

doi: 10.7690/bgzd.2025.09.001

基于数据驱动的车间运行决策优化技术

范波, 李君妍, 刘治红

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司长沙分公司, 长沙 410000)

摘要: 针对离散制造车间运行活动难以评估、生产瓶颈可追溯性差、生产过程决策实时性低、生产数据存储分散等问题, 提出一种基于数据驱动的车间运行决策优化技术。搭建基于数据驱动的车间运行决策优化框架, 深入讨论车间运行决策关键指标量化评估方法、车间数据分布式采存与关键特征判别方法和数据驱动的车间运行决策优化技术 3 项关键技术。实际应用结果表明: 该技术能解决存在问题, 对实现数据驱动的智能车间具有一定参考意义。

关键词: 数据驱动; 智能车间; 运行决策优化

中图分类号: TP18; TP311.13 **文献标志码:** A

Optimization Technology of Workshop Operation Decision Based on Data-driven

Fan Bo, Li Junyan, Liu Zhihong

(Changsha Branch, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to solve the problems of discrete manufacturing workshop, such as difficult evaluation of operation activities, poor traceability of production bottlenecks, low real-time decision-making in production process, and scattered storage of production data, a workshop operation decision-making optimization technology based on data-driven is proposed. Based on the data-driven workshop operation decision optimization framework, three key technologies are discussed in depth, including the quantitative evaluation method of key indicators of workshop operation decision, the distributed collection and storage of workshop data and the identification method of key features, and the data-driven workshop operation decision optimization technology. The practical application results show that the technology can solve the existing problems and has certain reference significance for the realization of data-driven intelligent workshop.

Keywords: data-driven; intelligent workshop; operation decision optimization

0 引言

制造业是我国国民经济的命脉, 是立国之本、强国之基, 是我国经济体系的重要组成部分^[1], 其中, 以航空、航天、船舶、电子、汽车、电器为主的离散制造行业在我国制造业中占据了极大的比重^[2]。目前, 离散制造业正在迈向智能转型升级, 如美国的“先进制造业国家战略规划”、德国的“工业 4.0 计划”、日本的“制造业白皮书”等。我国提出的“中国制造 2025”^[3]明确把智能制造作为主攻方向, 进而提升我国制造业的综合实力。车间作为离散制造过程中实施具体生产活动的核心单元, 正从自动化、数字化, 逐步向智能化发展。智能车间的制造数据具有典型的大数据 3 V 特性, 同时还展现出高维度、多尺度、不确定性和高噪声等特性。这些数据涵盖了生产全流程全要素, 是进行车间运行分析和决策的重要依据。

在大数据概念出现之前, 车间生产过程的运行分析与决策主要依赖准确模型和高效算法来提高产

品质量、生产效率等车间性能。

传统的离散制造车间的运行分析与决策优化, 采用“因果+建模+算法”模式, 首先分析参数与目标之间的因果关系, 建立描述问题的数学模型, 包括约束与目标等; 随后, 针对模型设计求解算法。当问题规模较小时, 可用数学方法求得精确解; 当规模较大时, 则根据问题特性设计智能算法, 以获取近似优化解。该模式存在以下问题^[4]:

1) 问题分析缺乏系统性: 研究者大部分从特定生产情境下进行特定问题分析, 很少从系统角度对车间运行状况进行评估; 2) 精准模型构建复杂度高: 车间内存在多种设备、工序和物料流转, 受到多源效应和多工序效应影响, 往往具有非线性、强耦合的特点, 难以构建精准模型; 3) 模型求解缺乏柔性: 研究者需采用不同约束和目标构建确定的描述性模型, 导致难以适应不同生产条件或多样化的生产需求, 可扩展性不足; 4) 决策复杂, 难以优化: 难以对动态工况变化进行实时性求解, 对于生产瓶颈的决策与优化效率低下。

收稿日期: 2024-09-05; 修回日期: 2024-10-11

第一作者: 范波(1986—), 男, 四川人。

大数据下的“关联+预测+调控”决策新模式^[5],首先通过对车间制造数据进行清洗、分类与集成,构建时序模型,挖掘序列模式,揭示制造数据间的潜在关系及其影响规律;随后,通过关联分析结果,模型化描述车间制造过程与性能指标的内在关系,实现在车间性能预测中的应用;最后,基于预测模型,识别并控制关键制造参数,建立针对产品合格率、交货准时率等性能指标的调控机制。

