

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.005

基于数字孪生的总装车间质量智能管控决策应用技术

朱春明, 何仁平, 周 来

(重庆长安工业(集团)有限责任公司, 重庆 401120)

摘要: 针对现场质量一致性不高、关键工装状态掌控难、综合效率低等问题, 以总装自动化生产线为基础, 利用数字孪生技术研究基于数字孪生的总装车间质量智能管控决策。搭建基于数字孪生的某产品总装智能车间集成应用总体架构, 围绕变批量装配质量一致性管控技术、复杂工况下质量紧密相关的关键工装寿命预测技术等关键技术进行阐述, 设计产品装配过程的误差传递模型和关键工装的全生命周期的寿命孪生模型。结果表明: 该技术实现了生产过程质量一致性管控、关键工装寿命预测, 形成精准、智能管控模式, 促进产品装配质量管控从被动模式向自主智能管控模式转变。

关键词: 总装; 自动化生产线; 数字孪生; 质量; 智能管控

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Application Technology of Quality Intelligent Management and Control Decision in Final Assembly Workshop Based on Digital Twin

Zhu Chunming, He Renping, Zhou Lai

(Chongqing Chang'an Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Aiming at the problems of low quality consistency, difficult control of key tooling status and low comprehensive efficiency, this paper studies the intelligent quality management and control decision-making of final assembly workshop based on digital twin technology on the basis of assembly automatic production line. The overall architecture of the integrated application of a product assembly intelligent workshop based on digital twin is built, and the key technologies such as the quality consistency management and control technology of variable batch assembly and the life prediction technology of key tooling closely related to quality under complex working conditions are described. The error transfer model of product assembly process and the life twin model of key tooling in the whole life cycle are designed. The results show that the technology realizes the consistency control of production process quality and the life prediction of key tooling, forms a precise and intelligent control mode, and promotes the transformation of product assembly quality control from passive mode to autonomous intelligent control mode.

Keywords: final assembly; automatic production line; digital twin; quality; intelligent control

0 引言

随着自动化、信息化等众多现代技术的迅猛发展, 数字化技术已成为推动工艺技术进步的源动力^[1-3]。近年来, 制造业工艺及装备自动化取得了很大进步, 在某些行业已经实现了单机自动化、自动化生产线等工程应用, 在正常工况条件下, 能实现零部件制造从上料到下线整个过程的自动化, 有的企业通过实施数据采集、监控、制造执行系统等, 也实现了生产车间管理的数字化。在智能制造的实践过程中, 始终面临信息空间和物理空间如何交互、融合的问题, 为此提出了数字孪生的解决方案^[4]。数字孪生是以数据和模型的集成融合, 通过在数字空间实施构建物理对象的精准数字化映射, 分析预测形成最佳决策, 实现全业务的闭环, 已成为全社

会各行业智能车间研究应用的热门技术^[5]。笔者侧重于采用数字孪生技术对总装车间质量管控决策进行研究, 以优化提升装配质量、效率与管控水平, 对国内制造业的发展具有现实意义。

1 数字孪生概述

数字孪生是国外最早定义的, 将数字孪生与工程设计进行比较, 以更好地理解设计、生产, 将设计与生产形成闭环^[6]。庄存波等^[7]系统地阐述了数字孪生的含义, 建立数字孪生的体系架构, 并对数字孪生在设计、制造以及服务等各阶段的实施途径进行了表述。美航局应用数字孪生技术对飞行中的物体进行仿真, 预测飞行物体的状态, 帮助地面人员作出正确的判断^[8]; 浙大设计了基于 CPS 模型和

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2020209B005)

作者简介: 朱春明(1977—), 男, 四川人, 高级工程师, 从事机加工工艺、技术规划设计研究。E-mail: hrp0830@sohu.com。

Moore 型有限状态下的飞机总装生产线，实现飞机总装现场数据采集平台与总装车间可视化平台融合^[9]；陈振等^[10]探索了以数字孪生的飞机装配车间的生产管控框架与涉及到的关键技术。

2 总装车间的需求分析

近年来，许多生产企业建成了自动装配生产线，显著提升了企业装配工艺自动化水平，但有的自动装配生产线依然存在质量一致性不高、关键工装状态掌控难与综合效率低等问题，需要集成应用数字孪生、智能决策等技术进一步解决关键工艺参数优化、关键工装寿命预测等问题，提升装配过程质量管控决策的智能性。基于数字孪生的装配智能车间集成应用技术典型需求如图 1 所示。

