

doi: 10.7690/bgzd.2020.04.009

面向 RDX 制造过程的流程工业数字化车间构建技术研究

苏新瑞¹, 谷克宏², 卫诗嘉¹, 曹 帅³

(1. 中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089; 2. 甘肃银光化学工业集团有限公司, 甘肃 白银 730900;
3. 中国兵器工业集团有限公司, 北京 100821)

摘要: 为实现流程工业制造全流程达到整体最优, 以典型高能炸药黑索金(RDX)制造过程为代表, 结合生产工艺特点构建数字化车间。从车间工艺流程、运行管控、安全管控、数据管理及应用分析等方面开展数字化车间构建技术研究。在已有技术、生产工艺的基础上, 抽取与高能炸药智能制造数字化车间相关的共性和专用技术, 并对其应用到的关键技术实施方法进行阐述。结果表明: 数字化车间的建立能够实现车间生产全流程信息感知, 快速响应制造过程内外部变化, 在保障 RDX 产品的产量和质量的同时, 提高制造过程中的安全程度。

关键词: RDX 制造过程; 流程工业; 智能制造; 数字化车间

中图分类号: TJ510.5 **文献标志码:** A

Research on Digital Workshop Constructing Technology of Process Industry for Manufacturing Process of RDX

Su Xinrui¹, Gu Kehong², Wei Shijia¹, Cao Shuai³

(1. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China;
2. Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd., Baiyin 730900, China;
3. China North Industries Group Corporation Limited, Beijing 100821, China)

Abstract: In order to realize the whole process of manufacturing process industry to achieve the overall optimal in manufacturing process, the study selects the RDX manufacturing process of typical high explosives as a representative, establishing digital workshop by reference to production process characteristics. Then, from the workshop process flow, operation control, safety control, data management and application analysis of several aspects, constructing technology of digital workshop is researched. Accordingly, the commonness and special technology relating to the intelligent manufacturing of high energy explosive is extracted based on the existing technology and production engineering. Furthermore, the implementation methods of the key techniques applied in the digital workshop are expounded. The results show that constructing of digital workshop can realize the information perception of the whole process of workshop production and the digital workshop rapidly responds to the internal and external changes in the process. While ensuring the yield and quality of RDX products, the safety level in the manufacturing process is also improved.

Keywords: RDX manufacturing process; process-oriented industry; intelligent manufacturing; digital workshop

0 引言

黑索金, 即环三亚甲基三硝胺(sanya methyl tri-ammonium nitrate, RDX)是高能炸药领域中性能最优良的炸药制品, 不仅被用于国家的战术及战略武器系统中, 而且在民爆行业被用于雷管、导爆管、推进药的制备, 其产品工程爆破、安全气囊系统等得到广泛应用^[1]。目前, 高能炸药行业依旧采用不连续的生产流程和人工操作模式, 制造水平落后, 自动化和信息化程度较低, 难以保证生产过程本质化安全和必要时刻的快速扩产能力, 制约了高能炸药行业的发展和产品质量的提升^[2]。随着《中国制造 2025》战略的发布, 推进智能制造成为强国的重要举措。构建数字化车间是实施智能制造的根本途

径, 也是我国未来工业发展的必由之路。

笔者以 RDX 制造过程为研究对象, 对其数字化车间搭建过程中涉及到的数字化生产车间工艺流程功能模块、运行管控功能模块、安全管控功能模块、数据管理及应用分析功能模块进行研究, 实现生产过程可视化、生产管控精细化, 优化工艺操作, 提高本质化安全程度, 促进高能炸药行业向数字化智能化方向转型, 为流程型工业数字化车间提供理论基础和实施方法, 对数字化车间建设向流程型工业推广具有指导意义。

1 数字化车间功能模块构成

根据高能炸药行业生产特点, 并基于 RDX 制

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-01-19

基金项目: 工信部智能制造综合标准化与试验验证项目

作者简介: 苏新瑞(1992—), 男, 辽宁人, 硕士, 工程师, 从事离散型流程型智能制造数字化车间构建、智能制造标准化、信息物理融合系统及数字孪生技术应用、大数据系统构建等研究。E-mail: sxrjordan23@163.com。

