DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.06.022

城市地下管网系统治理的工程科学逻辑

李晓飞[1,2]，尚毅梓[3*]，梁东方[1]

（1. 剑桥大学工程系，英国剑桥 CB2 1PZ；2. 北京禹冰水利勘测规划设计有限公司，北京 100048；
3. 中国水利水电科学研究院，北京 100038）

摘要：城市地下管网由增量建设转向存量更新的发展阶段，实施治理面临分别成立的专业条件进入共享地下空间和连续工程链后能否共同成立并持续有效的核心问题，对应的工程科学逻辑是将分散形成的专业条件在共享地下空间和连续工程链中依次转化为共同可行条件、可执行项目条件、后续工程判断条件。本文将单项专业条件实质性改变其他设施可行条件的情形界定为跨专业工程关联，沿着共同判断、项目执行、后续更新三个环节，归纳出独立专业可行条件、共同可行条件、可执行项目条件、后续工程判断条件四个状态，再以三次条件转换贯通工程链并由共同边界识别、实施路径分化、治理转化、跨期反馈来解释相应的转换机制。研究认为，专业合规不能替代围绕共同边界的共同校核，实施路径在安全底线和相应专业基础约束下由空间固化程度、资料可靠性、施工窗口联合决定，共同校核结论写入项目文件、落实责任并改变项目条件后即取得项目执行力，建成与运行信息被后续工程读取并改变判断后形成跨期反馈；工程应用时可据此识别共同边界、选择实施路径，将校核结论写入项目文件并落实责任，以建成与运行信息更新后续判断。由此，专业冲突、项目失续、信息失用被统一解释为工程条件转换中断，系统治理的评价也落到工程条件跨阶段持续有效这一便于检验的工程尺度。相关工程科学逻辑可为城市地下管网由分项设施管理走向基础设施网络的全过程治理提供依据，经过持续检验后有望丰富现代化基础设施网络构建与长效运维的基本认识。

关键词：城市地下管网；系统治理；工程科学逻辑；跨专业工程关联；共同边界；治理转化；跨期反馈

中图分类号：TU990.3　　**文献标识码：**A

Engineering Science Logic of Systemic Governance for Urban Underground Utility Networks

Li Xiaofei[1,2], Shang Yizi[3*], Liang Dongfang[1]

(1. Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK; 2. Beijing Yubing Hydraulic Survey Planning Design Co., Ltd., Beijing 100048, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: As urban underground utility networks shift from incremental expansion to the renewal of existing assets, their governance faces a core question: Whether independently established discipline-specific conditions can become jointly feasible and remain effective once they enter shared underground space and a continuous engineering chain. The corresponding engineering-science logic is to successively transform dispersed discipline-specific conditions into jointly feasible conditions, executable project conditions, and conditions for subsequent engineering decisions. This study defines a cross-utility engineering linkage as a situation in which a discipline-specific condition materially alters the feasibility of another facility. Along the three stages of joint judgment, project

收稿日期：2026-06-15；**修回日期：**2026-08-18

通讯作者：*尚毅梓，中国水利水电科学研究院正高级工程师，研究方向为韧性基础设施网络构建与长效运维、现代化水网；
E-mail: yzshang@foxmail.com

资助项目：智力援疆创新拓展人才计划(E535020301)；水利青年科技英才资助项目(JHYC202303)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

execution, and subsequent updating, four condition states are identified: independently feasible discipline-specific conditions, jointly feasible conditions, executable project conditions, and conditions for subsequent engineering decisions. Three condition transitions connect these states across the engineering chain, while common-boundary identification, implementation-path differentiation, governance translation, and cross-period feedback explain the corresponding transition mechanisms. The results indicate that discipline-specific compliance cannot substitute for joint checking at common boundaries; implementation paths are determined, under non-negotiable safety baselines and relevant discipline-specific constraints, by the degree of spatial lock-in, data reliability, and construction windows; conclusions from joint checking become executable at the project level only after they are incorporated into project documents, assigned to responsible entities, and used to modify project conditions; and cross-period feedback is established when as-built and operational information is retrieved and used in subsequent projects to revise engineering decisions. For engineering applications, the framework can therefore be used to identify common boundaries, select implementation paths, incorporate joint-check conclusions into project documents and assign responsibilities, and use as-built and operational information to update subsequent decisions. Accordingly, disciplinary conflicts, discontinuities in project implementation, and failures in information reuse can be interpreted uniformly as interruptions in the transformation of engineering conditions. Systemic governance can thus be evaluated at a directly testable engineering scale: Whether engineering conditions remain effective across successive stages. This engineering-science logic can provide a basis for the transition of urban underground utility networks from facility-specific management toward lifecycle governance at the infrastructure-network level and, after sustained validation, may further enrich basic understanding of the development and long-term operation and maintenance of modern infrastructure networks.

Keywords: urban underground utility networks; systemic governance; engineering science logic; cross-utility engineering linkage; common boundary; governance translation; cross-period feedback

一、前言

截至2025年年底，我国城市地下管网总长度近3.9×10^6 km，规模居世界首位[1]。经过长期建设，地下管网已经形成庞大存量，城市更新正在将治理重心由单项设施扩建推向多类设施的协同更新与持续运行。道路更新、内涝治理、生命线安全、长期运维相叠加[2-5]，单项设施调整往往改变其他设施的可用空间、排水出路、安全间距、施工窗口、运维条件。单个专业合规仍是工程安全的基础，但仅可表明设施在本专业边界内成立；当多类设施共享位置、接口、施工时序时，工程整体可行还取决于各专业条件在共同边界上同时成立并在项目实施和后续更新中继续有效。

