Journal of System Simulation

Volume 33 | Issue 6

Article 6

6-23-2021

Dynamic Control of Twin-workshop Model of Circuit Breaker Considering Takt Time Constraints

Shu Liang

1. Low Voltage Apparatus Technology Research Center of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China; ;

Zhang Jie 1. Low Voltage Apparatus Technology Research Center of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China; ;

Yanfang Yang 2. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

Yang Miao 2. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Control of Twin-workshop Model of Circuit Breaker Considering Takt Time Constraints

Abstract

Abstract: The production takt time greatly impact on the twin system modeling of assembly line. A dynamic control method of the twin workshop model is proposed, which considers the takt time constraints is proposed. Detecting the motion of the circuit breaker unit and the assembly line system, and the dynamic motion model of the circuit breaker twins are developed based on the takt time calculation. Through driving force loading, motion logic script controlling and switching, the twin mapping of the assembly line system is realized with fixed and flexible takt time as well. The circuit breaker's directional bounding boxes and their hierarchy traversal methods are established. The upper, middle and lower layers from the direction of the twin model is filtered during collision to reduce detecting of collision separation axis. Comparisons results show that the twin model has less chattering phenomenon, the collision response time is decreased by 15% and the accuracy of the collision detection is increased by 96.26%.

Keywords

circuit breaker, digital twin, takt time, multilayer directional bounding box, collision detection

Authors

Shu Liang, Zhang Jie, Yanfang Yang, Yang Miao, and Ziran Wu

Recommended Citation

Shu Liang, Zhang Jie, Yang Yanfang, Yang Miao, Wu Ziran. Dynamic Control of Twin-workshop Model of Circuit Breaker Considering Takt Time Constraints[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1277-1287.

第 33 卷第 6 期	系统仿真学报©	Vol. 33 No. 6
2021年6月	Journal of System Simulation	Jun. 2021

考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学控制

舒亮1,张洁1,杨艳芳2*,杨秒2,吴自然1

(1. 温州大学 浙江省低压电器工程技术研究中心,浙江 温州 325027; 2. 武汉理工大学 物流工程学院,湖北 武汉 430063)

摘要:生产节拍对以流水线为主要作业模式的孪生系统建模有重要影响,提出一种考虑节拍约束的 断路器孪生车间模型动力学控制方法,对断路器单体和配套流水线进行运动检测,在节拍计算的基 础上对孪生体进行动力学建模,通过驱动力加载、运动逻辑控制和切换,实现固定节拍和柔性节拍 时流水线系统的孪生映射。建立了断路器上层、中层和下层多层方向包围盒及其层级遍历方式,提 出对断路器孪生模型碰撞方向进行筛选,减少碰撞分离轴的检测数量。对比结果表明,孪生模型抖 动减少,碰撞响应时间降低15%,碰撞精度提高96.26%。

关键词:断路器;数字孪生;节拍;多层方向包围盒;碰撞检测
中图分类号:TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1004-731X (2021) 06-1277-11
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0165

Dynamic Control of Twin-workshop Model of Circuit Breaker Considering Takt Time Constraints

Shu Liang¹, Zhang Jie¹, Yang Yanfang^{2*}, Yang Miao², Wu Ziran¹

Low Voltage Apparatus Technology Research Center of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China;
 School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The production takt time greatly impact on the twin system modeling of assembly line. A dynamic control method of the twin workshop model is proposed, which considers the takt time constraints is proposed. Detecting the motion of the circuit breaker unit and the assembly line system, and the dynamic motion model of the circuit breaker twins are developed based on the takt time calculation. Through driving force loading, motion logic script controlling and switching, the twin mapping of the assembly line system is realized with fixed and flexible takt time as well. The circuit breaker's directional bounding boxes and their hierarchy traversal methods are established. The upper, middle and lower layers from the direction of the twin model is filtered during collision to reduce detecting of collision separation axis. Comparisons results show that the twin model has less chattering phenomenon, the collision response time is decreased by 15% and the accuracy of the collision detection is increased by 96.26%.

Keywords: circuit breaker; digital twin; takt time; multilayer directional bounding box; collision detection

引言

断路器是配用电网络中重要的保护性设备,广

泛应用于电力、石油、建筑等领域,每年使用数量 高达数十亿,是维护我国配用电网络安全的重要基 础。由于产量巨大,推行数字化制造方式,是目前

收稿日期: 2020-04-07 修回日期: 2020-07-07

基金项目:浙江省重点研发计划(2021C01046)