造过程搭建高能炸药数字化车间。针对当前设备自动化和生产连续化程度较低问题,创建车间工艺流程功能模块;针对高能炸药数字化车间流程性与间断性耦合、批次生产、各工序各批次对质量要求高等特点,创建车间运行管控功能模块;区别于传统流程型生产,高能炸药行业更加关注于车间的安全程度,通过辨析出 RDX 生产线的潜在危险因素,进行相应的安全防护,创建车间安全管控功能模块;针对高能炸药车间产品质量数据分析、工艺异常分析、生产线设备预测性维护分析需求,创建车间数据管理及应用分析功能模块。基于 RDX 生产过程的数字化车间功能模块总体组成架构如图 1。具体包括:

1) 车间工艺流程模块:高能炸药数字化车间工艺流程核心单元静态功能模块和动态运行要求模块。

静态功能模块所具备的功能组件包括从原材料准备加料单元到产品包装单元,实现全流程连续化和自动化所部署的机器人及电气机械系统、自动计量装置、远程监控和在线监测系统、过程数据在线检测分析系统、设备状态参数采集装置以及集散控制系统和各功能接口;

动态运行功能模块要求静态功能模块各组件根据各单元工序和加工方法实现无人化智能化运行,包括:工业机器人利用激光扫描和视觉装置实现原材料的上料、破带、推料过程;自动计量装置在线精确计量反应物进料量,实现实时进料和科学配比;在线监测系统实时监测反应状态,实现对工艺的及时调控;过程数据在线监测系统检测危险品及重要加工环节反应物的关键指标^[3],对其进行定性、定量分析,实现质量和安全方面的预测性维护。

2) 车间运行管控功能模块:全部要素和基础设施模块、静态基础模块、动态功能和系统集成模块。

基础设施模块是保障车间运行管控系统运行的基础设施模块,可保证车间内技术人员与设备之间、设备与设备之间能够有效通信^[4]。支持采用有线/无线的传输方式,以及安全保障措施。

静态基础模块与工艺流程静态模块类似,包括基础信息定义、车间结构、公用工程和安全管理等组件。

动态功能模块在静态模块的基础上进行关联和建立,包括生产计划、生产调度、生产监控、工艺管理、能源管理、库存管理、质量管理和设备管理。

通过对以上方面的整合实现对数字化车间运行管控的基本功能实现。

3) 车间安全管控模块:高能炸药数字化车间安全管控失效模块、可靠性模块和安全需求模块。

失效模块是构建在工艺流程模块的基础上,应用风险分析和危险分析的方法,对车间可能出现事故的原因进行逐层、逐级分解,对影响进行分析;

可靠性模块在失效模块的基础上,借助可靠性分析方法得出模块失效概率,并提供降低系统失效的方法和措施,增加车间的安全要求;

安全需求模块根据前 2 种模块特点,总结出数字化车间安全功能具体需求,包括系统需求、软硬件需求和具体安全功能对应的实施方法。

4) 车间数据管理及应用分析模块:车间工艺过程异常分析模块和车间设备预测性维护模块。

工艺过程异常分析模块通过将现场采集数与历史正常数据进行对比,可以检测到由于未知扰动所引起的过程控制中的异常变动,从而控制、减少工艺异常带来的损失;

预测性维护模块可预测制备装置发生故障的时段,通过提前预测可以减少突发宕机带来的损失。

2 数字化车间功能模块关键技术研究

2.1 工艺流程模块关键技术

构建数字化车间工艺流程模块主要围绕工艺流程的连续化、自动化、人机隔离等数字化车间核心要素,研究关键使能性工艺技术。主要包括以下几方面:

1) 机器人智能控制技术。

激光 3 维信息的点云重建技术与目标识别技术,包括点云数据的采集、预处理和 3 维重建等方面,以及自动识别技术,例如无线射频技术(radio frequency identification, RFID)。

各工业机器人的协同控制:需满足多机器人在工序单元自动化作业时能实现安全、快速的运动路径规划,并根据工序任务选取适应的机械臂末端工具,防止出现报警等情况降低工作单元效率。

