

中图分类号：TP29

论文 编 号：10006SY2041109

北京航空航天大學
硕 士 学 位 论 文

数字孪生平台研发及其
数据和知识建模方法研究

作者姓名 蒋亮亮

学科专业 电子信息与科学技术

指导教师 胡远奇

培养学院 集成电路科学与工程学院学院

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: veypi jiang

Supervisor: yuanqi hu

School of Integrated Circuit Science and Engineering

Beihang University, Beijing, China

中图分类号: TP29

论文编号: 10006SY2041109

硕士论文

数字孪生平台研发及其 数据和知识建模方法研究

作者姓名	蒋亮亮	申请学位级别	硕士
指导教师姓名	胡远奇	职 称	
学科专业	电子信息与科学技术	研究方向	数字孪生
学习时间自	2020 年 9 月 1 日	起至	2023 年 1 月 1 日止
论文提交日期	(年) 年 (月) 月 (日) 日	论文答辩日期	(年) 年 (月) 月 (日) 日
学位授予单位	北京航空航天大学	学位授予日期	(年) 年 (月) 月 (日) 日

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

指导教师签名：_____

日期： 年 月 日

摘要

数字产品定义 (Digital product definition, DPD) 经历了从二维到三维的发展。业界提出了以产品设计为核心的数字仿真 (DMU)、虚拟样机等技术，产品设计信息的定义和表达也越来越完善。近年来，国内外制造业的经验表明，3D 数字化定义的产品模式已经成熟，其效益被反复验证。但是，目前的数字化产品定义还存在描述不涉及制造、运行和维护阶段、产品定义和过程定义之间缺乏相关性、后续模拟基于“理想定义”对真实产品的指导有限等问题。为了解决上述问题，“数字孪生”技术应运而生。数字孪生技术被誉为有望改变未来航空制造“游戏规则”的顶级技术。这项技术使用数据馈送来映射物理实体，并正在对工业的许多领域产生颠覆性的影响。德国信息技术和新媒体协会预测，在制造业市场中，数字孪生的价值是巨大的，到 2025 年将超过 780 亿欧元。Gartner 已经连续两年 (2016、2017) 将数字孪生列为十大战略技术发展趋势之一。2017 年 11 月，世界上最大的武器制造商洛克希德·马丁公司将数字孪生列为未来国防和航空航天工业的六大顶级技术。

数字孪生是真实产品的虚拟表示。它拥有产品的信息，从产品生命的开始一直到产品的处置。在网络物理系统的语境中，数字孪生可以被看作是一个网络表征，是其特征点的对象集合，泛函其物理机制、虚拟特征和与人的交互关系。

在真实的实践场景中，往往会遇到复杂的现实问题，如海量信息的建模、处理问题，模型的结构化专有化问题等等。单一场景都有可能面临构建几千孪生体和处理每秒几十万量级数据，如何去已有的知识去构建模型，如何去描述模型特征和状态，如何去关联、分析、响应大量数据，这就是本篇研究的内容。

关键词：数字孪生，分布式

Abstract

Key words: digital twins, message queue

目 录

第一章 数字孪生	1
1.1 概述	1
1.2 总体方案	1
1.2.1 通用平台设计	2
1.2.2 通讯网络	2
1.2.3 知识模型	2
1.2.4 状态与事件模型	2
第二章 平台设计	3
2.1 整体架构	3
2.2 功能设计	3
2.3 sql 设计	3
2.4 后端设计	3
2.5 前端设计	3
2.6 交互逻辑	3
第三章 通讯网络	5
3.1 通讯拓扑	5
3.2 通讯协议	5
3.3 路由算法	6
3.4 分布式选举协议	6
3.5 硬实时通信	7
3.6 终端通信	8
3.7 性能分析	8
第四章 知识模型	9
4.1 基本模型	9
4.2 知识分类	9
4.2.1 现实类知识	9
4.2.2 仿真类知识	9
4.2.3 虚拟类知识	9