城市地下管网共享道路断面、竖向空间、施工时间、抢修通道[6]，但建设、产权、运维责任分属不同的主体。以建成区内涝改造为例，这类工程关联具体表现为：在排水管底高程改变后，燃气、电力、通信等管线的交叉条件随之变化；道路一旦开挖，迁改、保供、抢修需要在同一施工窗口内统筹。为此，开展城市地下管网系统治理，首先需要识别作用于同一位置、接口、施工时序并实质性改变其他设施可行条件的专业要求。地上开发强度、道路竖向、建筑接驳等条件也受地下设施承载能力的约束并进入共同边界校核[7-8]，否则排水出路、检修空间、后续调整余地可能在项目落地之前即被占用[9-10]。

在城市建成区，相关地下管网治理问题表现得更为突出。尽管国家已对城市地下管网和综合管廊建设改造作出了明确部署[11]，但建成区的既有管位、资料版本、产权关系、连续服务条件大多已经固化[12-13]。各专业各自立项、各自出图并不会自然形成系统方案；如底图不准，冲突会延续到设计；如高程和施工时序不一致，冲突会在施工中暴露；如审查意见没有进入项目文件或者竣工信息没有更新到底图，同类问题又会进入下一轮工程[14-16]。实际上，重复开挖、档案失真、后续可利用空间被提前占用都指向同一个问题：前一阶段形成的工程条件没有沿工程链准确传递并转化为下一阶段的有效条件。

城市地下管网治理的既有研究较为丰富，也形成了完整的专业工具体系。管线综合和综合管廊解决管位、交叉和承载方式[14,17]，排水防涝处理为水力安全和片区行泄提供保障[9,18]，安全韧性和地下空间规划讨论风险传播与长期通道[19-20]。建筑信息模型（BIM）/地理信息系统（GIS）、全生命周期信息模型支持识别设施位置、运行状态、资料版本[21-22]，协同治理、接口管理、资产管理关注多主体责任与全寿命信息连续[13,23-24]。这些方法能够形成可靠的专业判断，但专业条件能否进入共同判断、取得项目执行力并在后续工程中继续发挥作用，仍待独立解释。专业合规、工程链连续是相互联系且不能彼此替代的两类判断。

本文以跨专业工程关联在工程链中的持续承接

为主线，依次讨论三次转换：独立专业可行条件形成共同可行条件，共同可行条件进入当前项目并成为可执行项目条件，建成与运行信息转化为后续工程判断条件。从三次转换存在的三类断点出发，归纳共同边界识别、实施路径分化、治理转化、跨期反馈四项机制，以项目接续、责任接续、信息接续检查三次转换的完成情况。再通过公开案例对照、建成区内涝治理情景和反例检查，考察相关机制的工程表现与成立条件。上述研究路径不是对既有专业方法的重新分类，而是关注专业知识经过共同判断、项目组织、跨期更新以持续转化为有效工程条件，因而专业冲突、项目失续、信息失用可以置于同一条件转换链上进行理解，既能解释相关问题为何反复出现，也能据以判断工程关系在哪里中断、由何种文件及主体恢复接续。

二、理论问题与分析框架

城市地下管网系统治理面对的工程科学问题可以凝练为：分别成立的专业条件，如何在共享地下空间和连续工程链中形成共同判断、在项目实施和后续更新中保持有效。单项设施是否合规、工程条件能否跨阶段持续有效是两个层次的判断：前者由专业规范和计算回答；后者考察工程条件在共同判断、项目执行、后续更新三个界面上怎样转换，在哪里失去承接，又依靠什么机制在下一阶段重新生效。

（一）专业合规的作用边界

多类设施长期共用有限地下空间，建设、产权、运行、数据责任又分属不同主体，这是城市地下管网系统治理的基本现实[6,13]。空间共享使高程、间距、接口、施工时序相互影响，责任分置使已经明确的专业条件可能在建设、移交、运维阶段失去承接。数套分别合规的方案进入同一道路断面、同一施工期后，仍可能产生空间占用、服务干扰、安全风险；在工程建成以后，资产接收、运行维护、资料更新也可能在阶段交接处中断[16]。因此，专业合规仅证明单项判断成立，而工程整体可行还取决于这些判断在同一工程对象上共同成立。

现有方法可以分别处理管位、水力、安全、监测、资产管理等专业问题。例如，管线综合、综合管廊、排水防涝、地下空间规划能够给出管位、承载方式、水力安全、长期通道、分期开发条件，数字化、生命线监测、安全韧性的研究成果支持识别设施位置、运行状态、资料可信度、风险传播路径。进入具体项目后，问题随即转向实施对象、产权与数据移交、资产接收、运行维护，相关事项写入项目文件并落实到责任主体后，专业条件才能由技术判断转化为可执行的项目条件[25]。

路径依赖、渐进决策分别解释既有管位对后续选择的约束[26]、建成区分步改造的合理性[27]，协同治理、接口管理、资产管理则讨论多主体事项的决策与责任承接[24,28]以及建设、移交、运维过程中对象、责任、资料的连续[16,29]。这些认识较多分散在空间选择、组织协同、资产管理等环节，而在专业判断形成共同条件、共同条件取得项目执行力、建成信息进入下一轮工程方面依然缺少统一解释，承接对象、转换界面、完成证据等也有待进一步明确。

（二）工程条件接续的三类断点

跨专业工程关联沿工程链主要暴露出三类断点。① 分别满足规范并不等于多个专业条件能够在同一位置同时成立。高程、间距、安全要求一旦在同一交叉点、接口或施工时段存在相互影响，相关判断随之由独立判断转入共同校核；若冲突只停留在单一专业的图纸或审查意见中，则共同判断并未形成。② 共同可行并不等于项目可实施。在共同校核以后，如未结合既有管位、资料可靠性、施工窗口、资金条件选择实施路径[12,30]，或者未将结论写入项目范围、设计变更、责任清单、移交条件[24,31]，则共同可行条件仍不具有执行力。③ 资料形成并不等于信息跨期有效。既是实际管位、高程、设计变更已经归档，若后续项目没有读取这些资料并据此修改底图、参数、项目排序或审查要求[16,22,32]，那么这些资料并未成为新的工程判断条件。

