

长输管道完整性管理理念的发展脉络与制度化构建探讨

毛海波

国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司 山西 吕梁 033200

摘要:长输管道作为国家能源战略的“大动脉”，其安全、可靠、高效运行直接关系到国家能源安全、公共安全和生态环境。完整性管理（Pipeline Integrity Management, PIM）作为一种系统化、前瞻性的风险管控方法，已成为全球油气管道行业保障管道本质安全的核心范式。本文旨在系统梳理长输管道完整性管理理念从萌芽、发展到成熟的历史脉络，并在此基础上，结合中国国情，重点探讨其制度化构建的路径、挑战与对策。文章认为，完整性管理的制度化是一个涵盖法律法规、标准规范、监管体系、企业实践与文化培育等多维度的复杂系统工程，唯有通过顶层设计、法治保障、标准引领、能力建设与文化浸润的协同推进，方能实现从“被动应对”向“主动预防”的根本性转变，为我国能源基础设施的安全韧性提供坚实支撑。

关键词:长输管道；完整性管理；发展脉络；制度化；风险管控；标准体系

引言

现代工业中，长输管道网络是国家能源供应的生命线，输送石油、天然气等战略资源，关乎国民经济与社会安全。但管道系统风险高，泄漏、火灾或爆炸会带来巨大损失与生态灾难。传统事后维修和定期检验的管理模式，难以应对复杂环境与安全挑战。在此背景下，完整性管理这一全新安全管理哲学出现，它前移管理重心，强调对管道全生命周期潜在风险进行识别、评估、干预与监控，确保管道安全受控，是技术与管理理念的双重革新，实现了从“经验驱动”到“数据驱动”、从“被动响应”到“主动预防”的跨越。中国能源结构转型、基础设施大规模建设，构建完善的长输管道完整性管理体系意义迫切^[1]。我国管道里程长且增长快，安全风险叠加。如何将理念转化为制度安排是重大课题。本文将追溯完整性管理理念，解析核心要义，聚焦其在中国制度化构建问题，提供理论参考与实践启示。

1 长输管道完整性管理理念的发展脉络

完整性管理并非凭空产生，而是伴随着管道工业的发展、事故教训的积累以及风险管理理论的进步而逐步演化形成的。其发展历程大致可分为三个阶段：萌芽与探索期、形成与规范化期、深化与智能化期。

1.1 萌芽与探索期（20世纪70年代以前）

此阶段以法规合规和定期检验为主，属于被动防御。例如，美国1968年颁布《联邦管道安全法》，确立联邦对跨州管道的监管权，强调设计、施工和运行须符合规范，“合规即安全”成为核心逻辑。维护主要依赖基于时间的定期检验（TBM），如固定周期清管或开挖检查。然而，该模式存在明显局限：检验周期统一，无法反映不同管段

的实际风险；仅能发现已有缺陷，缺乏预测能力；对第三方破坏、地质灾害等动态外部威胁缺乏有效监控。整体上是一种静态、反应式的安全管理方式。

1.2 形成与规范化期（20世纪80-90年代）

一系列重大管道事故暴露出传统模式的脆弱性，推动行业转向“基于风险”的主动预防范式。核心理念是：管道各段风险不均，资源应优先配置于高风险区域。1994年，美国机械工程师学会（ASME）发布B31.8S《输气管道系统完整性管理》标准，首次系统提出完整性管理六步闭环流程：识别高后果区（HCA）、开展基线评价、实施风险评估、制定完整性评价计划、执行修复与减缓措施、评估管理有效性。这标志着完整性管理从理念走向实践。2002年，美国《管道安全改进法案》强制要求运营商对HCA实施完整性管理，使其由行业最佳实践上升为法定要求，并迅速被加拿大、欧洲等地采纳。此阶段确立了以风险为基础、以HCA为重点、持续改进的规范化管理体系。

1.3 深化与智能化期（21世纪初至今）

完整性管理理念不断拓展，覆盖管道全生命周期——从设计、采购、施工到运营乃至废弃，强调在项目前期植入完整性要求，从源头提升本质安全。同时，信息技术深度赋能管理升级：内检测（ILI）、外腐蚀直接评价（ECDA）、地理信息（GIS）、气象水文等多源数据实现高效整合；大数据分析、人工智能（AI）和机器学习（ML）技术显著提升风险预测精度，使预测性维护成为可能^[2]。例如，通过AI模型分析历史检测数据，可精准预测腐蚀或裂纹扩展趋势，优化检验与维修策略。数字孪生技术则构建管道虚拟镜像，支持实时监测、仿