4.3 碰撞模型	9
4.3.1 点与 AABB	10
4.3.2 AABB 与 AABB	10
4.4 刚体运动力学模型	10
4.4.1 理想粒子的运动	11
4.4.2 3d 物体旋转运动	12
第五章 状态与事件模型	13
5.1 状态机制	13
5.2 时序模型	13
5.3 事件模型	13
5.4 预测算法	13
结论	15
参考文献	17

插图目录

图 1 系统结构图	2
图 2 通讯网络	5
图 3 选举协议	6

表 格 目 录

表 1 通讯帧	6
----------	-------	---

主要符号对照表

HPC	高性能计算 (High Performance Computing)
cluster	集群
SMP	对称多处理
MBD	基于模型的设计
API	应用程序编程接口
Digital Twin	数字孪生
entity	实体对象
physical entity	物理对象
virtual entity	虚拟对象
physical domain(space)	物理域 (物理空间)
L	角动量
I	惯性张量
τ	力矩
ω	角速度

第一章 数字孪生

1.1 概述

数字产品定义 (Digital product definition, DPD) 经历了从二维到三维的发展。业界提出了以产品设计为核心的数字仿真 (DMU)、虚拟样机等技术，产品设计信息的定义和表达也越来越完善。近年来，国内外制造业的经验表明，3D 数字化定义的产品模式已经成熟，其效益被反复验证。但是，目前的数字化产品定义还存在描述不涉及制造、运行和维护阶段、产品定义和过程定义之间缺乏相关性、后续模拟基于“理想定义”对真实产品的指导有限等问题。为了解决上述问题，“数字孪生”技术应运而生。数字孪生技术被誉为有望改变未来制造“游戏规则”的顶级技术。这项技术使用数据馈送来映射物理实体，并正在对工业的许多领域产生颠覆性的影响。德国信息技术和新媒体协会预测，在制造业市场中，数字孪生的价值是巨大的，到 2025 年将超过 780 亿欧元。Gartner 已经连续两年 (2016、2017) 将数字孪生列为十大战略技术发展趋势之一。2017 年 11 月，世界上最大的武器制造商洛克希德·马丁公司将数字孪生列为未来国防和航空航天工业的六大顶级技术。

数字孪生是真实产品的虚拟表示。它拥有产品的信息，从产品生命的开始一直到产品的处置。在网络物理系统的语境中，数字孪生可以被看作是一个网络表征，是其特征点的对象集合，其中泛函其物理机制、虚拟特征和与人的交互关系。

在真实的实践场景中，数字孪生往往会遇到复杂的现实问题，如海量信息的建模、处理问题，模型的结构化专有化问题等等。单一场景即有可能需要构建几千孪生体并处理每秒几十万量级的数据，如何根据已有知识构建模型，如何描述模型特征和状态，如何关联、分析、响应大量数据，是本篇文章的主要研究内容。

鉴于以上生产需要，本文提出了一种实时分布式通信系统以及一种知识和事件模型化方法，解决大数据情况下实时响应和高效知识处理问题，并在自研的通用型数字孪生平台上进行验证。

1.2 总体方案

数字孪生主要技术包括信息建模、信息采集同步，信息分析、智能决策等，虽然已经取得了很大发展，但是由于现在世界模型机理复杂、知识图谱建立困难以及有效数据采集分析困难等问题，限制了其实实践形势。