第一作者:舒亮(1982-),男,博士后,教授,研究方向为计算机仿真技术、智能材料、结构的建模方法及控制理论。

E-mail: shuliangalbert@163.com

通讯作者:杨艳芳(1975-),女,博士,副教授,研究方向为数字化设计与优化、仿真。E-mail: yangyanfang@whut.edu.cn

第 33 卷第 6 期	系统仿真学报	Vol. 33 No. 6
2021年6月	Journal of System Simulation	Jun. 2021

提升制造企业效率、降低运行成本的重要手段[1]。

数字孪生车间是目前国内外研究热点,国内已 经开展较多数字孪生车间相关研究,如王时龙等^[2] 提出基于数字孪生的人机物虚实融合驱动管控机 制,实现工业数据互联互通、人机物数据深度融合。 郭东升等^[3]利用数字孪生技术,结合航天结构件制 造车间的产品、工艺和资源进行建模,提高了车间 生产能力。李西兴等^[4]提出了基于 Web Service 和 数据库中间表的异构数据集成方法,实现了纺织机 械制造数字化智能化管理平台的数据集成与共享。 任杉等^[5]提出一种生命周期大数据驱动的复杂产 品智能制造服务新模式,提升全制造流程和全生命 周期管理的智能决策能力。这些研究主要针对车间 制造物联、数字车间建模、车间数据集成、车间智 能运行与精准管理等方面^[6],目前针对模型动力学 控制方面的研究还较少,尤其是在考虑模型受时间 节拍约束的条件下对孪生模型与实际系统间的真 实映射关系进行建模和处理,还缺乏具体研究。

一条完整的断路器流水线包含设备 24 台套, 包括 1 423 个串行和并行动作,系统零件总数超过 20 000 个,零部件众多,生产流程复杂,为实现孪 生模型映射,需要以实际生产节拍为约束条件,对 孪生模型进行动力学控制,进而实现孪生系统的真 实映射。可以在考虑时间节拍约束的条件下,基于 模型物理属性加载和相应碰撞检测算法,对孪生模 型进行相应控制,完成不同运动逻辑、运动状态的 判断与控制,实现孪生映射关系。

目前主要的碰撞检测算法大致可分为基于几 何空间和基于图像空间两类,其中基于几何空间的 碰撞检测算法包括包围盒法和空间剖分法。于凌涛 等^[7]通过 S-AABB 包围盒进行碰撞检测,并采用分 区域碰撞检测和预测碰撞检测法优化碰撞检测算 法。于瑞云等^[8]利用碰撞检测的时空相关性,对时 空相关的部分进行相交测试,提高碰撞检测的准确 性。熊心一等^[9]提出了静态八叉树与动态八叉树相 混合的空间剖分算法,有效解决医学虚拟教学系统 中计算复杂的问题。于海军等^[10]提出一种基于图像 空间的快速碰撞检测算法,提高碰撞检测效率,满 足碰撞检测实时性的要求。

本文基于断路器制造车间布局及工艺,提出 一种考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学 控制方法,在动力学分析基础上,分析模型不同运 动状态时运动逻辑及其受力情况,建立基于动态八 叉树和多层方向包围盒的碰撞检测算法,优化模型 碰撞过程中的响应时间和信息传递的实时性。结合 实际生产需求,将生产节拍引入模型动力学控制方 案,针对不同生产线生产节拍,通过不同运动状态时 驱动载荷的加载与控制对孪生模型进行调控,实现 断路器孪生车间模型运动的精准控制和实时映射。

1 断路器孪生系统

典型的小型断路器结构如图 1 所示,对于断路 器制造车间,其主体分为装配线和检测线。其中断 路器装配线主要完成零部件的自动化装配,包括自 动装手柄/扭簧、磁系统、磁轭、销轴、总装、检 测等 12 个工艺流程。断路器检测线根据生产需求 进行部分壳外零部件组装以及性能检测,包括单极 穿钉、单极铆合、激光打标、自动延时、多极拼装、 多极穿钉、多极铆合、扫码瞬时、通断耐压、自动 移印、装配卡扣、贴封口塞装配等 12 个工艺流程。





(a) 断路器内部结构
 (b) 断路器外部结构
 图 1 典型小型断路器结构图
 Fig. 1 Circuit diagram of circuit breaker

断路器数字化制造孪生车间系统架构如图 2 所示,包括断路器物理车间、断路器虚拟车间、车 间孪生数据和车间服务系统4部分。

(1) 断路器物理车间

断路器物理车间作为孪生车间的参照,主要由

第 33 卷第 6 期		Vol. 33 No. 6
2021年6月	舒亮, 等: 考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学控制	Jun. 2021

生产线设备、人和环境等组成。通过 PLC 控制器 驱动生产线设备并采集生产线各设备的运动状态 和运动逻辑关系,并通过传感器等设备感知断路器 位置信息,控制和驱动自动化设备运动。

(2) 断路器虚拟车间

虚拟车间包括生产线设备、人和环境等物理模型、物理模型的运动规则。通过对断路器物理车间 三维建模、层级建模和构建孪生体运动规则,引入 实时生产数据控制孪生体运动,实现断路器物理车 间在虚拟空间全要素全流程的真实映射。

