

商用航空发动机生产管控的数字孪生模式探索

吕延全

(中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201306)

摘要: 针对商用航空发动机研制时间周期长、复杂程度高的特点, 面向型号研制阶段需求, 及规模化批量生产转型的潜在需求, 以知识可重用、适航规范质量管理为基础, 研究基于数字孪生的生产管控模式, 从生产管控的质量、设备、计划、物流等环节, 明确物理与信息系统映射模型框架, 通过物理环节与信息系统的连接和交互, 为型号研制提供更加实时、高效的服务, 为规模化批量生产构建生产管理、现场组织技术架构。

关键词: 航空发动机; 型号研制; 规模化批量生产; 生产管控; 数字孪生

Exploring the Digital Twin Mode for Commercial Aero-engine Production Management and Control

Lv Yanquan

(AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., LTD, Shanghai, P R China, 201306)

Abstract: To develop a better production mode which fulfill the aero-engine production in both proto-type research and development stage and scaled stage, this paper focus on the digital twin based production management and control mode, which consider the the quality control, equipment, planning, logistics and other aspects of production control issues, and build up a cyper physical system which mapping the physical and information system together, through the connection and interaction of physical and information systems, more real-time and efficient services are given to response for dynamic events in both prototype development phase and scaled production phase.

Keywords: aero-engine; prototype production; scaled production; production control; digital twin

0 引言

在民用航空制造领域, 由于商用航空发动机产品对质量的高度稳定性要求, 需要产品研制过程具有严格的系统性和完整性, 其研制过程表现出周期长、制造要求高、复杂程度高的特点, 且科研试制到产品批产阶段, 工艺方法的固定、设备和工装及资源的配置需要持续调整及完善, 导致其工艺变化频繁、工作量大, 在如何实现项目型号研制阶段高效率、强柔性, 以及项目批产阶段的质量稳定性等方面具有挑战性。

所谓数字孪生是针对物理世界的物理过程, 创建数字化模型进行仿真模拟, 通过模拟数据提前预测物理过程的未来状态, 进行仿真模型与物理过程数据交互, 对物理过程状态数据分析, 进而支持决策优化, 为物理过程的具体环节明确决策参数。面向复杂机械产品全生命周期不同过程可分为产品数字孪生、生产数字孪生和业务管理数字孪生三类, 考虑产品、生产、业务管理 3 个维度涉及的多学科技术, 并建立物理过程和数字模型的连接, 进而提高产品研制过程质量水平及生产效率, 是数字孪生技术的最终目标。

本文针对商用航空发动机型号研制过程及批量生产阶

段生产管控的具体需求, 研究基于数字孪生的解决方案和关键技术, 为支持型号研制及产品准时交付提供支持。

1 数字孪生技术在生产过程管控领域的应用

1.1 应用概述

“数字孪生”最初由密歇根大学的 Michael Grieves 教授 2003 年在其产品全生命周期管理课程上提出概念雏形。2014 年, Michael Grieves 教授进一步在其发布的白皮书中明确了数字孪生的概念模型, 包括现实世界的物理对象、虚拟世界的数字化模型和连接两者的信息及数据三部分内容。

近年来, 伴随着世界各国工业 4.0 策略的提出, 以德国、美国和中国为代表的工业 4.0、工业互联网、中国制造 2025 发展计划的相继提出, 其中数字孪生技术逐渐引起了工业界的关注及广泛应用探索。商用航空发动机领域中, 由于航空发动机工作环境的多样性及复杂性, 以及适航条件的严格要求, 需要对大气进气、燃烧、推动过程中高温高压条件下的发动机元器件进行严格监控。GE 航空通过构建产品的数字孪生模型, 测量产品运行中的各项参数, 构建针对每台发动机的“私人医生”信息库进行实时状态数据记录, 以确保产品研发工程师随时可获取产品运行过程状态参数, 并综合使用状态参数进行诊断及判断。RR 和普惠也在积极探索数字孪生技术, 主要针对数据应用领域进行工程技术研发及应用。

