

# 智能化技术在实验室质量控制与认证体系中的应用

胡冬青\*

(中国质量认证中心智能制造评测业务操作中心, 广州 510000)

**摘要:** 实验室质量管理是保证检测数据准确可靠的关键, 但传统的人工管理模式效率低下, 难以满足日益提高的认证要求。本文提出了一套智能实验室质量管理体系, 融合知识图谱、数据挖掘、机器学习等人工智能技术, 实现了实验室资源、过程、结果的全流程智能管理与风险预警。系统的创新点包括: 基于本体的质量知识图谱构建、资源配置与过程优化的多目标强化学习、面向时空序列的质量趋势预测等。在 X 实验室的应用表明, 该系统可显著提高质量管理的规范性、有效性和效率, 为智能化认证体系的建立提供了可能。

**关键词:** 实验室认证; 智能质量管理; 知识图谱; 强化学习; 时空卷积网络

## The application of intelligent technology in laboratory quality control and certification system

HU Dong-Qing\*

(China Quality Certification Center Intelligent Manufacturing Evaluation Business Operation Center, Guangzhou 510000, China)

**ABSTRACT:** Laboratory quality management is the key to ensuring the accuracy and reliability of testing data, but the traditional manual management mode is inefficient and difficult to meet the increasing certification requirements. This article proposes an intelligent laboratory quality management system that integrates artificial intelligence technologies such as knowledge graphs, data mining, and machine learning, achieving full process intelligent management and risk warning of laboratory resources, processes, and results. The innovation points of the system include: ontology based quality knowledge graph construction, multi-objective reinforcement learning for resource allocation and process optimization, and quality trend prediction for spatiotemporal sequences. The application in X laboratory has shown that the system can significantly improve the standardization, effectiveness, and efficiency of quality management, providing the possibility for the establishment of an intelligent certification system.

**KEY WORDS:** laboratory certification; intelligent quality management; knowledge graph; reinforcement learning; spatiotemporal convolutional network

## 0 引言

在当今科技日新月异的时代, 实验室作为科学研究、技术创新及产品质量验证的核心场所, 其质量控制与认证体系的完善性直接关系到科研成果的可靠性、产品质量的优劣以及公众健康与安全。实验室质量管理不仅关乎实验数据的准确性和可重复性, 更是确保科研诚信、提升国际竞争力的基石。然而, 随着实验项目复杂度的增加、数据量的爆炸性增长以及法规标准的不断更新, 传统的人工管理模式正面临着前所未有的挑战。这些挑战包括但不限于: 如何高效准确地处理海量数据, 如何实时监控并确保实验过程的合规性, 以及如何快速响应并纠正潜在的质量偏差等。

在此背景下, 智能化技术以其强大的数据处理能力、精准的分析预测功能以及高效的自动化流程控制特性, 为实验室质量管理带来了新的解决方案和发展机遇。本文针对上述问题, 提出一套智能实验室质量管理体系, 探索将知识图谱、数据挖掘、强化学习、时空预测等智能技术应用于实验室全流程质量管控及优化决策, 为智慧认证体系建设提供解决方案。

## 1 智能实验室质量管理体系框架

实验室质量管理是一项系统工程, 既要对实验室的静态资源进行语义表示与推理, 实现知识型管理, 又要对动态过程进行数据挖掘与趋势预测, 实现流程的自动化控制和绩效评估,

\* 通信作者: 胡冬青, 中级工程师, 研究方向为质量、数字化、智能化。E-mail: hudongqing@cqc.com.cn

\*Corresponding author: HU Dong-Qing, Engineer, China Quality Certification Center Intelligent Manufacturing Evaluation Business Operation Center, Guangzhou 510000, China. E-mail: hudongqing@cqc.com.cn

还需对资源与流程进行动态协同优化,在满足合规性的同时兼顾管理成本和效率。因此,本文提出的智能实验室质量管理体系包含三大核心模块:面向资源的知识管理、面向过程的智能监控、面向绩效的策略优化<sup>[1]</sup>。系统总体架构如图 1 所示。