(3) 车间孪生数据

车间孪生数据包括物理车间数据、虚拟车间数 据、车间服务系统数据以及三者融合产生的数据等 四部分。车间孪生数据对生产数据集成与共享,实 现孪生系统管理与信息交互,消除信息链路不完整 造成的信息孤岛问题。车间孪生数据融合有助于实 现断路器孪生系统智能生产与决策。

(4) 车间服务系统

车间服务系统由孪生数据驱动的服务系统功 能组成,通过深入底层设备的生产数据采集系统, 管控断路器车间各设备生产状态。并针对车间资源 配置进行分析,优化生产计划与生产过程,实现断 路器孪生系统智能化管控和提高企业生产效率。

断路器数字孪生车间构建过程主要包括数字 孪生建模、数据传输系统和车间服务系统。其中数 字孪生建模流程为:①对断路器实体车间设备进行 全尺寸的几何建模,完成数字化的三维模型;②依 据流水线的实际生产工艺和动作状态对其进行层 级建模和设备运动设计,实现模型层级之间的父子 连动控制:③对复杂模型按"少模型,少顶点"的原 则优化,提高模型的执行效率;④根据断路器流水 线的运动逻辑以及动作之间的配合关系,对车间设 备进行状态建模;⑤结合物理引擎进行模型的动力 学控制、机械设备动作的运动控制以及设备之间协 调运动控制。数据传输系统有助于断路器虚拟车间 与物理车间之间的交互融合,其流程如图3所示。 数据传输系统通过 MODBUS-TCP 协议采集断路 器物理车间设备的运行数据、历史数据等信息,并 在传输系统内部完成数据格式解析、集成任务。处 理后的数据通过TCP协议发送至断路器虚拟车间, 用来驱动断路器车间孪生体运动,并将车间物理数 据与虚拟车间仿真数据送至服务系统,实现车间设 备管控、监测、故障诊断、人机交互、系统漫游等 服务。



图 2 断路器孪生系统组成 Fig. 2 Composition of circuit breaker twin system

http://www.china-simulation.com

1279 •



图 3 数据传输流程图 Fig. 3 Flow chart of data transmission

完整的断路器流水线系统包括两条镜像装配 线和一条检测线,每条单线节拍不相同且相互关 联,并根据实际生产任务柔性可调。孪生系统缺乏 节拍约束和逻辑控制时,孪生模型易出现运动逻辑 错误、运动位姿偏差等问题,在生产节拍约束下对 孪生体进行动力学建模和控制,显得十分重要。

本文提出在节拍约束条件下对断路器孪生车 间进行动力学控制,实现真实孪生映射关系,图4 为考虑节拍约束的模型动力学控制方法流程图。



图 4 考虑节拍约束的模型动力学控制方法流程图 Fig. 4 Flow chart of dynamics control considering production takt time constraints

该流程主要分为3个阶段:在预处理阶段,利 用动态八叉树划分可能发生碰撞的区域,实现多个 区域的独立检测,并根据模型在车间中的运动轨迹 进行距离探测,避免过多的计算消耗。在相交检测 阶段,根据断路器孪生模型几何特点构造多层方向 包围盒,并对每一区域中距离较近、可能发生碰撞 的断路器孪生体包围盒进行相交检测,判断模型之 间是否发生碰撞。通过碰撞检测算法完成孪生模型 不同运动逻辑、运动状态的判断,最后根据模型所 处生产线的时间节拍和生产需求,对碰撞前、碰撞 时、碰撞后的模型进行相应的动力学控制,实现物 理实体和孪生模型在不同运动状态下的孪生映射。

2 碰撞检测算法

2.1 预处理阶段

预处理阶段主要对断路器流水线系统进行空 间剖分,快速获取场景中可能发生碰撞的物体,降 低区域内模型检测数量。八叉树作为三维空间内常 用的空间剖分法,广泛用于虚拟现实系统^[11-12]。由 于断路器孪生车间中孪生体处于动态变化状态,需 要构建根据动态场景快速更新的动态八叉树模型。 根据实际工艺流程,断路器孪生体可分为非碰撞孪 生体和碰撞孪生体。非碰撞孪生体包括装配机构、 检测机构等,无需碰撞检测:碰撞孪生体包括断路 器、阻挡机构等,需要通过动态八叉树进行场景分 割。将整个断路器孪生车间作为根节点,车间划分 为8个小空间,即8个子节点,若某个子节点内碰 撞孪生体数量未达到系统设置容量,则子空间继续 往下划分空间,即子节点划分8个子节点。每个子 空间碰撞孪生体数量随生产过程实时变化,动态八 叉树需要动态状态记录进入子空间的碰撞孪生体 第 33 卷第 6 期 2021 年 6 月

