

冶金机械自动化校准的溯源性体系构建研究

姜新军 郭伟 魏铁龙

河南金数智能科技股份有限公司 河南 安阳 455004

摘要: 冶金工业高质量发展中, 冶金机械精度关乎产品质量与生产安全, 自动化校准溯源性是保障校准可靠的核心前提。本文以溯源性核心概念为基础, 结合冶金行业校准特点与体系构建原则奠定理论根基; 设计出包含架构、关键要素及溯源链模型的自动化校准溯源性体系框架; 分析关键技术, 提出风险防控与持续改进机制。旨在为冶金企业构建科学完善的体系提供方案, 确保校准结果可追溯验证, 提升机械精度, 推动行业高效精准发展。

关键词: 冶金机械; 自动化校准; 溯源性体系; 计量标准

引言: 随着智能制造技术普及, 冶金机械朝着大型化、自动化方向升级, 而机械关键参数的校准精度, 成为制约产品质量提升的核心瓶颈。当前多数冶金企业的校准工作虽实现自动化, 但溯源环节存在路径模糊、数据管理散乱等问题, 导致校准结果缺乏可靠验证依据, 埋下生产安全隐患。高温、高粉尘的特殊生产环境, 更对校准溯源的稳定性提出严苛挑战。基于此, 聚焦冶金行业特性构建系统化的自动化校准溯源性体系, 破解量值传递难题, 对夯实行业计量基础具有重要现实意义。

1 冶金机械自动化校准溯源性理论基础

1.1 溯源性核心概念

溯源性是计量领域关键特性, 通过有规定不确定度的连续比较链, 使测量结果或标准值与国家或国际计量基准相连。在冶金机械自动化校准中, 关键参数校准结果要逐级比对, 最终溯源至国家或国际计量标准, 保证结果一致可比。其核心要素有三: 一是溯源路径明确各级环节; 二是不确定度控制合规, 防止误差累积; 三是计量标准传递, 各级标准定期检定或校准。在冶金机械压力类参数校准中, 要依托实验室专业能力, 通过量值传递体系, 将压力参数校准结果溯源至国家压力计量基准, 为冶金机械自动化校准结果溯源奠定基础。

1.2 冶金行业校准特点分析

冶金行业机械校准特点鲜明, 因行业特殊性, 体现在环境、对象、要求三方面。环境上, 生产现场高温、高粉尘、强振动与电磁干扰并存, 对校准设备耐候性与抗干扰能力要求高。对象上, 冶金机械类型丰富, 不同设备校准参数差异大, 压力类参数为核心监测指标, 实验室需开展专项校准。要求上, 冶金生产连续化, 设备停机校准时间短, 产品精度提升倒逼校准结果精度与溯源性提高^[1]。实验室自2008年按ISO/IEC17025《检测和校准实验室能力通用要求》建立质量管理体系, 2009年10

月首次接受国家认可委员会现场审核, 为满足冶金行业压力类参数校准要求提供了合规的体系支撑。

1.3 溯源性体系构建原则

冶金机械自动化校准溯源性体系构建需遵循四大核心原则。科学性原则: 体系设计基于计量学理论与行业实际, 溯源路径、不确定度评估、计量标准选择要合规, 实验室开展压力表等检定校准时, 需依ISO/IEC 17025体系, 确保压力量值溯源合规。完整性原则: 体系覆盖冶金机械全生命周期自动化校准环节, 从出厂到生产、维修后等校准结果皆可溯源, 尤其要覆盖压力类计量器具新购检定、在用校准、维修后复检全流程。实用性原则: 体系考虑生产连续化, 校准流程简洁高效, 校准设备适应恶劣环境, 实验室针对冶金现场, 选用耐低温、抗振动的便携式压力校验仪, 满足现场快速校准需求。可追溯性原则: 建立完善记录管理机制, 详细记录校准信息, 确保结果来源与有效性可追溯。

2 冶金机械自动化校准溯源性体系框架设计

2.1 体系架构设计

冶金机械自动化校准溯源性体系架构为“三层四级”结构。“三层”是计量基准层、行业计量标准层、企业校准层; “四级”指从国家计量基准到企业工作计量器具的量值四级传递。计量基准层为体系最高层, 以国家或国际计量基准(如国家温度、长度、压力基准)为核心, 提供高精度量值参考。行业计量标准层由冶金行业专用计量标准组成, 如温度、力值、压力计量标准装置, 需定期与国家计量基准比对, 为企业校准层传递量值, 实验室压力标准装置(如活塞式压力计、数字压力标准器)需定期送上级计量机构检定, 确保符合行业计量标准要求。企业校准层是执行层, 含企业内部计量标准装置与自动化校准系统, 负责日常校准, 其标准要定期送行业层检定或校准, 实验室作为企业校准层核

