

11-20-2019

## Cloud-end Cooperative Manufacturing and Simulation Application in Electrical Equipment Industry

Ruijie Shi

*1.State Grid Electronic Commerce Co., Ltd., Beijing 100053, China;;*

Zou Ping

*2.Beijing Aerospace Smart Manufacturing Technology Development Co., Ltd., Beijing 100039, China;;*

Xike Wu

*3.NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China;;*

Liu Gang

*2.Beijing Aerospace Smart Manufacturing Technology Development Co., Ltd., Beijing 100039, 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.

---

# Cloud-end Cooperative Manufacturing and Simulation Application in Electrical Equipment Industry

## Abstract

**Abstract:** Electrical equipment manufacturing industry hopes to achieve cloud-end cooperative manufacturing of the whole industry chain services by means of national network e-commerce cloud platform. On the basis of explaining the role of simulation in cloud-end cooperative manufacturing, this paper analyses the practical problems faced by enterprises in electrical equipment industry to realize cloud-end cooperative manufacturing, and presents effective solutions and overall solution; *all kinds of the necessary application services are provided, which coincide with the actual requirement of electrical equipment manufacturing industry; and the research results of the key problems for realization about them are introduced. The overall industry chain service process is constructed. The practical application situation and application effect of an electrical equipment manufacturing enterprise cloud-end cooperative manufacturing and simulation verification are given.*

## Keywords

cloud-end cooperative manufacturing, simulation verification, State Grid e-commerce cloud platform, electrical equipment manufacturing industry

## Authors

Ruijie Shi, Zou Ping, Xike Wu, Liu Gang, Gao Chen, Junyuan Zhang, Li Lin, and Guo Li

## Recommended Citation

Shi Ruijie, Zou Ping, Wu Xike, Liu Gang, Gao Chen, Zhang Junyuan, Li Lin, Guo Li. Cloud-end Cooperative Manufacturing and Simulation Application in Electrical Equipment Industry[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 771-786.

# 电工装备行业云端协同制造及仿真应用研究

石瑞杰<sup>1</sup>, 邹萍<sup>2</sup>, 吴夕科<sup>3</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 高晨<sup>1</sup>, 张俊媛<sup>2</sup>, 李琳<sup>4</sup>, 郭立<sup>2</sup>

(1.国网电子商务有限公司, 北京 100053; 2.北京航天智造科技发展有限公司, 北京 100039;  
3.南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106; 4.国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

**摘要:** 电工装备制造行业希望借助国网电商云平台, 实现各企业云端协同制造全产业链服务。本文在阐述仿真在云端协同制造中的作用基础上, 通过对电工装备行业各企业实现云端协同制造所面临的实际问题分析, 给出了有效解决途径及总体解决方案; 并结合行业需求提出了所提供的各类云端服务, 对实现的关键问题进行了研究; 并通过全产业链服务流程的构建, 实现了全产业链协同服务。给出了该平台在某电工装备制造企业云端协同制造及仿真验证的实际应用情况及效果。

**关键词:** 云端协同制造; 仿真验证; 国网电商云平台; 电工装备制造行业

中图分类号: TP319 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0771-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0613

## Cloud-end Cooperative Manufacturing and Simulation Application in Electrical Equipment Industry

Shi Ruijie<sup>1</sup>, Zou Ping<sup>2</sup>, Wu Xike<sup>3</sup>, Liu Gang<sup>2</sup>, Gao Chen<sup>1</sup>, Zhang Junyuan<sup>2</sup>, Li Lin<sup>4</sup>, Guo Li<sup>2</sup>

(1.State Grid Electronic Commerce Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2.Beijing Aerospace Smart Manufacturing Technology Development Co., Ltd., Beijing 100039, China; 3.NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Electrical equipment manufacturing industry hopes to achieve cloud-end cooperative manufacturing of the whole industry chain services by means of national network e-commerce cloud platform. On the basis of explaining the role of simulation in cloud-end cooperative manufacturing, this paper analyses the practical problems faced by enterprises in electrical equipment industry to realize cloud-end cooperative manufacturing, and presents effective solutions and overall solution; *all kinds of the necessary application services are provided, which coincide with the actual requirement of electrical equipment manufacturing industry; and the research results of the key problems for realization about them are introduced. The overall industry chain service process is constructed. The practical application situation and application effect of an electrical equipment manufacturing enterprise cloud-end cooperative manufacturing and simulation verification are given.*

**Keywords:** cloud-end cooperative manufacturing; simulation verification; State Grid e-commerce cloud platform; electrical equipment manufacturing industry

## 引言

当今世界掀起智能制造工业革命的浪潮, 德国



收稿日期: 2018-09-14 修回日期: 2019-01-17;  
作者简介: 石瑞杰(1973-), 男, 河南宜阳, 硕士, 高工, 研究方向为智慧供应链与工业互联网; 邹萍(1985-), 男, 北京, 博士, 高工, 研究方向为云平台、大数据与工业互联网。

提出“工业 4.0”、美国提出“先进制造业国家”, 我国提出“中国制造 2025”的强国战略<sup>[1]</sup>。云协同制造<sup>[2]</sup>是一种智能制造的新模式, 通过利用云平台, 将各类制造资源及制造能力虚拟化、服务化, 实现制造资源的集中管理和共享, 为各行业各企业实现产品制造过程的全产业链服务<sup>[3]</sup>, 提供可随时获取、安全可靠的云端协同服务。

我国电工装备行业各企业专业化程度日益提高, 协同生产制造的需求日益增多。迫切需要应用先进的互联网+技术<sup>[4]</sup>, 打造行业应用云平台<sup>[5]</sup>, 来实现云端协同制造的新模式。目前, 电工装备行业已打造了国网电商云平台, 希望借助于国网电商平台提供对电工装备行业各企业云端协同制造全产业链应用服务支撑。

本文在说明仿真在云端协同制造中的作用基础上, 指明了电工装备行业实现云端协同制造及仿真的有效途径。基于此, 对电工装备行业如何实现云端协同制造及仿真应用问题进行了研究, 并给出了电工装备行业某企业的具体应用实例。

## 1 仿真在云端协同制造中的作用

云端协同制造包括产品的云端协同设计、云端生产资源计划管理、云端生产运行管理 3 个过程。这 3 个过程间顺序相连, 具体如下:

通过云端协同设计过程, 可使得参与产品设计的各协同方, 在云端设计资源统一管理的基础上, 相互协同最终形成产品设计模型。该产品设计模型将是云端资源计划管理过程的输入, 根据产品设计模型 BOM、相关物料信息及加工工序信息及获取的各协同企业的生产资源及专业加工能力等信息, 通过云端资源计划管理的排产功能, 最终形成产品的排产结果, 实现对各协同企业生产资源的统筹规划, 最大化利用。

同时, 云端资源计划管理过程所产生的排产计划又是云端生产运行管理过程的输入之一, 云端生产运行过程根据输入的排产计划, 结合产线及设备的实际运行能力和运行状态, 实现对产品的工艺生产。并通过云端生产运行管理, 实时监控生产运行状态, 并根据生产运行状态进行适时调整, 实现产线最大生产效率的运行。

在上述 3 个云端协同过程之中, 前一个过程结果是另一个过程结果的输入, 结果的优劣对后一个过程及整个云端协同制造<sup>[8]</sup>都会有产生重要的影响。为此, 需要对每一个过程的结果进行验证或优

化, 才能确保云端协同制造的顺利实现。仿真技术<sup>[6-7]</sup>目前在产品设计模型<sup>[9]</sup>、生产作业排序<sup>[10]</sup>及产线生产平衡问题<sup>[11-12]</sup>的验证与优化问题中均得到了应用, 具体说明如下:

数字虚拟仿真技术<sup>[13]</sup>可以模拟产品设计结构, 全方位解析产品的结构、各方面性能参数, 从而实现产品设计的各种参数指标最优。在产品设计中, 通过产品虚拟仿真建模及运行, 可以获得对产品的一个完整认识。利用数字化虚拟手段可实现产品形态仿真、颜色材质仿真、机械动作仿真、人体工学仿真、工艺制作等方面的仿真。已有学者利用 VB.NET 作为开发工具对 AutoCAD 进行了二次开发, 实现了在 AutoCAD 环境下的三维零件实体虚拟拆装的动态仿真。该方法能够自动完成零件图的自动拆卸和装配过程的模拟, 对于实际产品设计及相关过程有一定的示范作用。