三类断点依次发生在专业判断转向共同判断、共同判断进入项目执行、建成与运行信息进入后续更新的界面，分别对应共同条件形成、项目执行力取得、建成信息跨期生效。表1归纳了现有专业方法已经解决的问题和仍待闭合的阶段承接环节。由此，城市地下管网系统治理的研究重点落在工程条件的阶段承接，即前一阶段已经形成且仍需有效的

条件，由下一阶段明确的主体、文件和行动继续承接。

（三）条件状态、转换与接续判断

三类断点表明，专业合规不等于共同可行、共同可行不等于项目可实施、资料留存不等于跨期有效，这三项判断不能混同。这些判断虽然发生在不同阶段，却可以沿同一工程链统一表达，关键在于区分分析对象、条件状态、转换关系。工程科学研究关注科学原理和技术知识在目标、约束、实施条件下转化为人工系统的设计、建造、运行规则[69-70]。就城市地下管网而言，这一转化表现为专业条件由独立判断进入共同判断，再进入项目执行并用于后续工程更新。可将工程条件归纳为独立专业可行条件、共同可行条件、可执行项目条件、后续工程判断条件四个状态，四个状态之间形成三次转换，分别对应共同判断形成、当前项目落实、后续工程更新。需要说明的是，文中的跨专业工程关联，专指单项专业条件已经实质性改变其他设施可行条件的具体工程情形，而不泛指部门之间的一般协作。高程、安全距离、施工时序、检修空间、运行条件一旦要求其他专业重新校核、调整布置或者改变施工、运行和维护条件，即形成跨专业工程关联。依据这样的界定将分析对象落到具体工程事项，也由此区分仅需共享信息的一般事项、需要共同处理的工程事项。

跨专业影响一旦落实到具体交叉位置、接口参数或施工时序，也就形成共同边界。已经确认可实质性影响其他设施的事项，可能造成严重安全后果但其影响对象、影响范围、失效路径尚未查清的事项，均应纳入共同校核。共同边界并非增设一套统一的专业标准，而是相关专业在同一工程位置上共同校核的约束对象；相关专业通过共同校核形成一致判断，由此确立共同可行条件。此时，各个专业仍按自身规范开展计算与安全判断，但需将受影响设施、约束要求、资料来源、调整结果置于同一位置、同一接口、同一版底图上进行复核。例如，排水管底高程压缩其他管线的交叉空间、燃气安全距离改变邻近设施的管位与施工方式，属于跨专业工程关联；将这些影响定位到具体交叉点、高程区间、施工时段，即形成可共同校核的边界。

第二次转换由共同可行条件通向可执行项目条件。在相关专业围绕共同边界形成一致判断以后，仍需在项目层面明确施工方式及单位、通过文件取得执行力等。实施路径由空间固化程度、资料可靠性、施工窗口共同决定，共同校核结论随后进入规划条件、项目范围、资金计划、设计文件、责任清单、验收移交文件、运维协议。

表1　相关研究进展与仍待回答的阶段承接问题

研究方向	国内代表性研究	国际代表性研究	主要研究内容	仍待回答的问题
管线综合与综合管廊	规划规范[14,33]、管廊标准[17,34-35]、全寿命与治理研究[36-39]	管廊治理[36]、可持续性[39]、适用性[37-38]	管位、交叉、安全间距、承载方式、运维要求	空间方案应用的具体项目，投资、建设、移交、运维责任的确定
排水防涝与城市水系统	系统化内涝[18,40]、道路行泄[41]、平急两用[18,40-41]	洪水模拟[42-43]、综合水系统[44]、城市实践[45-46]	排水高程、超标降雨、片区水力过程	排水要求与其他管线、道路改造、施工时间的衔接
数字化、生命线监测与资产信息	排水数字孪生[47-48]、生命线监测与运行调度[19]	三维数据[12,49]、BIM/GIS[50]、生命周期信息[22]、语义互操作[51]、资产信息[15,25,52]	设施位置、资料一致性、运行状态、模型互操作	资料写入项目文件，资产接收、运行维护、数据更新主体的明确（由后续设计读取）
安全韧性与风险治理	城市安全韧性[19]	韧性[53-55]、基础设施互依[6,56]、跨域治理[57-58]	事故传播、服务维持、设施恢复、风险识别	识别风险应用的具体项目和主体，以风险清单、审查意见或项目条件方式传递给并支持形成验收依据
地下空间规划与城市更新	地下空间规划与平急两用[20]	地下空间长期规划[59]、系统方法[10]、系统框架[60-63]	长期通道、资源配置、分期开发	依据建成区的已有管位和零散施工机会组织可实施项目
复杂适应、协同治理与全寿命管理	地下空间规划[20]、生命线韧性与数智化研究[19,47]	路径依赖[26]、适应性治理[30,64-65]、边界对象[66-68]、多中心治理[58]、框架操作化[24]	历史选择、分步决策、多单位协作、全寿命资料	识别冲突的承接主体、传递文件，项目的完成资料进入下一轮工程

在项目实施以后，会形成新的建成状态和运行记录，但这些信息只有被后续工程读取并实际改变底图、参数、预留位置、项目排序、审查要求才标志着第三次转换完成。可从三个方面观察第三次转换完成后的结果：项目接续关注前一阶段条件是否进入下一阶段项目；责任接续关注建设、接收、运维、数据更新是否落实到明确主体；信息接续关注建成与运行信息是否改变后续判断。三类接续是转换完成的可观察结果而非新的条件状态，工程见效仍由积水、事故、服务中断等专业指标另行评价。