1.2.1 通用平台设计

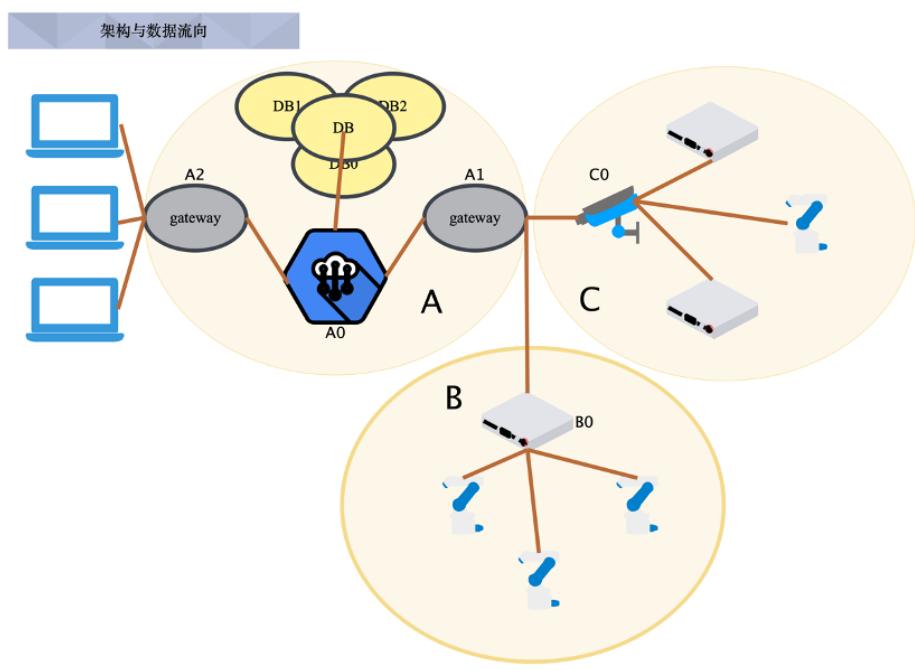


图 1 系统结构图

1.2.2 通讯网络

1.2.3 知识模型

1.2.4 状态与事件模型

第二章 平台设计

2.1 整体架构

2.2 功能设计

2.3 sql 设计

2.4 后端设计

2.5 前端设计

2.6 交互逻辑

第三章 通讯网络

3.1 通讯拓扑

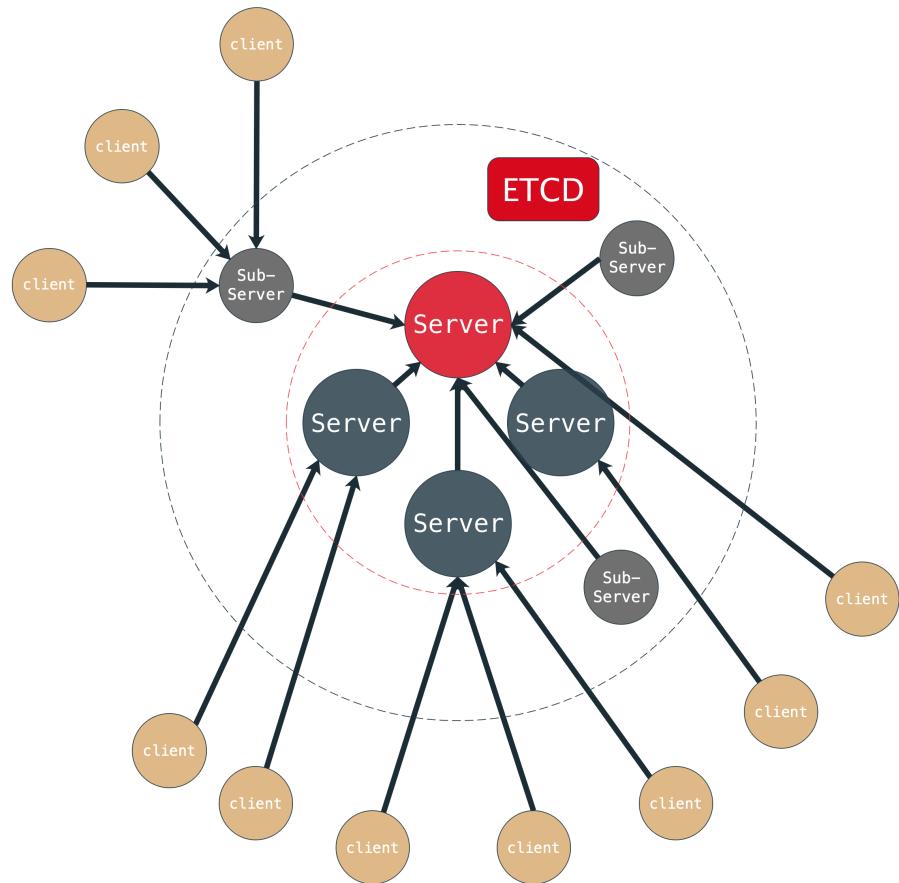


图 2 通讯网络

3.2 通讯协议

- prefix
 - count
 - typ
 - tag
 - source
 - target
 - data

表 1 通讯帧

prefix	count	
typ	tag	source
target	data	
data		
....		
data		

3.3 路由算法

Trie 树又被称为前缀树、字典树是一种用于快速检索的多叉树结构。字典树把字符串看成字符序列，根据字符串中字符序列的先后顺序构造从上到下的树结构，树结构中的每一条边都对应着一个字符。字典树上存储的字符串被视为从根节点到某个节点之间的一条路径，并在终点节点上做个标记“该节点对应词语的结尾”，正因为有终点节点的存在，字典树不仅可以实现简单的存储字符串，还可以实现字符串的映射，只需要将相对应的值悬挂在终点节点上即可。

Trie 的核心思想是空间换时间，有如下基本性质：