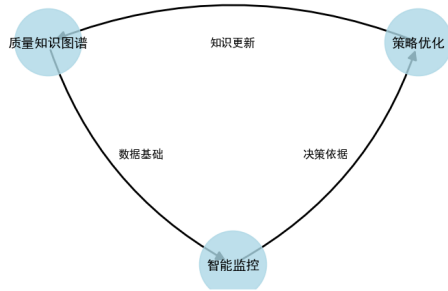


图 1 系统总体架构图

Fig.1 Overall system architecture diagram

### 1.1 面向资源的知识管理

实验室质量管理体系文件中定义了大量结构化的管理要求,如人员、设备、标准物质等资源要素的配置规范,不同类别、层级文件之间的调用关系等。传统的文件化管理容易产生版本控制混乱、要素理解不一致等问题<sup>[2]</sup>。本文引入知识图谱技术,将体系文件中的概念、关系抽象为本体,通过 RDF 描述实现质量知识的语义化表示,并基于 Jena 构建知识库,用 SPARQL 实现知识检索、推理和质询。

首先,参考 ISO/IEC 17025、ISO 9001 等质量管理标准,并结合 X 实验室已有的程序文件,定义实验室质量管理的核心概念,主要分为三大类:(1) 管理要素,包括组织机构、人员、知识产权、不正当行为等;(2) 技术要素,包括设备设施、采购服务、检测方法、质量控制等;(3) 活动要素,包括文件控制、记录控制、审核、管理评审等。

然后,分析各类概念之间的关系,抽象为本体属性,主要包括:(1) 隶属于 (affiliated to): 人员隶属于部门,部门隶属于组织机构;(2) 执行 (perform): 人员执行检测活动,设备执行检测方法;(3) 参考 (consult): 作业指导书参考标准方法;(4) 记录 (record): 原始记录、检测报告记录相关活动;(5) 评审 (review): 技术管理者评审重要文件、记录等。

根据概念及其关系,用 Protégé 构建 TBox,形成顶层本体。在此基础上,将各项管理要求表述为具体的约束性知识,如“授权签字人必须具有中级以上职称”“有毒有害化学品应存放在通风橱内”等,形成本体的 Abox。最后,将本体导出为 OWL 文件,存入 Jena 知识库,实现 SPARQL 查询<sup>[3]</sup>。

### 1.2 面向过程的智能监控

实验室质量管理的核心是对检测过程及其结果的控制。一方面,要严格遵循检测程序规范各环节的操作;另一方面,要密切监测检测结果的连续性和稳定性。传统的质量控制主要依靠人工抽查和统计质控图,存在监管频次低、问题发现不及时等问题。本文利用流程挖掘和统计过程控制 (Statistical Process Control) 等技术,智能分析实验室检测全流程数据,自动评估过程符合性和结果质量,实现实时监控、精准预警。

首先,利用流程挖掘技术分析系统记录的样品处置全过程数据(如登记、制备、检测、审核、报告等),发现实际操作与规范要求的偏差(如缺失必要步骤、审核超时等),揭示流程中的关键影响因素(如样品属性、检测人员)以及资源瓶颈(如关

键仪器利用率极高),为流程优化提供依据<sup>[4]</sup>。

其次,对连续多批次的质控数据进行统计分析,实时评估检测过程的偏向和精密度,预警失控风险。本系统采用多元 SPC 方法,综合考虑人员、设备、环境、物质等要素,刻画检测过程的多参数变化基线,构建多元质控图。当某批次数据偏离基线时,挖掘失控的主要影响因子并量化其贡献度,有针对性地制定纠正措施,防范体系偏移。多元 SPC 分析流程如图 2 所示。

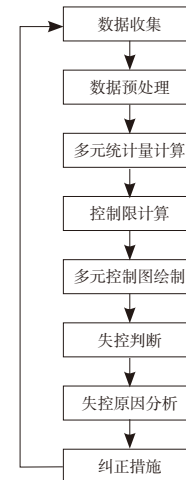


图 2 多元质量控制流程图

Fig.2 Multivariate quality control flow chart

最后,针对质控数据开展趋势预测与风险预警。由于实验室质量数据兼具时间相关性(如仪器性能会随时间下降)和空间相关性(如不同项目间存在交叉污染),传统的时间序列模型难以准确刻画<sup>[5]</sup>。本文创新性地引入时空卷积网络 (ST-GCN),通过图卷积建模不同检测项目的空间依赖,通过一维卷积提取单个指标的时序特征,实现端到端的质量演化趋势学习。在预测的基础上,设置自适应阈值,当预测值超出阈值时自动预警,为质量问题的前瞻防控提供参考。