收稿日期: 2018-11-26; 修回日期: 2019-01-07。

作者简介: 吕延全(1973-), 男, 吉林长春, 高级专家。主要从事数字化工厂, 制造执行系统及智能优化算法方向的研究。

国内，商用航空发动机领域刚刚起步，王岭等探索了数字孪生技术在商用航空发动机大部件对接工艺环节应用的实践案例。针对数字化工厂的数字孪生总体方案及数据应用方面有部分学者进行了初步的研究，陶飞等人提出了数字双胞胎车间的方案，讨论了数字双胞胎车间的概念，介绍了其系统组成，阐述了其运行机制，探讨了其关键技术，基本实现了物理车间、虚拟车间、车间服务系统的全要素、全流程、全业务数据的集成与融合，及生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等的迭代运行，使车间生产和管控最优。石菁菁提出了基于数字化双胞胎对生产过程进行仿真验证和信息反馈决策的方法解决生产过程质量稳定性问题的解决方案。目前数字孪生技术主要集中于概念及技术研究阶段。

1.2 生产管控数字孪生的基本模型

按照产品研制生态系统基本原理划分，产品研制系统可分为产品、生产和业务 3 个维度^[7]，据此基于模型的数字孪生技术也包括“产品数字孪生”、“生产数字孪生”和“业务管理数字孪生”^[8]。其中，生产数字孪生针对生产管控过程，并依据 ISA95 标准，实现了生产执行、生产物流、设备资源、生产质量 4 个维度的物理与数字化闭环，及时暴露生产过程中的质量问题及对生产成本浪费情况进行反馈等方面的内容。其基本模型依据、场景及要求如图 1 所示。

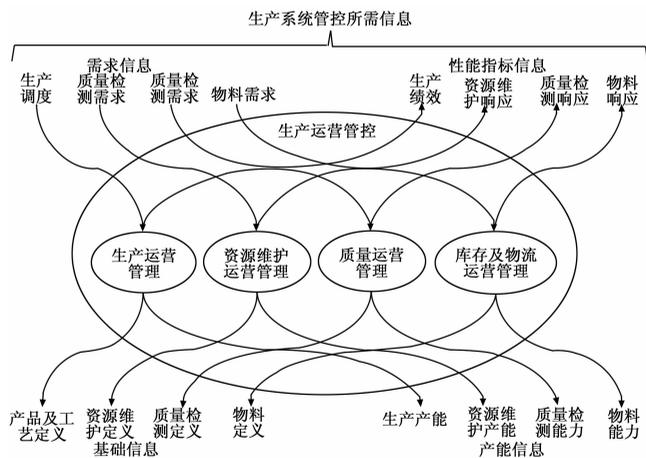


图 1 生产系统管控信息模型

1.2.1 生产运营管理数字孪生

生产运营管理的核心是生产调度，生产调度是生产系统决策优化、过程管控和性能提升的基础输入。从生产系统管控信息模型定义生产调度孪生，通过准确获取需求、性能指标、基础定义及产能信息，建立虚实映射和交互融合的调度数字孪生模型，实现“任务需求—资源物料质量约束—绩效目标”调度要素协同与持续优化。

调度数字孪生的核心目标是响应动态变化，物理车间中的任务、设备资源、检查能力及物料库存信息变化情况实时传输至数字孪生信息模型中，数字孪生模型通过自组织、自学习进行调度状态解析及调度方案调整，快速形成应对调度决策评估，支持生产系统管理人员快速确定异常范围，敏捷

响应，形成更好的扰动响应能力和异常解决能力。

数字孪生驱动的调度模式是调度优化与过程管控以呈现出新的转变，即形成了数据驱动模式，调度要素由实体互联向虚拟映射转变，响应方式由被动响应向主动应对转变，过程控制由粗放控制向精确控制转变，管理形式由层级结构向扁平化结构转变。