- - 根节点不包含字符，除根节点外每一个节点都只包含一个字符
- - 从根节点到某一节点，路径上经过的字符连接起来，为该节点对应的字符串
- - 每个节点的所有子节点包含的字符都不相同

字典树能够利用字符串中的公共前缀，这样可能会节省内存，利用字符串的公共前缀可以减少查询字符串的时间，能够最大限度的减少无谓的字符串比较，同时在查询的过程中不需要预知待查询字符串的长度，沿着字典树的边进行匹配，查询效率比较高。

3.4 分布式选举协议

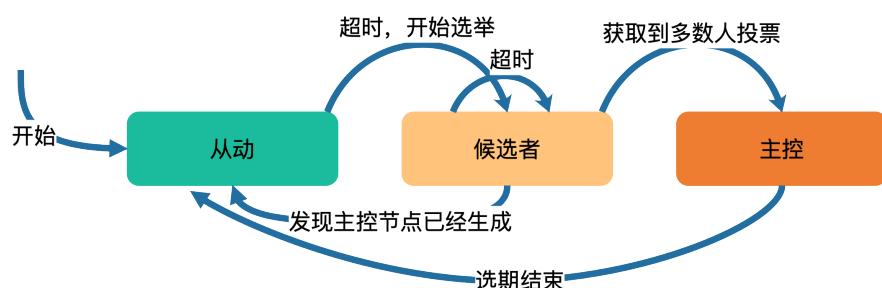


图 3 选举协议

分布式协议中，一个节点任一时刻处于以下三个状态之一：

- 从动
- 候选者
- 主控

如上图所示，可以看出所有节点启动时都是从动状态；在一段时间内如果没有收到来自主控的心跳，从从动切换到候选者，发起选举；如果收到大多数的同意票（含自己的一票）则切换到主控状态；如果发现其他节点比自己更新，则主动切换到从动。

总之，系统中最多只有一个主控节点，如果在一段时间里发现没有主控，则大家通过选举-投票选出主控。主控会不停的给从动发心跳消息，表明自己的存活状态。如果主控节点故障，那么从动节点会转换成候选状态，重新选出主控。

3.5 硬实时通信

在工业控制领域实时 (Real Time) 是一个核心要求。实时系统是指计算的正确性不仅依赖于逻辑的正确性而且依赖于产生结果的时间，如果系统的时间限制不能得到满足，系统将会产生故障。在工业领域这种故障可能造成灾难性的结果。