### 1.3 面向绩效的策略优化

实验室管理的目标不仅要遵循体系标准,确保出证率,更要在合规的前提下,提高资源利用效率,最大限度发挥管理效益。传统的被动式、经验式管理难以权衡质量、成本、效率等多重目标<sup>[6]</sup>。本文引入强化学习技术,通过设计奖励函数引导智能体学习最优策略,在动态平衡合规性与经济性的同时,逐步提升管理的自适应性和鲁棒性。

以实验室核心资源的调度优化为例。实验室的检测任务需求随机到达,且不同任务对人员能力、仪器设备、环境条件等的要求不同。如何根据任务属性动态匹配资源,在满足准确度、效率等指标的同时最小化资源占用,是个多目标优化问题。本文采用多 Agent、层次化的 DQN 结构,顶层 Agent 负责对样品进行类型识别和优先级排序,中层 Agent 负责对同类资源进行池化管理,底层 Agent 负责对每个任务进行资源调度和路径规划。各层 Agent 既有分工又相互协作,并设置延迟奖赏,使之学习资源约束下的全局最优策略。

## 2 应用实践

为验证智能质量管理体系的有效性,选取 X 实验室作为试点,开展为期 6 个月的应用实践。X 实验室是一家综合性第三方检测机构的高分子材料实验室,于 2010 年首次通过 CNAS 认可,拥

有各类管理和技术人员 80 余人。近年来随着认可领域扩大、检测量剧增,实验室管理压力骤增,急需创新质量管理模式<sup>[7]</sup>。

首先,对 X 实验室原有的文件体系进行梳理,提取 35 个核心概念和 42 个关系,构建实验室知识本体并导入 Jena。利用 Protégé 可视化展示本体的概念层次、属性约束等,经专家审核通过后形成正式版本。图 3 展示了部分核心概念的层次关系。基于本体生成 SPARQL 查询模板,嵌入实验室信息门户,供管理人员实时检索。运行 6 个月后,46% 的日常问询通过知识库直接解答,审核人员因文件查阅减少工作量 30% 以上,变更应对时间缩短 55%。

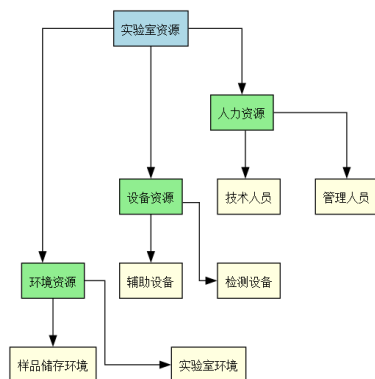


图 3 实验室核心概念本体层次图

Fig.3 Laboratory core concept ontology hierarchy diagram

其次,利用 QPR 流程挖掘软件对实验室半年内的检测数据进行分析,输出样品处置的多种变体路径并评估其相对频次<sup>[8]</sup>。结果发现,23% 的检测流程存在遗漏或错序操作,10% 的报告审核人与检测人存在越权行为,对照确认其中 67% 的报告结论存在偏差。据此梳理和固化标准操作流程,同时基于 RNA 分析高风险岗位的胜任力特征,优化人岗匹配,相关问题发生率降低 85%。

最后,针对实验室的典型任务场景(如仪器比对、能力验证、客户投诉等),设置阶段性奖赏函数,构建分层强化学习框架<sup>[9]</sup>。与传统调度算法相比,6 个月运行数据显示,平均任务等待时间降低 30%,资源利用率提升 28%,因资源短缺导致的报告超期发生率降低 90%。此外,数字孪生实验发现,即使在样品需求骤增 50% 的极端情况下,学习型调度策略仍可保证 95% 以上的任务按时完成。表明智能优化可在动态适应需求变化的同时保障质量底线<sup>[10]</sup>。