生产作业排序<sup>[14]</sup>是资源排产结果中的主要内容, 合理的生产作业排序可以有效缩短生产周期, 增加生产系统柔性。可以通过仿真软件建立相应的仿真模型, 对其中的参数进行优化。例如, 有的学者针对车间作业排序问题采用仿真和优化算法相结合的方式进行研究, 建立了采用 UML 分析的车间作业计划仿真优化系统框架, 并在 Plant Simulation 仿真软件中进行实现, 应用遗传算法优化模型参数实现最优排序。在此基础上, 有的学者采用了改进的工序编码方法进行车间作业排序优化, 并利用遗传算法对 Plant Simulation 仿真模型中的参数进行优化。

产线生产平衡问题<sup>[15]</sup>是将有限的任务分配给各加工产线, 在保证各任务加工顺序的前提下实现各产线作业节拍和任务负荷的相同或近似相同, 以此提高产线生产效率的方法。对于产线生产平衡问题, 也可通过输入产线生产的实际情况模拟出现实产线生产状况, 并利用仿真软件及其内置的优化模块, 实现产线生产效率的优化。很多学者研究了基于 Plant Simulation 仿真的生产线或总装线的优化问题, 并以生产线(总装线)产量、设备利用率、工

作负荷以及有无瓶颈工序等为侧重点或指标来衡量产线的平衡性<sup>[16]</sup>。

上述仿真技术应用情况说明,完全可通过仿真实现对云端协同制造中 3 个过程结果的仿真验证及优化。故此,可将仿真融入云端协同制造之中,通过构建云端协同仿真服务,将其与云端协同制造的 3 个过程有机融合,实现对各过程结果的合理性验证与优化,以确保云端协同制造过程得以顺利实现及获得最佳的整体运行效率。

## 2 电工装备行业云端协同制造与仿真应用问题分析

### 2.1 云端协同制造与仿真需求描述

电工装备行业为我国的电力发展做出了卓越的贡献,支撑了国家不断升级的电力网建设。但是,随着技术的发展,行业设备越来越高端、先进、精细,单一企业很难独立完成全部制造流程,需要越来越多的企业分工协作。

而现有各企业的信息系统建设,都只涵盖固定数量的资源或特定的业务应用服务,不能实现面向行业的全产业链服务,难以满足协同生产的要求。由此,出现了一系列管理瓶颈,表现出缺乏动态性、响应慢、扩展性差等诸多问题,造成资源浪费,效率低下,制约行业整体发展。为此,迫切需要建立云平台并在云平台之上实现云端协同生产制造及仿真。通过对电工装备行业内多家企业的实际调研,电工装备行业实现云端协同制造及仿真验证面临的问题如下:

#### 1. 需要云端协同设计中的图文档管理

各电工设备需要企业间的协同设计。在整个协同设计过程中,需要对大量的产品设计信息进行多方面的沟通,其中设计信息包括图纸、生产工艺、作业要求等多种技术资料。同时,需要有完整的研发文档版本控制和变化信息跟踪。为此,需要国网电商平台上实现对协同设计过程中的各类图文档的统一管理与设计资源共享。

#### 2. 需要云端生产资源计划管理中的资源排产

电工装备行业各企业生产过程相对复杂,包括品类繁多的零件采购、部件外协等活动。生产资源的统筹安排可确保各企业生产有序进行,同时实现资源效率的最大化利用。否则,就会出现缺料或库存积压等情况,影响企业生产效率。需要在国网电商平台上提供云端生产排产应用服务,提升企业资源利用率。

#### 3. 需要云端生产运行管理中的产线设备管理

电工装备行业各企业生产过程以设备为基础,需要实时掌握设备运行状态,设备加工信息,远程获得设备故障信息。这些都是企业提高生产效率、实现设备远程维护和提升产品质量的关键因素。需要在国网电商平台上提供云端设备管理服务。通过将产线及设备数据接入国网云平台之后,实现对产线设备的有效管控,做到远程实时监控。

#### 4. 需要云端协同制造的仿真验证与优化

对于电工装备行业云端协同制造过程,需要对协同设计后的产品模型进行仿真验证,确保产品模型的合理性。同时,需要将资源计划管理中的排产计划结果进行仿真验证;也需要通过远程监控所掌握的设备及产线实际生产能力及生产运行状态,结合排产计划,对产线设备进行仿真和优化调整。

### 2.2 云端全产业链服务需求

针对上述云端协同制造与仿真的实际业务需求,电工装备行业希望借助于已打造的国网电商平台,来实现对整个电工装备行业的从产品云端供需对接、云端协同制造与仿真及云端销售服务的全产业链服务需求。

现有的国网电商云平台虽然已经实现了电子商务应用服务环节,但是由于该平台并没有关于电工装备行业各企业云端协同制造与仿真方面的应用服务,不仅无法满足上述云端协同制造与仿真方面的行业需求;更无法与现有电子商务业务进一步有机融合,无法形成对电工装备全行业各企业的全产业链服务的支撑。

## 2.3 有效解决途径

基于上述电工装备行业各企业云端协同制造与仿真和云端全产业链服务应用问题,我们提出如下有效解决途径:

1. 构建基于国网电商云平台的总体解决方案,结合现有国网电商云平台的架构,从行业需求出发,提供可满足电工装备行业各企业云端协同制造及全产业链服务的解决方案。

2. 云端协同制造各应用服务构建 基于总体解决方案,结合电工装备行业各企业云端协同制造与仿真实际业务需求,明确需要在国网电商平台之上所提供的各应用服务及服务内容,并对服务实现的关键问题展开研究。

### 3. 全产业链服务流程构建与实现

在明确各应用服务内容及服务内容的基础上,进一步构建电工装备行业的全产业链服务流程;并研究如何在国网电商平台实现相应全流程支撑服务。

## 3 云端协同制造与仿真总体解决方案

基于上述解决途径,我们在国网电商云平台的已有架构基础上,给出了云端协同制造与仿真应用的总体解决方案,如图 1 所示。

在图 1 所示的国网电商平台总体解决方案,共包括资源层、接入层、平台服务层、行业应用层 4 层,为电工装备制造提供云端协同制造与仿真等提供相应的服务能力。

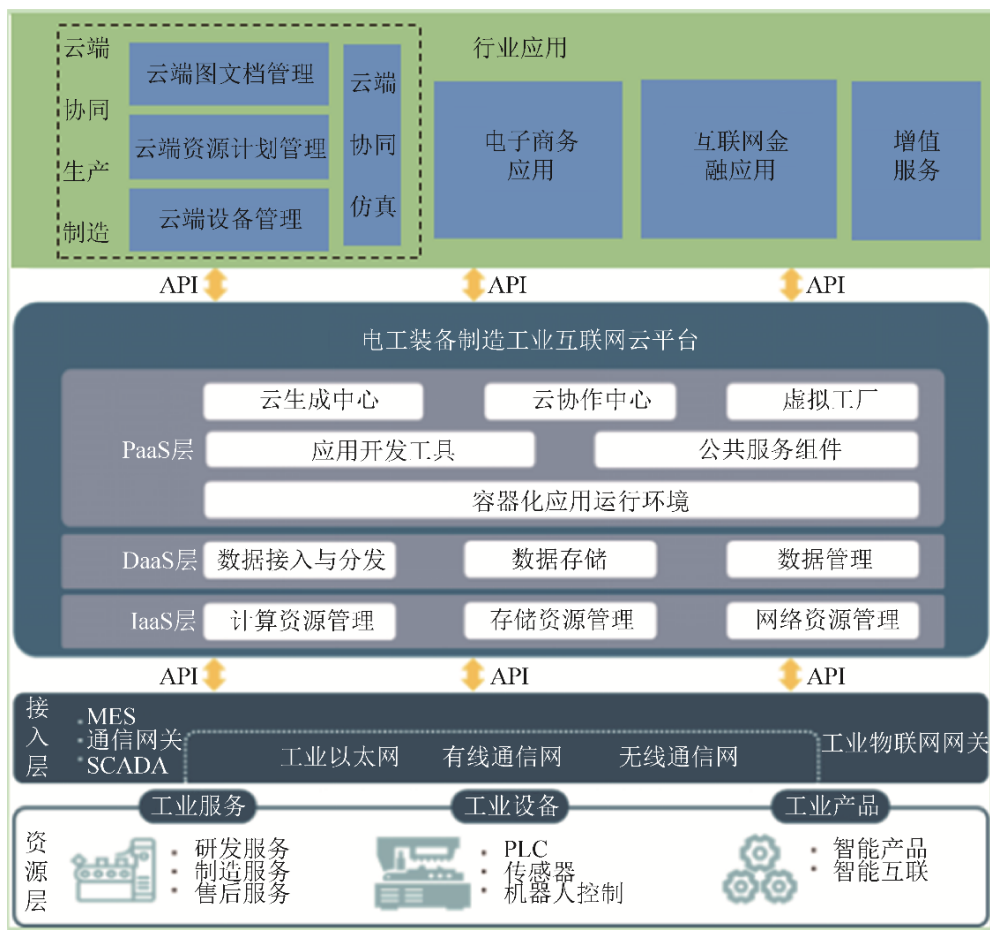


图 1 电工装备行业云端协同制造及仿真总体解决方案

Fig. 1 Overall solution scheme of cloud-end cooperative manufacturing & simulation in electrical equipment manufacturing industry

