

数字化监测技术在智慧冷库土建工程质量全过程管控中的应用

王 文

(江苏凯璞晟建设科技有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I3.005

摘 要: 智慧冷库对土建结构密封性、保温隔热性、地坪抗冻性、沉降稳定性具有极高标准,传统人工巡检、事后验收的管控模式,存在监测滞后、精度不足、盲区较多、数据追溯性差等弊端,难以满足智慧冷库工程精细化质量管控需求。数字化监测技术依托 BIM 建模、物联网感知、激光扫描、AI 智能分析、云端数据联动等技术,可实现土建工程全周期、全覆盖、高精度动态监测。本文结合智慧冷库土建工程特殊施工要求,从前期 BIM 仿真预控、施工期多源传感动态监测、竣工期三维激光核验、运维期数字孪生回溯四个维度构建全过程数字化管控体系,重点突破保温层隐蔽空洞智能识别、地基微沉降连续追踪、气密薄弱区域热成像定位等关键技术瓶颈,系统解决冷库土建隐蔽工程质量隐患、结构变形、保温失效等管控难题,为同类冷链工程质量管控提供可落地的技术范式。

关键词: 数字化监测; 智慧冷库; 土建工程; 质量全过程管控

Application of Digital Monitoring Technology in Whole-process Quality Control of Civil Engineering for Smart Cold Storage

Wen Wang

Jiangsu Kaipusheng Construction Technology Co., Ltd.

Abstract: Smart cold storage puts forward extremely high requirements for the airtightness, thermal insulation, floor frost resistance and settlement stability of civil engineering structures. Traditional management modes relying on manual inspection and post-acceptance supervision are plagued by delayed monitoring, low precision, widespread monitoring blind areas and poor data traceability, which fail to meet the refined quality control requirements of smart cold storage construction. Supported by BIM modeling, Internet of Things perception, laser scanning, artificial intelligence analysis and cloud data linkage, digital monitoring technology realizes full-cycle, full-coverage and high-precision dynamic monitoring of civil engineering construction. Combined with the special construction characteristics of smart cold storage civil engineering, this paper constructs a whole-process digital quality control system covering four stages: pre-construction BIM simulation pre-control, multi-source sensor dynamic monitoring during construction, 3D laser inspection upon completion, and digital twin retrospective analysis during operation and maintenance. It breaks through key technical bottlenecks including intelligent identification of hidden voids in insulation layers, continuous monitoring of foundation micro-settlement, and thermal imaging positioning of weak airtight areas. The proposed method effectively solves prominent quality risks such as hidden construction defects, structural deformation and insulation failure of cold storage civil engineering, providing a feasible technical paradigm for the quality management of similar cold chain engineering projects.

Keywords: digital monitoring; smart cold storage; civil engineering; whole-process quality control

前言

冷链经济快速发展推动智慧冷库建设规模化、标准化升级,智慧冷库区别于普通建筑工程,土建施工需兼顾结构稳定性、低温抗冻性、气密保温性、防潮防渗性等多重特殊要求,土建施工质量直接决定后期冷库温控精度、能耗水平、运行安全与使用寿命。传统土建质量管控依赖人工经验抽检、阶段性验收,对隐蔽工程、细微结构变形、保温层施工缺陷监测能力薄弱,极易遗留隐性质量隐患,造成后期冷量损耗、地坪冻胀、墙体结露、结构沉降等问题。随着建筑数字化转型深入,BIM、物联网、智能传感、AI 监测等数字化技术逐步应用于工程建设领域,为冷库土

建全过程质量管控提供全新手段。基于此,本文系统探究 BIM 建模、物联网感知、激光扫描、AI 预警等数字化技术在冷库土建设计预检—施工精控—验收核验—运维预判全链条中的耦合应用路径,构建适配冷库特种需求的全周期智能管控框架,以期为冷链工程数字化转型提供可落地的技术范式。

一、智慧冷库土建工程特性与质量管控现存短板

(一) 智慧冷库土建工程特殊施工与质量要求

智慧冷库土建工程属于特种功能性建筑施工,相较于普通房建工程,施工标准严苛、专项质量要求更高,核心聚焦结构抗冻、气密保温、防渗防潮、沉降稳定四大核心指标。

上述四类指标并非孤立存在,而是相互耦合制约——保温性能衰减会加剧地坪冻胀风险,防渗失效则直接导致保温层含水率上升、隔热性能骤降。以典型中低温冷库(库温 $-18^{\circ}\text{C}\sim-25^{\circ}\text{C}$)为例,围护结构传热系数一般要求 $\leq 0.15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,地坪混凝土抗冻等级不低于F300,地基全年累计沉降量需控制在20mm以内。各指标须通过系统化施工管控协同达标,任一环节偏差均可能引发连锁质量失效。