和删除离开子空间的碰撞孪生体。

实际生产过程中,断路器单元在传送带上的运 动轨迹相对固定,可以在子空间内对断路器运动过 程中的距离进行检测和判断,当断路器与前方或后 方断路器模型相隔一定距离时,模型之间开始下一 步的相交检测。若断路器与前方或后方模型相隔距 离较远,即断路器分布处于不集中状态时,模型之 间不进行碰撞检测,从而通过距离探测减轻系统的 计算消耗,节省计算量和时间。

2.2 相交检测阶段

2.2.1 断路器多层方向包围盒的构造

常用包围盒有轴对齐包围盒(AABB)^[13]、包围 球(Sphere)^[14]、方向包围盒(OBB)^[15]和离散有向多 面体(K-DOP)^[16],其结构原理如图 5 所示。根据断 路器模型和阻挡机构特点,使用方向包围盒(OBB) 最为合适,并在此基础上构建更为紧密的多层方向 包围盒结构。



(a) 轴对齐包围盒

(b) 方向包围盒图 5 常用包围盒类型Fig. 5 Common types of bounding boxes

方向包围盒是方向任意且包裹整个物体的长 方体^[17]。方向包围盒表达方式较为简单,获取模型 中心点、一个旋转矩阵和3个半边长可以构造模型 的包围盒。当断路器在生产过程中执行旋转操作 时,包围盒跟随模型旋转,仍紧密包围模型,防止 造成过多的冗余空间。

断路器模型处于流水线系统中时,一部分阻挡 机构作用于断路器上部模型,不接触断路器底部; 另一部分阻挡机构作用于断路器底部模型,不接触 断路器上部。因此,本文采用多层方向包围盒,分 为上层、中层和底层 OBB,图 6 为多层方向包围 盒结构图。上层 OBB 包括整个断路器孪生体,设 计一定冗余空间,用来粗略检测断路器是否碰撞。 中层 OBB 覆盖断路器底部模型,底层 OBB 覆盖断 路器上部模型。这种多层方向包围盒同样适用于阻 挡机构孪生体,通过孪生模型多层方向包围盒相交 结果判断断路器孪生体处于何种运动状态,并对断 路器孪生体做出相应动力学控制,实现孪生映射。



(c) 包围球

图 6 断路器多层方向包围盒结构图 Fig. 6 Structure diagram of multilayer OBB of circuit breaker

2.2.2 多层方向包围盒的相交检测

方向包围盒(OBB)间相交测试基于分离轴理 论进行,若2个方向包围盒在任一轴线上的投影不 重叠,则这条轴为分离轴,可判定这2个方向包围 盒不存在相交可能。分离轴的选取一般为每个包围 盒的3个面方向或2个包围盒边方向的两两叉乘。

第 33 卷第 6 期	系统仿真学报	Vol. 33 No. 6
2021年6月	Journal of System Simulation	Jun. 2021

因此,检测一对方向包围盒是否相交,需测试 15 条可能是分离轴的轴线,如果有一条轴确定 2 个方向包围盒投影不重叠,就可以判定这 2 个方 向包围盒不相交,如果有重叠,则这对包围盒必定 相交^[18]。

断路器孪生车间系统场景规模较大,阻挡气缸 和断路器等碰撞孪生模型数量多达几百,15 条分 离轴的相交计算量过于复杂,影响系统运行速率。 为了减小计算量,本文提出对断路器孪生模型进行 碰撞时的方向进行分析和筛选。断路器生产线中孪 生模型主要沿x, y, z 轴等方向运动, 其中断路器 孪生模型由于跟随对象不同而做出不同种类运动, 其跟随对象可划分为传送带和操作机构。当断路器 跟随传送带运动时,主要沿 x,z 轴运动,此时需 要考虑断路器单体之间的碰撞情况。当断路器跟随 操作机构运动时,主要沿x,y,z轴方向运动,由 于断路器作为操作机构的子对象,遵循"父动子必 动"的运动关系,断路器跟随操作机构脱离传送带 后不存在独立运动,此时无需考虑断路器单体之间 的碰撞。通过运动状态、运动方向的分析和筛选, 当模型间的碰撞集中发生在传送带时,碰撞方向仅 为 x 和 z 轴 2 个,此时包围盒间的 15 条分离轴测 试可简化为两条分离轴,从而大大减少计算量。