旋转刀片切割系统、碎料装置等工作单元工作运行方式和生产时序。

2) 连续进料、在线精确计量及配比技术。

新型框式搅拌工装:采用框式搅拌,通过剪切作用消除原材料与料仓壁粘接产生的蓬料现象;

减重式双料仓喂料机:采用双称,单独系统进行控制,以克服单料仓在空仓满仓转换时喂料量波

动较大的缺点。

3) 工艺过程控制技术。

硝化液在线检测技术：利用具有分析速度快、无污染、不破坏样品、可远程传输等特点的在线近红外、中红外及紫外线光谱分析技术对硝化液等危

险品进行检测。光谱分析技术的基本原理是利用单色光或复合光照射被测样品，样品中分子选择性地吸收辐射光中某些波段的光，产生吸收光谱^[5-6]。通过化学计量学方法将谱图与其表征性质数据进行关联，得到结果用于样品性质预测性分析。

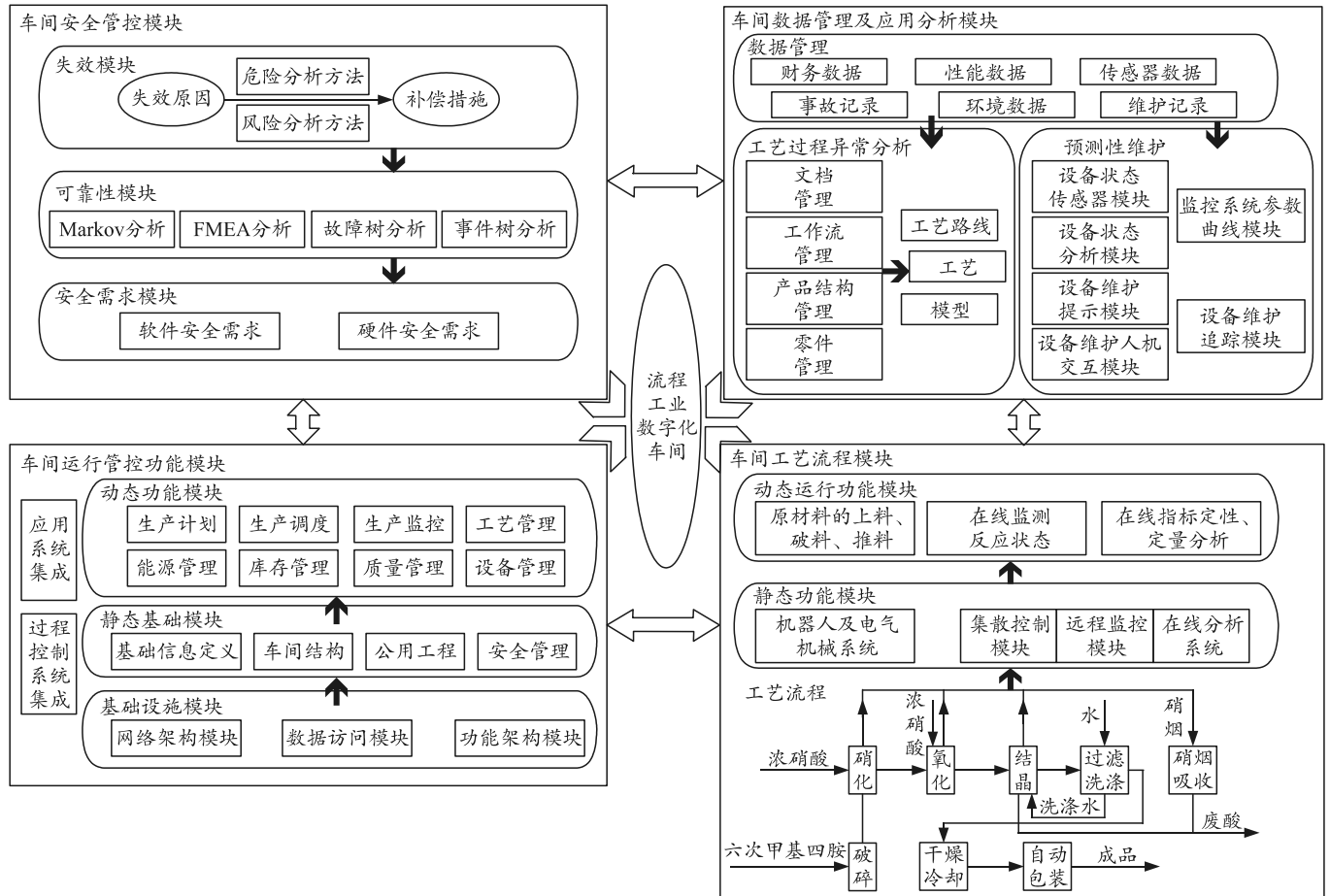


图 1 基于 RDX 生产过程的数字化车间功能模块总体组成架构

在线粒度分析检测技术：使用探头式在线图像分析系统对高固体系照片进行图像的实时分析，可应用于 RDX 生产的结晶工序，在线检测晶体结晶过程中的结晶速度、温度、加料速度、停留时间、混合速率等工艺参数对晶体生长、形状和粒度分布的影响。

2.2 运行管控模块关键技术

车间运行管控模块用来描述工厂各个层次的基本实体以及实体间的相互关系。基于自组织柔性工厂模块和柔性生产全过程管控方法，针对 RDX 生产线特点，建立生产车间运行管控系统，实现高能炸药多型号多批次的精细化管理，主要研究内容有：

1) 车间运行管控多方式数据接入技术研究：

如图 2 所示，方式包括控制系统数据接入模块、OPC 数据接入接口、智能巡检设备数据采集和质量分析