在 CPU 资源调度方面，OS 主要提供一个多任务 (multitasking) 的运行环境，以方便应用的开发。在开发某个应用时首先把工作拆解成多个任务 (Task/Thread)，每个任务都可以简化成一个简单的无限循环：

```

1 void MyTask (void)
2 {
3     while (1) {
4         Wait for an event to occur;
5         Perform task operation;
6     }
7 }
```

代码 3.1 基本调度过程

如上面代码所示，任务 (Task) 都是等待 event，然后处理事务。任何一个任务得以运行，都是因为它收到了一个 Event，这个 Event 可能是一个中断、也可能是超时到期、还有可能是其他任务发出的 IPC 信号，继续追查发出 IPC 信号的任务最后的源头 Event 肯定是一个外部设备硬件中断或者是内部的 Timer 中断。中断引起了 Event 传递，形成了逐个运行多个任务的链条 (Chain)。一个系统内部会存在很多条这种链条。

对实时 (Real Time) 系统来说，不仅仅要求 OS 能提供多任务环境，更要求任务能在

极短的时间之内响应外部的中断事件。

对于终端节点来说硬实时通讯较好实现，利用时钟定时中断即可强制切换到高级别消息发送，但是终端节点一般作为信息发送和执行节点，不具备逻辑处理功能，在整体通讯延迟受最慢一级也就是逻辑处理层一般也是主机节点影响最大，为处理此问题，对消息进行分级，高优先级消息会先触发中断响应，并切换到执行状态，且不可被抢占。

3.6 终端通信

3.7 性能分析

第四章 知识模型

4.1 基本模型

在建立数字孪生虚拟世界过程中，会有大大小小的规则、算法等知识纳入其中，任何规则算法归纳来讲都是描述任意虚拟或实体对象相关作用关系。本文归纳了这些规则、算法的共同特征，建立了一个一般性的知识模型，该模型是一个动态模型，其知识求解过程可根据特点纳入平台内运算或使用独立进程进行运算求解。基本模型需要先建立三个外部特征，触发域、输入域、输出域。触发域主要用于设定触发求解过程的条件。输入域是指定该模型需要哪些虚拟/实体对象的什么参数。输出域是指定该模型输入影响范围和参数。基本模型内部求解过程可以根据类型和功能特点选择提交公式或算法代码，或直接运行独立的求解程序。

4.2 知识分类

对于不同的知识或者说规则，根据其作用域和功能特点，将其分为现实类知识、虚拟类知识、仿真类知识

4.2.1 现实类知识

该类知识是具体场景下最底层知识，其触发域和输入域仅能为实体对象数据，虚拟场景运行与否不影响该类知识触发和生效作用。

4.2.2 仿真类知识

该类知识为虚拟环境中与实体对象对应的虚拟对象的数据的关联知识，其输出域可以设定于虚拟世界，也可作用于现实世界。

4.2.3 虚拟类知识

该类知识其输出域仅能作用于虚拟世界。

4.3 碰撞模型

为了简化物体之间的碰撞检测运算，通常会对物体创建一个规则的几何外形将其包围。在本系统中，碰撞检测中将物体分为三种检测模型，点、AABB、球体。其中，AABB (axis-aligned bounding box) 包围盒被称为轴对齐包围盒。

轴对齐包围盒是判断两个物体是否重叠的最快算法，物体被包裹在一个非旋转的（因此轴对齐的）盒中，并检查这些盒在三维坐标空间中的位置，以确定它们是否重叠。

由于性能原因，轴对齐是有一些约束的。两个非旋转的盒子之间是否重叠可以通过逻辑比较进行检查，而旋转的盒子则需要三角运算，这会导致性能下降。如果你有旋转的物体，可以通过修改边框的尺寸，这样盒子仍可以包裹物体，或者选择使用另一种边界几何类型，比如球体（球体旋转，形状不会变）。