资源层支持各类电工装备制造现场工业服务、工业设备和工业产品等全要素的接入。接入层建立开放的制造设备接口标准规范, 实现各类工业制造资源的通信互联互通; 平台服务层包括: IaaS 层提供的基础设施服务; DaaS 层提供的大数据存储、治理和分析服务和应用运行环境服务; PaaS 层提供的云生产、云协作中心虚拟电工装备应用基础设施和运行环境服务基础服务。

最顶层的行业应用层: 除了目前已有的电子商务应用服务、互联网金融应用服务和增值服务外, 还需要提供云端协同制造及仿真应用服务, 包括: 云端图文档管理、云端资源计划管理、云端产线设备管理及云端协同仿真四类应用 APP 服务。进而,

将这 4 类服务与原有电子商务服务进行融合, 在国网电商平台上形成面向电子工装备行业各企业全产业链服务。

最顶层的行业应用层: 除目前已有的电子商务应用服务、互联网金融应用服务和增值服务外, 还需提供云端协同制造及仿真应用服务, 包括: 云端图文档管理、云端资源计划管理、云端产线设备管理及云端协同仿真 4 类应用 APP 服务。将这 4 类服务与原有电子商务服务进行融合, 在国网电商平台形成面向电子工装备行业各企业全产业链服务。

## 4 电工装备行业云端协同制造及仿真应用关键问题研究

基于上述解决方案, 若想在国网电商云平台之上实现云端协同制造及仿真应用乃至全产业链服务。需要实现云端协同制造及仿真各类应用服务; 再将各类应用服务与国网电商平台的电子商务服务进行融合, 形成云端全产业链服务。本部分阐述对这两个关键问题进行研究后, 所形成的研究成果。

### 4.1 各应用服务内容

根据前述电工装备行业各企业在实现云端协同制造及仿真的实际业务需求, 我们首先在国网电商云平台之上提供如下满足需求的各类应用服务。

具体如下:

#### 1) 云端图文档管理服务

云端图文档管理提供产品协同设计过程的图文档管理功能。管理对象包括: 产品图纸、技术文档、工艺文档、标准操作手册等产品生产技术文档。可实现技术资料进行分类存储管理, 同时还能进行版本控制, 文档共享, 签入签出控制, 方便企业快速查找提取资料, 跟踪产品技术路径。提供企业产品的设计管理, 能够完善产品结构, 并对数据进行管理和跟踪相关信息的变化, 实现研发资源共享。此外, 具备产品 BOM 管理功能、控制 BOM 版本, 可为云端资源计划管理服务提供产品基础数据及模型。

#### 2) 云端资源计划管理服务

云端资源计划管理, 提供基于有限产能排产的高级应用服务, 又称云排产。企业将自身的销售订单信息、物料信息、产品的设计 BOM、工艺信息、产线能力信息、库房信息输入到云端资源计划管理进行排产运算, 可以实现企业各类资源利用率的提高, 保证生产任务如期完成。如果自身资源不足, 可补充外协资源, 进行重新排产, 直至满足企业销售订单中的承诺需求。

#### 3) 云端产线设备管理服务

提供产线设备管理及数据分析功能, 实现对产线设备的生产运行状态监控与分析。通过国网电商平台的设备接入层, 将企业产线设备的实时生产数据采集到云平台, 通过国网电商云平台汇总统计, 提供给云端产线设备管理进行产线设备生产过程状态的实时监控; 并也可接收“云端资源计划管理”的生产指令, 通过云平台通道下发到设备中, 驱动产线设备进行加工生产, 同时采集设备完工信息。

#### 4) 云端协同仿真服务

在上述应用服务的基础上, 在国网电商云平台之中重点提供云端协同仿真服务, 实现对上述 3 类服务结果的验证与优化。协同仿真服务是一种集成化的服务。主要包括产品设计模型仿真、云排产结果的仿真验证及产线设备仿真优化服务。



产品设计模型仿真服务可对协同设计后的产品模型进行仿真验证。建模工具可为用户提供对象建模。用户可以根据设计, 灵活地选择合适的仿真功能对产品设计模型及构成部件进行仿真和验证和参数优化, 便于发现在协同设计阶段的存在问题, 并改进问题, 提高产品的设计质量。

排产仿真验证服务, 通过对接云端资源计划管理获取排产计划、工艺加工工序、专业单元加工企业资源库存等信息, 通过与建立在国网电商云平台行业应用层的云端资源计划管理服务进行排产结果交互, 实现排产仿真验证服务, 验证排产计划的可行性。

进而, 在完成生产线虚拟仿真模型搭建的基础上, 通过把产线生产计划、设计、工艺数据及产线设备的实际生产运行数据等输入到产线仿真模型中, 通过仿真验证该生产方案能不能达到预期订单交期、质量等要求。如果满足则可投入生产, 如不满足则需要通过仿真找出问题点, 通过设计仿真试验针对性的进行优化, 直至满足订单要求。这些优化参数回传给相应的功能模块进行优化配置。

生产执行过程的产线设备仿真服务就是对这类企业生产资源和产线设备之间关系的建模。用云端产线设备管理服务中提供的产线设备实际运行数据反映企业真实的车间生产运行情况, 并通过排产计划中的生产任务驱动数据模型的计算, 仿真出真实的生产执行过程。这种建模是云端协同仿真服务中针对企业产线设备生产仿真的重点和难点。电工装备行业不同的企业生产资源建模和其之间的关系往往相差很大, 需要做出正确的资源模型, 才能得出正确的仿真数据。

此外, 在协同仿真服务中提供模型调度, 仿真计算资源管理、协同仿真中间件以及分布式仿真引擎。其中, 仿真计算资源为云端协同仿真提供相应仿真资源支撑, 包括仿真过程所需的网络资源, 系统模型构建时使用的行业通用的模型资源, 以及通过 API 接口以及二次开发方式集成到云端的工具软件资源。

## 4.2 各应用服务实现关键问题研究

### 4.2.1 基于 XML 的异构数据集成问题研究

要实现将电工装备行业各协同设计参与者所设计的各产品部件最终形成一个完整的产品设计模型, 就必须对不同产品部件的各类异构数据实现集成。通过在国网电商云平台应用层的云端图文档管理服务中我们运用基于 XML 的数据交换技术<sup>[17]</sup>, 建立相应的异构数据集成算法, 可有效解决云端图文档管理中的各产品部件异构模型的数据集成问题。具体实现如下:

XML(eXtensible Markup Language, 可扩展标记语言)是可以对电子文档和数据进行结构化处理的标记语言, 我们用它来进行异构数据的描述, 并对它解析进行数据的交互。

我们首先定义需要集成的异构数据类别, 并根据类别定义处理该类别数据的 XML 解析脚本, 和需要调用的处理程序。接收到异构数据结构包后系统的处理流程如图 2 所示。

