### 信息物理系统（CPS）的建模与设计

**1前言**

[信息物理系统](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=66193225&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)包含了将来无处不在的环境感知、[嵌入式计算](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=75911812&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)、网络通信和网络控制等系统工程，使物理系统具有计算、通信、精确控制、远程协作和自治功能。它注重计算资源与物理资源的紧密结合与协调，主要用于一些智能系统上如机器人，智能导航等。目前，信息物理系统还是一个比较新的研究领域。

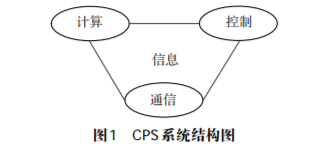
CPS的意义在于将[物理设备](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=74537108&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)联网，是连接到互联网上，让物理设备具有计算、通信、精确控制、远程协调和自治等五大功能。CPS本质上是一个具有控制属性的网络，但它又有别于现有的控制系统。CPS则把通信放在与计算和控制同等地位上，因为CPS强调的[分布式应用](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=10478360&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)系统中物理设备之间的协调是离不开通信的。CPS对网络内部设备的远程协调能力、自治能力、控制对象的种类和数量，特别是网络规模上远远超过现有的工控网络。[美国国家科学基金会](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=6672503&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)（NSF）认为，CPS将让整个世界互联起来。如同互联网改变了人与人的互动一样，CPS将会改变我们与物理世界的互动。

Petri网是从过程的角度出发，它是一种有效的建模工具对于复杂系统的描述和分析，适合于各种描述和研究异步的、并发的计算机系统，并且提供了一种可操作语义及定性和定量的分析。现如今，许多国内外专家学者已经对Petri网进行了丰富的扩展，主要有时间Petri网、时延Petri网以及随机Petri网等等。这些扩展模型为描述和研究异步并发的计算机提供了有力的支持。因此，本文主要从时间Petri网入手去讨论CPS实体物理过程的时空一致性问题。时间Petri网虽然能够从时间的层面去描述系统的性能，但是暂时还不能直接来分析对于时空一致性要求较高的CPS系统性能。

本文通过拓展时间Petri网，在时间Petri网中引入空间标签，建立一个时空Petri网模型。通过时空Petri网模型去进一步分析CPS系统的时空一致性，并将该模型应用于CPS物理实体的时空建模，为CPS系统的时空一致性建模提供有效的建模方法。

**2.CPS系统建模方法**

CPS系统是以3C技术为基础，通过对现实世界物理系统的感知与控制器实时控制，使得整个系统行为呈现出一种信息系统与物理系统并行运作且相互影响的混成系统。其体系结构图如图1所示。它按照系统功能可划分为信息系统和物理系统，信息系统包括用于监控外界环境以及外界其他物理设备，根据感知信息实时控制物理系统；物理设备则是按照信息系统的控制进行规律性的自动运作。因此，如何描述物理设备的规律性运动是构造时空Petri网的主要目标。

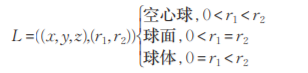


1.1CPS物理实体分类及特征

由上文可知物理设备是按照信息系统的控制进行规律性的自动运作，即感知和改变物理环境。因此，物理设备又可以细分为感知设备（Sensingequipment）和执行设备（Actuatingequipment）。感知设备（Sensingequipment）主要是指一些用于感知信息的元器件，通常使用最多的元器件就是传感器。它可以根据系统需求目的性地获取系统所需信息，并将信息发送给信息系统进行处理。同时，系统为了能够长时间且稳定地获取最新环境信息，会对传感器网络规定一个周期性的检测时间，并进行规律性的检测。执行设备（Actuatingequipment）是指当信息系统接受到来自感知设备下的传感器网络传递的信息后，通过一致性分析当前状态下物理环境，并对执行器给出相应的控制指令，执行器进行指令操作，从而改变当前物理环境。

2.2CPS物理实体建模

在物理设备中，感知设备主要是由一些静态的传感器构成，它们大都是静止不变的。因此本文的时空一致性分析主要是针对具有动态性的执行器（actor）。由于执行器不仅仅只有一个，所以每个执行器必须要有唯一一个用于区别其他的执行器的标记。同时一个执行器除了要有区别于其他执行器的标记外，还要具有同一环境下的时空属性以及状态属性。其中时间属性指的是执行器当前所处的时间点，空间属性指的是执行器在当前环境下所处的位置信息以及将要按照执行指令到达的位置点，本文在这里将空间属性范围定义为以某一坐标点为中心点，以(r1,r2)为区域半径对来对空间区域进行刻画。这里可以用统一的三维空间坐标系(x,y,z)对当前执行器位置进行定位，空间属性L表达式如下:



状态属性通常就是对一些执行设备当前动作的描述，包括忙碌、加速、减速等。最后当执行器接收到来自感知设备传递过来的信息指令后，还应该根据信息指令进行指令操作。

通过对CPS物理设备进行分析，可以把具有同一属性以及行为的执行器进行抽象化。在这里把具有相同属性和行为的执行器统一定义为物理实体类。

定义1:一个物理实体类定义为一个四元组AC=(BS,ACP,SJP,KJP)。

其中：

1. BS记为标识，用于区别不同物理实体类；
2. ACP表示当前所处状态属性；
3. SJP表示当前的时间属性；
4. KJP表示当前的空间属性。

这些属性和标识会根据不同的物理实体类以及该实体类所处的物理环境的变化而不断变化。在CPS系统中，每一个物理实体类都是由一些具有相同属性的执行器组成，相反的每一个执行器是该执行器所处实体类的一个具体实例。下面将对单个实体形式化描述。

定义2:一个物理实体定义为一个六元组

ACT=(BSid,ACTP,SJTP,KJTP,ACTC,ACTP)。

其中，BSid表示该物理实体的唯一标识；ACTP表示该物理实体的当前状态属性；SJTP表示该物理实体的当前时间属性；KJTP表示该物理实体当前空间属性；ACTC表示该物理实体所处的物理实体类；ACTP表示该物理实体当前所处的时空Petri网模型。

3.3CPS物理实体时空事件模型

在CPS系统中，运行时间通常是由一些离散的点组合而成，因此许多外部因素都会影响其准确性。相对于物理实体，则表现为由时间约束的实时连续状态演变。实际上要描述执行器（actor）的时空性不仅要记录执行器空间属性，同时还要指明该执行器的时间属性，系统发出的执行行为与执行的响应时间应该是密切相关的。因此，本文在这里引入事件的概念，将执行器（actor）的时空属性定义为一个实时时空事件（以下简称事件）。

定义3一个实时时空事件（TimeEvent）TE可以表示为一个七元组

TE=(TEid,TEP,TES,TEE,TEA,TER,TEW)。

其中，TEid表示该事件的唯一标识；TEP表示该事件的属性集，它是以一个集合的形式存在，包括当前属性以及将要达到的属性。可以表示为

TEP={TEP1,TEP2,TEP3,⋯,TEPn}。

TES表示事件开始的时间；TEE表示事件的结束时间；

当TES=TEE时，该事件为一个点时间事件，即当前执行器没有进行位移；当TEE>TES时，该事件为一个段时间事件，即当前执行器已经完成位移或正在进行位移。TEA表示当前事件发生时所对应执行器节点；TER表示当前事件生成时所对应执行器的空间位置；TEW表示当前事件的权重值，即权重值越大，事件级别越高，事件优先执行，反之则稍后执行。

**3时空Petri网模型**

CPS物理实体不同于其他计算单元，其所在位置不是一成不变的。相反对于大多数的物理实体来说，它们最基本属性恰恰是其位置属性会随着时间及系统指令的要求不断发生变化。传统的时间Petri网虽然引入了时间概念，但是无法对CPS系统物理实体所处的空间位置信息进行表示。本文进一步扩展时间Petri网并引入空间标签，通过对Petri网建模能力以及CPS结构的深入分析，下面将给出模型的相关定义。

Petri网是对离散并行系统的数学表示。Petri网是[20世纪60年代](https://baike.sogou.com/lemma/ShowInnerLink.htm?lemmaId=371024&ss_c=ssc.citiao.link" \t "https://baike.sogou.com/_blank)由卡尔·A·佩特里发明的，适合于描述异步的、并发的计算机系统模型。 Petri网既有严格的数学表述方式，也有直观的图形表达方式，既有丰富的系统描述手段和系统行为分析技术，又为计算机科学提供坚实的概念基础。

一、背景

卡尔·A·佩特里是一名物理学家，他发明Petri网主要是从物理的角度去描述并发现象的。据佩特里本人所述，他认为60年代计算机科学的概念构架 由于缺乏并发不适合于描述物理系统。其中一个重要的概念，就是Petri网里面不存在所谓的“全局时间”的概念，因为这跟[狭义相对论](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%AD%E4%B9%89%E7%9B%B8%E5%AF%B9%E8%AE%BA" \o "狭义相对论" \t "https://blog.csdn.net/jackiej/article/details/_blank) 是冲突的。相反，Petri网可以描述每一个节点的时序。

从狭义相对论的观点出发，两个时空点之间如果没有因果关系把它们连接起来（或者说“类空”的），它们就是独立的，不能说其中一个发生在前另一个在后 或者相反。因此，Petri网里面的两种变迁（见下文）如果都有发生的条件，则不能认为其执行顺序有任何关系。然而，Petri网旨在描述变迁之间的因果 关系，并由此构造时序。

二、经典Petri网

经典的Petri网是简单的过程模型，由两种节点：库所和变迁，有向弧，以及令牌等元素 组成的。

1、结构

Petri网的元素：

库所 （Place）圆形节点

变迁 （Transition）方形节点

有向弧 （Connection）是库所和变迁之间的有向弧

令牌 （Token）是库所中的动态对象，可以从一个库所移动到另一个库所。

Petri网的规则 是：

有向弧是有方向的

两个库所或变迁之间不允许有弧

库所可以拥有任意数量的令牌

2、行为

如果一个变迁的每个输入库所 （input place）都拥有令牌，该变迁即为被允许(enable) 。一个变迁被允 许时，变迁将发生 (fire)，输入库所 (input place)的令牌被消耗，同时为输出库所 (output place)产生令牌。