既有理论成果可以解释这些转换，但不能替代工程证据。基础设施互依研究阐明设施在空间占用和服务关联上的相互影响[6,56]，边界对象与知识转化研究阐明不同专业需要围绕共同对象交换信息并校正判断[66,68]，路径依赖和适应性调整解释新区与建成区采取差异化实施方式的合理性[26,64]，协同治理、接口管理、资产信息连续模型表明共同校核结论进入多主体项目时需要明确责任和信息承接[16,23-24]。前一阶段形成且仍需有效的条件，应在下一阶段有明确的承接对象、执行文件、责任主体并继续进入后一轮工程；这些认识落实到具体管位、高程、现场资料、项目文件并体现为责任主体的实际履责后，工程问题才具有可检验的对象。

沿三类断点反向追溯，四项机制分别作用于不同转换环节。共同边界识别定位跨专业影响，实施路径分化使共同可行条件适配现场情境，治理转化赋予共同校核结论以项目执行力，跨期反馈使建成与运行信息进入下一轮工程判断。相应的理论来源、工程转换、可查验结果对应关系如表2所示。

（四）作用机制与基本命题

在上述状态转换链中，四项机制需要落实为可以查验的工程变化。① 共同边界识别命题，当一项专业条件已经实质性改变其他设施的布置、施工、运行或维护条件时，应将这种影响落实到具体位置、接口或施工时序并转入共同校核；冲突位置、受影响设施、资料依据、调整结果可作为识别完成的证据。② 实施路径分化命题，在共同可行条件形成后，实施方式随工程情境而定，空间固化程度、资料可靠性、施工窗口共同影响前置统筹或渐进更

表2　理论来源、工程转换与可查验结果

需要解释的工程问题	既有理论提供的认识	有待解释的阶段承接	本研究的理论转换	可查验结果
某一专业条件改变其他设施的可行条件	基础设施互依[6,56,71]说明空间占用、施工干扰、服务中断会跨系统传播，边界对象与知识转化[66-68]说明不同专业可借助共同资料协作	何时由专业独立判断转入共同校核，怎样定位校核对象	将一项专业条件实质性改变其他设施布置、施工、运行或维护可行性的情形界定为跨专业工程关联；以实质性影响为触发条件，具体位置、接口、施工时序为定位对象，识别共同边界	冲突位置、受影响设施、接口高程、安全后果、资料可靠性
新区与建成区的空间、资料和施工机会不同	路径依赖[26]、渐进决策[27]、适应性管理[30,64-65]说明既有管位、信息、组织条件会限制后续选择	长期规划怎样转化为当前可实施的工程做法	依据空间固化程度、资料可靠性、施工窗口，选择前置统筹或渐进更新方式	通道与节点方案、项目组合、分期计划、保留接口、施工窗口利用记录
技术方案涉及多个实施与责任主体	协同治理[23,28]、工程接口管理[24]说明跨主体事项需要明确接口、决策和责任	专业意见怎样转化为项目执行力，怎样检验会商成效	将校核结论写入项目范围、资金计划、设计文件、责任清单、验收移交文件、运维协议，以是否改变项目条件作为治理转化的完成判据	设计变更、项目清单、责任清单、移交文件与运维协议、移交条件、尚未解决事项及后续处置要求、现场执行记录
建成与运行信息转化为后续工程判断条件	系统生命周期与资产信息管理[13,15-16,22,25,29,52]、组织学习[72]要求对象、资料、责任在建设、运行、更新之间保持连续	归档资料怎样转化为对下一轮工程的实际影响	竣工与运行信息被后续项目读取，用于修改底图、参数、项目排序、审查要求，构成跨期反馈	版本更新、读取记录、后续设计修改、复盘记录、同类问题变化

新的选择；公共安全要求是共同校核的基本底线，涉及排水等重力流设施时应将水力连续作为基础约束。③ 治理转化命题，共同校核结论改变项目范围、设计条件、责任清单、移交条件并落实到具体主体后才取得项目执行力。④ 跨期反馈命题，建成与运行信息被后续工程实际读取并据此改变底图、参数、预留位置、项目排序、审查要求后，将转化为后续工程判断条件。

尽管实际工程过程并非单向线性推进，但三次转换存在先后关系。例如，补测、设计变更、施工条件变化都可能使项目返回共同校核，跨期反馈也可能触发新一轮共同边界识别。实施路径分化、治理转化共同作用于第二次转换：前者决定实施方式，后者赋予共同校核结论以项目执行力，两者均不增加新的条件状态。因此，四项机制用于解释三次状态转换，而机制与转换无需一一对应。

由此，跨专业工程关联构成分析单元，四个条件状态标示工程链所处阶段，三次转换贯通共同判断、项目执行、后续更新，四项机制解释这些转换的成立条件，三类接续提供可查验结果。分析对象、状态、转换、机制、结果依次相扣，共同构成城市地下管网系统治理的工程科学分析框架。

三、跨专业工程关联的条件转换机制

城市地下管网中的跨专业工程关联，集中体现在共享道路断面、交叉节点、接口、施工时序上的约束在不同设施之间产生的实质性影响。四类关键条件状态、三次转换、四项机制的对应关系如图 1 所示。

（一）共同边界识别与共同判断形成

当一项专业条件已经改变其他设施的布置或实施条件时，原有的独立判断不再充分，由独立专业可行条件向共同可行条件的第一次转换随之启动。共同边界识别将实质性影响落实到具体工程事项。规划阶段可围绕排水出路、主干通道、重要交叉和远期接口筛查潜在影响；进入设计和施工阶段后，再通过专业计算、现场复测与设计变更，将影响定位到具体管位、接口参数和施工时段[9,14]。排水管底高程压缩燃气或电力管线的交叉空间，是一项专业条件在具体交叉位置形成多专业共同边界的典型情形。