基于该模式,笔者围绕离散制造车间特点,搭建基于数据驱动的车间运行决策优化框架,并以某装配车间为研究对象,搭建某装配车间运行决策优

化系统。

1 基于数据驱动的车间运行决策优化框架

1.1 离散制造车间的具体特性及存在问题

离散制造车间的具体特性^[4]包括资源组织的复杂性、设备负载的不均性、生产过程的多扰动性和运行状态的不稳定性。存在的典型问题包括车间运行活动难以全面评估、生产瓶颈可追溯性差、生产数据存储分散的问题。

针对以上问题,基于数据驱动的车间运行决策优化的技术框架如图 1 所示。

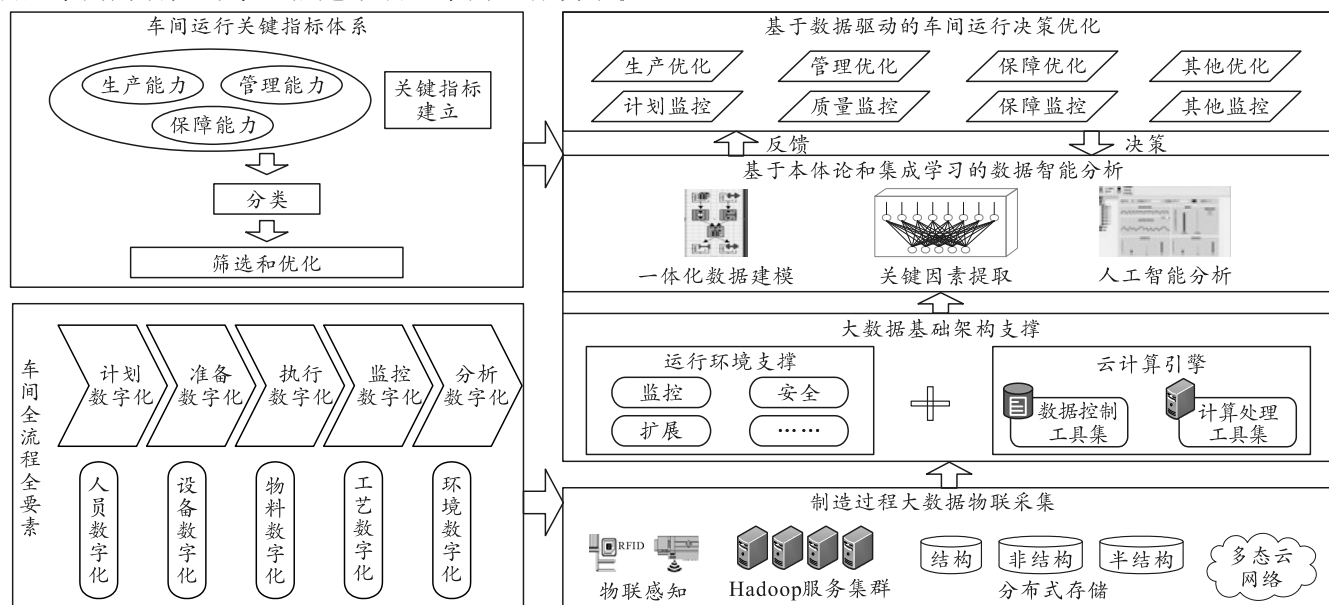


图 1 基于数据驱动的车间运行决策优化框架

1.2 基于数据驱动的车间运行决策优化的技术框架

1) 车间运行关键指标体系。由于生产过程中的环节多、要素复杂、干扰因素众多,车间运行决策面临巨大的挑战,难以达成预期目标。为此,有必要构建一套适合车间运行决策的综合评价指标体系,能够科学、全面且简洁地反映车间的运行状况。笔者重点围绕车间的生产能力、管理能力和保障能力 3 大方面,结合相关业务,构建基于系统分析的车间关键指标体系,明确适合车间的指标组合,以便进行全面的综合评估。

以车间运行关键指标体系为引导,对车间全流程全要素的数据进行了表征。车间生产全流程涵盖了生产计划、生产准备、生产执行、生产监控和生产评估分析等环节,生产全要素则包括人、机、料、法、环等方面。生产全流程全要素的数字表征涉及多类数据,如计划数据、人员数据、设备数据、物

料数据、工艺数据和环境数据等。这些数据具有多源、异构和多模态的特征。针对这些特征,采用相应的物联网技术手段,对车间生产过程中的各个环节和各类要素数据进行实时感知。