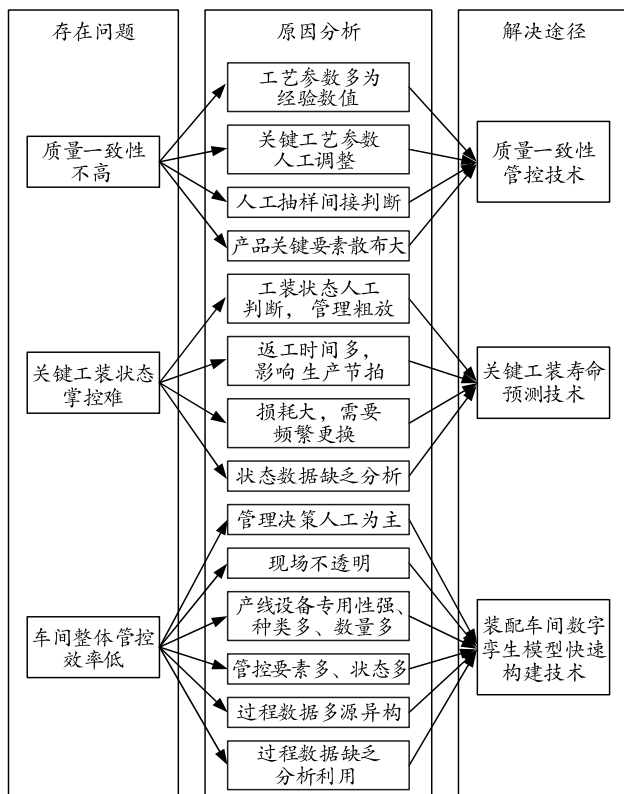


图 1 总装车间对数字孪生技术的典型需求

基于典型需求，需要研究以下技术：

- 1) 提高产品装配质量水平，需要研究装配质量一致性管控技术；
- 2) 提高连续稳定生产能力，需要研究多源数据驱动的关键工装寿命预测技术；
- 3) 提升产品装配车间质量管控的智能性，需要研究装配车间数字孪生模型构建技术。

3 总体技术方案

企业在实施数字孪生工程时，可参照基于数字

孪生智能车间系统的通用架构，同时再结合固有装配的质量管控业务特点和特殊要求，基于已有的自动化基础条件，研究基于数字孪生的智能车间集成应用技术，突破制约车间数字孪生构建和车间生产质量虚实结合智能管控的关键技术，构建一套基于数字孪生的装配智能车间集成验证系统，实现对产品装配质量精准、智能管控。总体技术方案架构如图 2 所示，集成应用技术研究路线如图 3 所示。

4 关键技术研究

4.1 变批量装配质量一致性管控技术

装配过程中的工艺参数一致性影响着产品质量的一致性。同批产品在不同设备上完成同一工序会产生装配误差；同一型号的产品在不同批次生产中也会因为产线的调试产生误差。产品的关键工艺对产品的精准度影响较大，故研究装配过程的工艺一致性有着重大意义。其关键工艺参数一致性管控技术方案如图 4 所示。

4.1.1 装配误差发现与分析技术

装配过程关键工艺参数包括重量、转速、压力、行程、时间、拧紧力矩等，其误差是影响产品一致性水平的关键；因此，针对这些数据进行实时采集、分析、发现误差并及时调整，将能很好地提升产品质量水平。

4.1.1.1 装配关键数据实时获取与分析技术

以装配质量关键工艺参数实时数据为主要对象，从装配车间孪生数据库中建立产品关键工艺参数如重量、转速、压力、行程、时间、拧紧力矩等实时镜像，构成关键工艺参数实时数据库。通过孪生数据库提供的实时数据库的接口及操作，为质量一致性管控应用程序提供服务，改进后的加工误差控制服务。采用以传统数据库为历史数据库，利用内存缓冲区技术建立实时数据库，外围再附加实时控制程序的访问方法来实现实时数据库。加工误差控制图实时数据库原理模型如图 5 所示。

如图 6 所示，将从孪生数据库获得的关键工艺参数实时数据与工艺标准数据进行比较，从而得出各产品装配过程中各工艺环节的误差，进行报警提示；与历史数据综合分析获得关键工艺数据的正态分布图，从而预知变化规律；基于实时数据进行数据变化趋势预测，以及生成统计分析报表。所有分析结果以图、表等方式显示，实现关键工艺数据的可视化监控。