注意：

变迁的发生是原子的，也就是说，没有一个变迁只发生了一半的可能性。

有两个或多个变迁都被允许的可能，但是一次只能发生一个变迁。这种情况下变迁发生的顺序没有定义。

如果出现一个变迁，其输入库所的个数与输出库所的个数不相等，令牌的个数将发生变化，也就是说，令牌数目不守恒。

Petri网络是静态的，也就是说，不存在发生了一个变迁之后忽然冒出另一个变迁或者库所，从而改变Petri网结构的可能。

Petri网的状态 由令牌在库所的分布决定。也就是说，变迁发生完毕、下一个变迁等待发生的时候才有确定的状态，正在发生变迁的时 候是没有一个确定的状态的。

两个变迁争夺一个令牌的情形被称之为冲突 。当发生冲突的时候，由于Petri网的时序是不确定的，因此具体哪个变迁得以发生也是不确 定的。实际应用中，往往需要避免这种情形。用于描述现象的Petri网也可能自然出现冲突，这表明我们对于变迁发生的条件没有完全了解。

多个弧连接两个节点的情况。在输入库所和变迁之间的弧的个数决定了该变迁变为被允许需要的令牌的个数。弧的个数决定了消耗／产生的令牌的个数。

3、Petri 网的形式化定义

一个经典的Petri网由四元组（库所，变迁，输入函数，输出函数）组成。 任何图都可以映射到这样一个四元组上，反之亦然。

被允许的形式化 变迁发生的形式化 Petri网到变迁系统的映射 可达性图

Petri 是一个三元组（P,T,F） F(P X T)U(T X P)是弧的集合

4、流程建模

一个流程的状态 是由在场所中的令牌建模的，状态的变迁 是由变迁建模的。令牌表示事物（人，货物，机器），信息，条件， 或对象的状态； 库所代表库所，通道或地理位置；变迁代表事件，转化或运输

一个流程（Flow）有当前状态，可达状态，不可达状态。

5、经 典Petri网的局限性

没有测试库所中零

模型容易变得很庞大

模型不能反映时间方面的内容

不支持构造大规模模型，如自顶向下或自底向上

三、高级Petri网

为了解决经典Petri网中的问题，研究出了高级Petri网，在以下方面进行了 扩展：

令牌着色 -- 令牌具有属性

时间-- 变迁有延迟时间

层次化 -- 一个变迁可以是一个子Petri网

1、令牌着色

一个令牌通常代表具有各种属性的对象，因此令牌拥有值 （颜色）代表由令牌建模的对象的具体特征，如一个令牌代表一个工人（张三，28 岁，经验3级）。

2、时间

为了进行分析，我们需要建模期间，延迟等，因此每一个令牌拥有一个时间戳，变迁决定生产出的令牌的延迟。

3、层次化

构造一个复杂性与数据流图相当的Petri网的机制。 子网是由库所，变迁和子网构成的网络。

4、时序

增加时序逻辑的定义，更好的描述行为过程。

**4结语**

CPS是一种通过多种物理实体与物理环境紧密结合，能够感知和反馈物理环境的新型分布式实时反馈系统，其复杂程度超越了一般信息系统，这给CPS的建模与验证带来了极大挑战

本文从CPS物理实体状态转移过程中时空一致性问题出发，在时间Petri网的基础上引入空间标签，提出一种基于时空Petri网的建模方法，系统描述了CPS物理实体状态转移的过程，进一步分析了模型的可行性和有效性。但是本文只模拟了单一环境下物理实体的状态转移，并没有对复杂环境下物理实体状态转移进行模拟，这些问题有待未来去解决。

**参考文献：**

1. LeeEA.Constructivemodelsofdiscreteandcontinuousphysicalphenomena，TechnicalReportNo.UCB/EECS2014-15[R].Berkeley：EECSDepartment，UniversityofCalifornia，2014.
2. 何积丰.Cyberphysicalsystems[J].中国计算机学会通讯，2010，6（1）：25-29.
3. JensenJC.Model-baseddesignmethodologyforcyberphysicalsystems[C]//Procofthe7thInt’lConfonWirelessCommunicationsandMobileComputing（IWCMC），2011：1666-1671.
4. FacchinettiT.Real-timemodelingfordirectloadcontrolincyberphysicalpowersystems[J].IndustrialInformatics，2011，4（7）：689-698.
5. 朱敏，李必信.基于微分动态逻辑的CPS建模与属性验证[J].电子学报，2012，40（6）：1126-1132.
6. KeY，LiW，MetalS.Anadaptivediscreteeventmodelforcyberphysicalsystem[C]//TheFirstAnalyticVirtualIntegrationofCyberPhysicalSystemsWorkshop，SanDiego，California，USA，2010：9-15.
7. 邵珠成.信息物理融合系统时空逻辑研究[D].上海：华东师范大学，2013.

[8]梁雪辉.信息物理融合系统的时空分析及推理[D].广州：广州工业大学，2014