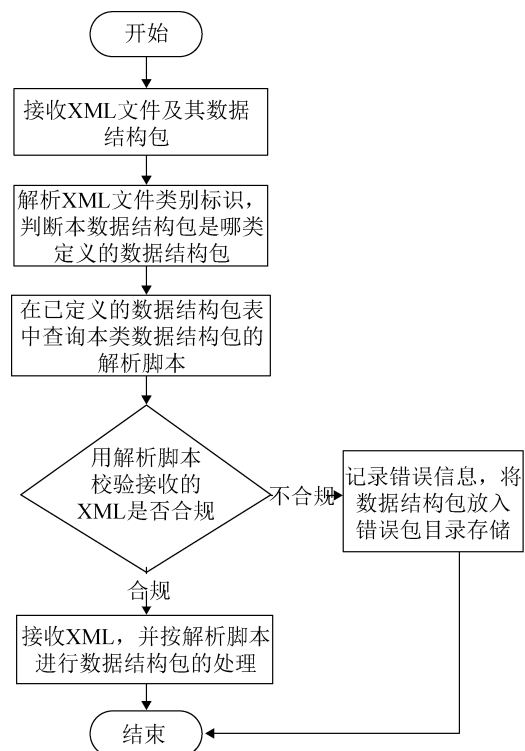


图 2 异构数据集成算法流程图

Fig. 2 Flow chart of heterogeneous data integration algorithm



接收的 XML 文件主要由以下核心内容组成：  
XML 类别标识：类别标识名，标识本数据结  
构包的类别，系统首先识别类别标识名，并依据本  
标识名到数据库中定义好的“数据结构包表”中查  
找并获得本类的解析脚本。

XML 数据内容：描述数据结构包数据内容部  
分，其结构和解析脚本一致。系统依据解析脚步对

本部分进行校验，校验合规后，调用解析脚本对应  
的处理程序对本部分数据进行处理。

XML 文件内容：描述数据结构包文件内容部  
分，描述包中所带文件数量及文件格式、文件大小  
等信息。系统在进行合格校验时，依据该内容对包  
中文件进行检查，如错误将存入错误包目录中。

数据库中的“数据结构包表”的数据结构示例  
如表 1 所示。

表 1 解析脚本内容示例  
Tab. 1 Content example of analysis script

序号	标识名	说明	XML 地址	创建时间
1	CAPP_DATA	工艺数据	\CAPP_DATA_V1.0.XML	2018/06/14
2	BOM_DATA	BOM 数据	\CAPP_DATA_V1.0.XML	2018/06/14
3	PDM_DOC	文档数据	\CAPP_DATA_V1.0.XML	2018/06/14

XML 解析脚本内容示例(以 BOM 数据脚本  
PDM\_BOM\_V1.0.XML 为例)如下：

```
<file>
<type>PDM_BOM</type>
<data>
<part>
<name>A</name>
<children>A01</children>
<children>A02</children>
</part>
<part>
<name>A</name>
<children>A01</children>
<children>A02</children>
</part>
<part>
<name>A01</name>
</part>
<part>
<name>A02</name>
</part>
</data>
</file>
```

最终，我们实现了对单 XML 数据文件、  
OUTCAD 数据文件、PRO/E 数据文件、UG 数据  
文件的处理。

4.2.2 云端排产建模问题研究

在云排产建模时，需考虑不同的生产策划优  
化排产目的和模式<sup>[18]</sup>，并进而构建适合的排产模  
型。云端排产建模问题,我们从如下几个方面进行  
了研究：

1) 生产订单的动态排产预估和在线预排产

生产订单是企业生产排产的主要依据，根据生  
产订单可以获得包括产品生产数量、加工时间、交  
货期等基本信息。其中交货期是制造型企业进行生  
产排产的重要依据，据此可以确定包括交货提前、  
交货延迟，以及总完工时间等有关排产问题的时  
间限制信息。

对于生产订单的动态排产预估，我们结合乐观  
悲观决策法，构建排产中面向生产订单的交货期的  
乐观、折衷(正常)、悲观这几种情况下订单的生  
产状况排产。

对于通过网络实时通信平台，为网络化生产订  
单提供快速排产评估的服务，简称在线预排产。我  
们通过简单而快速的操作，让用户在购买前大致了

解如果下了这个订单和国网电商云平台提供的企业生产能力是否能够完成,及在什么时间范围可以完成。

在线预排产实现对订单确认时的用户竞标拍卖和投标价格的指定提供极有价值的参考,可以作为云生产的增值服务。

2) 构建以生产设备和生产人员能力为核心的基于生产能力的排产规则和判别指标

排产中的生产设备约束涉及机器生产能力、机器维护维修、生产设备连接等方面。其中,机器生产能力是指在企业的计划期内,在既定的组织技术条件下,参与生产的机器设备所能生产的产品数量。机器生产能力是反应生产设备的一个重要技术参数,为生产排产计划提供重要的设备生产信息,以保证计划能达到要求。

我们通过数值映射等手段,将生产设备的能力、生产环境的情况和人力情况,均经过归一化处理后,转化成和一个和工时对应的生产能力数值。并利用该数值进行下一步的运算和操作。同时,采用日历调控的方式,根据修改或设计不同的工作日,动态管理生产能力,并按能力需要进行生产分配和计划制定。

3) 面向工艺路线优化和不同生产能力模式的排产优化根据产品生产工艺路线,可以获得产品生产的工序次序、加工准备时间、产品加工时间等信息。对于工艺路线要求严格的产品,我们根据其工序限制和时间依赖限制的约束,进行生产排产。

4) 面向不同的生产需求情况,考虑构建多个不同的生产模式进行应对,其中 3 个主要的生产模式,分别是(1)最大生产能力;(2)负载均衡;(3)首选/推荐加工中心。

5) 云排产模型的建立采用复杂网络和资源均衡中的相关技术,实现资源分派和推荐选择等算法。由于云排产将面对异构不确定环境下资源的管理和分配,因此,我们采用基于多模型的构建方式,对不同情况下的订单进行生产排程,并提供模型性

能的样例和评估模块,方便用户和服务商进行选择 and 修正。

#### 4.2.3 云端产线设备动态指标计算问题研究

云端产线设备管理服务需要对企业生产设备的生产状态数据进行采集,除了实时展示这些生产数据以供管理人员远程监控外,还可以对历史的存储数据进行统计计算,获得 KPI 指标。该服务部署在国网电商云平台之上,服务于行业内多家企业,将实现对多家企业各类产品加工设备数据的采集。

由于设备数据庞大且 KPI 指标众多。每个 KPI 指标对应的数据源不同,而且计算方法也不尽相同。为此,在这里我们提出了云端产线设备管理的 KPI 指标计算动态算法,可实现 KPI 指标的动态加载和动态展示,让企业用户可以快速部署 KPI 计算公式,得到本企业的设备指标。

具体的算法流程如图 3 所示,在算法中 KPI 动态计算引擎和 KPI 计算进程都部署在国网电商云平台上,运用平台的高性能计算资源能快速的调用每个 KPI 各自定义的计算公式程序、数据源程序,开展 KPI 的计算。

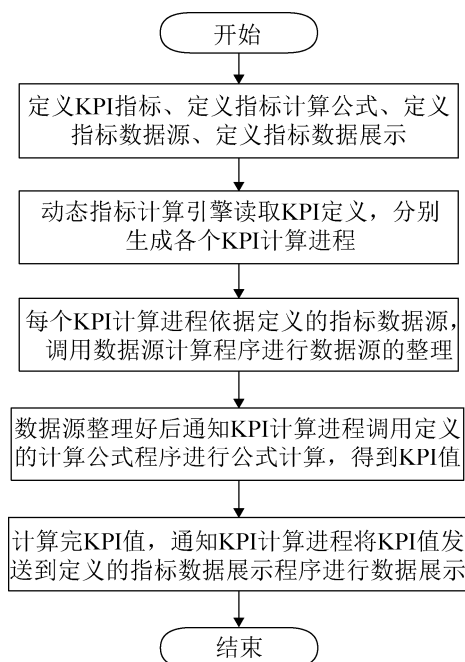


图 3 动态 KPI 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of dynamic KPI algorithm

数据展示程序部署在云端设备管理服务中, 负责展示经国网电商云平台计算出来的 KPI 指标。这样能最大程度降低服务的开销, 让客户得到良好的使用体验。

#### 4.2.4 云端协同仿真服务过程问题研究

云端协同仿真服务与云端协同制造的云端协同设计过程、云端生产资源管理和云端产线设备管理间存在相互协作的关系, 即在整个云端协同制造实现过程中, 存在着相应的信息交互。为此, 如何建立云端协同仿真服务实现过程, 实现与云端协同制造 3 个过程之间的有序协同是云端协同仿真服务实现的关键问题之一。