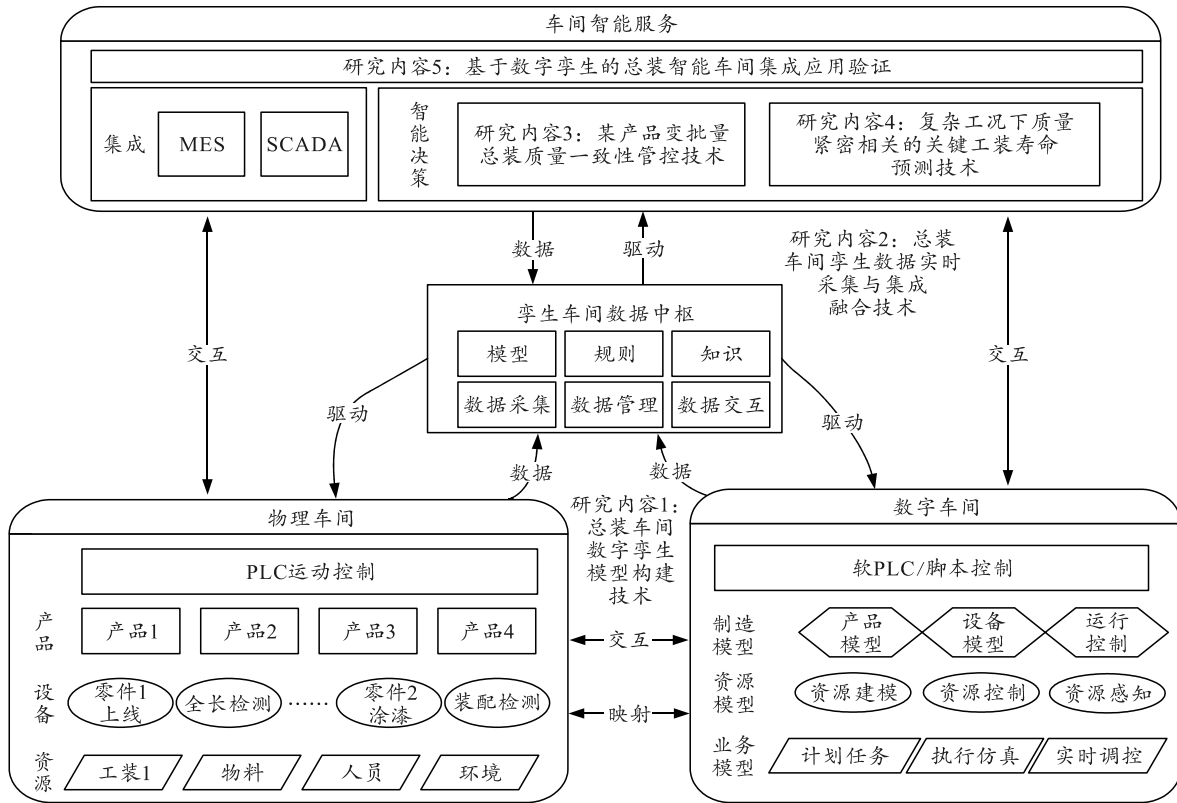


图 2 基于数字孪生的某产品总装智能车间集成应用总体架构

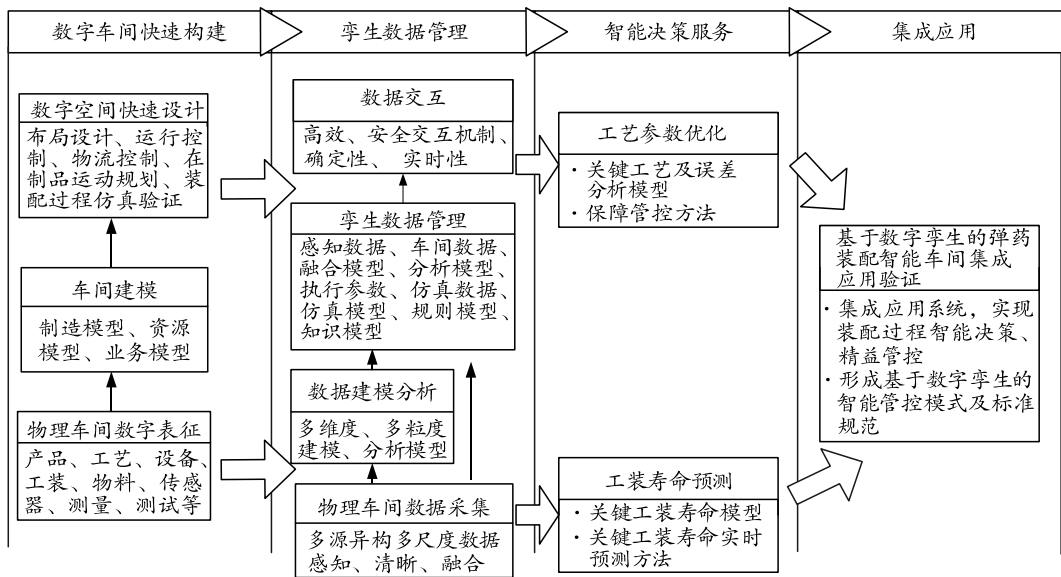


图 3 基于数字孪生的智能车间集成应用技术研究路线

4.1.1.2 构建装配过程的误差传递模型

如图 7 所示,以某产品装配为例(后续分析仍以该产品装配示例),主要装配工序 30 余道,研究工序间误差传递的规律,根据误差传递模型,构建装配过程的误差传递模型。

误差传递模型建立包括:

1) 单工序的误差传递模型:

$$y_i = a_i x_i + d_i。$$

式中: y_i 为第 i 工序加工误差; a_i 为误差传递(转换)系数; $a_i x_i$ 为传递(转换)误差,即输入误差 x_i 经工序传递给输出误差 y_i 的部分; $i=1, 2, 3 \dots, n$ (工序顺序号)。

2) 多工序的误差传递模型:

$$y_n \propto \prod_{i=2}^n a_i y_1 + \prod_{i=3}^n a_i y_2 + \dots + \prod_{i=n}^n a_i y_{n-1} + y_n。$$