1.2.2 资源维护运营管理数字孪生

生产系统中的资源具体包括生产设备、工装工具、技能人员等，生产资源的功能稳定性是生产过程稳定性的关键保障。生产资源数字孪生中通过各种传感器对资源状态进行监控及评估，并预测资源故障及剩余寿命，从而实现将传统的事后维护转变为事前维护。

生产资源数字孪生模型中，物理资源实时感知运行状态及环境数据，虚拟资源在数字孪生模型中通过物理资源数据进行同步运行，在此基础上对资源状态进行评估，制定维护策略，并提前进行维护相关的数据论证及验证，实现资源按要求运行。

生产资源数字孪生中，资源的状态数据实时性更强，在对生产资源的物理状态数据实时全方位状态对比过程中，对于维修策略和故障分析方式有了新的变化，要求维护方式由事后处理向事前服务方式转变。事前服务策略及相关的数通过数字孪生进行事前模拟验证，预测生产资源故障及剩余寿命，支持生产过程稳定运行。

1.2.3 质量运营管理数字孪生

质量运营管理的目标是实现产品的功能和性能满足质量标准要求，其是影响复杂产品研发质量和使用性能的重要因素。

质量运营管理数字孪生通过各种检测资源、设备及标准化工作手段，通过与数字孪生模型中的数据分析及工具，实现零部件生产、装配、试验过程的精准控制，对复杂产品生产过程进行统一高效管控，达成产品生产过程稳定性的要求。

在进行质量运营数字孪生环境构建过程中，需要对产品工艺的质量要求与生产过程的物理实际数据进行融合，建立质量精度预测方法。通过对质量要求响应，实现生产工艺的动态调整与实时优化。

1.2.4 库存及物流运营管理数字孪生

库存及物流运营管理数字孪生主要是对物料准备及物料流动过程进行准确的跟踪、分析，及提供对于库存、物料资源相关的准确备货及配送。

库存及物流运营管理数字孪生，在数字模型层面，可以利用生产系统仿真技术，对生产制造工艺路径、物流进行预规划、仿真，并在仿真模型预演基础上进行分析、评估，实现原材料、半成品、在制品、返修品、合格品、报废品的流转过程仿真。在物料备货库存管理方面，优化库存及资金利用率，避免冗余，降低库存并减少在制品数量。在生产过程物流配送方面，通过对物料运输的经济性、时效性，及流动路线的优化，缩短搬运时间，减少路径干涉

等问题。

2 商用航空发动机产品生产管控的特点及需求

商用航空发动机研制过程采用型号项目研制和批量生产相结合的模式。考虑商用航空发动机产品安全性、可靠性要求极高的特点,产品研制初期采用型号研制模式,根据相关上级单位论证的项目需求,针对性地研究和制造并形成全新的设计、制造及应用过程。其生产过程具有如下特点:

1) 产品任务:品种多、数量少、未定型;设计不成熟的情况普遍存在,导致设计变化频繁;标准化程度低、通用性低。

2) 资源设备:部分加工工艺采用通用工具执行,以提高其适应性;工装设备对设计变更缺乏足够的适应性,造成由于设计变更难以及时到位;装备故障概率高,产品质量/废品率存在不稳定性;要求技能人员具有较高的技术水平和丰富的实际经验。优化资源配置是生产管控过程的主要难题。

3) 质量管理:产品样本数量少,质量业务工作量大、效率低、成本高。

4) 生产结构形式:供应商—库房—车间—作业单元—班组,作业期间生产现场要同设计部门、工艺部门、工装部门、库房等多个单位一起协同作业,这种开环、纵向和横向严格分工的生产管理模式,信息传递的层次和环节多,导致发动机科研研制阶段生产管理极其复杂和困难。