共同边界一经确认，各个专业判断对应到同一交叉点、同一接口参数、同一版底图。排水、燃气、电力等专业首先开展本专业计算，再将受影响

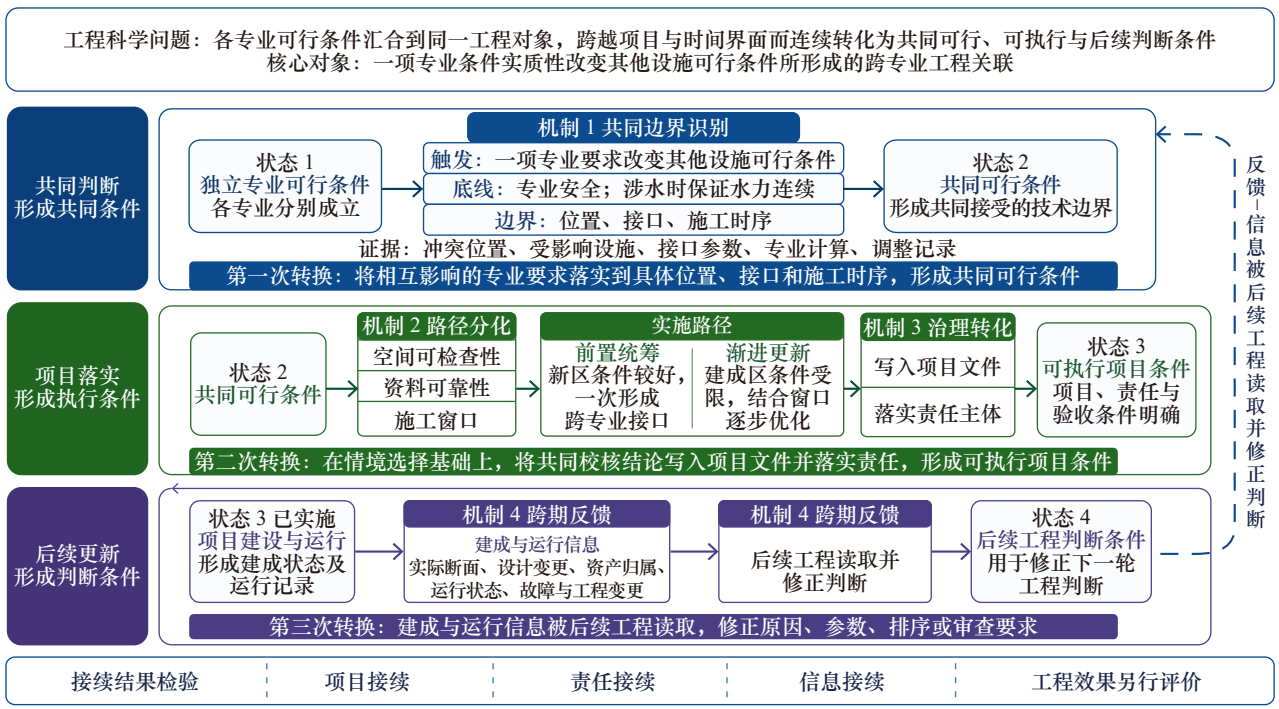

图 1　城市地下管网跨专业工程关联接续的理论框架

设施、约束要求、安全后果、资料来源、调整结果放到同一工程位置进行复核。校核顺序由约束刚性、失效后果决定，如燃气安全距离等不可退让的要求需优先满足，涉及重力流排水时排口受纳、连续高程、自然坡降等基础约束需先行稳定。第一次转换完成的标志是相关专业在具体位置上形成共同确认的高程、间距、接口、施工时序，保留专业计算与资料版本的可追溯记录。至此，共同可行条件已经形成，而当前项目的执行条件尚待建立。

（二）实施路径选择与项目条件形成

第二次转换由共同可行条件通向可执行项目条件，包含路径选择、项目落实两个连续动作。新区的地下空间关系尚未固化，可以在道路和地块开发之前安排主要通道、节点和接口。建成区受既有管位、产权边界、连续服务、道路开挖条件的制约，通常需要利用道路大修、内涝治理、管线更新形成的施工窗口渐进实施。通过路径选择，使共同可行条件与现场空间、资料、施工机会适配。

路径选择首先受到不可退让的专业安全底线约束，涉及重力流排水时连续高程、稳定出路构成方案成立的基础约束[9,73]。在满足这些基础约束后，空间固化程度[26]、资料可靠性[12]、施工窗口[27]共同决定实施方式。在路径确定以后，共同校核结论需进入项目文件。明确建设对象、实施时点、资金来源、建设单位、资产接收主体、运行维护责任、验收条件，体现在项目范围、设计变更、责任清单、移交文件[24,31]。第二次转换完成的标志是实施方式与现场条件适配，共同校核结论、责任安排同时进入项目文件。

（三）跨期反馈与后续判断更新

工程建成只改变设施的实际状态，并不自动形成后续工程判断条件。第三次转换以建成与运行信息被实际采用并改变后续判断为基准。资料链需贯穿各个工程阶段：规划阶段保留控制条件、共同边界、远期接口情况，设计阶段记录专业计算、交叉校核、设计变更情况，施工和竣工阶段补充实际管位、高程、材质、接口、测量精度、资产移交情况，运行阶段持续记录故障、维护、积水、服务中断情况。资料形成单位对资料来源与真实性负责，资产接收、运行维护、数据更新主体在责任移交过程中确认并维护相应记录。

统一底图是串联这些资料的基础载体，可用条件取决于所载对象、位置、来源、精度、测量时间、更新单位的可追溯性[12,22]，与项目清单、竣工测量、资产移交、运维事件的对应程度[13]。BIM/GIS、数字孪生等技术可以统一对象、管理版本并提高信息可检索性[48,50]，碰撞检测可以将冲突定位到具体管线与构件[21]。数字平台能够汇集资料并提供共享条件，专业计算、现场复测、责任确认仍由相应单位承担。实际管位和竣工变更需及时更新到底图与平台[32,74]，资产接收、运行维护、数据更新主体也需明确[16]。资料进入平台只是具备被读取条件，只有后续项目据此修改底图、参数、预留位置、项目排序、审查要求并留下读取与修改记录，跨期反馈才算完成。尚未出现的后续项目事项应列为待核验，在读取记录形成前尚不能认定已经完成反馈[32]。