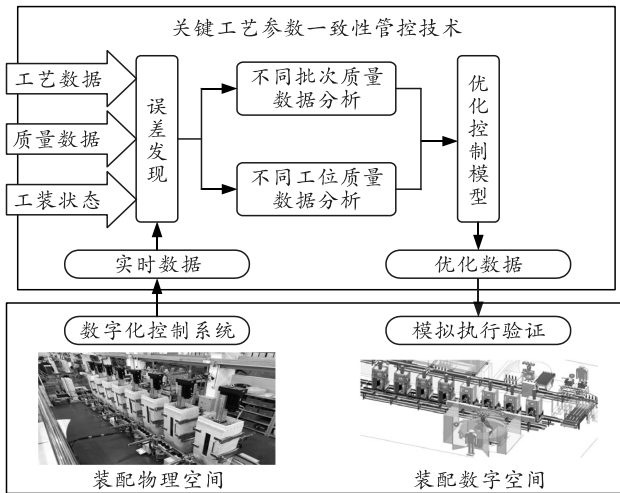


图 4 关键工艺参数一致性管控技术方案

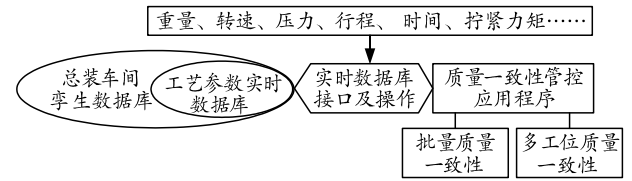


图 5 关键工艺参数实时数据库原理模型

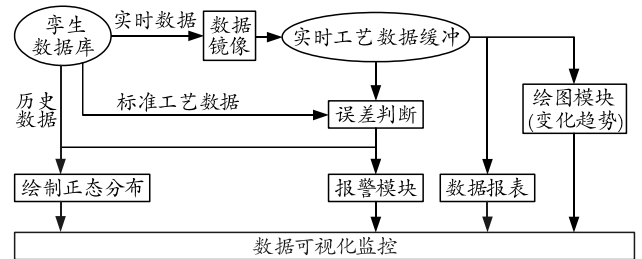


图 6 实时数据库结构模型

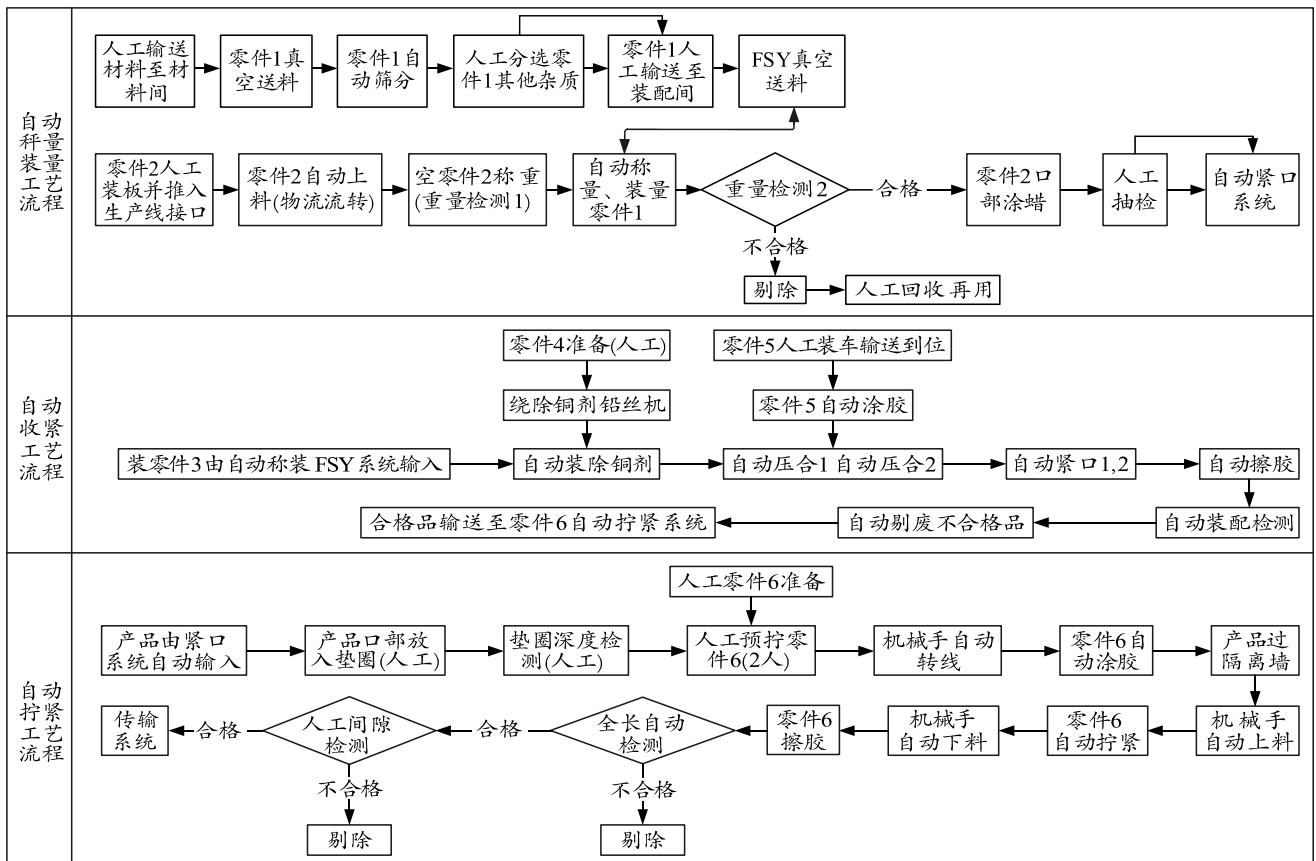


图 7 某产品总装主要工艺流程

上式是工艺过程最终工序的输出误差与中间工序的输出误差间的关系式，也是中间工序的输出误差对最终工序输出误差影响大小的表达式。

4.1.1.3 误差发现和分析

从设备、工装、人的操作 3 个层面去分析装配过程中关键工艺误差的产生原因，找出装配检测的异常数据与装配过程数据的变化趋势的关联规则，从装配过程中发现误差。

4.1.2 不同批次的质量一致性管控技术

装配过程中，同型号不同批次的产品装配间隔时间可能很大，在更换模具工装时容易产生各批次之间合格范围内的误差波动，记录同型号产品的历史工艺参数数据，求解各工艺参数的历史均值与分布标准差，形成历史批次的装配工艺参考值。在装配过程中，通过将实时监测数据与历史参考值进行相似度分析，设定阈值，对可接受的一致性进行评

价, 对于出现超差趋势或者不可接受的误差波动, 依据误差发现与分析模型, 给工艺人员调整产线工艺参数提供优化建议。

4.1.2.1 相似度分析法

不同批次产品质量一致性可以通过多特征统计分析方法, 建立不同批次产品的质量一致性定量评价方法, 同时分析质量波动来源。选定一个参考样品, 对该批次产品与参考批次产品中的多个参数进行相似度分析, 相似度的值介于 0~1 之间, 相似度越接近 1, 表明该批次产品与参考样品越接近。通过对相似度较差的数据进行反馈控制, 使整个生产过程形成闭环控制, 从而保证该批次与参考批次产品质量的一致性。