心,依托ISO/IEC17025质量管理体系,利用内部压力标准装置开展压力表、压力变送器自动化校准。架构还融入信息化管理模块,贯穿三层,实现溯源数据实时采集、存储、查询与分析,确保量值传递可监控、可追溯,形成完整架构闭环。

2.2 关键要素与流程

该体系关键要素涵盖计量标准资源、自动化校准设备、溯源数据管理系统和专业技术人员。计量标准资源须满足各级溯源要求,各级标准要有有效检定或校准证书,实验室压力标准装置需持国家认可证书,压力表等校准结果要与标准装置证书信息关联。自动化校准设备要适配多参数校准,具备耐高温等特性,实验室针对压力参数配置自动化压力校准系统,能自动采集压力信号、处理数据并生成校准报告。溯源数据管理系统要实现校准数据全流程记录与管理,详细记录设备、参数、标准装置及不确定度等信息,符合数据追溯要求。专业技术人员需掌握相关知识技能,实验室人员要经专项培训,熟悉压力计量原理、系统操作及体系要求,保证操作规范^[2]。核心流程为:企业自动化校准系统用内部标准校准参数;内部标准送行业层检定或校准;行业层与国家基准比对;溯源数据管理系统记录数据,形成溯源档案供查询验证。

2.3 溯源链模型构建

冶金机械自动化校准溯源链模型采用“金字塔”逐级传递结构,明确溯源路径。顶层是国家/国际计量基准,是溯源链源头。第二层是行业计量标准,基于国家基准校准,针对行业特性建立,不确定度小于下一级允许误差,行业压力计量标准不确定度控制在0.01%以内。第三层是企业计量标准,由行业标准校准,部署在企业计量实验室,作为企业计量标准核心用于校准。第四层是自动化校准执行层,通过企业标准对关键校准点自动化校准,记录不确定度并与上一级关联。模型中每个环节都要出具校准证书,明确量值传递关系与不确定度,确保溯源路径可验证。

3 溯源性体系实施的关键技术

3.1 高精度校准技术

高精度校准技术是冶金机械自动化校准溯源性体系实施的核心支撑,重点解决冶金机械关键参数的高精度测量与校准问题。针对几何精度校准,采用激光干涉测量技术;针对力值参数校准,采用压电式力传感器校准技术;针对压力参数校准,实验室采用高精度压力校准技术,如使用0.01级活塞式压力计作为标准,对自动化压力校准系统进行校准,确保系统测量精度,进而实现

压力表、压力变送器的高精度校准,校准误差可控制在 $\pm 0.1\%$ 以内。针对温度参数校准,采用黑体辐射源校准技术。这些高精度校准技术的应用,确保冶金机械关键参数(含压力参数)的校准结果达到高准确度,为溯源性体系的实施奠定技术基础,尤其实验室基于ISO/IEC17025体系,将压力高精度校准技术与质量管理结合,进一步保障了压力量值溯源的可靠性。

3.2 在线校准与动态补偿技术

在线校准与动态补偿技术针对冶金机械连续化生产的特点,解决传统离线校准停机时间长、无法应对动态误差的问题,是溯源性体系适应冶金生产场景的关键技术。在线校准技术通过在冶金机械关键部位嵌入内置式校准模块,针对压力参数,可在冶金机械液压管路、气体管道上安装在线压力校准接口,接入便携式自动化压力校准仪,实现压力表、压力变送器在线校准,无需停机,校准频率可根据生产需求设定(如每2小时自动校准一次),校准数据通过工业总线实时传输至溯源数据管理系统,实现校准结果的实时溯源。动态补偿技术则通过建立误差补偿模型,实时修正冶金机械在运行过程中因温度变化、振动等因素产生的动态误差,如针对高温环境下压力表示值漂移,通过温度传感器实时采集环境温度,代入预设的温度补偿模型,自动修正压力示值误差,补偿数据与校准结果关联,确保补偿后压力精度仍可溯源至计量标准。该技术的应用,既保障了冶金生产的连续性,又确保了动态工况下校准结果的溯源性。