碰撞检测过程中,影响计算速率和碰撞响应时 间的另一因素是包围盒的遍历。不同于已有的多层 方向包围盒单重遍历方式,本文提出一种多层方向 包围盒的层级遍历方式。单重遍历是对其中一个模 型的包围盒和另一个模型多个层次的包围盒进行 检测。采用层级遍历,其原理框图如图7所示。模 型A,B相隔所设距离时,模型之间进行相交检测。 首先对模型A,B的上层包围盒对进行相交检测, 在确定上层包围盒对的相交检测结果基础上,再决 定是否进行下一层包围盒对的检测,从而减少碰撞 检测时间。本文根据断路器孪生车间模型的几何特 征进行层级设置,使用某一模型的上层包围盒包含 模型整体,用于粗略检测模型间碰撞。中层和底层 包围盒无共有部分,这种依据碰撞部位设置的层级 关系便于快速判断模型碰撞类型,减少检测时间。 例如,若模型 A 的上层包围盒与模型 B 的上层包 围盒相交,则继续进行 A, B 中层包围盒对的相交 检测。当 A 的中层包围盒与 B 的中层包围盒相交, 此时根据模型运动姿态即可判断模型之间发生碰 撞,不再进行 A, B 底层包围盒对的相交检测,减 少计算消耗。当 A 的中层包围盒与 B 的中层包围 盒不相交,根据模型运动姿态判断出 A, B 为断路 器和阻挡机构,并且模型之间即将发生碰撞。此时 进行 A, B 的底层包围盒对的相交检测,当系统继 续运行直到底层包围盒对相交,则判断模型间已经 发生碰撞,并传递碰撞信息。采用多层方向包围盒 的层级遍历方式可有效减少场景的运行消耗,提升 计算速率。





3 考虑节拍约束的模型动力学控制

将断路器孪生体运动过程分为碰撞前、碰撞时 和碰撞后 3 个阶段,在对断路器单体和配套流水 线系统进行运动检测和判断的基础上,结合实际 生产线的时间节拍约束,对孪生体进行相应动力 学控制。

3.1 模型碰撞前的动力学控制

(1) 不同生产线的节拍约束

断路器孪生车间中非碰撞孪生体和阻挡机构 的运动由状态建模和触发事件控制,首先需要实现 断路器由静止到随传送带匀速运动的过程。实体车 间中断路器与传送带之间存在摩擦力,依靠摩擦力

第 33 卷第 6 期		Vol. 33 No. 6
2021年6月	舒亮, 等: 考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学控制	Jun. 2021

实现位移的传递。断路器孪生车间包括两条镜像的 装配流水线和一条检测流水线,对断路器孪生体进 行动力学控制时需要考虑不同生产线的节拍约束。 根据断路器实体车间检测线的日工作时间、日产量 和不合格率等信息,推导检测流水线的生产节拍为 *k*₈,通过式(1)进行计算:

$$k_{\beta} = \frac{T}{\mu(1+\sigma)} \tag{1}$$

式中: T 为车间日工作时间; μ 为产量; σ 为产品 不合格率。装配线的节拍是检测线的 2 倍, 即:

$$k_{\alpha} = 2k_{\beta} \tag{2}$$

进行断路器孪生体运动控制时,需要判孪生体 模型处于何种状态,即位于何种工艺步骤,进而通 过生产节拍计算相应的传送带运动速度。基于式(1) 和式(2),在检测线传送带末端测量产品间距,进而 得到检测线传送带运动速度 *v_e*:

$$\begin{cases} v_{\beta} = \Delta S/k_{\beta} \\ v_{\alpha} = \frac{1}{2}v_{\beta} \end{cases}$$
(3)

式中: ΔS 为传送带末端的产品间距; v_a 为装配线 传送带速度。以断路器检测线为例,从传送带位移 传感器获取断路器点到点的时间 t 和距离 S,其中 点到点的时间 t包括断路器加速时间 t_0 和匀速运动 时间 t_1 ,进一步得到断路器加速过程的加速度 a, 再结合牛顿力学公式得到断路器孪生体的驱动力 大小,即:

$$\begin{cases}
F_{\beta} = ma \\
S = \frac{1}{2}at_{0}^{2} + v_{\beta}t_{1} \\
t_{0} + t_{1} = t \\
v_{\beta} = at_{0}
\end{cases}$$
(4)

式中: F_{β} 为检测线中断路器所受合力; a 为断路器 加速运动过程中的加速度。通过动力学方程组求得 断路器由静止至匀速运动所需合力 F_{β} ,即为加载 到断路器的驱动力。当断路器运动速度与传送带匹 配时,调整驱动力为0,此时断路器跟随传送带进 行匀速运动。采用类似的分析方法,结合式(4)可得 到装配线中断路器模型的驱动力 F_{a} 。

(2) 柔性节拍时的动力学控制

断路器制造车间进行实际生产时,需要根据需 求生产一极至四极不同型号的断路器产品,断路器 极数不同时,其生产节拍相应发生变化,因此需要 根据订单需求进行柔性节拍的动力学控制。