四、工程条件接续的实现与检验依据

四项机制落到具体工程对象、项目文件、责任落实、数据更新后才具有可检验性。三次转换分别在共同可行条件形成、可执行项目条件落实、后续工程判断条件形成的过程中留下工程证据，贯穿规划、设计、施工、验收移交与运行更新。工程条件接续的检验集中在三个问题：共同边界上的约束是否形成一致判断，共同校核结论是否改变当前项目，建成与运行信息是否改变后续工程判断。这些变化得到记录、追踪和复核后，工程链在相应界面完成接续才有据可查。

（一）共同可行条件的形成与工程校核

城市地下管网方案同时受到自然地理、公共安全、技术经济、项目实施四类条件的制约（见图2）。地形、排口、受纳水位决定方案的基本成立条件，安全距离、消防疏散构成不能退让的底线，道路断面、敷设方式是方案比选的要素，产权、资金、施工时间决定工程的组织实施方式。

工程约束的控制值、适用方式可以随地点和阶段变化，但依法确定的公共安全底线不能随建设条件下调。资料的可靠性同样会改变工程判断，如底图、产权、现状资料不足时原有方案可能在补测和

核权后不再成立，因而工程记录还需包括约束对象、位置、阶段、依据、责任单位、证据可靠性。对于投资大、建成后难以调整且证据仍显不足的工程，补测和试验是方案确定前的必要核验，可按最不利情形预留安全余度以控制剩余风险。

工程约束的判断还取决于采用的空间尺度。城市尺度主要控制排水出路、重大生命线通道、应急保障[20,59]，片区尺度进一步落实道路断面、管线交叉、设施接口、更新时序[10]，地块与节点尺度重在核对接驳高程、局部空间、产权交界、检修通道。不同尺度可以共用一套底图，但城市控制要求需逐级落实到片区、地块与节点并明确相应的控制对象、判断层级和责任单位，否则进入具体项目后仍会失去承接。

共同校核关注共享位置上具有实质性影响的工程条件，但并不重复审查各专业的全部内容。各个专业首先完成本专业计算，再核查共享高程、交叉位置、安全间距、抢修通道、施工时间。按照具体对象确定校核成果，如主干通道形成控制线，复杂节点形成节点方案，建设对象、责任单位、实施顺序、资金来源、数据提交要求需纳入项目清单；会签和会商宜集中处理尚未形成一致意见的共同事项。

以重力流排水为例说明共同校核应服从物理约束。连续高程、自然坡降决定重力排水路径[9,75]，排口高程、受纳水位决定系统的稳定出路[40]，因而管底与道路高程、汇水路径、排口顶托、调蓄、超标降雨行泄均进入校核范围[41,43]。排水高程一旦被其他设施或后续开发占用，建成后再调整的代价很高；当连续高程构成方案刚性约束时，稳定排水出路和控制高程成为方案成立的前提。这种先后次序源自重力流规律、工程不可逆性，并不意味着为单一专业设定普遍等级。在排水骨架稳定以后，燃气安全距离、泄漏影响与抢修条件[73]，综合管廊的分舱、运行维护和应急要求[35]，重要生命线的事故传播和恢复能力等，仍在同一共享位置逐项核对。当然，不同情境的控制重点可以变化，如内涝治理更关注排水高程和地表行泄[41,46]，地下空间复杂区更关注结构安全、疏散与长期通道[20]。

在共同校核完成后，路径选择转向现场可实施性。空间固化程度反映工程调整余地，资料可靠性决定现有资料能否直接进入设计，施工窗口与相关单位的同期行动能力决定可以组合实施的具体任务。当空间调整余地较大、资料可靠、施工窗口明确时，可以提前确定主要通道、节点、接口；在条件尚不完备时，应先补齐相应的资料、权属、责任