3.3 不确定度评估方法

不确定度评估是冶金机械自动化校准溯源性体系的关键环节,用于量化校准结果的可靠性,确保溯源过程中误差可控。针对冶金机械自动化校准,需采用“分步评估+综合合成”的不确定度评估方法。首先,分步评估各级溯源环节的不确定度,包括计量基准传递至行业计量标准的不确定度(如国家力值、压力基准传递至行业标准的不确定度 U_1)、行业计量标准传递至企业计量标准的不确定度(U_2)、企业计量标准校准冶金机械的不确定度(U_3),每个环节需考虑设备误差、环境误差、操作误差等影响因素,如实验室开展压力表校准时,需评估压力标准装置误差、环境温度变化误差、操作人员读数误差等引入的不确定度分量,其中标准装置误差占比最大,需严格控制在允许范围内^[3]。其次,采用GUM(测量不确定度表示指南)方法进行综合合成,将各级不确定度按方差合成法则计算,得到冶金机械校准结果的扩展不确定度 $U = k \times \sqrt{(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2)}$ (k 为包含因子,通常取2,对应95%置信水平)。实验室针对压力表、压

力变送器校准,已建立标准化的不确定度评估模板,确保评估过程符合ISO/IEC17025体系要求。同时,需建立不确定度数据库,记录不同校准项目、不同环境条件下的不确定度数据,为溯源性体系提供量化的精度保障。

3.4 信息化管理技术

信息化管理技术为冶金机械自动化校准溯源性体系提供数据支撑与流程管控,实现溯源过程的全数字化管理。其核心包括溯源数据采集系统、数据库管理系统、可视化监控平台三大模块。溯源数据采集系统通过工业物联网技术,实时采集各级校准设备的校准数据(如计量标准参数、冶金机械校准结果、不确定度数据)、设备状态数据,针对压力校准,需采集压力标准装置的输出压力值、压力表/压力变送器的示值、校准环境温度湿度等数据,采集频率可达毫秒级,确保数据实时性;数据库管理系统采用分布式架构,存储海量溯源数据,具备数据加密、备份、查询功能,需按ISO/IEC17025体系要求,对压力表、压力变送器校准数据进行分类存储,保留至少6年,满足溯源追溯需求,可按设备编号、校准时间、溯源路径等多维度检索数据;可视化监控平台通过图表、地图等形式,直观展示溯源链各环节状态,可实时查看实验室压力标准装置的检定有效期、压力表校准进度、压力参数不确定度分布,当出现溯源异常时,自动发出预警。此外,信息化管理技术还支持与企业MES、ERP系统对接,实现校准计划与生产计划的协同,提升溯源性体系的整体运行效率。

4 冶金机械自动化校准溯源性体系的风险防控与持续改进

4.1 风险识别与防控

冶金机械自动化校准溯源性体系运行面临多类风险,采用“全面识别-分类防控-动态监控”模式保障稳定。风险类型有技术、管理、环境三类。技术风险如校准设备故障等,防控上,定期维护保养设备,压力标准装置每月密封检查、每季度零点校准,自动化压力校准系统每月软件测试,建立故障应急预案;用多种不确定度评估方法交叉验证;定期修正动态补偿模型。管理风险包括计量标准超期未检等,防控上,建立检定提醒

机制,压力标准装置提前30天预警;溯源数据“本地+云端”双备份;人员每年参加相关培训考核,不合格禁上岗。环境风险是恶劣环境对设备与数据的影响,防控上,选用耐候性强的设备,现场压力校准设备具备IP65防护等级,可耐受特定温区,周边设防护装置,实时监测环境参数。

4.2 持续改进机制

为使冶金机械自动化校准溯源性体系适应行业发展,需建立“评估-反馈-优化”持续改进机制。定期开展体系运行效果评估,设定溯源覆盖率等量化指标,压力参数额外评估重复性与再现性,每季度企业多部门联合评估,实验室每年内部审核与管理评审,分析如压力校准流程效率低等问题^[4]。建立多渠道反馈机制,收集多方意见。制定针对性优化措施,如优化自动化校准系统软件减少人工干预、引入蒙特卡洛法评估不确定度。同时跟踪优化效果,形成“评估-反馈-优化-再评估”闭环,推动体系持续完善。

结束语

冶金机械自动化校准溯源性体系是保障冶金产品质量、提升效率的关键。其构建要结合行业特点,以科学理论、完善框架、先进技术为核心。本文梳理理论、设计框架、分析技术、提出风险防控与改进机制,为企业提供可落地方案,突出压力量值溯源核心作用。企业要重视体系落地维护,将溯源性融入生产全流程,持续改进提升适应性与有效性,以精准溯源推动冶金机械精度提升,助力行业高质量发展。

参考文献

- [1]梅荣娣.自动化仪表装置在机械工程中的具体应用[J].广西农业机械化,2020,(03):67-68.
- [2]靳红滨.冶金技术在炼铁高炉中的应用和发展[J].山西冶金,2021,44(5):144-146.
- [3]曾飞,王涛.冶金高校智能测控虚拟仿真实验平台建设[J].实验技术与管理,2020,37(02):32-36.
- [4]杨馥羽.我国冶金工业运行分析及发展态势[J].世界有色金属,2020(03):178-179.