断路器镜像装配线不涉及产品拼装工艺,其生 产节拍无需调整。多极断路器需要对单极断路器进 行拼装、铆合等操作,不同型号断路器的时间节拍 与断路器极数有关。通过式(1)可以得到单极断路器 的检测线节拍 *k*_ρ,则生产多极断路器时检测线的节 拍为:

$$k_n = \lambda k_\beta \tag{5}$$

式中: λ 为断路器极数; k_n为多极断路器检测线节 拍。多极断路器检测线的时间节拍随断路器极数柔 性调整,对非碰撞孪生体运动产生影响。为实现一 至四极断路器的柔性节拍控制,针对不同型号断路 器设计非碰撞孪生体运动逻辑,柔性调整其运动轨 迹。其中多极穿钉、多极铆合和多极拼装等工艺单 元主要作用于多极断路器,对其进行逻辑脚本控 制,根据实际工艺编辑不同运动路径。并通过检测 不同断路器极数对脚本进行切换和控制,从而实现 非碰撞孪生体模型与节拍的柔性化匹配。如单极穿 钉、移印等工艺步骤,单极穿钉机构生产单极断路 器时,下料 5 个铆钉;多极断路器时下料 2 个铆钉。 移印机构内部可以容纳 4 个单极断路器,或 2 个二 极断路器,或 1 个三极断路器,或 1 个四极断路器, 通过脚本切换可以执行不同运动动作。

对于碰撞孪生体模型的影响,进行多极断路器 生产时,断路器模型在传送带上的间距与断路器极 数成正比,模型运行时间与其间距的比例关系不 变,因而不受柔性节拍的影响。但多极断路器的质 量增大,由质量 *m* 变为λ*m*,此时计算驱动力大小时 需要相应乘以极数λ,进而得到相应的驱动力大小。

3.2 模型碰撞时的动力学控制

断路器孪生体随传送带匀速运动时,其合力为 0。当碰撞发生时,由于碰撞力的存在,断路器无

第 33 卷第 6 期	系统仿真学报	Vol. 33 No. 6
2021年6月	Journal of System Simulation	Jun. 2021

法快速进入静止状态,容易出现模型抖动现象。通 过碰撞信息的检测,可以对断路器模型进行动力学 控制,调整其在传送带上的受力情况,使其合力快 速趋于零,减少模型抖动,图8为发生碰撞时模型 的动力学控制流程图。



图 8 碰撞时断路器模型的动力学控制流程图 Fig. 8 Flow chart of dynamics control during collision

传送带上的阻挡机构与断路器发生碰撞,此时 建立断路器集合 C,并记录当前断路器的运动状 态,标记为C1。当后续断路器与C1碰撞时,记录 后续断路器运动状态并标记为 C2, 直至没有后续 断路器与 C 中断路器发生碰撞。集合 C 新增断路 器时,首先获取新增断路器的运动状态,判断其在 碰撞前是否达到匀速状态。若新增断路器处于匀速 状态,则冻结其在传送带上的移动和旋转等行为, 即冻结断路器在 x, y, z 轴上的位移和绕轴旋转等 行为,使断路器尽快进入静止状态。若新增断路器 处于加速状态,则取消碰撞前加载到断路器上的驱 动力,再冻结其在传送带上的移动和旋转等行为, 使断路器合力在较快情况下趋于零。集合 C 中断 路器进入静止状态后,断路器运动状态保持稳定, 不受后续断路器产生的碰撞冲击影响,减少孪生模 型抖动。

3.3 模型碰撞后的动力学控制

实际生产中,阻挡机构撤离传送带时,断路器 通过摩擦力作动,跟随传送带重新加速运动,进入 下一操作环节。断路器孪生模型发生碰撞时,借助 阻挡机构依次将发生碰撞的断路器记录到集合*C*。 阻挡机构撤离时,集合*C*中断路器重新运动,对 断路器解除移动和旋转等行为冻结,并根据生产线 和断路器极数对其施加驱动力,直至断路器随传送 带匀速运动。注意到,此时驱动力的计算以及柔性 节拍的匹配控制,与3.1节中的控制方案相同,直 至断路器模型发生阻挡碰撞并进入下一工艺环节。

4 实验结果及分析

基于 Microsoft Visual Studio 2015 和 Unity 3D 5.5.2f1 平台联合开发了面向断路器数字化制造的 孪生系统,系统总体界面及部分功能模块如图 9 所 示。总体界面包括车间看板、设备看板和车间生产 线等 3 部分,孪生数据包括工艺数据、设备动作逻 辑数据、生产数据、设备状态数据等,一方面用于 驱动孪生体车间模型的运动与控制,同时用于实时 监测设备运行于生产状态,包括故障、报警、生产 进度、OEE、产品合格率等数据进行集成、可视化 管理和监控。此外,通过数据管理服务系统,根据 断路器生产线运行、生产等信息,快速、动态地对 生产异常、订单调整等事件进行实时响应和决策, 优化系统资源。

在所开发孪生系统基础上,对所提出的动力学 控制方法及效果进行验证,分别对比了碰撞检测响 应时间、检测精度和模型运动稳定性3项内容。以 Unity 3D 自带的响应函数为对象,分别进行四次对 比,对比结果如表1所示。可以看到,对于相同的 相交检测次数,所提出方法消耗的时间更少,优化 效果最高达到 15%。检测精度的对比结果如表 2 所示,通过测量脚本发送碰撞信息时孪生模型间几 何距离计算精度参数,分别进行 10 次测量。表 2 中的对比结果显示,Unity 3D 函数检测到碰撞信息 时,模型间距仍较大,存在一定误差。通过所提出