5) 生产管控:工序时间不确定,资源不可控因素较多,经常出现更改、变动、返修等情况,导致生产计划缺乏准确性,需依靠成熟的技术人员通过经验安排来推动生产的运行。

6) 成本:由于数据传输的及时性较差,对于各种变化情况主要依靠人工进行响应,响应过程慢且周期长,导致成本不随产量增加而下降。

在型号研制阶段具备明确的设计定型、制造工艺定型后,转入规模化批量生产阶段。规模化批量生产模式具有一定的稳定性和重复性。考虑商用航空发动机产品型号研制及规模化批产过程转化的长周期性和灵活变动性,特别是型号研制阶段的定制化生产特点,决定了生产系统必须同时适应型号研制和规模化批量生产,达成生产定制化与规模化的有机统一,满足产品不同阶段交付要求。

借鉴国外航空发动机产品研制的经验及优势,综合运用国内外先进的数字化、网络化、智能化技术进行升级改造,在全过程可交互的环境中构建商用航空发动机产品生产的核心要素及数字化支撑技术,改善传统依靠人工纸质进行信息传输,导致过程缓慢及效率低下的特点,通过数字孪生技术实现物理车间、虚拟车间、车间服务系统的全要素、全流程、全业务数据集成与融合,和生产要素管理、生产活动计划、生产过程管控之间的迭代运行,通过深刻认识生产运行规律,紧密结合企业实际情况完善生产系统参数设置,使车间生产和管控最优。

3 商用航空发动机生产系统管控数字孪生技术总体架构

商用航空发动机生产系统是产品功能和性能实现的最终阶段和关键环节,生产质量在很大程度上决定了产品的最终质量,对生产系统进行有效的数字化管控,对于实现商用航空发动机产品自组织、自适应及面对扰动及时响应具有重要作用。

同时,由于商用航空发动机产品对安全性及稳定性的要求,需要通过数字孪生获得数字化模型支持企业进行涵盖其整个价值链的整合,实现从需求分析、产品设计、生产规划、生产工程、生产实施直至产品维护服务各个环节,构建一致的、无缝的数据平台,形成基于模型的虚拟产品全生命周期和基于传感器技术的现实产品全生命周期镜像。

商用航空发动机产品生产系统建立数字孪生系统是产品全生命周期中实现数字与实物有效关联的关键环节,这一过程将产品设计数字模型转化为实物产品,并在此过程中对实际的材料属性、加工精度、装配精度及测试数据进行标准化的注释记录。同时,利用数字化模型具有模块化、自治性和连接性的特点,可以从测试、开发、工艺及运维等角度,打破现实与虚拟之间的藩篱,实现产品全生命周期内生产、管理、连接的高度数字化及模块化,可快速有效寻找车间、控制层、数据层及应用层的短板,进行优化。

考虑商用航空发动机对稳定性、可靠性的要求,生产系统为提高各环节的质量管控水平以满足适航质量体系要求,建设生产系统的数字孪生,要求达到如下目标:

1) 互联。生产系统实物模型与数据模型互联,实现从产品设计输入接收到工艺、生产准备、物流、生产、设备维护全过程的实物与数据模型互联。

2) 集成。实现从产品设计输入接收到工艺、生产准备、物流、装配生产过程横向业务集成;实现人机料法环测与控制系统、管理系统纵向信息集成。

3) 数据源统一。发动机生产过程数据、生产运营过程数据、基础设施数据统一。

搭建商用航空发动机生产系统数字孪生模型总体架构如图 2 所示,其中应具有如下特征:

1) 从商用航空发动机产品数字模型到产品实物模型构建基于模型的全数字记录。针对商用航空发动机适航取证过程对产品全生命周期数据的可追溯性要求,以及产品生产过程中成本控制等运营管理要求,构建生产系统数字孪生,对生产执行、物流、设备、质量活动进行数据获取。

2) 针对商用航空发动机产品生产的全过程数据闭环。形成生产成本、物流管控、设备稳定性及质量一致性管理的数据处理、使用,关键绩效指标计算、分析过程闭环。即能快速通过商用航空发动机生产系统数字孪生获取的实时数据,准确计算相关绩效指标参数,并形成绩效指标参数与过程参数的直接映射对应关系。