数据接入，实现车间数字化生产的信息基础设施、数字化设备和智能感知设备的数据接入和传递，为模块构建提供数据支撑。

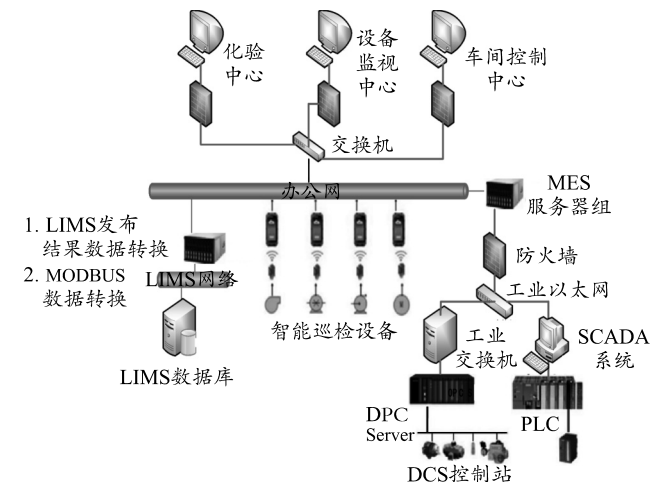


图 2 车间运行数据采集与传输网络

控制系统数据接入方式：部署或升级数据采集系统，利用组态软件将产线设备与 PLC 进行连接，实现数据的监控并提供 OPC 接口。

OPC 接口数据接入方式：对需要进行数据采集过程系统通过系统升级、软件配置、接口开发等方式拥有统一的 OPC 接口。通过统一接口将底层设备数据传输到操作站的 OPC Server，再利用无线模块将信息传入到制造执行系统端的实时数据库服务器上，实现底层设备数据的采集与数据的横向纵向传输。

智能巡检设备接入方式：巡检仪器采用工业手持终端安装软件方式，支持 Android、IOS 操作系统，内置无线模块，通过蓝牙等无线技术与设备数据采集装置的传感仪相连，并且设定账户权限，根据账户类型确定巡检内容，无账户时只支持临时测量、上传数据等功能。在客户端采用 B/S 构架，管理人员也可以联网浏览访问服务器，对软件进行操作、管理。

质量检测数据接入方式：采集实验室信息管理系统 (laboratory information management system, LIMS) 系统中样品化验信息，包括样品名称、样品加工工序、样品化验结果和样品分析方法等内容。形成质量检测分析信息源，并接入到车间运行管控平台数据库中，实现业务层对该信息的访问与获取。

2) 面向服务的体系结构 (service-oriented architecture, SOA) 基于服务组件^[7]，将应用程序的不同功能单元 (又称服务) 通过定义接口和协议彼此联系起来，并通过 WebService 实现服务的彼此调用。