第 33 卷第 6 期	
2021年6月	

Vol. 33 No. 6 Jun. 2021

的断路器层级包围盒相交检测方法,模型包围盒间 交叠程度极小,精度更高,相比 Unity 3D 检测函 数,精度提高 96.26%。



(a) 总体界面



(b) 故障预警功能

图 9 孪生系统总体界面及部分功能模块 Fig. 9 Overall interface of the twin system and the functional modules

表1 碰撞检测的响应时间

Tab. 1	Response time for collision detection			
包围盒相交	Unity 3D 响	本文算法	本文算法	
检测次数	应时间/s	响应时间/s	优化效率/%	
500	10	9	10	
1 000	20	17	15	
3 000	60	51	15	
10 000	200	170	15	

对断路器模型动力学控制进行验证,分别对比 未施加控制(方案 1)和在节拍约束基础上进行动力 学控制(方案 2)时,断路器模型发生碰撞的速度和 加速度曲线,其结果如图 10,11 所示。从对比结 果可以看到,断路器模型在驱动力作用下快速完成 加速过程,随传送带做匀速运动。未进行控制约束 时,模型抖动现象较明显,并且受到流水线上后续 断路器连续冲击影响,速度曲线出现振荡,类似的 现象在图 11 所示的加速度曲线也可以观测到。

and this algorithm			
松洞京早	Unity 3D 检测精	本文算法检测	
1型	度/m	精度/m	
1	0.016 638 33	-9.72E-05	
2	0.017 441 33	-0.000 576 92	
3	0.016 238 74	-0.000 818 199	
4	0.016 238 74	-0.000 576 92	
5	0.016 640 24	-0.000 817 245	
6	0.016 641 19	-0.000 817 245	
7	0.016 638 33	-0.000 817 722	
8	0.017 441 33	-0.000 576 92	
9	0.016 640 24	-0.000 577 873	
10	0.016 638 33	-0.000 577 873	
差值	0.001 202 93	0.000 720 978	
平均值	0.016 719 68	-0.000 625 414	

表 2 Unity 3D 和本文算法的检测精度对比

Tab. 2 Comparison of detection accuracy between Unity 3D



图 10 断路器孪生模型的速度曲线对比





http://www.china-simulation.com

第 33 卷第 6 期	系统仿真学报	Vol. 33 No. 6
2021年6月	Journal of System Simulation	Jun. 2021

在节拍约束的基础上进行动力学控制,从图 10,11 中的速度和加速度曲线可以看到,模型振 动较小,断路器模型可以快速进入静止状态,从而 提高孪生系统的平稳与运行稳定性。

5 结论

数字孪生技术是当前智能制造领域的一个重 要研究方向,实现数字孪生的一个重要前提是孪生 体要实时、忠实反应物理实体的运动状态、运动规 律,能够形成高保真、高精度的动态多维/多尺度/ 多物理量模型映射关系。针对不同应用场景,实现 这一映射关系的具体问题和难度又各不相同。本文 针对断路器实际制造车间生产布局和实际生产需 求,提出一种考虑节拍约束的孪生模型动力学控制 方法,有助于指导以流水线为主要制造模式的数字 孪生车间的构建和孪生体模型的控制。本文利用动 态八叉树和多层方向包围盒等碰撞检测算法,显著 改善孪生模型碰撞的响应时间和检测精度,实现孪 生系统的真实映射关系。碰撞响应时间最大减少 15%,碰撞检测精度提高96.26%,并且通过模型动 力学控制,减少了断路器孪生模型碰撞过程中的抖 动现象,提升了孪生系统运行的平稳与可靠性。

参考文献:

 赵浩然,刘检华,熊辉,等.面向数字孪生车间的三维 可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
 Zhao Haoran, Liu Jianhua, Xiong Hui, et al. 3D

Visualization Real-time Monitoring Method for Digital Twin Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(6): 1432-1443.

- [2] 王时龙,王彦凯,杨波,等.基于层次化数字孪生的工业互联网制造新范式——雾制造[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3070-3080.
 Wang Shilong, Wang Kaibo, Yang Bo, et al. Fog Manufacturing: New Paradigm of Industrial Internet Manufacturing based on Hierarchical Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(12): 3070-3080.
- [3] 郭东升,鲍劲松,史恭威,等.基于数字孪生的航天结 构件制造车间建模研究[J].东华大学学报(自然科学

版), 2018, 44(4): 578-585, 607.

Guo Dongsheng, Bao Jinsong, Shi Gongwei, et al. Research on Modeling of Aerospace Structural Parts Manufacturing Workshop based on Digital Twin[J]. Journal of Donghua University(Natural Sciences), 2018, 44(4): 578-585, 607.