如图 8 所示, 相似度常用的计算量度有原始数据向量间的欧氏距离、相关系数和夹角余弦等。

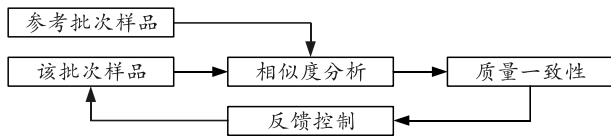


图 8 相似度分析法

其中夹角余弦法计算相似度的计算公式如下:

$$\cos \theta = \sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk} / \left(\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n x_{jk}^2} \right)$$

式中: $\cos \theta$ 为样品 i 和样品 j 的相似度值; x_{ik} 为样品 i 的指标 k 的测量值; x_{jk} 为样品 j 的指标 k 的测量值; n 为指标数。

4.1.2.2 评价曲线法

通过多次取样检测得到产品各项特征的统计数据, 利用平均值可对产品质量的整体水平进行评价, 利用标准偏差的结果可对产品质量的一致性水平进行评价。对于产品质量的评价模式, 如果仅仅通过设定阈值来判断好坏, 或是通过简单的线性模型来计分, 未免显得简单而模糊, 不符合工业要求; 因此, 可以针对特定的产品设计质量评价曲线, 以区分不同的质量一致性水平。设计好符合产品特性的质量评价曲线后, 即可寻找合适的函数来表达, 这样的函数即为产品质量评价函数, 同时对于不同重要性的质量特征设定相应的权重系数, 从而计算产品质量一致性评价得分。

4.1.3 同工序不同工位的质量一致性管控技术

自动称装、结合、紧口等主要工序均由多台设备并行生产, 在同一个工序中的各设备生产过程中, 除了来料零部件特性散布以外, 存在工装模具差别、

不同设备功能部件特性不一致、人工调试误差等问题, 按相同的工艺参数生产出来的产品, 关键质量参数波动较大, 质量一致性水平有待提升。多工位输出数据一致性表征了产品基本误差的差值趋于一致的特性, 保证被测产品在同一工序不同工位之间的测试结果不会产生较大的偏差。

针对不同工位成品装配, 除了记录已经管控的工艺数据, 还需要记录工位的工艺参考(如紧口工序中结合压力、行程)等, 通过对工艺参考数据与检测的实际工艺数据的分析, 发现各工位本身的个性化误差特性; 研究误差产生原理, 对误差产生的原因进行分析, 构建可行的多工位工艺一致性控制模型, 给出消除工位间工艺不一致的管控方法。面对不同工位产生的海量工艺数据, 通过数据挖掘算法, 找出影响工位工艺质量的主要原因, 不同产品质量数据的差异, 进而对工位质量一致性进行合理评价。主要采用以下 2 种分析方法:

1) 主成分分析。

不同产品之间的差异程度可以用主成分分析法进行考察, 以实现对产品的质量控制和数据支持。主成分分析是一种应用广泛的多元统计方法, 旨在降低变量维数, 并生成一系列新的变量, 这些变量是原来所有变量的组合, 称为主成分。

在用统计分析方法研究多变量问题时, 变量个数太多就会增加问题的复杂性。在很多情形下, 变量之间是有一定相关关系的, 当 2 个变量间有一定相关关系时, 可以解释为这 2 个变量反映此问题的信息有一定的重叠。主成分分析是对于原先提出的所有变量, 将重复的变量(关系紧密的变量)删去多余, 建立尽可能少的新变量, 使得这些新变量是两两不相关的, 而且这些新变量在反映问题的信息方面尽可能保持原有的信息。

主成分分析通过奇异值分解实现, 原始测量数据矩阵 X 分解成 2 个矩阵: T 和 P , 于是有

$$X = TP^T$$

其中: T 为得分矩阵, 代表在新坐标中样品的位置; P 为载荷矩阵, 描述了新的坐标轴, 如主成分是如何从原始变量中形成的。

2) 聚类分析。

聚类分析是一种无监督模式识别方法, 常用于目标观测对象的分类, 即利用观测对象的一组变量对目标进行分类。“距离”常作为聚类分析种样本之间相似性的度量, 距离越近表示相似性越大, 越

容易聚在一起形成一类。

K 均值是一类基于距离的聚类，通常采用欧式距离度量样本之间的相似程度。欧式距离的计算公式如下：

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

式中： D_{ij} 为样本 i 和 j 之间的距离； P 为变量数。

4.2 关键工装寿命预测技术

拧紧机结构如图 9 所示。摩擦头作为其中的关键工装，工作是靠压力与零件 6 头部接触，通过静摩擦的共同运动实现零件 6 的拧紧，是产品装配拧紧过程中易损易耗件，更换频繁，不同寿命阶段对产品的质量影响大，经常导致返工，因此对其寿命预测意义重大。