基于此, 我们结合国网电商各企业的云端协同仿真服务需求, 提出了如图所示的云端协同仿真服务内部实现过程, 执行流程如图 4 所示。

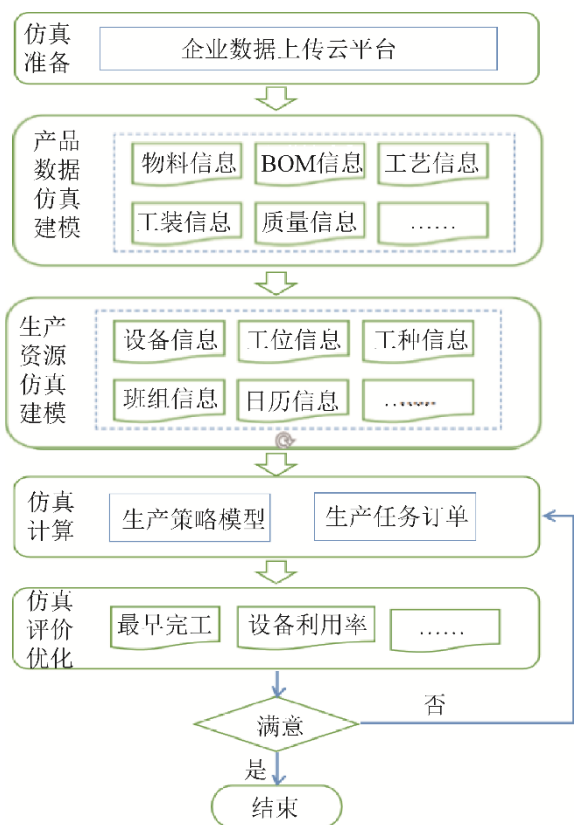


图 4 云端协同仿真服务实现过程  
Fig. 4 Implementation process of cloud-end cooperative simulating services

云端协同仿真服务从平台上接收企业相关信

息后, 结合从云端协同设计、云端生产资源管理和云端生产运行 3 个过程的输入信息后, 依次进行产品模型的仿真验证、排产结果的仿真建模验证以及通过仿真技术, 并结合企业产线设备运行的实际状态和能力进行产线仿真, 对产线生产运行情况进行评价。若评价结果为不满意, 则继续通过仿真技术进行优化处理, 直至满意为止。

#### 4.3 全产业链服务流程构建及实现

云端全产业链服务过程涉及: 电子商务、云端协同制造服务所包含的云端协同设计、云端生产资源管理及云端生产运行 3 个服务和云端销售供五个应用服务。根据这 5 类应用服务相互间的逻辑关系, 构建了如图 5 所示的全产业链服务流程。该流程的具体实现步骤描述为:

- 1) 通过电子商务过程实现云端供需对接; 对于实现匹配的供需双方, 确定是否需要进行新产品的协同设计过程。若不需要, 则直接将已有产品的模型信息及订单信息传递给云端生产资源管理服务, 转至 4)。
- 2) 对于需要新产品协同设计的供需双方则由各设计参与方通过云平台进行产品协同设计; 设计后把设计结果发送至云端协同仿真服务进行模型仿真验证。
- 3) 云端协同仿真服务通过产品模型仿真验证。若结果合理, 则把经验证的模型结果发送给云端生产资源管理服务; 如不合理, 则重复步骤 2) 和 3) 直至结果合理, 转步骤 4)。
- 4) 云端资源计划管理服务接收订单及经验证的产品模型信息, 开始进行资源排产; 并将排产结果发送给云端协同仿真服务。
- 5) 云端协同仿真服务对接受的排产结果进行仿真验证; 若结果是通过排产引擎对参与方的生产资源进行的合理规划; 则将经验证的排产结果发送给云端生产运行过程; 否则, 继续重复步骤 4) 和 5), 直至结果合理, 转步骤 6)。
- 6) 云端生产运行管理服务是接受已验证的排

产结果, 结合各企业的产线设备资源的实际能力及运行状态, 对物料进行加工生产并进行监控和管理; 同时将产线产线设备资源的实际能力及运行状态发送给云端协同仿真服务。

7) 云端协同仿真服务通过对产线设备的仿真验证, 对产线设备的生产运行给出评价; 若已达到最优运行状态, 则由云端生产运行服务监控产线生产运行状态, 直至生产完成, 转至步骤 9); 若尚未达到最优运行状态, 也将结果反馈至云端生产运行服务。

8) 云端生产运行服务接受云端协同仿真服务的产线生产评价结果, 对于未达到最优运行状态的, 进行优化调整, 重复步骤 7)和 8), 直至状态达到最优, 且生产运行过程结束, 转至步骤 9)。

9) 接受云端生产运行服务传来的运行结果, 并开始云端产品销售过程, 完成全产业链服务。

在上述各服务实现的基础上, 我们将其部署于国网平台应用层, 封装成应用 APP<sup>[19]</sup>, 并根据如图所描述的全产业链服务实现总体流程, 进行流程

组织编排及流程配置, 实现了对电工装备行业各企业从云端供需对接到云端协同制造的全产业链支撑服务。

## 5 企业应用实例

我们将增加了云端协同制造应用 APP 的国网电商平台, 应用于国网南瑞集团泰事达的企业生产制造过程。实现该企业的电工装备产品环网柜的云端图文档信息管理服务、云端资源计划服务、云端产线设备管理及云端协同仿真服务。最终实现了国网电商云平台对南瑞泰事达企业云端协同制造与仿真服务支撑。

### 5.1 企业云协同生产制造各服务应用

1. 云端图文档管理服务应用 南瑞泰事达某电工装备产品的图纸、技术文档等信息, 搭建产品 BOM 结构, 具体如图 6 所示。图文档管理中的文件管理模块的发件箱和收件箱管理设计人员和客户间的协同, 具体如图 7 所示。

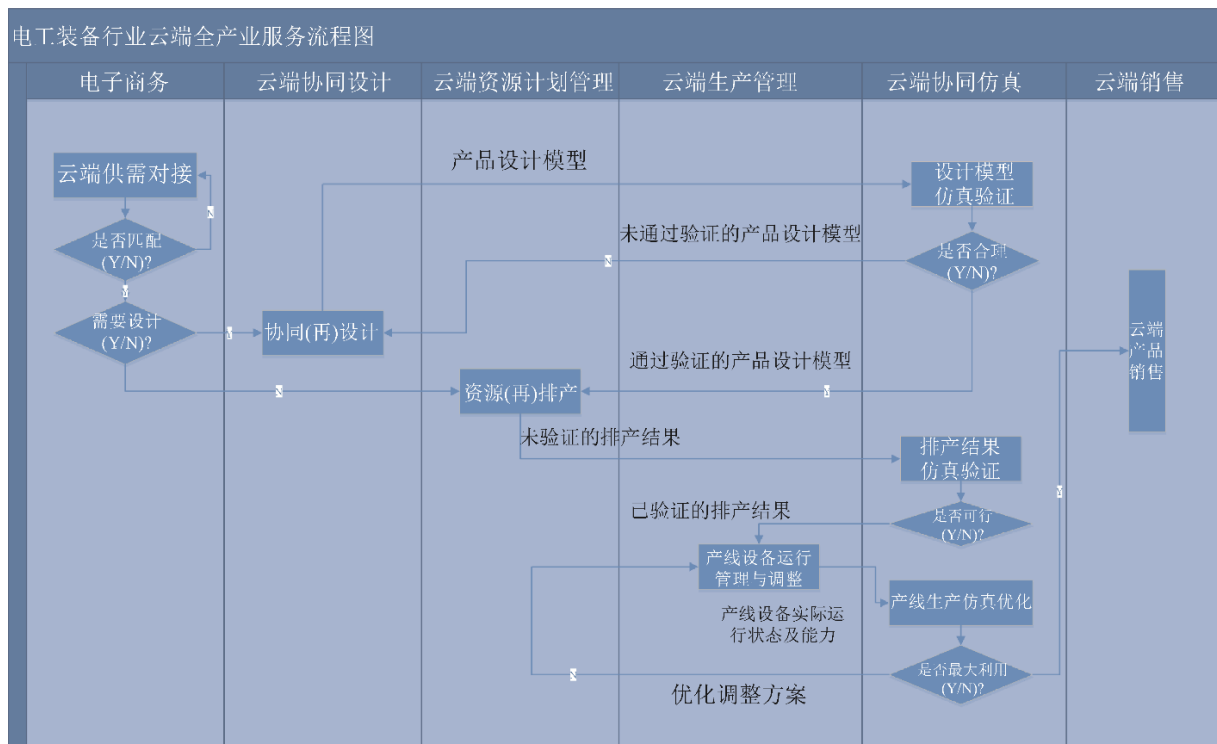


图 5 电工装备行业全产业链服务总体流程图

Fig. 5 Overall flow chart of whole industry chain service in electrical equipment manufacturing industry