- [4] 李西兴, 郭顺生, 杜百岗. 纺织机械制造企业数字化智能化制造与管理平台设计与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 672-685.
 Li Xixing, Guo Shunsheng, Du Baigang. Design and Implementation of Digital & Intelligent Management Platform for Textile Machinery Manufacturing Enterprise[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(3): 672-685.
- [5] 任杉,张映锋,黄彬彬. 生命周期大数据驱动的复杂产品智能制造服务新模式研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 194-203.
 Ren Shan, Zhang Yingfeng, Huang Binbin. New Pattern of Lifecycle Big.Data-Driven Smart Manufacturing

of Lifecycle Big-Data-Driven Smart Manufacturing Service for Complex Product[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 194-203.

[6] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合 理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
Tao Fei, Cheng Ying, Cheng Jiangfeng, et al. Theories

and Technologies for Cyber-Physical Fusion in digital Twin Shop-Floor[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(8): 1603-1611.

[7] 于凌涛, 王涛, 宋华建, 等. 面向虚拟手术的碰撞检测 优化算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(9): 1164-1170.
Yu. Lington, Wang, Tao, Song, Husilian, et. al. An

Yu Lingtao, Wang Tao, Song Huajian, et al. An Optimization Algorithm of Collision Detection Applied to Virtual Surgery[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(9): 1164-1170.

 [8] 于瑞云,赵金龙,余龙,等.结合轴对齐包围盒和空间 划分的碰撞检测算法[J].中国图象图形学报,2018, 23(12):1925-1937.

Yu Ruiyun, Zhao Jinlong, Yu Long, et al. Collision Detection Algorithm Based on AABB Bounding Box and Space Division[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(12): 1925-1937.

[9] 熊心一,姚字.基于混合八叉树的动态对象碰撞检测 算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(增1): 96-99.
Xiong Xinyi, Yao Yu. Dynamic Object Collision Detection Algorithm based on Hybrid Octree[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(S1): 96-99.

第 33 卷第 6 期				Vol. 33 No. 6
2021年6月	舒亮,	等:	考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学控制	Jun. 2021

- [10] 于海军,马纯永,张涛,等. 基于图像空间的快速碰撞 检测算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(2): 530-533.
 Yu Haijun, Ma Chunyong, Zhang Tao, et al. Fast Collision Detection Algorithm based on Image Space[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(2): 530-533.
- [11] 刘晓平, 余烨, 孔洁琼, 等. 一种协同渲染环境下的场景管理策略[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 85-88.
 Liu Xiaoping, Yu Ye, Kong Jieqiong, et al. Scene Management Method in Collaborative Rendering Environment[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 85-88.
- [12] 傅由甲.动态八叉树在复杂场景设计中的应用[J].系统仿真学报,2006,18(增 2):408-410.
 Fu Youjia. Application of Dynamic Octrees in Complex 3D Scene Design[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(S2):408-410.
 [13] 潘振宽,李建波.基于压缩的 AABB 树的碰撞检测算
- [15] 潘振觉, 字建设. 盔丁压缩的 AABB 树的碰撞检测算 法[J]. 计算机科学, 2005, 32(2): 213-215.
 Pan Zhenkuan, Li Jianbo. The Collision Detection Algorithm based on Compressed AABB Trees[J]. Computer Science, 2005, 32(2): 213-215.
- [14] 靳雁霞, 秦志鹏, 李照. 融合R-Sphere包围球的变形体 碰撞检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 92-96.

Jin Yanxia, Qin Zhipeng, Li Zhao. Deformation Collision Detection Algorithm Fusing R-Sphere Bounding Volume[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(1): 92-96.

- [15] 史旭升, 乔立红, 朱作为. 基于改进 OBB 包围盒的碰 撞检测算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 26-31.
 Shi Xusheng, Qiao Lihong, Zhu Zuowei. Algorithm of Collision Detection based on Improved Oriented Bounding Box[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2014, 41(5): 26-31.
- [16] 姜波. 基于 K-DOPs 包围盒碰撞检测算法的改进[J]. 燕山大学学报, 2008, 32(4): 351-355.
 Jiang Bo. A Mended Collision Detection Algorithm based on K-DOPs[J]. Journal of Yanshan University, 2008, 32(4): 351-355.
- [17] 王培俊, 王文静, 陈鹏, 等. 基于 OBB 算法和前向预防的快速碰撞检测[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 1003-1007.

Wang Peijun, Wang Wenjing, Chen Peng, et al. Rapid Collision Detection based on OBB Algorithm and Penetration Avoidance Mechanism[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 1003-1007.

[18] 宁涛, 郭晨, 张升文. 用混合包围盒优化碰撞检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(1): 1-3.
Ning Tao, Guo Chen, Zhang Shengwen. Optimization of Collision Detection Method using Hybrid Bounding Box[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(1): 1-3.