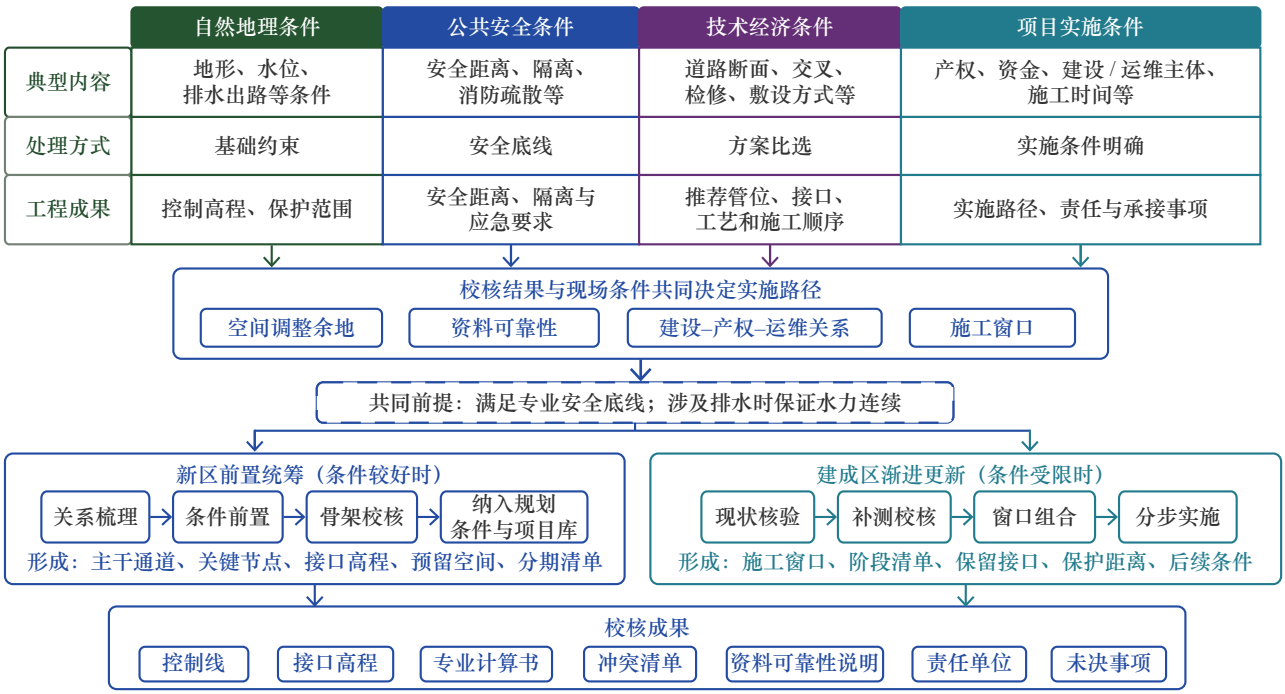

图2　四类工程约束条件的处理方式及其对实施路径的影响

条件，再结合可用施工窗口渐进更新。

（二）可执行项目条件的组织落实

共同可行条件取得执行力的关键在于将路径选择、建设对象、开工与验收条件、移交责任落实到具体项目。新区前置统筹、建成区渐进更新虽然起点不同，但最终均需形成项目范围、设计条件、责任清单、移交文件以及可供后续工程读取的建成资料（见图3）。

1. 实施路径与项目组合

在新区和重点开发片区，多专业工程条件可以在开发前统一确定[8,59]。开发强度和道路竖向决定设施需求与空间条件[7]，排水出路与接驳高程构成水力约束[9]，燃气管线等设施的安全设防属于前置条件[73]，综合管廊或其他敷设方式则由断面条件、长期扩展需求的比较结果确定[17]。这些控制条件一经形成，就由规划条件和项目库承接，以免延迟至单个项目施工前再逐项协调[11]。前置统筹旨在提前锁定骨架、接口、远期空间，不要求一次性建好全部设施。

在建成区，现状核验是路径选择的起点。管位、高程、运行状态、资料精度应足以支撑判断，产权、资产接收、运维边界应可核实。在分步实施期间，公共安全底线贯穿全过程，涉及排水系统时水力连续纳入基础约束。可积极利用道路大修、老旧小区改造、内涝治理、管线更新提供的有限施工窗口。在条件不足时，先补测核权，必要时采取临时安全措施；在管位、产权、施工窗口明确后，再将位置相近、工期相容且建设、接收和运维主体均明确的任务组合起来。

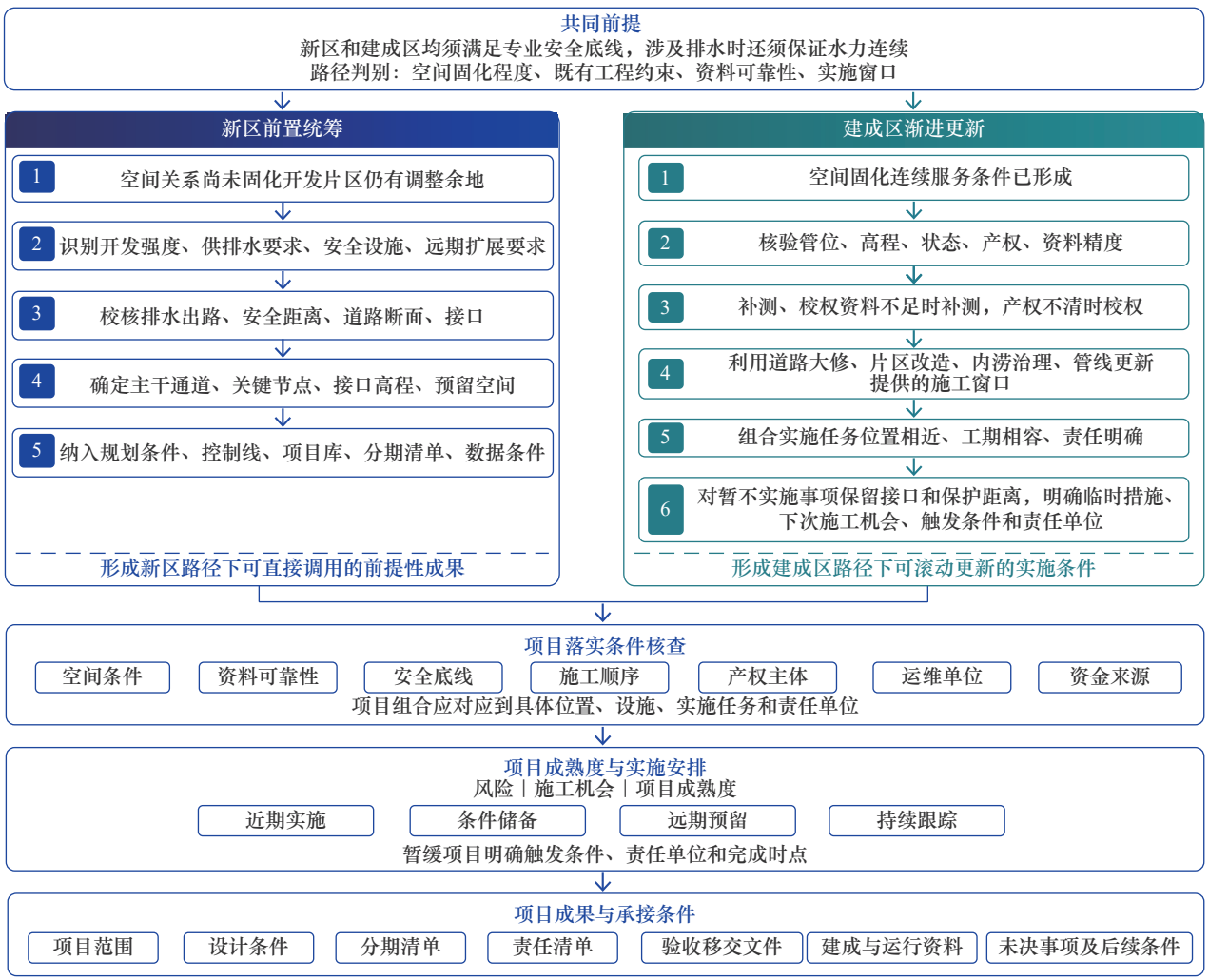

图3　新区前置统筹与建成区渐进更新的实施过程

无论前置统筹还是渐进更新，工程安排都应落实到具体的位置、设施、责任单位[13]，也应根据风险、施工机会、项目成熟度划分为近期实施、条件储备、远期预留、持续跟踪[27]。其中，条件储备、远期预留事项的项目记录，需载明保留接口、触发条件、责任单位、完成时点，也需在不降低安全底线的前提下纳入项目库并持续更新。