4.3.1 点与 AABB

如果检测到一个点是否在 AABB 内部就非常简单了—我们只需要检查这个点的坐标是否在 AABB 内；分别考虑到每种坐标轴。如果假设 P_x , P_y 和 P_z 是点的坐标, $B_{minX} - B_{maxX}$, $B_{minY} - B_{maxY}$, 和 $B_{minZ} - B_{maxZ}$ 是 AABB 的每一个坐标轴的范围，我们可以使用以下公式计算两者之间的碰撞是否发生：

```

1 function isPointInsideAABB(point, box) {
2     return (point.x >= box.minX && point.x <= box.maxX) &&
3         (point.y >= box.minY && point.y <= box.maxY) &&
4         (point.z >= box.minZ && point.z <= box.maxZ);
5 }
```

4.3.2 AABB 与 AABB

检查一个 AABB 是否和另一个 AABB 相交类似于检测两个点一样。我们只需要基于每一条坐标轴并利用盒子的边缘去检测。

```

1 function intersect (a, b) {
2     return (a.minX <= b.maxX && a.maxX >= b.minX) &&
3         (a.minY <= b.maxY && a.maxY >= b.minY) &&
4         (a.minZ <= b.maxZ && a.maxZ >= b.minZ);
5 }
```

4.4 刚体运动力学模型

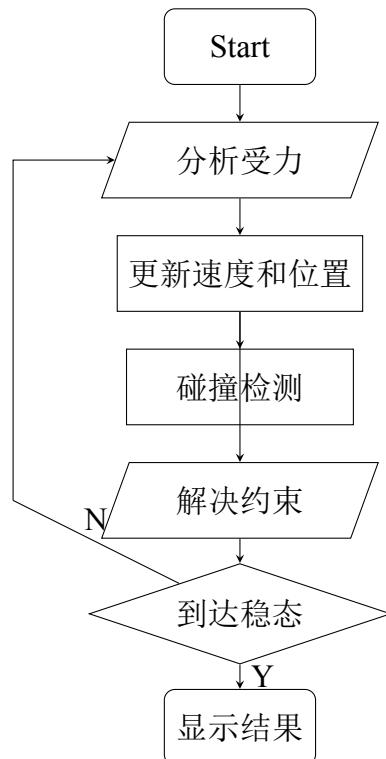
刚体的运动主要基于牛顿三大定律来模拟：

- 1. 惯性物体在不受力时，总是保持速度不变。

- 2. 力, 质量, 加速度力在物体上产生加速度, 满足 $F = ma$.
- 3. 力的作用是相互的

基于牛顿三大定律, 在计算机中来模拟刚体的运动, 物理引擎来模拟的流程大致都是这样的:

对于每个物体, 使用循环的方式来模拟:



4.4.1 理想粒子的运动

先不考虑物体的形状和旋转, 把物体当成理想粒子来对待, 根据牛顿定律来循环计算物体的速度和位置:

$$dt = t_{i+1} - t_i$$

$$v(t_{i+1}) = v(t_i) + \left(\frac{f(t_i)}{m}\right)dt$$

$$p(t_{i+1}) = v(t_i) + v(t_{i+1})dt$$

将其泰勒展开

$$p(t_{i+1}) = p(t_i) + p'(t_i)dt + p''(t_i)\frac{dt^2}{2!} + p'''(t_i)\frac{dt^3}{3!} + \dots$$

对于浏览器按像素点实时位置渲染精度而言, 3 阶泰勒展开已符合精度要求。

4.4.2 3d 物体旋转运动

惯性张量

在三维空间中任取一点 Q 及一个直角坐标系 Q_{xyz} , 可以得到物体的惯性张量:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yz} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