3) 针对商用航空发动机产品生产的自组织优化。通过

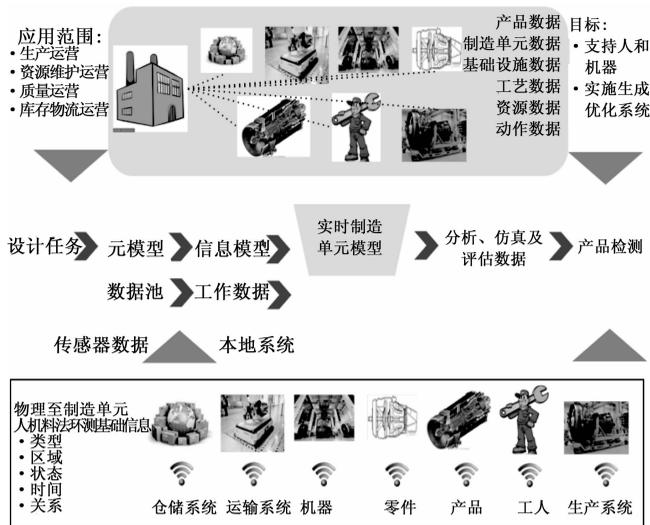


图 2 商用航空发动机生产系统数字孪生模型总体架构

对商用航空发动机生产系统的数据分析，及决策知识的积累，逐渐形成基于数据的自组织优化能力，在不同层次、不同环节构建自主判断能力。

4 基于数字孪生的商用航空发动机总装车间生产管控实践

总装装配是商用航空发动机制造的最后环节，对产品的质量、综合性能及可靠性等有着决定性影响。针对装配车间，进行基于数字孪生技术的生产管控实践过程中，首先建立起商用航空发动机装配车间的数字孪生模型，在此基础上，通过多传感器技术建立数字孪生模型与实际生产系统之间数据连接，在数据关联的基础上，通过构建自适应同步生产管控机制，实现基于数字孪生的商用航空发动机装配生产过程的自适应管控，研究其对生产过程稳定性及对干扰响应的具体提升作用。

4.1 航空发动机总装车间生产系统建模与仿真

数字孪生的基础是采用数字化的形式对物理实体的行为和流程进行动态呈现。在进行数字孪生实践过程中，首先对商用航空发动机生产系统进行建模，对生产系统的人机料法环测要素及其生产活动进行数字化呈现。具体包括图 1 中三类信息，具体说明如下：

- 1) 基础信息：装配车间布局、设备清单及设备产能、线边仓对应零部件或半成品数量、产品模型、工艺说明书、工艺布局图、工时定额、物料基础信息、质量基础要求。
- 2) 需求信息：商用航空发动机产品及其型号研制数量信息。
- 3) 能力信息：包括设备资源产能信息、人力资源信息、物料资源等。

数字孪生建模过程的基本逻辑如图 3 所示。通过建模与仿真，构建基于模型的商用航空发动机生产系统，对模型进行可视化展示，针对具体产品模拟商用航空发动机总装车间的各项生产执行活动，并对模拟过程中的数据进行