2) 制造过程大数据物联采集。对于物联网采集的结构化、半结构化和非结构化数据,基于 Hadoop 平台,采用分库分表策略,建立分布式存储数据库,以满足高效检索、分布式数据近线查询和高并发流数据获取与实时分析的需求,快速识别生产流程中的瓶颈。

3) 基于本体论和集成学习的数据智能分析。在数据基础架构的支持下,结合本体论和机器学习算法,对关键特征数据进行挖掘,实现车间不同数据的关联分析和智能提取。

4) 基于数据驱动的车间运行优化。在车间数据特征分析的基础上,参考多目标决策理论对指标体系进行评估分析,从而实现车间运行指标的决策与

优化，最终支撑车间实现产品优质、高效、低成本的生产目标。

2 关键技术

2.1 车间运行决策关键指标量化评估方法

2.1.1 基于系统分析的车间运行决策关键指标体系

车间是直接制造产品的基础单元，车间考核的指标是根据行业领域、生产模式、管理模式等方法，

虽有所差异，但构建方法基本类似。通常将车间的性能指标^[6]分解为表 1 中的第 1 层和第 2 层所示。由于存在部分关键指标重复且分类不明确的问题，部分指标虽然能反应评价对象的相关属性，但是对影响优化车间运行决策的权重低，因此采用归纳演绎法对初步建立的指标体系进行细致分类和整理，结合 Delphi 法^[7]最终确定适合车间的指标组合来进行相应的车间综合评价，如表 1 的第 3 层和第 4 层所示。

表 1 车间运行决策关键指标体系

第 1 层	第 2 层	第 3 层(初步)	第 4 层(Delphi 法)
生产 能力	质量	产品合格率、返工合格率、质量稳定率、质量损失率	产品合格率、返工合格率、质量稳定率
	成本	产品转换率、设备利用率、质量损失率、废品率、单位产品	产品转化率、单位产品能耗、单位产品原材料消耗成本
	时间	计划达成率、准时交货率、质量稳定率	计划达成率、准时交货率
	均衡性	生产均衡率、员工利用率、设备利用率、生产配套率	生产均衡率、生产配套率
管理 能力	人员	员工利用率、员工素质	员工利用率
	设备	设备利用率、设备故障率	设备利用率、设备故障率
	物料	备料及时率、产品转换率、调度指令执行率	调度指令执行率
保障 能力	安全	安全事故发生率、违反安全规定事件次数	安全事故发生率、违反安全规定事件次数
	供应	备料及时率、先进先出执行率	备料及时率、先进先出执行率
	检测	检测误差率	检测误差率

2.1.2 基于 AHP-TOPSIS 的车间运行决策量化评估

构建完成车间运行决策关键体系后，需对车间运行决策进行量化评估。常使用层次分析法、模糊综合评判法、TOPSIS 评价法、灰色关联度分析法、主成分分析法等^[8]，笔者根据车间制造网络的特点，基于车间产品制造过程的任务路线流向，将各关键指标构建为多任务加权有向网络模型，结合关键指标自身属性及其相邻节点对其重要度的影响，从度中心性、聚类系数及接近中心性 3 个特征参数^[9]出发，使用 AHP 确定权重并结合 TOPSIS 多属性决策算法^[10]，来评估资源节点的重要性，评判各关键指标影响生产运行决策的权重系数，以此来量化不同决策方案的性能。具体流程如下：

- 1) 选取关键特征参数为度中心性、聚类系数及接近中心性^[9]，可分别反映节点的重要性、紧密性和信息传递效率。
- 2) 使用层次分析法确定权重，包括构建成对比较矩阵、计算权重向量、进行一致性校验。
- 3) 综合使用 TOPSIS 算法评估节点重要性。在确定权重后，使用 TOPSIS 算法评估节点重要性。
- 标准化决策矩阵，使用从 AHP 获得的权重 w_j 对标准化后的评分进行加权，计算理想解和负理想解，计算各方案与理想解和负理想解的距离，根据距离计算相对接近度 Z_i 。按照 Z_i 值的大小对重要度

排序，完成评估任务。 Z_i 越大，节点越重要，把各方案的 Z_i 依照由大至小的方式排序，贴近度越大，决策方案更优。

2.2 车间数据分布式采存与关键特征判别方法

2.2.1 车间数据采集与预处理方法

对车间全流程全要素的数据进行在线与离线采集，以实现系统分析中关键指标的量化评估。数据源主要来自生产管理系统，包括产品信息、生产计划、生产工艺模型以及仓库与物料信息等，这些数据可通过 API 或 Webservice 等数据交换接口获取。此外，采集数据还包括生产现场的工艺设备状态及工艺参数、检测设备状态及检测数据、扫描设备读取的物料数据以及传感器感知的环境数据等。设备的联网与数据的采集、传输通过物联网提供的现场总线得以实现。