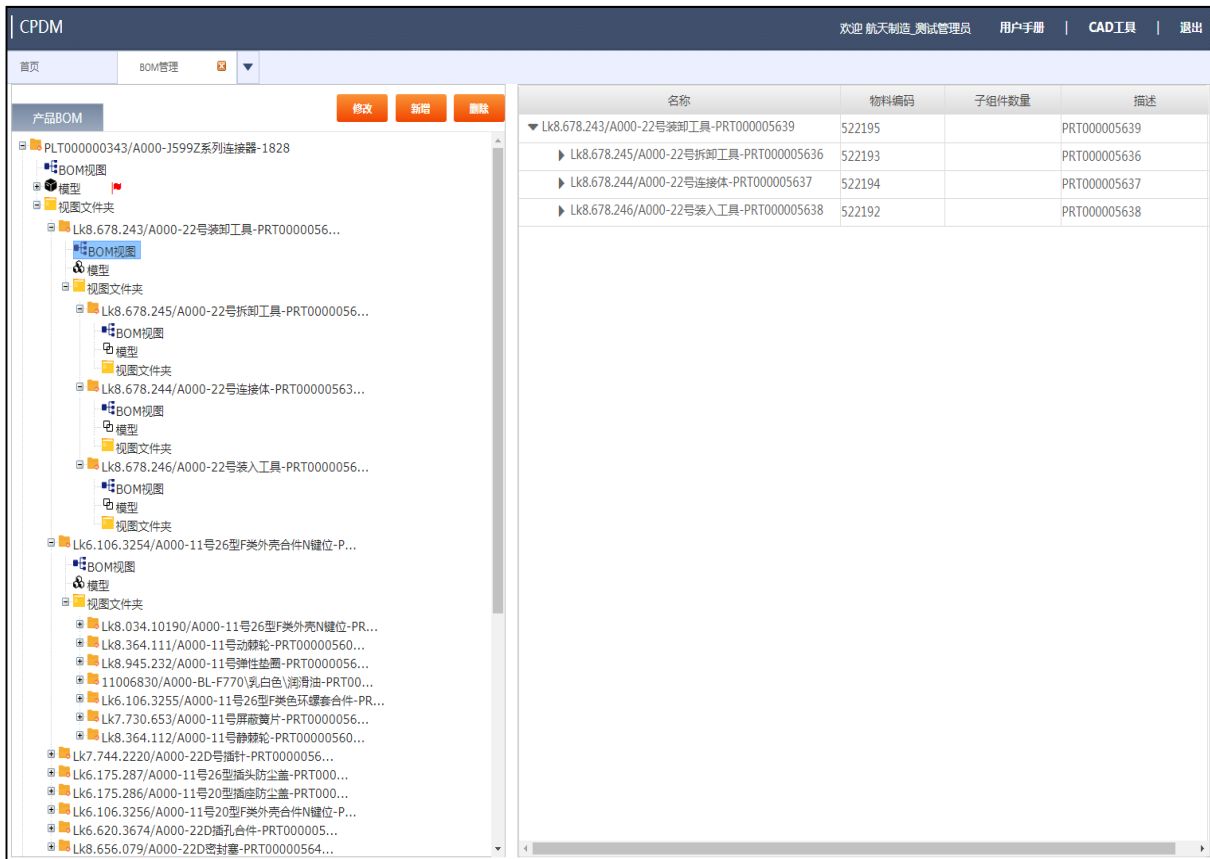


图 6 某电工装备产品 BOM 展现数据  
Fig. 6 BOM display data of an electrical equipment product

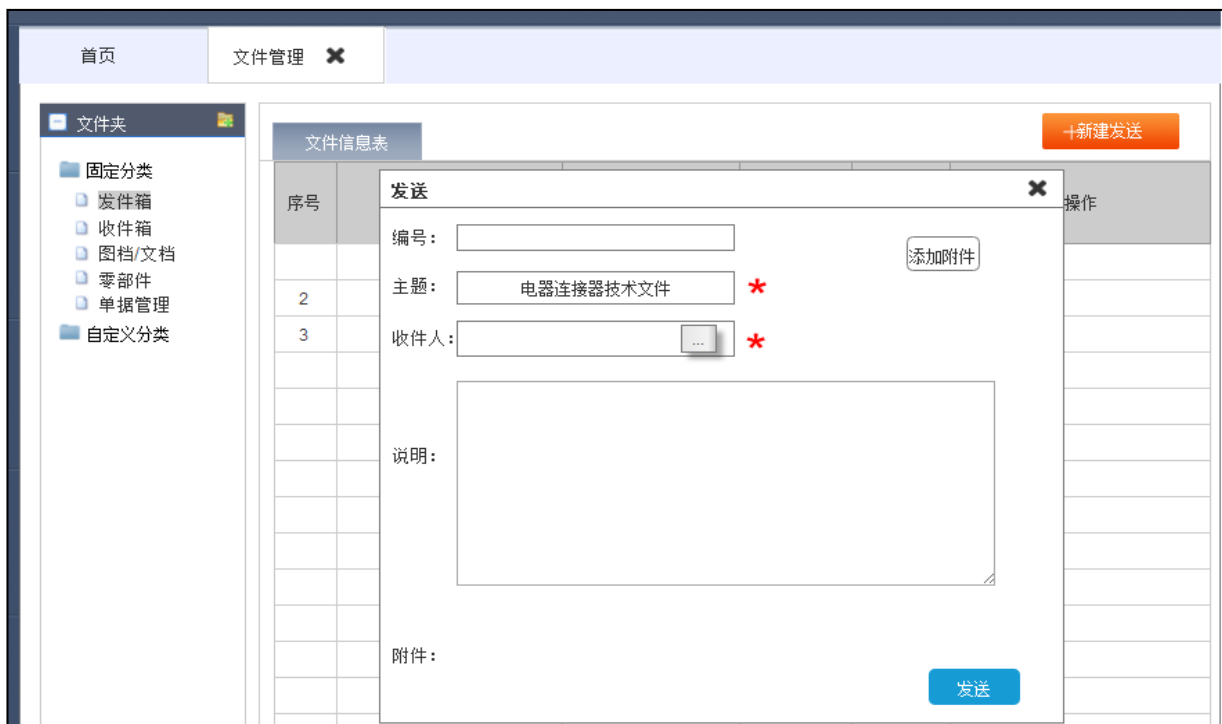


图 7 云端图文的管理系统中技术文档的外发  
Fig. 7 Outsourcing of technical documents in PDM

<http://www.china-simulation.com>

2. 云端资源计划管理服务应用 通过输入产线数据,通过接收来源于“云端图文档管理”的经验证的产品 BOM 数据,对销售订单执行进行产线生产任务分解和排产仿真运算。排产仿真运算结果包括物品生产计划、外协计划、外购计划等。

企业将生产计划下发到云端产线设备管理服务进行生产执行,并下发外协计划、外购计划到平台的产品交易应用,与外协、外购厂家建立订单合同,外协、外购订单合同通过云平台下达到外协、外购企业的 ERP 系统或者 MES 系统进行订单执行,并通过国网电商云平台实时读取生产执行状态。企业的产线资源如图 8。企业的产线资源数据维护界面如图 9。

3. 云端产线设备管理服务应用 采集产品生产执行数据,展示产线实时生产状态,报警产线故障信息,分析产品的合格率和产线的效率。图 10 为企业的生产线实施监控展示页面。图 11 为企业的生产作业计划展示页面。