(二) 传统土建工程质量管控模式的局限性

传统智慧冷库土建质量管控以人工现场巡检、阶段性抽样检测、竣工事后验收为核心模式,适配性与精准度存在显著短板,难以满足特种冷库工程管控需求。人工管控主观性强、精度有限,对保温层内部空洞、地基细微沉降、隐蔽管线铺设偏差等隐性缺陷排查难度大,极易出现漏检、误检问题。管控模式以静态阶段性验收为主,缺乏施工全过程动态监测,无法实时捕捉施工过程中的质量偏差,问题发现滞后,整改成本高、返工难度大。

(三) 数字化监测技术应用于冷库管控的适配价值

依托BIM三维建模技术,可实现冷库土建施工前置模拟、图纸碰撞检测、施工方案优化,从源头规避设计与施工偏差。物联网智能传感、激光点云扫描技术,能够对地基沉降、结构变形、保温层厚度、施工平整度、缝隙精度等关键指标进行24小时不间断动态监测,消除人工监测盲区。

二、智慧冷库土建工程前期筹备阶段数字化质量预控应用

(一) 基于BIM技术的施工图纸优化与碰撞检测

在智慧冷库土建工程前期筹备阶段,BIM数字化建模技术是实现质量前置预控的核心手段,能够从设计源头规避施工质量隐患。针对冷库土建墙体、地坪、保温层、设备基础、管线预埋等复杂施工内容,搭建1:1精细化三维BIM模型,完整还原冷库土建结构、保温体系、管线布局等全部细节,突破传统二维图纸表达局限。尤其针对冷库工程特有的保温层贯穿节点(如制冷管道穿墙、电气桥架穿板、地坪锚筋穿透保温层),BIM模型可精准标识每一处穿透位置,提前优化穿墙套管预埋、保温密封节点构造,从设计源头杜绝热桥与漏气通道。

(二) 数字化模拟仿真优化专项施工方案

智慧冷库土建保温施工、地坪抗冻施工、防渗防潮施工专业性极强,施工方案合理性直接决定工程质量,通过数字化模拟仿真技术可实现施工方案精准优化。采用三维流体仿真、结构受力仿真技术,模拟冷库低温环境下土建结构受力、温度传导、水汽渗透规律,精准分析保温层施工厚度、板材拼接工艺、地坪配筋方案的适配性,优化抗冻、保温、防渗专项施工参数。针对冷库地基施工、大体积混凝土浇筑、保温板材安装等关键工序,开展施工过程动态模拟,预判施工过程中易出现的沉降不均、混凝土开裂、保温缝隙超标等质量风险,针对性调整施工工艺、施工顺序与技术参数。

(三) 数字化清单构建质量管控标准体系

依托数字化平台搭建智慧冷库土建质量管控标准清单,实现前期质量管控标准化、规范化落地。结合国家冷库建筑施工规范、低温建筑技术标准与项目设计要求,梳理土建施工地基、结构、保温、地坪、防渗、附属设施六大模块的质量管控要点,搭建数字化质量标准数据库。细化各工序施工精度阈值、验收标准、监测指标,明确保温层平整度、缝隙宽度、地基沉降偏差、混凝土强度、防渗等级等关键参数的管控标准,形成可视化、可量化的数字化管控清单。将标准清单录入云端管控平台,关联现场监测设备,实现施工全过程质量标准自动比对、智能判定。

三、智慧冷库土建施工阶段数字化动态监测管控应用

(一) 地基与结构工程数字化动态监测管控

地基与主体结构是智慧冷库土建工程的核心载体,其沉降稳定性、结构完整性直接决定冷库运行安全,依托数字化监测技术可实现全过程动态精准管控。在地基施工阶段,布设高精度沉降传感设备、应力监测设备,24小时实时采集地基沉降量、土层应力、混凝土收缩变形等数据,通过云端平台动态分析沉降变化趋势,精准预判不均匀沉降风险,及时调整施工工艺与养护方案。地基沉降属于慢变量持续演化过程,宜采用高频连续采集(每小时记录一次)以捕捉趋势拐点;而主体结构成型偏差属于工序完成后即定型的参数,采用关键节点(如每层施工完毕)的激光扫描即可满足精度要求。两类数据在云端汇总后,通过时间轴对齐比照,可有效判别沉降是否由结构施工荷载变化引起,抑或地基持力层本身存在不均匀性问题,从而指导差异化整改。主体结构施工过程中,采用激光点云扫描、无人机巡检技术,定期对梁柱、墙体、屋面结构进行三维扫描,快速比对模型数据与实际施工偏差,精准识别结构平整度偏差、构件尺寸超标、细微开裂等质量缺陷。

(二) 保温与气密工程数字化精准监测管控

保温气密工程是智慧冷库土建质量管控的重难点,直接影响冷库温控效果与能耗指标,数字化监测技术可实现隐蔽保温工序的精准管控。保温板材安装阶段,依托激光测距、厚度监测设备,实时检测保温层铺设厚度、板材拼接缝隙、粘结密实度,杜绝保温层厚薄不均、缝隙过大、局部空洞等问题,保障整体隔热连续性。施工完成后,采用气密性数字化检测设备、红外热成像监测技术,全域扫描冷库墙体、屋面、地坪保温体系,精准识别热桥隐患、漏冷点位、气密薄弱区域,弥补人工肉眼排查的局限性。