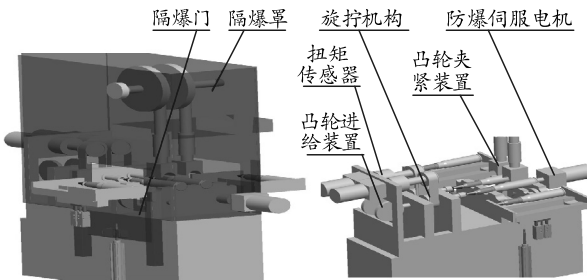


图 9 拧紧机结构

总装过程中具有面对众多品种和复杂的工况，在关键工装的寿命预测过程中，首先构建关键工装寿命孪生模型，并以实时工况数据驱动模拟分析预测，再人工确认预测结果和决策方案。技术方案如图 10 所示。

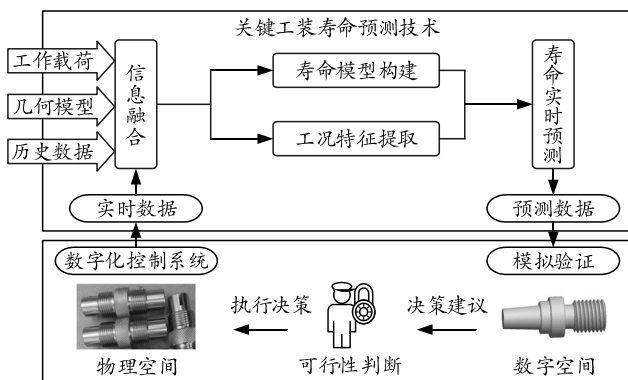


图 10 多源数据驱动的关键工装寿命预测技术方案

4.2.1 关键工装寿命孪生模型构建

基于工作过程的转速、拧紧力矩、压力、时间等参数的历史健康数据、失效数据、退化数据以及前后工序数据，装配产品的材料、形状等多源数据，通过强化学习及构建深度神经网络等技术对多源数

据进行分析，识别能够影响在面向不同产品的关键工装寿命的影响因素，对不同产品的数据进行聚类、对同类产品的历史数据进行寿命拟合，最终构建出单个的关键工装在装配不同产品时使用寿命的基本孪生模型，技术路线如图 11 所示。

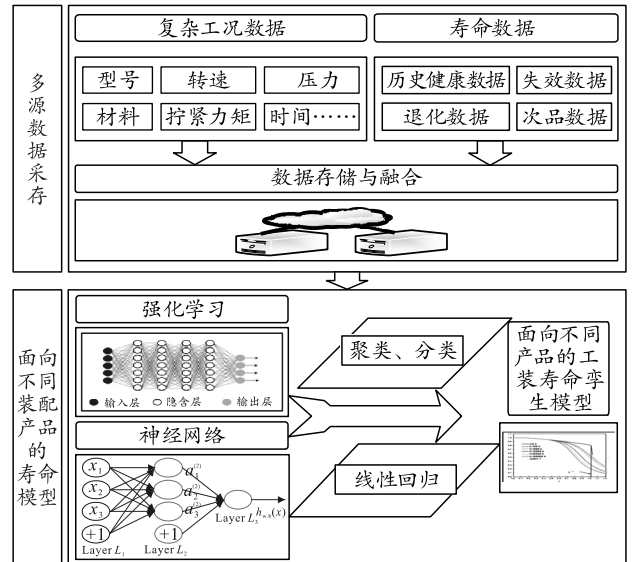


图 11 关键工装的全生命周期的寿命孪生模型构建

4.2.2 工装寿命预测技术

在构建单个工装寿命的基础上，对同线多个工装作业点过程数据采集。在现场实时数据的驱动下，通过融合现场数据与孪生模型去预测在该工况下各个工装的预测寿命。在一个或者几个同时达到临界寿命前，给出寿命即将终结的信号提示现场人员对其进行更换，在更换完成后，更新该工作点的模型状态。在面向不同装配对象时，系统能够根据产品参数选择对应的孪生模型去预测，在新产品上线时，也能够根据产品参数去选择最接近的寿命模型去迭代更新。通过上述机制，实现关键工装在不同工况下的寿命的有效预测，减少返工品、次品乃至废品的出现，可以向调度系统实现自适应最优调度提供参考依据，技术路线图如图 12 所示。