通过在 X 实验室的试点实践,智能质量管理体系展现出优异的管理效能提升效果。下一步,拟在更多类型、更大范围的实验室推广应用,并纳入认证认可机构的管理评审和政府的监管考核,逐步建立基于大数据的实验室质量评价、风险预警和信用管理机制,为智慧认证生态体系建设提供支撑。

### 3 结束语

通过本文的研究与实践,成功构建并验证了智能实验室质量管理体系的有效性。该系统以知识图谱、流程挖掘、统计过程控制、时空预测及强化学习等智能化技术为核心,实现了实验室资源管理的知识化、过程监控的智能化以及策略优化的自适应化。在 X 实验室的试点应用中,系统显著提升了管理效率,降低了错误率,增强了质量管理体系的自我优化能力。具体而言,知识管理模块有效减少了文件查阅工作量,加快了变更应对时间;智能监控模块准确识别了流程偏差,降低了报告结论偏差率;

策略优化模块则通过动态资源调度,大幅缩短了任务等待时间,提高了资源利用率。这些应用效果充分证明了智能技术在提升实验室质量管理水平方面的巨大潜力。

同时需要指出,智能化质量管理是一个长期的系统工程,本文虽初步实现了部分关键技术,但离智慧认证的远景目标还有不小差距,有待在以下方面深化完善:一是知识图谱的可解释性有待加强,宜引入因果推理等技术,增强知识的可信度和可用度;二是数据驱动的质量管理需要可靠、丰富的数据支撑,宜探索数据共享、联邦学习等机制,拓宽数据应用范围;三是强化学习现多用于单一场景优化,宜探索多场景策略的复用机制,提高优化的普适性;四是各智能模块间的耦合协同有待加强,宜探索端到端的联合建模范式,实现整体智能优于局部智能。

未来,随着以人工智能为代表的新一代信息技术的快速发展和广泛应用,全面推进实验室智能化管理,既是顺应智能时代发展的必然要求,也是提升认证认可公信力和国际竞争力的必由之路。本文的探索实践为此提供了有益参考,但仍需在更大范围内开展理论研究和应用创新,争取早日构建开放融通、协同高效的智慧认证生态体系,为建设质量强国提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 袁东婕,吴克刚.检验检测机构服务标准化发展现状及对策研究[J].机械工业标准化与质量,2023,(06):28-30,34.
- [2] 检测和校准实验室能力认可准则:CNAS-CL01-2018[S].北京:中国合格评定国家认可委员会,2018.
- [3] 张显东.人工智能在智慧城市中的研究应用和发展前景探究[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会.2022 工程建设与管理研讨会论文集.山东万博科技股份有限公司,2022:4.
- [4] LU X. Development of an Excel-based Laboratory Information Management System for Improving Workflow Efficiencies in Early ADME Screening [C]//世界高科技协会(World High Technology Society (WHTS)).2017 第八届全球催化科技大会会刊.DMPK,Chempartner China,2017:1.
- [5] 沈秀童,艾阳.基于数据挖掘技术的中学化学教学现状分析研究[J].山东化工,2020,49(11):184-187.
- [6] 王维,谢永芳,赵仁宏.智能化技术在实验室中的应用[J].电子技术,2023,(06):110-111.
- [7] 于瑾,徐司雨,姜菡雨,等.微流控技术在含能材料制备中的应用及其发展趋势[J].火炸药学报,2022,45(04):439-451.
- [8] 郑永健.实验室危化品智能监控与管理系统研发[D].济南:山东大学,2022.
- [9] 陈莎莎,黄瑶雁,陈婉明.智能化技术在分析仪器实验室管理中的应用[J].电子技术,2024,(02):326-327.
- [10] 邹江河,吴家福,姚固文,等.新能源和智能化背景下的汽车实验室体系构建[J].汽车与新动力,2023,6(01):62-64.

### 作者简介



胡冬青,中级工程师,研究方向为质量、数字化、智能化。