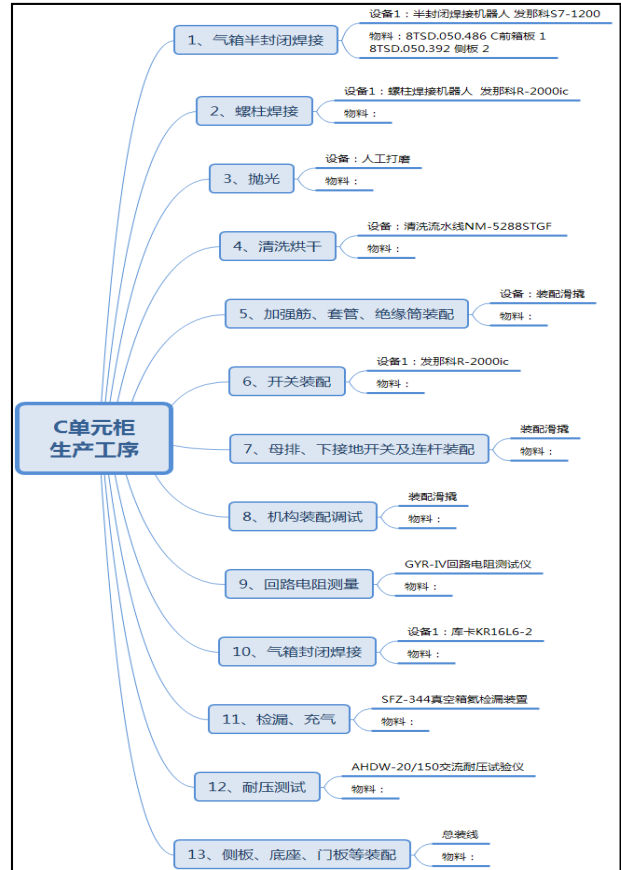


图 8 企业生产资源图  
Fig. 8 Enterprise production resource map

编号	资源类别	描述	操作
1	TSDCNCX01	气箱半封闭焊接	气箱半封闭焊接
2	TSDCNCX02	螺柱焊接	
3	TSDCNCX03	抛光	
4	TSDCNCX04	清洗烘干	
5	TSDCNCX05	加强筋、套管、绝缘管	
6	TSDCNCX06	装负荷开关	
7	TSDCNCX07	母排、下接地开关及连	
8	TSDCNCX08	机构装配调试	
9	TSDCNCX09	回路电阻	
10	TSDCNCX10	气箱封闭焊接	
11	TSDCNCX11	检漏、充气	
12	TSDCNCX12	耐压测试	
13	TSDCNCX13	侧板、底座、门板等装	

图 9 某电工装备产品的产线数据维护界面  
Fig. 9 Maintenance interface of production line data for an electrical equipment product





图 10 产线监控界面  
Fig.10 Production line monitoring interface

操作	订单号	加工单号	计划类型	物品名称	工序编码	工序名称	计划数量	完成数量	计划开工	计划完工	计划状态	工作中心名称	能力分类名称
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	120	耐压测试	10	20	2018-04-23	2018-06-25	已完结	耐压测试	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	80	机构装配调试	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	机构装配调试	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	60	装负荷开关	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	装负荷开关	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	100	气箱封闭焊接	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	气箱封闭焊接	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	50	加强筋、套管、	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	加强筋、套管、	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	40	清洗烘干	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	清洗烘干	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	130	侧板、底座、门	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	侧板、底座、门	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	110	检漏、充气	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	检漏、充气	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	30	抛光	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	抛光	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	20	螺柱焊接	10	22	2018-04-23	2018-06-25	已开工	螺柱焊接	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	70	母排、下接地开	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	母排、下接地开	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	90	回路电阻	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	回路电阻	
查看详情	TSD生产订单-2(TSD生产订单-2)		手工创建	环网柜	10	气箱半封闭焊接	10	10	2018-04-23	2018-06-25	已完结	气箱半封闭焊接	

图 11 企业生产作业计划展示界面  
Fig. 11 Display interface of enterprise production plan

### 5.2 云端协同仿真优化服务

通过国网电商平台提供的云端协同仿真服务, 实现了对该企业环网柜产品的生产线仿真优化。通过国网电商平台获取云端资源计划管理服务提供的排产结果以及云端产线设备管理服务提供的环网柜生产线设备实际运行状态及资源能力信息后, 我们进行了环网柜生产线虚拟仿真优化。

对于如图 12 所示的环网柜生产线总体结构图, 我们通过采用云端仿真软件 FlexSim 进行仿真优化, 对环网柜产线加工能力和订单需求和基于工艺过程, 虚拟装配过程的仿真优化, 实现对环网柜产线生产效率的优化。有关详细的仿真优化结果, 我们将另文阐述, 此处不再赘述。

在完成环网柜生产线虚拟仿真模型构建的基



基础上,又结合通过国网电商云平台输入的数据,包括该产线实际加工能力等信息,进一步通过仿真优化了该生产线中的网柜装配线的运行效率及单位时间产能,回传给相应的功能模块进行优化配置,如图 13 所示。

### 5.3 云端协同制造与仿真服务应用价值

该企业通过对云端图文管理应用服务的使用,使得产品设计部门更好的管理产品设计过程,共享产品设计相关资料,实现协同设计。最主要的是与传统的 PDM 系统比较,云端图文的管理系统能支

持管理产品设计与客户的沟通过程,极大的节约了设计沟通时间和成本,为压缩产品设计周期作出重大贡献。自上线以来,产品设计周期缩短了 20%,提高了客户对企业的满意度。

通过云端资源计划管理服务,使该企业计划人员摆脱对生产计划的手工编制,更加能合理规划各类生产资源利用,减少出错率。最主要的是,提高了生产计划编制的时间和人力。应用云端资源计划管理后,生产计划编制人员由 8 人减少到 3 人,编制时间由 3 天时间变成不到 1 天时间,对生产计划的调整更加方便和准确。

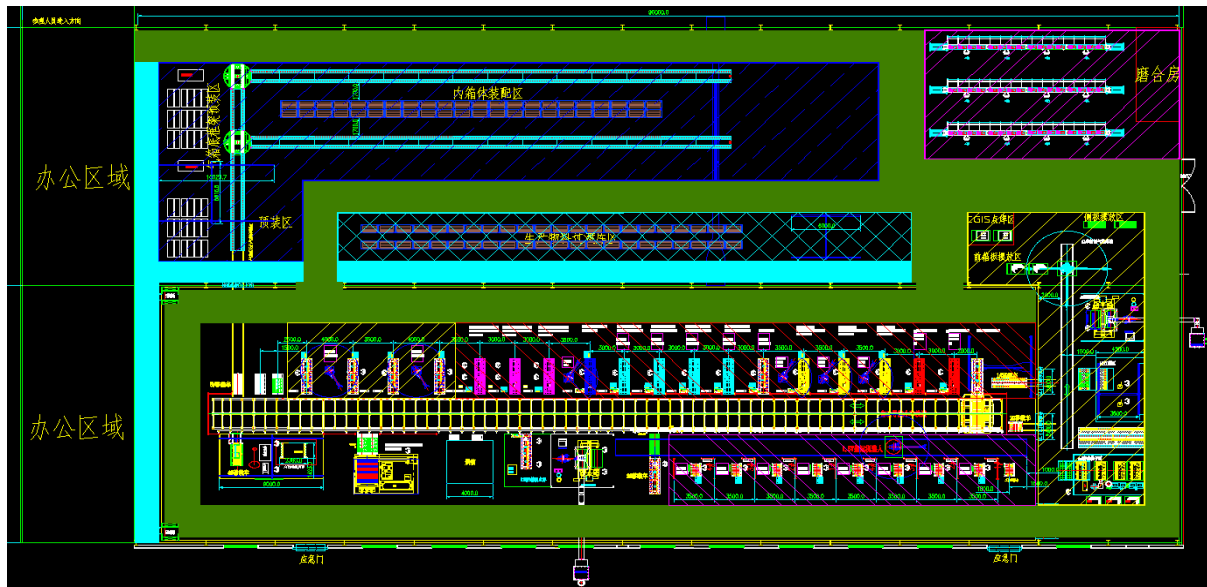


图 12 环网柜生产线结构图

Fig. 12 Overall structural diagram of ring main unit production line

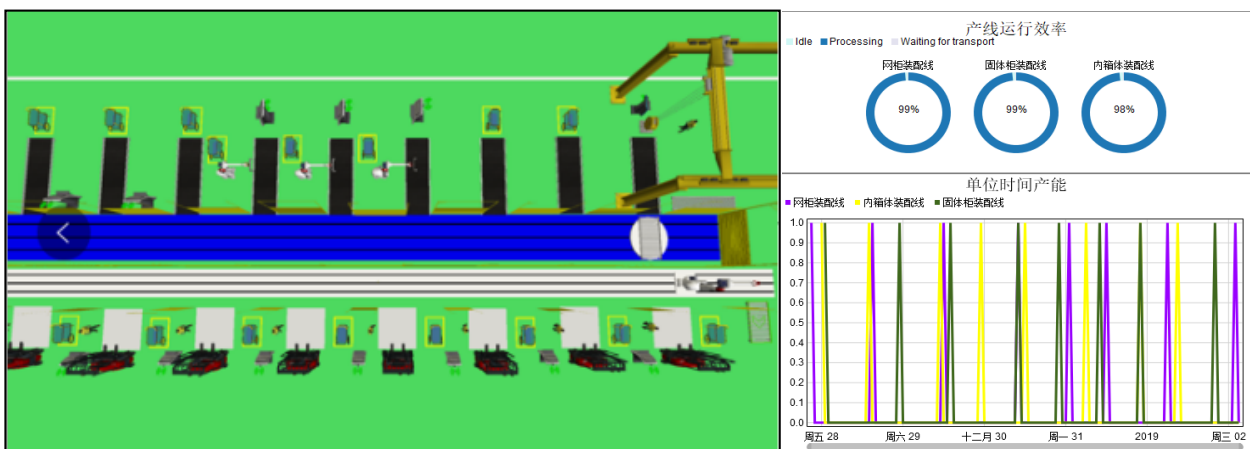


图 13 环网柜装配线虚拟仿真建模及优化

Fig. 13 Virtual simulation modeling and optimization of ring main unit assembly line