(三) 地坪与防渗工程全过程智能监测管控

冷库地坪需长期承受低温冻融、设备荷载、货物碾压,防渗抗冻施工质量要求严苛,数字化智能监测可实现施工全流程精准管控。地坪混凝土浇筑阶段,动态监测混凝土浇筑温度、养护湿度、收缩应力变化,传感器采用预埋式布设,在混凝土浇筑前固定于钢筋骨架或基层表面,重点布置于地坪中心、边缘、设备基础周边及墙角应力集中区域,测点间距控制在3~5m,确保应力场分布可完整反演。埋

入式传感器需加装耐腐蚀防护套管，并在混凝土振捣过程中专人看护，防止位移或损坏。智能调控养护参数，有效预防地坪混凝土开裂、起砂、空鼓等质量缺陷，保障混凝土强度与抗冻性能达标。防渗层施工完成后，采用数字化水压渗漏监测、全域扫描检测技术，对地坪、墙角、墙体根部等防渗关键区域进行全覆盖检测，精准排查防渗层破损、搭接不严、渗漏隐患。

四、智慧冷库土建竣工验收与运维阶段数字化回溯管控

（一）数字化竣工核验与智能验收管控

在智慧冷库土建工程竣工验收阶段，依托数字化技术实现全方位、高精度、智能化验收，替代传统人工粗放验收模式。整合 BIM 竣工模型、施工全过程监测数据、工序验收资料，搭建数字化竣工验收体系，实现模型与实体工程 1:1 精准比对，快速核验结构尺寸、保温参数、施工工艺是否符合设计标准与规范要求。采用激光三维扫描、红外检测、智能传感核验设备，对冷库土建结构、保温体系、防渗工程、地坪质量进行全域精细化检测，自动生成验收数据报表、质量偏差清单、缺陷点位分布图。系统根据预设量化标准自动判定可量化指标（尺寸偏差、平整度、厚度、气密性漏风率等）的合格性，并生成疑点清单；对于外观质量、修补工艺等主观性较强项目，则通过系统标记疑似区域，由验收人员在现场复核确认，形成“机器初筛+人工精判”的人机协同验收模式，兼顾效率与可靠性。

（二）工程质量数据数字化归档与溯源管理

构建智慧冷库土建工程数字化质量档案体系，实现施工、验收、隐患整改全流程数据系统化归档与可追溯管理。依托云端大数据平台，归集前期设计模型、施工模拟数据、过程监测数据、工序验收记录、隐患整改台账、竣工核验数据等全部质量资料，搭建完整的电子质量档案库，替代传统纸质档案碎片化管理模式。对各类数据进行分类梳理、智能标签化处理，实现结构施工、保温施工、防渗施工、地坪施工等各模块质量数据快速检索、精准溯源。

（三）运维阶段质量动态回溯与长效优化

智慧冷库土建工程竣工投运后，依托数字化监测体系

实现运维阶段质量动态回溯与长效优化，保障工程长期稳定运行。延续施工阶段数字化监测系统，持续采集冷库土建结构沉降、墙体变形、保温性能、气密性能、地坪状态等运行数据，动态追踪土建工程质量变化趋势。通过 AI 大数据分析，对比施工期标准数据与运维期动态数据，精准研判土建结构老化、保温性能衰减、防渗性能弱化等潜在质量问题，提前预警运行风险。结合历史施工质量数据回溯分析，定位质量衰减成因，针对性制定运维检修、加固优化方案。

结语：

数字化管控可全面提升冷库结构稳定性、保温气密性与防渗抗冻性能，保障工程建设质量与长效运行安全。随着 5G、数字孪生、大模型技术的持续成熟，数字化监测将从“辅助工具”演进为“工程大脑”，推动冷链基础设施建设迈向更高水平的智能化、标准化与绿色化，为保障国家冷链物流高质量发展筑牢工程质量根基。

参考文献：

- [1] 徐炜亮. 智能建造技术在建筑施工中的应用探索 [J]. 陶瓷, 2026, (4): 171-174.
- [2] 杨亚楠, 王明明, 董世钊. 数字化技术在住宅建筑质量管理中的应用与优化策略 [J]. 居舍, 2025, (33): 158-161.
- [3] 王宇飞. 基于数字化技术的建筑结构健康监测与数据分析方法研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2025, (21): 47-50.
- [4] 姜庆达, 魏颖, 李升起. 建筑工程施工阶段智能监测技术研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34(5): 34-36.
- [5] 王海渊, 袁扬, 李健民, 张峰, 沈李, 刘洋. 建设工程质量检测监测数字化应用体系研究 [J]. 信息技术与标准化, 2024, (12): 76-82.
- [6] 颜家乐. 建筑工程管理模式的数字化转型研究 [J]. 房地产世界, 2024, (16): 94-96.

作者简介：王文（1980 年—）、女、汉、江苏徐州、本科、江苏凯璞晟建设科技有限公司、工程师、研究方向：智慧冷库设计及安装。