独立的功能实体：通过目录服务 (UDDI) 查找，可动态修改服务且不影响客户端应用。通过简单对象访问程序 (simple object access protocol, SOAP) 可访问服务器端数据。SOAP 是简单对象访问协议，定义了一种跨平台的分布式系统通信协议。协议采用远程调用协议 (remote procedure call, RPC) 作为一致性的调用途径，通过网络从远程计算机程序上请求服务。可扩展标记语言 (extensible markup language, XML) 作为数据传送的格式，允许服务提供者和服务客户经过防火墙 Internet 进行通信交互。

大数据量低频率访问：通过使用网络服务描述语言 (web services description language, WSDL) 和基于 XML 文本的 SOAP 请求，可实现一次性接受大量数据的接口。

基于 .NET 框架的运行平台：.NET 可提供 WebService 和 NetService。由于 .NET 技术框架运行于 Windows 操作系统，最大程度地降低开发 Windows 应用的难度^[8]。在生成 ASP Web 应用程序时，主要采用 N 层体系结构进行 Web 应用程序开发，利用分层方式来处理复杂的功能，底层每个程序接口执行当前一个简单的功能，而上层通过调用不同下层程序并按不同顺序来执行这些程序，来完成多个复杂的业务功能。

3) 基于产品直通率模块的柔性生产线全程管控方法。炸药生产企业的产品生产需对原材料、中间产品的质量有较高要求，笔者提出全程质量把控方法，实时进行产品全批次在线实时质量跟踪、预警和回溯。

可配置、可自组织的柔性工厂模块：柔性工厂模块工具支持统一的物理工厂和逻辑对象工厂数据建模，为系统提供了完整统一的数据模型，并为上层业务模块提供基础数据支撑。柔性工厂模块描述的关键要素包括元模型、元数据、子模型和规则；元模型定义描述模型的语言，工厂里任一组成元素都是元模型实例；元数据起数据字典作用被定义在工厂模型中的公共对象；子模型以工厂作为实例，定义元模型之间的关系；规则主要用于不同层次之间数据映射。关键要素关系如图 3 所示。

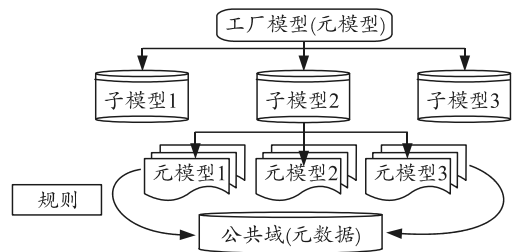


图 3 工厂关键要素关系

直通率是衡量生产线出产品质水准的一项指标，可以描述生产质量、工作质量或测试质量的某种状况。利用自组织的柔性生产线模块实现产品的批次跟踪管理，通过原材料配比、中间工序投入产出、最终产品的包装等信息，使产品的分析更加深入。

2.3 车间安全管控模块关键技术

安全模块构建研究过程中，利用风险分析、风险评价、风险管控技术，对高能炸药数字化车间危险、有害因素进行识别、分析、评估和预测，并提出安全防护措施和方法，将风险有效的控制到可接受范围内。

风险分析技术：针对高能炸药数字化车间特点，

对特定的危险源进行危险和可操作性分析 (HAZOP 分析^[9])，评估目标偏移原因、后果及可能的安全措施，并且提供安全建议，实现危险源识别的数字化和精准化。

风险评估技术：风险分析实现对系统的风险定量和定性分析，针对高能炸药车间 HAZOOP 分析输出，利用故障树分析 (fault tree analysis, FTA)、事件树分析 (event tree analysis, ETA)、失效模式和影响分析 (failure mode and effect analysis, FMEA) 等技术生成风险矩阵、风险图，对风险进行有效评估。针对 RDX 生产线的安全子系统的安全要求，确定系统或子系统的必要的风险降低，计算合适的安全完整性等级 (safety integrity level, SIL)，包括工艺物料平衡图 (process flow diagram, PFD)/点特征直方图 (point feature histograms, PFH)、失效率、系统体系结构等，并给出风险降低措施建议。