采集到的车间数据主要包括结构化和非结构化的文档(如 XML、HTML)、各类报表、图片和视频等信息。由于非结构化数据量大，且可能存在因感知设备漏测导致的空值、因感知设备异常引入的错误值以及同一空间位置重复采样导致的重复值等问题，可对实时采集的数据进行了过滤、异常值剔除、空值补全以及数据清洗等预处理操作，以提高数据的可信度。

2.2.2 基于 Hadoop 的数据分布式存储方法

由于采集到的车间数据不仅包括结构化数据,还包括半结构化数据和非结构化数据。其中,结构化数据主要来自业务系统、车间现场的制造数据、生产设备的工艺参数等,均遵循数据库的格式和长度规范。非结构化数据则主要来源于车间生产中的办公文档、各类产量报表、生产图片及视频信息等。传统的关系型数据库(如 Oracle、SQL Server、MySQL)等都只能存储结构化数据。为有效管理这 2 类数据,笔者采用基于 Hadoop 生态系统的分布式存储架构^[11]。

对于车间结构化数据的存储, HBase 主要存储来自预处理后的非实时结构化数据以及从数据库平台迁移过来的结构化数据。可采用分库分表策略对这些数据进行组织。具体而言,车间制造设备运行状态数据被划分为一个库,并按设备分表,每个设备对应一张表;车间物流信息被划分为一个库,并按读写器分表,每个读写器对应一张表;车间环境信息数据被划分为一个库,并按传感器分表,每个传感器对应一张表。

对于车间非结构化数据的存储, HBase 主要存储包括文档、图片、监控视频在内的各种格式的文件。由于这些数据无统一格式且大小不定,笔者采取基于文件元数据解析的存储策略。当收到文件存储请求时,首先对文件的元数据(如文件名、文件大小、文件类型等)进行解析。若文件较小,则将文件连同元数据一起存储到 HBase 中;若文件较大,则将文件直接存储到 HDFS 中,并将存储路径加入到文件的元数据中,最后将元数据存储到 HBase 中。

2.2.3 基于 Bootstrap 的车间数据关键特征判别

车间全流程全要素数据具有多源、异构、多模式等特征,使得这些数据难以直接应用于车间运行指标的量化评估;因此,从分散于各环节的海量异构数据中提取有效信息成为实现车间量化评估的关键环节。

为了有效判别车间数据的关键特征,需要选取能够反映车间运行本质且对指标敏感性强的指标作为数据关键特征分析的依据,并将这些关键特征作为后续重点监控对象。通过对这些关键特征数据的科学调整,逐步实现车间性能指标的优化。

笔者针对车间数据的关键特征提出一种具体的判别方法,主要使用 Bootstrap 方法^[12],基于维数

约简的特征提取思路,通过对最终统计量的排序,确定数据的关键特征,以提高数据分析的效率和准确性,为车间的量化评估提供有力支持。其具体流程为:1) 根据观测样本 $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 构造系统网络拓扑函数 F_n ; 2) 通过 Bootstrap 方法从 F_n 中抽取样本,计算相应 Bootstrap 统计量 $R^*(X^*, F_n)$,根据统计量排序进行数据关键特征判别。通过分析排序结果,识别出对系统性能或指标敏感性较高的特征,以此为基础进行进一步的优化和分析。

2.3 数据驱动的车间运行决策优化技术

车间需要高质量地满足生产过程中的各项关键考核指标,当前依赖领域知识和生产经验的决策方法存在着不精确、难度高、优化有限等问题,聚焦此问题,提出数据驱动的车间运行决策优化技术,其主要构成如图 2 所示。