展示，管理人员事前确定是否满足预定要求，如有偏离，需要进一步调整资源配置相关情况。

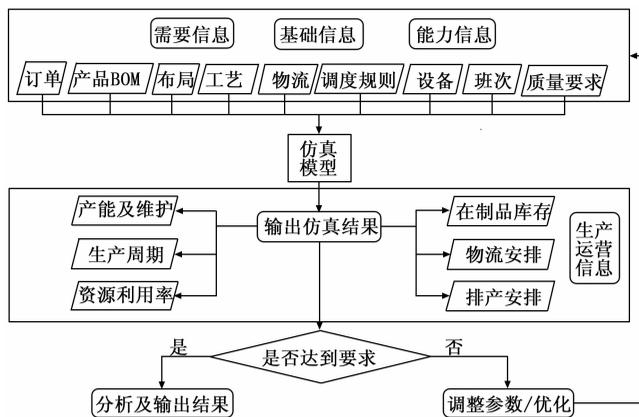


图 3 商用航空发动机总装车间数字孪生建模及可视化的基本业务逻辑

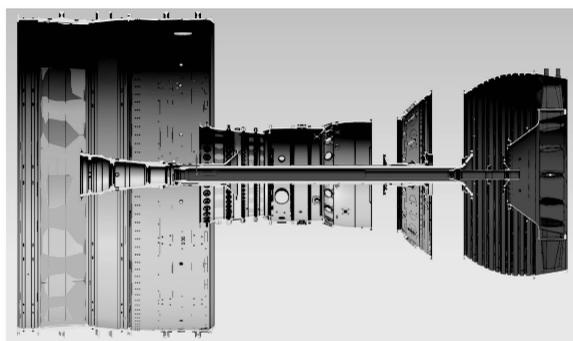


图 4 商用航空发动机总装车间数字孪生建模及可视化案例

如图 4 所示，以商用航空发动机总装车间某对接装配工序为例，进行建模仿真及可视化介绍，该工序要求对接精度高，需要事前对零部件进行选配，以避免重复工作浪费资源。通过获得零部件的加工精度数据，对零部件建模及对接过程进行仿真，对装配误差进行评估及选配，可以在装配前对接的轴和孔的匹配情况进行仿真及可视化展示，满足装配条件的情况下，进行物流安排及工作安排，开展生产活动。

4.2 虚实数据互联集成

有效采集、组织和管理装配车间产生的各类要素数据是数字孪生仿真模型能执行有效调整的基础。随着物联网、传感器以及无线技术的不断发展，以 RFID 为代表的物联网技术逐渐成熟，在信息采集、处理速度、使用便捷性、抗干扰、适应环境方面表现出极强的适应性。

商用航空发动机装配车间中的各类数据信息获取及传输的渠道如下：

- 1) 基础信息获取方式：通过数字孪生系统建立初期，在数字化信息系统中进行完整的设置获得；
- 2) 需求信息获取方式：通过数字孪生系统运行过程中，不同阶段的录入输入获得；
- 3) 能力信息获取方式：能力信息考虑其随时间的变化

特性，且实时影响参数数据配置及最终的决策，需要对各类资源，包括设备、物料、人力资源、在制品的质量状态等信息进行实时数据获取。考虑 RFID 技术的成熟度，商用航空发动机总装车间采用 RFID 技术进行相关数据获取。

图 5 为基于模型的商用航空发动机总装车间某厂房生产系统信息集成中展示页面中的总体信息集成页面，基于数字孪生的商用航空发动机总装车间生产管控执行过程中，依据生产系统管理的基本要求，在相关资源中添加 RFID 标识及传感器，建模，通过数据集成，可进行可视化组态配置，将数据存储到综合数字孪生环境数据库中，以图形化的方式对信息进行综合展示，例如针对车间显示如下综合信息：

- 1) 工作中心信息：工作中心的总体数量和工作中心基本数据；
- 2) 班组信息：展示班组的总体数量和班组的列表；
- 3) 人员信息：展示人员总体数量和人员列表的展示；
- 4) 设备信息：展示位于当前厂房的设备总数和和设备列表；
- 5) 订单信息：展示当前厂区正在生产的发动机型号和台份以及其所有订单的数量；
- 6) 订单类型：展出当前生产发动机型号数量和订单数量以及订单的列表；
- 7) 环境数据：展示厂房的温度、湿度、噪音、气压、光源、PM2.5 等环境数据。