风险管控技术：1) 对设备级功能安全要求，包括运行状态、环境适应和电气安全等；2) 对人员的功能安全要求，包括安全操作规范和安全操作的具体要求；3) 对安全管理的具体要求，包括安全参与

人员的责任，以及安全的组织等。

2.4 车间数据管理及分析模块

制造执行系统 (manufacturing execution system, MES) 是面向采集车间生产制造过程管理的实时信息系统^[10]，拥有制造过程所有的动态和静态信息。将在线监测的数据上传到分布式控制系统 (distributed control system, DCS) 系统，根据工艺控制情况进行组态和调试，确保工艺控制安全可靠，系统运行正常。从 DCS 系统将工艺控制采集上传到 MES 系统。MES 软件系统进行设置工艺运行模块，根据数据设置工艺数据范围，利用大数据分析，对异常数据进行分析优化。

如图 4 所示，工艺数据分析数据库是基于分布式处理 Hadoop 软件体系框架。利用 SHELL、API 等应用程序调用接口的方式，将体量较大的文本、文件上传至文件处理组件；通过 SQOOP 开源工具将传统数据库或数据表导入分布式数据库；利用分布式文件系统 (HDFS) 对数据进行存储、管理，以及基于 Spark 分布式的计算框架对数据进行处理。

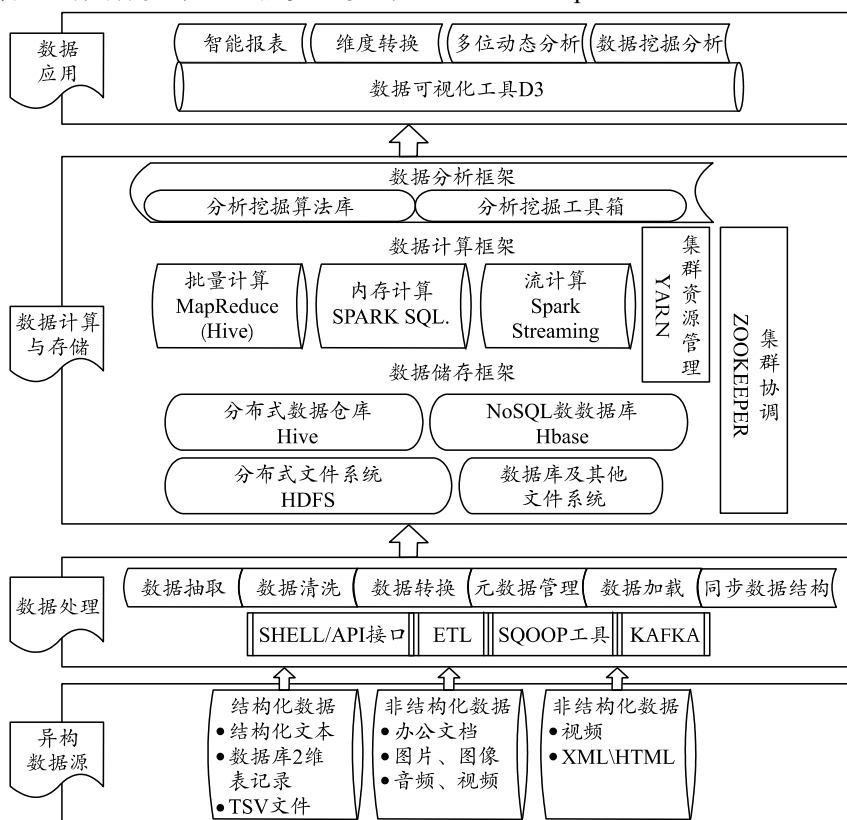


图 4 基于 Hadoop 软件框架的数据库总体架构

工艺异常识别方法：工艺异常识别分别生产过程模块和历史数据作为识别基础。基于过程模块的定量方法为动态机器仿真、观测器法和奇数校验法；

基于历史数据的定量方法为神经网络法和概率分类法。针对不同反应物成分确定定性方法如图 5。



图 5 储存管理子系统凭证编辑前界面

6 结束语

运用白盒和黑盒 2 种方法对系统进行测试，各模块功能正常、接口数据通联良好，没有出现系统崩溃，一切运行正常。因测试客户机数量和时间的限制，并不能表明系统性能优越、没有缺陷，仅表明系统在逻辑方面，设计没有问题。在系统实际投入运行后，仍需从广大客户群体中收集系统错误和不足，对系统进行纠错和完善。