真推演与应急响应。完整性管理正由依赖专家经验的传统流程，转型为数据驱动、智能决策的现代化体系。

2 长输管道完整性管理的制度化构建：中国的路径、挑战与对策

将先进的完整性管理理念转化为国家层面的、稳定运行的制度安排，是保障其有效落地的关键。中国的完整性管理制度化构建始于21世纪初，在借鉴国际经验的基础上，结合自身国情，取得了显著进展，但仍面临诸多挑战。

2.1 制度化构建的主要路径与成就

2.1.1 顶层设计与法律保障

2010年颁布的《中华人民共和国石油天然气管道保护法》是中国管道安全领域的里程碑式立法。该法首次在国家法律层面明确了管道规划、建设、运行中的安全保护要求，并提出了“保障石油、天然气输送安全”的总目标，为完整性管理的推行奠定了法律基础。随后，《安全生产法》的多次修订，也强化了企业主体责任和风险分级管控、隐患排查治理双重预防机制的要求，与完整性管理理念高度契合。

2.1.2 标准规范体系的建立

国家标准化管理委员会和相关行业协会主导，构建了以GB 32167《油气输送管道完整性管理规范》为核心的标准体系。该标准于2015年发布，2016年强制实施，其内容基本对标ASME B31.8S等国际先进标准，系统规定了完整性管理的全流程要求。此外，围绕内检测、风险评估、直接评价等关键技术，也陆续出台了一系列配套的推荐性国家标准和行业标准（如SY/T系列），初步形成了层次分明、覆盖全面的标准框架。

2.1.3 政府监管体系的强化

国家能源局及其派出机构作为管道保护的主管部门，承担着监督企业落实完整性管理责任的职责。通过开展专项督查、年度检查、事故调查等方式，推动企业建立完整性管理机构、配备专业人员、编制并执行完整性管理方案。监管方式也正从单纯的合规性检查，向基于风险的、绩效导向的监管模式转变。

2.1.4 企业主体责任的落实

以国家管网集团、中石油、中石化等为代表的大型管道运营企业，普遍建立了专门的完整性管理部门，投入巨资引进内检测器、建设数据中心、开发完整性管理软件，并培养了一支专业的技术队伍。完整性管理已成为其日常运营不可或缺的一部分。

2.2 当前面临的挑战

尽管成就斐然，但中国完整性管理的制度化之路仍

面临深层次挑战：（1）法规标准体系的协同性与执行力有待加强：《管道保护法》虽为上位法，但其条款较为原则，缺乏对完整性管理具体操作细节的强制约束力。GB 32167虽然是强制标准，但在法律责任追究方面与上位法的衔接不够紧密。此外，部分标准更新滞后于技术发展，地方性法规与国家标准之间偶有冲突，影响了制度的统一性和权威性。（2）全生命周期管理尚未完全贯通：目前的完整性管理实践主要集中于管道投运后的运营阶段。在设计、采购、施工等前端环节，完整性管理的要求尚未完全融入项目管理流程^[3]。例如，设计阶段对未来可能面临的腐蚀、地质灾害等风险考虑不足；施工阶段的质量控制数据未能有效传递给运营方，形成“数据断点”，增加了后期管理的难度和不确定性。（3）数据壁垒与共享机制缺失：管道数据分散在不同企业、不同部门甚至不同信息系统中，形成了一个“数据孤岛”。政府监管部门、管道企业、第三方技术服务公司之间缺乏有效的数据共享和交换机制。这不仅制约了区域性、流域性的整体风险评估，也阻碍了大数据、AI等先进技术在完整性管理中的深度应用。（4）中小企业与老旧管道的管理困境：大型央企在完整性管理方面投入巨大，但数量众多的地方燃气公司、小型油气田集输管道运营商，受限于资金、技术和人才，难以建立完善的完整性管理体系。同时，我国有大量服役超过20年甚至30年的老旧管道，其原始资料缺失、本体状况不明、改造难度大，是完整性管理的难点和痛点。（5）专业人才与技术能力短板：完整性管理是一项高度专业化的工作，需要复合型人才，既懂管道工程、材料、腐蚀，又精通风险评估、数据分析和信息技术。目前，行业内此类高端人才严重短缺，尤其是在数据分析、模型开发等新兴领域。基层技术人员的能力水平也参差不齐。