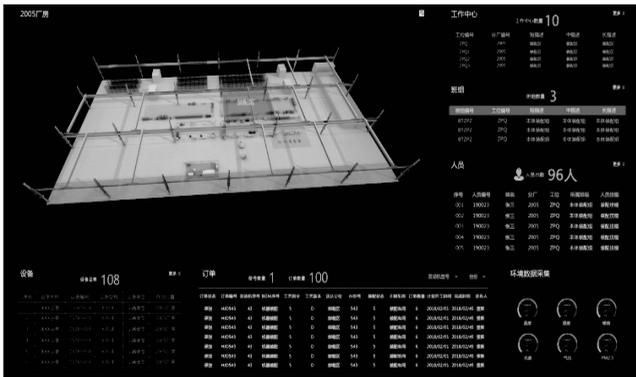


图 5 商用航空发动机总装车间数字孪生系统数据集成环境

4.3 基于数字孪生的自适应同步生产管控

图 6 展示了商用航空发动机总装车间生产管控过程中进行数据优化处理自适应管控的业务逻辑。生产系统在运行初期通过大量的数据实践，总结并形成决策优化规则及知识库。在批量生产规模化运行过程中，通过生产系统仿真预测生产系统的参数变化趋势，并与物理生产系统实时数据进行匹配，由执行器及推理器获得知识及规则输入，通过数据优化算法计算，支持系统进行决策参数调整。具体执行过程中，通过有效前置输入数据，管理人员可以对监控参数进行编辑或调整。以满足既定的目标要求。

5 结语

商用航空发动机因其产品的特殊性，生产过程由科研

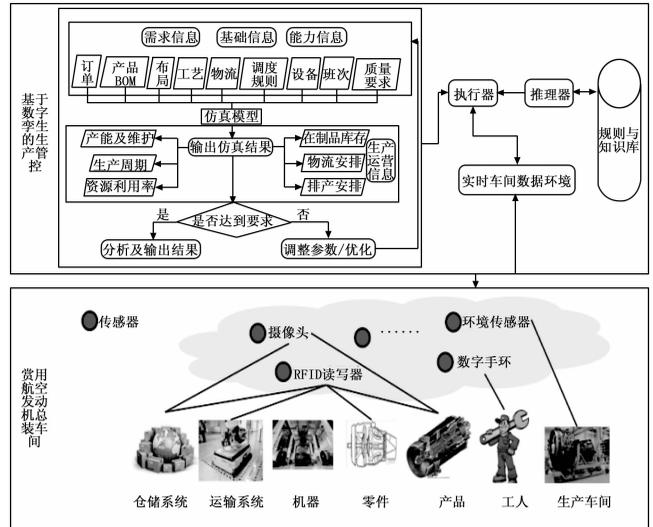


图 6 基于数字孪生的商用航空发动机总装车间自适应生产控制业务逻辑

试制型号研制向规模化批量生产阶段转变的时间周期长、复杂度高，随着新一代数字技术的不断推进，本文探索并建设基于数字孪生的生产管控系统，同时适应并构建响应型号研制和规模化批量生产中的各种扰动的响应机制，并应用物联网、传感器及数据分析技术，达成生产定制化与规模化的有机统一，满足产品不同阶段交付要求，并在此过程中提高商用航空发动机生产的质量稳定性和效率。

参考文献：

- [1] 李 凯. 基于“工业 4.0”的航空发动机智能制造建设模式研究 [J]. 科技展望, 2016, 26 (21): 10-11.
- [2] 王彦蓓. 智能制造推动航空制造业转型发展 [J]. 经济视野, 2016 (112): 117-118.
- [3] Pratt & Whitney, Pratt & Whitney's First Advanced Manufacturing Facility in Singapore [EB/OL]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/pratt-whitneys-first-advanced-manufacturing-facility-in-singapore-300594797.html>, 2018.
- [4] GE, Predix [EB/OL]. Available: <https://www.ge.com/cn/b2b/digital/predix>. 2018.
- [5] Zhang Yingfeng, Qiancheng, liuJingxiang, et al. Agent and cyber-physical system based self organizing and self-adaptive intelligent shop floor [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2017, 13 (2): 737-747
- [6] Qu ting, Pan Yanghua, liuxuan, et al. IoT based real time production logistics synchronization mechanism and methods toward customer order dynamics [J]. Transactions of the institute of measurement and control, 2017, 39 (4): 429-445
- [7] 王 岭. 基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对接技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 286-290.
- [8] 陶 飞, 张 萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (1): 1-9.
- [9] 陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (1): 1-18.