(上接第 39 页)

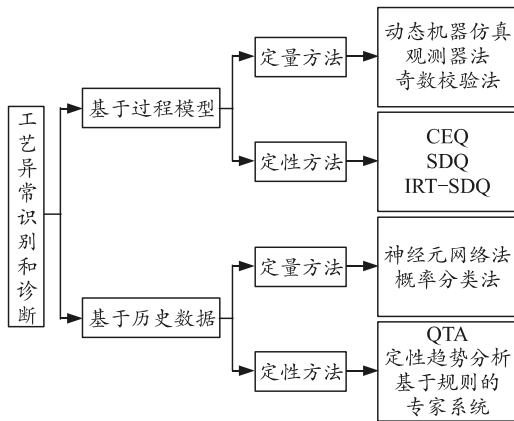


图 5 工艺异常识别方法类型

3 结束语

笔者结合流程工业工艺特点与生产现状，在流程型企业建设数字化车间，落实我国智能制造发展战略。选取流程工业中高能炸药 RDX 生产制造过程为研究对象，围绕数字化车间生产工艺，从运行管控、安全管控、数据管理和应用分析等 4 方面内容进行研究，提出车间工艺流程模块、车间运行管控模块、车间安全管控模块以及车间数据管理和应用分析模块，并对创建功能模块所应用到的关键技术进行阐述，为流程型工业数字化车间的建设提供理论支撑。该方法为加速我国工业化和信息化融合，

参考文献:

- [1] 王勇, 赵翔. 浅析油料装备器材信息化建设[J]. 中国储运, 2012(8): 133-134.
- [2] 贾青宁, 王翔, 张志海, 等. 部队卫生装备信息化管理的现状及对策[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(2): 145-146.
- [3] 涂亚庆, 邬晓岚, 陈军, 等. 油料装备器材器材信息化模式的系统构想[J]. 后勤工程学院学报, 2006, 22(2): 31-35.
- [4] 美国国防部副部长帮办(保障与器材战备)办公室. 美国国防部装备保障路线图[M]. 于川信, 刘志伟, 译. 北京: 军事科学出版社, 2012: 12-161.
- [5] 王永德. 装备保障信息化建设浅析[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(8): 148-151.
- [6] 张藩藩, 付长义, 龚德金. 美军联合全资产可视系统对我国的启示[J]. 科技视界, 2014(29): 178.
- [7] 粟琳, 王绪智. 美军装备保障新理论新技术发展趋势[J]. 中国表面工程, 2007(1): 6-10.

提升我国整体智能制造水平，顺利实施我国制造强国战略具有较为重要的意义。

参考文献:

- [1] 米向超, 胡立双, 陈毅峰. 黑索今工业生产技术进展[J]. 当代化工研究, 2013, 10(8): 26-29.
- [2] 陈文靖, 叶志文. RDX 的合成工艺研究进展[J]. 爆破器材, 2012, 41(2): 11-15.
- [3] 张经纬. 面向化工生产的实验室信息管理系统的设计与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 10-12.
- [4] 蒋捷峰, 胡瑞飞, 殷鸣, 等. 智能制造数字化车间信息模型[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 70-74.
- [5] 杜晓敏. 基于 DSP 的光谱仪数据传输及信息分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 5-11.
- [6] 刘晓东. 基于太赫兹光谱的爆炸物检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016: 74-85.
- [7] WEI Z, BENHARKAT A N, AMGHAR Y. Change-centric Model for Web Service Evolution[C]. 2014 IEEE International Conference on Web Services (ICWS), 2014.
- [8] 牛立栋. 基于.NET的SOA组件集成开发框架的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 12-13.
- [9] 杨仕刚, 王三明. 定量风险矩阵在HAZOP分析中的应用研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(1): 242-244.
- [10] 柯裕根, 雷纳尔·戴森罗特, 沈斌. HYDRA制造执行系统指南: 完美的MES解决方案[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 4-10.