对角元素 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 是物体分别相对于 x, y, z 轴的转动惯量。

$$I_{xx} = \int (r_y^2 + r_z^2) dm$$

$$I_{yy} = \int (r_x^2 + r_z^2) dm$$

$$I_{zz} = \int (r_x^2 + r_y^2) dm$$

计算惯量积

$$I_{xy} = I_{yx} = - \int (r_x r_y) dm$$

$$I_{xz} = I_{zx} = - \int (r_x r_z) dm$$

$$I_{yz} = I_{zy} = - \int (r_z r_y) dm$$

根据惯性张量计算力矩 τ , 角加速度 $d\omega$, 角速度 ω 。

$$\tau = \frac{dL}{dt} = I \frac{d\omega}{dt}$$

$$d\omega = I^{-1} \tau dt$$

$$\omega(t_{i+1}) = \omega(t_i) + (I^{-1} \tau(t_i)) dt$$

用四元数 q 来表示刚体的旋转状态, 刚体在 dt 时间内沿着 ω 旋转了 $|\omega dt|$ 的角度, 得到

$$q(t_{i+1}) = q(t_i) * [\cos \frac{|\omega dt|}{2}, \sin \frac{|\omega dt|}{2} \frac{\omega}{|\omega|}] \quad (4.2)$$

第五章 状态与事件模型

5.1 状态机制

5.2 时序模型

5.3 事件模型

5.4 预测算法

结论

参 考 文 献

- [1] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future nasa and u.s. air force vehicles[C]//Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics ; Materials Conference Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference Aiaa. [S.l.: s.n.], 2012.
- [2] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011(1687-5966).
- [3] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Springer International Publishing, 2017.
- [4] LEE J. Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: Towards smart manufacturing[J]. 2020, 38(8):901-910.
- [5] UHLEMANN H J, LEHMANN C, STEINHILPER R. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0[J]. Procedia CIRP, 2017, 61:335-340.
- [6] ALAM K M, SADDIK A E. C2ps: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems[J]. IEEE Access, 2017, 5:2050-2062.
- [7] RAMTILAK A, JOSEPH A, SIVAKUMAR G, et al. Digital twin spark ignition for improved fuel economy and emissions on four stroke engines[C]//SIAT 2005. [S.l.: s.n.], 2005.
- [8] CERRONE A, HOCHHALTER J, HEBER G, et al. On the effects of modeling as-manufactured geometry: Toward digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2014, 2014.
- [9] QI Q, TAO F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison[J]. IEEE Access, 2018:3585-3593.
- [10] ANWER, NABIL, SCHLEICH, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017.
- [11] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. Digital twin workshop:a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(第 1 期).
- [12] BANERJEE A, DALAL R, MITTAL S, et al. Generating digital twin models using knowledge graphs for industrial production lines[C]//9th ACM Web Science Conference, Industrial Knowledge Graphs. [S.l.: s.n.], 2017.
- [13] WAGNER, C, GROTHOFF, et al. The role of the industry 4.0 asset administration shell

and the digital twin during the life cycle of a plant[J]. IEEE Int C Emerg, 2017.

[14] 韩辉. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing[J]. 疾病监测, 2019.

[15] FISHER C R, NYGREN K E, BEAUDOIN A J. Validation of materials-informed digital twin: Mapping residual strains in hsla steel weldment using high energy x-rays[J]. Journal of manufacturing processes, 2022(74-Feb.).

[16] PAU F, JOAN G, V 铆 CtorGIC, 等. SARS-CoV-2 Spread Forecast Dynamic Model Validation Thorough Digital Twin Approach, Catalonia Case Study[J]. 2021.

[17] WANG Y C, ZHANG N, LI H, et al. Research on digital twin framework of military large-scale uav based on cloud computing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1738 (1):012052 (6pp).

[18] ZHOU H, YANG C, SUN Y. Intelligent ironmaking optimization service on a cloud computing platform by digital twin - sciencedirect[J]. 工程 (英文), 2021.

[19] HADLEY F, DUNLAP T A, POON T. Precision treatment with machine learning and digital twin technology for optimal metabolic outcomes[Z]. [S.l.: s.n.], 2021.