,可能需要用到数百个甚至更多的库所、变迁.因此本文通过应用模块化、层次化及参数化的技术和 IDEF1X 方法,弥补了进行大规模的复杂系统建模时基本 Petri 网容易出现的模型庞大、系统节点过多的不足.本文在对基本制造单元进行模块化建模的基础上构建的不同生产管理模式及生产系统的 Petri 网模型,在不丢失系统任何本质含义前提下简化了系统模型,而且通过应用参数化技术,使所建立的 Petri 网模型具有较好的灵活性和通用性.不过,从解决大规模复杂系统的生产管理模式选择的角度来看,本文所选择的实例显得有些单薄.

第三,在应用广义随机 Petri 网进行系统的性能分析时,通过直接对所建生产系统的 Petri 网模型进行仿真,避免了先应用 Petri 网建模而后应用其他仿真软件进行仿真可能出现的歧义.因此,本文的研究方法具有普遍意义,也为制造企业进行生产模式选择提供了有效的工具.

参考文献:

[1] 林勇,乐晓娟,付秋芳. Push/Pull 和 CONWIP/Pull 生产控制模式对比分析[J]. 工业工程,2006,9(2):6-10.

[2] 易树平,蒲骥,高庆萱,等. 基于赋时 Petri 网的成组生产单元缓冲区建模[J]. 工业工程与管理,2009,14(6):7-11.

[3] 吴继兰,邵志芳,韩景倜,等. 完全自产情境下的推拉组合式生产链协同规划[J]. 计算机集成制造系统,2016,22(3):806-812.

[4] 潘春荣,黎良. 基于可重入加工组合设备的建模与调度研究[J]. 系统仿真学报,2016,28(4):772-782.

[5] 康杰,李良. 基于 Petri 网的 CONWIP 控制系统的建模与仿真[J]. 西南交通大学学报,2009,44(4):620-624.

[6] 秦江涛,任上. 基于 Petri 网仿真的随机制造单元性能分析研究[J]. 计算机应用研究,2013,30(8):2364-2367.

[7] 顾军,罗军舟,曹玖新,等. 基于排队 Petri 网的服务系统性能建模与分析方法[J]. 计算机学报,2011,34(12):2435-2455.

[8] 刘斌,张建东,李杜娟,等. 基于 Petri 网理论的 FC-AE-ASM 建模与性能分析[J]. 计算机应用研究,2011,28(3):1092-1094.

[9] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 2 版,北京:清华大学出版社,2005.

[10] 郝克刚,丁剑洁. 层次结构的 Petri 网[J]. 计算机科学与探索,2008,2(2):123-130.

[11] VAN DER AALST W, STAHL C. Modeling business processes: a petri net-oriented approach [M]. Cambridge:MIT Press,2011.

[12] JENSEN K,KRISTENSEN L M. Coloured petri nets: modeling and validation of concurrent systems[M] Berlin:Springer-Verlag,2009.

[13] WANG D, CHEN X, LI Y. Experimental push/pull production planning and control system[J]. Production Planning & Control,1996,7(3):236- 241.

[14] 祁国宁,顾新建. 大批量定制原理及关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(9):776-783.

[15] 顾新建,徐福缘,顾新建,等. 面向大批量定制的产品设计方法研究[J]. 中国机械工程,2002,13(10):844-847.

[16] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[17] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[18] 江志斌. 半导体芯片制造系统建模与优化调度控制[M]. 上海:上海交通大学出版社,2011.

[19] 陈禹六. IDEF 建模分析和设计方法[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

(编辑:丁红艺)