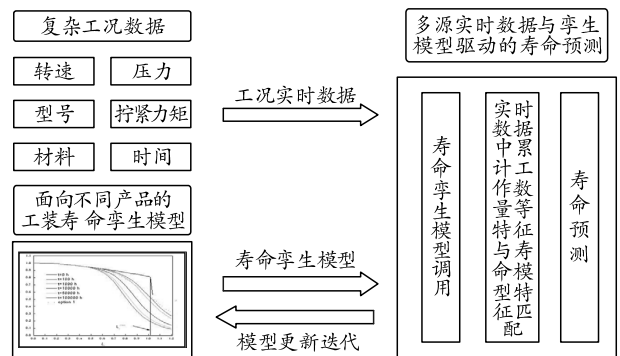


图 12 工装寿命预测技术路线

5 应用验证

基于 C/S 软件架构总装物理车间和虚拟车间的同步映射集成实现孪生模型双向交互，通过构建车间实时数据通信与孪生模型的同步快速通道，设计命令同步及异构数据库同步机制，以车间运行活动

过程为主线，基于数据获取、通信建立、数据传输及实时数据同步模型实现姿态驱动、动态标签等，通过对关键工艺参数进行反馈控制以及产线自身的状态监测和故障响应，实现总装车间的集成管控，其应用场景如图 13 所示。

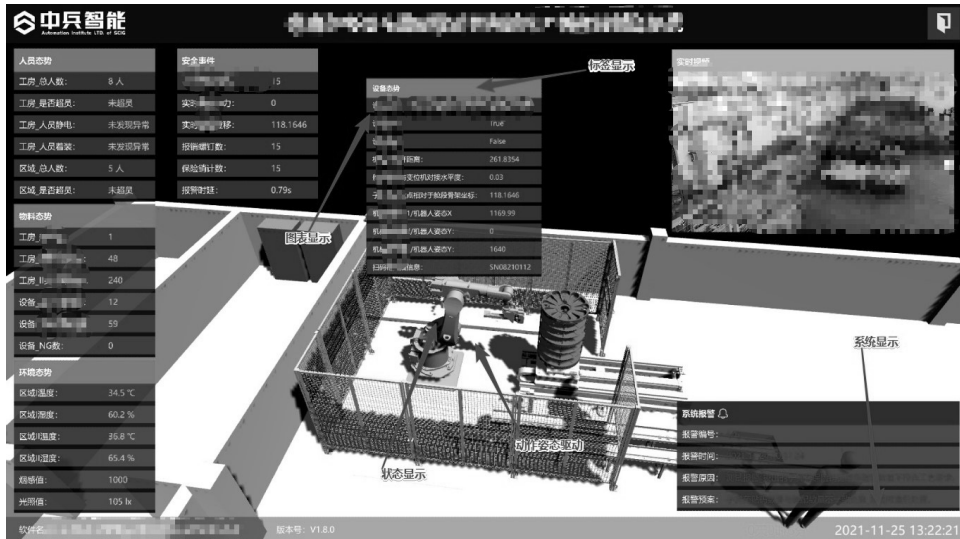


图 13 总装生产线质量管控系统

6 结束语

笔者以多品种自动装配生产线为研究对象，开展变批量装配质量一致性管控技术、复杂工况下质量紧密相关的关键工装寿命预测技术等关键技术研究。在现有总装车间自动化生产线资源的基础上，创新建立装配车间数字模型、工艺参数与质量关联模型、关键工装寿命模型，实现关键工艺参数优化、关键工装寿命预测等，进一步提升产品装配质量一致性。

笔者应用数字孪生技术构建总装车间质量智能管控决策，能够指导实践生产。在批量生产的数字化车间进行质量智能管控，提高其工艺技术和生产管理，可借鉴笔者介绍的相关方法，具有一定的推广价值。

参考文献:

[1] 郑瑛琨. 经济高质量发展视角下先进制造业数字化赋能研究[J]. 理论探讨, 2020(6): 134-137.
 [2] 张群兴, 芮伟, 王明远. 电子信息装备质量检验智能化系统方案设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 16-20.

[3] 梁海洋, 张瀚铭, 孙科星. 基于工业互联网的高危产品装配生产线智能管控平台设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(12): 24-28.
 [4] 陶飞, 程颖, 程江锋, 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.
 [5] 张新生. 基于数字孪生的车间管控系统的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
 [6] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through products. Through product lifecycle management[M]. Ann Arbor, Mich. USA: NCMS, 2011. 35-55.
 [7] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
 [8] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1): 71-84.
 [9] 孙萌萌. 飞机总装配生产线数字孪生系统若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
 [10] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索[J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 46-50.