2.3 深化制度化构建的对策建议

为应对上述挑战，推动完整性管理在中国迈向更高水平，应着力于以下几个方面：

2.3.1 完善法治体系，强化刚性约束

推动《管道保护法》的修订，增加关于完整性管理的专门章节，明确企业实施完整性管理的法定义务、具体内容和法律责任。建立法规、强制性标准与推荐性标准相衔接的“金字塔”式制度体系，确保各项要求能够层层落实、有效执行。

2.3.2 打通全生命周期链条，实现无缝衔接

在国家层面倡导并强制推行“完整性管理前移”策略。要求在项目可研、设计阶段就进行初步的风险评估，并将结果作为设计方案优化的依据。建立统一的管道全生

命周期数据交付标准,确保从“出生证明”(竣工资料)到“健康档案”(运行数据)的完整、准确、可追溯。

2.3.3 构建国家级管道安全数据平台,打破信息壁垒

由政府主导,联合主要管道企业,建设国家级油气管道安全与完整性管理大数据中心。在保障商业秘密和数据安全的前提下,制定数据共享目录和交换规则,实现关键数据(如HCA分布、重大风险源、事故信息等)的互联互通,为宏观决策、区域风险预警和技术创新提供强大支撑。

2.3.4 实施分类指导与差异化监管

针对不同类型、不同规模的管道企业,制定差异化的完整性管理指南和监管要求。对于大型骨干管网,鼓励其对标国际一流,探索智能化、预测性管理;对于中小企业和老旧管道,则提供技术支持、财政补贴或政策引导,帮助其建立最基本的风险识别和管控能力^[4]。可考虑设立国家专项基金,用于支持老旧管道的更新改造和安全评估。

2.3.5 加强人才培养与能力建设

在高等教育和职业教育体系中,增设管道完整性管理相关专业方向或课程。支持行业协会、龙头企业建立专业培训和认证体系。鼓励产学研合作,加快在风险评估模型、智能内检测、数字孪生等前沿技术领域的研发与应用,不断提升行业的整体技术能力。

2.3.6 培育安全文化,提升社会共治水平

完整性管理的成功离不开良好的安全文化土壤。企业内部应倡导“人人都是安全员”的文化,鼓励员工报告隐患和未遂事件。对外,要加强公众宣传和教育,普及管道安全知识,建立便捷的第三方施工报备和举报渠道,形成政府监管、企业主责、社会监督的多元共治格局。

3 结语

长输管道完整性管理理念的演进史,是一部人类不

断深化对复杂工业系统风险认知、并寻求更优治理之道的历史。从最初的被动合规,到如今的主动预防与智能决策,完整性管理已发展成为一套成熟、系统、科学的管道安全治理范式。对于中国这样一个管道大国而言,完整性管理的制度化构建绝非一日之功,而是一项关乎国计民生的基础性、战略性工程。未来的道路,需要我们以更大的决心和智慧,不断完善顶层设计,弥合制度缝隙;以更开放的姿态,拥抱技术创新,打破数据藩篱;以更务实的举措,关注基层需求,解决实际难题。唯有如此,才能真正将完整性管理的理念内化于心、外化于行,构筑起坚不可摧的能源安全屏障,让这条流淌着国家命脉的钢铁长龙,在安全、可靠、高效的轨道上,为中华民族的伟大复兴持续输送澎湃动力。

参考文献

- [1]李凌铎,王魁军,张蕾,等.天然气长输管道建设期发展新质生产力创新完整性管理的探索与实践[C]//中国石油学会石油储运专业委员会,石油工业标准化技术委员会油气储运专标委,国家石油天然气管网集团有限公司生产部,国家石油天然气管网集团有限公司科技部,中国石油天然气股份有限公司油气和新能源分公司.第九届中国油气管道完整性管理技术交流大会论文集.中国石油天然气销售广东公司;清远中石油昆仑燃气有限公司;韶关始兴昆仑燃气有限公司,;2025:294-297.
- [2]王安泉,李强,鞠梓宸,等.油田集输管道信息化与完整性管理[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(22):81-84.
- [3]谢雳雳,罗嘉慧,杨浩.天然气长输管道完整性管理效能评价指标研究[J].内蒙古石油化工,2024,50(09):10-14.
- [4]郝郁,汪相逢,尹航,等.油气集输管道完整性管理关键技术探讨[J].全面腐蚀控制,2022,36(09):124-127.