<http://www.china-simulation.com>

• 784 •

通过云端产线设备服务的使用, 让生产人员随时掌握产线设备实时状态, 并可及时进行有效管控。在该企业中, 环网柜充气检漏指标非常重要, 直接决定了产品的合格与否, 云端产线设备服务对该指标的采集、实时监控和周期变化趋势统计, 清晰的展示了车间近期生产的状态, 让管理者能快速发现车间生产问题, 杜绝质量问题的发生。

同时, 将生产过程信息数据与仿真数据进行对比, 其间不吻合数据能反映出仿真建模的不正确之处, 也反映出来该企业管理不到位之处, 可进一步对仿真模型进行优化或者完善企业管理。当生产过程信息数据与仿真数据一致时, 企业管理者可实现完全的生产管控, 规避了风险, 控制了成本。通过在南瑞泰事达的应用, 使得环网柜产品的生产线总体生产效率提升了 10%。

## 6 结论

本文说明了仿真在云端协同制造中的作用, 并结合电工装备行业各企业所面临的实际问题, 给出了基于国网电商平台的云端协同制造及仿真的有效解决途径及总体解决方案。不仅弥补了国网电商平台无法实现云端协同制造过程与仿真的应用服务支撑, 同时与国网电商平台原有的电子商务应用服务一起, 形成了可支撑电工装备行业各企业全产业链的应用服务。并在南瑞泰事达企业进行了成功应用, 取得了一定的应用效果。尤其是云端协同仿真验证, 助力企业合理的安排生产活动, 规避了风险, 使得企业的生产效益提升了 10%。

接下来, 我们将继续深入分析电工装备行业其他典型设备生产企业的特点及实际需求, 进一步研究云端协同制造与仿真应用的关键问题及应用实现技术, 丰富和完善云端协同制造及仿真的云端应用 APP, 助力国网电商云平台在电工装备行业的推广应用及基于国网云平台的电工装备行业云端协同制造新模式的实现。

## 参考文献:

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.  
Zhou Ji. Intelligent Manufacturing -- Main Direction of "Made in China 2025"[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1345-1356.  
Li Bohu, Zhang Lin, Ren Lei, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1345-1356.
- [3] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 智慧云制造: 工业云的智能制造模式和手段[J]. 中国工业评论, 2016(增 1): 58-66.  
Li Bohu, Chai Xudong, Zhang Lin, et al. Smart Cloud Manufacturing: The Model and Means of Smart Cloud Manufacturing[J]. China industry review, 2016(S1): 58-66.
- [4] 王云霞, 邱胜海, 李光荣. 面向服务的企业云资源建模方法的研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(24): 67-71.  
Wang Yunxia, Qiu Shenghai, Li Guangrong. Research on service-oriented modeling technology of cloud manufacturing resources[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(24): 67-71.
- [5] 舒金龙. 基于云制造的工业互联网建设与实践[N]. 中国企业报, 2018-06-19.  
Shu Jinlong. Construction and Practice of Industrial Internet Based on Cloud Manufacturing[N]. Chian Enterprise News, 2018-06-19.
- [6] 杨晨, 李伯虎, 柴旭东, 等. 面向云制造的云仿真支撑框架及应用过程模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1444-1452.  
Yang Chen, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Cloud manufacturing oriented cloud simulation supporting framework and its application process model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1444-1452.
- [7] 张霖, 周龙飞. 制造中的建模仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 1997-2012.  
Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling & Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 1997-2012.
- [8] 连志刚, 顾幸生. 云智造——基于云架构的智能制造[J]. 智能制造, 2018(增 1): 22-27.  
Lian Zhigang, Gu Xingsheng. Cloud Zhizao---Intelligent Manufacturing Based on Cloud Architecture[J].

- Intelligent Manufacturing, 2018(S1): 22-27.
- [9] 何锐, 魏艳. 基于车间群的船体分段建造生产计划仿真与优化[J]. 科技通报, 2018, 34(10): 140-143.  
He Rui, Wei Yan. Simulation and Optimization of Production Schedule for Ship Block Manufacturing Based on Workshop Group[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(10): 140-143.
- [10] 朱永祥. 基于仿真技术的生产计划及资源调度优化研究[C]// 中国造船工程学会(CSNAME), 2015年CAD/CAM学术交流会议论文集. 北京: 中国造船工程学会(CSNAME), 2015: 5.  
Zhu Yongxiang. Research on Production Planning and Resource Scheduling Optimization Based on Simulation Technology[C]// The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers (CSNAME), Proceedings of the 2015 CAD/CAM Academic Exchange Conference. Beijing, China: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers (CSNAME), 2015: 5.
- [11] 孟令玺, 孟令威. 云计算下的资源负载均衡性调度仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 386-389.  
Meng Lingxi, Meng Lingwei. Simulation of Resource Load Balancing Scheduling under Cloud Computing[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 386-389.
- [12] 何丽, 孙文磊, 王晓斌. 云模式下仿真设计资源的虚拟化与服务化[J]. 机械设计与制造, 2016(9): 266-268, 272.  
He Li, Sun Wenlei, Wang Xiaobin. Virtualization and Servitization of Simulation Design Resources on Cloud Mode[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(9): 266-268, 272.
- [13] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349-362.  
Li Bohu, Chai Xudon, Zhang Lin, et al. Preliminary Study of Modeling and Simulation Technology Oriented to Neo-type Artificial Intelligent Systems[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, 30(2): 349-362.
- [14] 胡月梅. JIT生产模式下多品种小批量混流装配线计划排序研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.  
Hu yuemei. Research on mixed-model assembly line's sorting of many varieties and small Batch based on JIT[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
- [15] 赵东方, 张帅, 高阿曼. 面向柔性提升的生产单元仿真建模及评价方法研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 108-114.  
Zhao Dongfang, Zhang Shuai, Gao Aman. Research on the evaluation method of modeling and simulation for the manufacturing cells flexibility[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018, 36(3): 108-114.
- [16] 黄俊生, 广晓平. 关于生产车间作业优化调度效率仿真研究[J]. 制造业自动化, 2017, 39(10): 95-99.  
Huang Junsheng, Guang Xiaoping. Study on simulation of job shop optimization schedule efficiency problem[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(10): 95-99.
- [17] 赵振杰, 闫月辉, 王浩, 等. 基于XML的异构PDM平台数据交换技术[J]. 智能制造, 2017(4): 35-38.  
Zhao Zhenjie, Yan Yuehui, Wang Hao, et al. Data Exchange Technology of Heterogeneous PDM Platform Based on XML[J]. Intelligent Manufacturing, 2017(4): 35-38.
- [18] 叶启付, 李国丛, 单振刚, 等. 多品种小批量壳体生产单元布局仿真优化[J]. 航天制造技术, 2015(6): 53-57.  
Ye Qifu, Li Guocong, Shan Zhengang, et al. Simulation and Optimization in A Multi-varieties and Small-batch Shell Manufacturing Cells Layout[J]. Aerospace Manufacturing Technology Aerosp Manuf Technol, 2015(6): 53-57.
- [19] 刘航. 云模块化产品制造服务平台关键技术设计[J]. 科技通报, 2017, 33(2): 113-116.  
Liu Hang. Key Technology Design of Cloud Modular Product Manufacturing Service Platform[J]. BULLETIN OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2017, 33(2): 113-116.