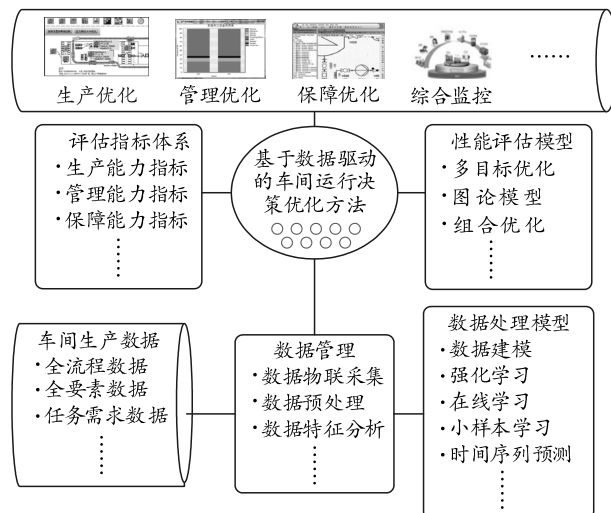


图 2 数据驱动的车间运行决策优化技术

数据驱动的车间运行决策优化技术主要包括 3 方面:1) 数据方面,针对车间制造过程数据关键特征,通过结合不同的数据优化模型和机器学习方法进行数据特征提取,包括数据建模、强化学习、在线学习、小样本学习、时间序列预测等,进行数据监测及变化趋势预测;2) 指标方面,基于关键指标体系和量化权重,建立性能评估模型,包括多目标优化、图论模型、组合优化模型等,动态评估车间运行性能;3) 决策优化方面,形成车间数据、指标、态势等综合监控,支撑从车间生产、管理、保障等方面进行决策优化。

3 应用示例

为验证基于数据驱动的车间运行决策优化技术的有效性,笔者以某装配车间为研究对象,围绕产

品生产过程中的生产态势、保障能力和质量优化等车间运行的优化目标展开研究。

在此过程中,笔者基于车间生产数据,结合产品装配过程中的业务规则、专家知识、数据处理算法及特征分析算法,对数据进行采集、处理和分析。通过这些手段,为数据驱动的车间运行决策优化方法提供高质量的数据源和样本。随后,结合评估指标体系和性能评估模型,构建了一体化的装配车间运行决策优化系统。该系统能够实现装配车间的生产态势分析、质量优化、保障能力提升以及监控报警等多项功能。

某装配车间运行决策优化系统由3个层级组成:第1层为数据采集与管理层,负责数据的采集及分类分级存储;第2层为数据处理与分析层,负责实时数据的比对、数据特征分析、综合评估及数据可视化展示;第3层为数据应用层,负责车间运行的监控、生产态势分析、制造能力分析、制造质量分析及车间报警信息管理等功能。

基于车间指标分析模型所得到的评估分析结果数据,以及基于特征系统的车间状态监控数据,系统支持通过多种可视化图表进行展示,如图3所示。这些图表类型包括柱形图、折线图、饼图、雷达图、散点图、圆环图、条形图、地图、堆积图、面积图、组合图、气泡图、GIS地图、仪表盘、全距图以及甘特图等多种形式和样式。系统还能够生成并输出详细的决策优化结果报告,为数据分析和决策提供全面支持。



图3 某装配车间运行决策优化界面

4 结论

面对如何准确全面评估车间运行状况的问题,

笔者使用系统分析法构建车间运行决策关键指标体系,并使用AHP-TOPSIS方法进行车间运行决策量化评估,构建一套适合车间运行决策的综合评价指标体系。面对如何进行数据存储和特征判别的问题,使用Hadoop进行分布式采存,并根据数据特点,使用Bootstrap进行车间数据关键特征判别,得到车间关键特征数据,优化系统性能指标。面对如何进行车间运行决策优化时,提出从数据、指标、决策优化3方面出发,进行数据驱动的车间运行决策优化。以某装配车间为研究对象,搭建某装配车间运行决策优化系统作为应用验证。今后,笔者将围绕车间数据特点,逐步实现车间运行决策优化中数据、指标、决策优化3个角度的决策优化,帮助快速高效生产,最终支撑车间实现产品优质、高效、低成本的生产目标。

参考文献:

- [1] 李培根. 智能制造概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [2] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11-23.
- [3] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 企业观察家, 2019(11): 54-55.
- [4] 方伟光. 离散制造车间大数据分析与智能决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [5] 张洁, 高亮, 秦威, 等. 大数据驱动的智能车间运行分析与决策方法体系[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1220-1228.
- [6] 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.
- [7] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(S1): 189-191, 204.
- [8] 虞晓芬, 傅珉. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004, 19(11): 119-121.
- [9] 薛浩. 基于节点重要度评估的作业车间生产调度研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [10] 樊树海, 凌宁. 基于AHP-TOPSIS模型的企业财务绩效评价[J]. 会计之友, 2018, 35(6): 78-80.
- [11] 陈吉荣, 乐嘉锦. 基于Hadoop生态系统的大数据解决方案综述[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(10): 25-35.
- [12] EFRON B. Bootstrap methods: another look at the jackknife[J]. The Annals of Statistics, 1979, 7(1): 1-26.