敷设方式取决于设施属性、安全等级、排水坡度、道路断面、施工影响、检修空间、全寿命成本，是工程条件比较后的结果，不应先行预设。对于需求集中、长期扩展明确、断面与经济条件适宜的区域，可采用综合管廊；对于安全允许的局部路段和复杂节点，可采用共沟或节点舱；对于排水骨干设施和风险较高、不宜共置的设施，宜独立敷设。

共同校核按照“资料核验–专业自校–共享位置交叉校核–会商处理剩余问题”推进。会商集中处理跨专业问题，如尚未满足的公共安全约束，多产权主体之间的责任界面，主干通道与远期接口安排，因资料不足而尚未查清的管位、权属或接口条件。会商结论应明确调整方案、责任单位、完成时间、仍待满足的条件。

底图可靠是资料进入设计环节的前提。统一底图需保留数据来源、精度、测量时间、产权、更新单位[12,22,76]。近期实测、竣工测绘、可追溯物探成果可以直接进入设计校核，旧档案、普查资料只用于初步判断，设计校核仍以分级复测结果为依据[32,74]。仅有示意位置或前期经验不足以决定安全距离和排水高程。在项目完成后，实际管位、高程、材质、接口、监测点位、资产移交信息成为底图与台账的更新内容，资产接收、运行维护、数据更新主体以书面形式确认各自承担的事项[16]。

2. 工程文件与责任承接

责任承接落实在具体事项与明确单位的对应关系上（见表3）。总体协调主体可按照城市现行职责体系组织共同事项、检查承接情况，但不可替代专业法定责任、项目建设责任、资产责任、运行维护责任。在项目范围确定后，建设、出资、资产归属、接口维护、运维费用、数据更新等事项需同步落实；在产权、使用、运行维护单位不一致时，需分别记录单位名称与承担事项[13,29]。在验收移交时，需核查实际管位、高程、接口、资产编码、监测接入、设计变更，同步完成数据提交与资产移交[16,25]。在既有空间固化时，可根据可用空间、施工窗口安排分步实施；在资料不可靠、产权边界不清时，需先补测核权；在施工窗口错位时，可调整项目组合；在信息失续时，需补充资料更新和后续读取记录。

竣工资料和运行资料承担不同的工程作用。

表3　各阶段的成果、写入文件与检查依据

具体成果	写入文件	主要承接主体	常见断点与改进	检查依据
主干通道、控制线、接口高程	专项规划、规划条件、控制线、项目库	规划部门、专业主管单位	图面方案已经协调，但未进入项目条件；应纳入规划条件或项目库	控制线、接口高程、保留条件
项目组合与分期	项目建议书、可行性研究、年度建设计划	建设、投资、财政主体	问题清单与项目库分离；应按照风险、施工机会和资金条件形成项目组合	项目范围、资金来源、分期条件
跨专业冲突处理	专业审查、设计协调、问题会商	设计单位、法定审查单位	普遍性会签或重复审查；宜由各专业先完成计算，再结合具体冲突召集涉及的设计、建设、产权、运维单位	调整意见、责任清单、尚待满足的安全、时点或处置条件
实际建成状态	设计变更、竣工测量、验收资料	建设、施工、测绘主体	竣工资料只归档、不更新底图；数据提交应与验收、结算、移交同步	实际管位、高程、接口、版本
资产与运维责任	资产移交、运维协议、资产台账	产权、运维主体	建成后产权单位、费用承担单位、故障处置单位不清；应在移交时书面确认	产权、费用、接口、故障处置责任
运行评价	运行记录、风险清单、后评价和城市体检	运维、城市管理主体	只形成零散事件记录，缺少连续效果数据；应按项目类型持续记录	积水、水位、事故、服务中断、重复开挖
跨期反馈	更新计划、后续项目条件、设计修改记录	后续项目建设、设计、审查主体	已形成复盘意见但未进入后续工程；应保留读取和修改记录	读取记录、设计修改、项目排序、审查要求调整

竣工测量、调试、验收结果用于校正设计数据，运行中的故障、积水、事故记录用于检验既定高程、安全距离、接口条件。在实际状态与设计文件不一致时，应先核明原因，再决定偏差处置方式；经核查确认可以接受的实际状态，需同步更新至统一底图、竣工资料、资产台账，据此修正后续工程采用的参数。运行阶段涉及本期工程成效、跨期反馈成立两个判断：前者由积水范围与水位、生命线事故与服务中断、重复开挖与责任争议等指标评价；后者不以资料留存为依据，而以建成与运行信息被后续工程实际采用并改变判断为依据。

治理转化无需新建制度，关键在于让共同校核结论进入既有工程文件并改变执行条件。例如，主干通道、接口高程进入规划条件[8,33]，冲突处理进入可研、设计、审查文件[31]，责任分工进入验收移交与运维协议[13,35]，竣工状态进入统一底图、资产台账[16,32]，运行中的故障、积水、维护记录进入更新计划、后续项目条件[5]。治理转化、跨期反馈应使用不同证据判断：对于前者，需检验共同校核结论是否改变当前项目；对于后者，需检验建成与运行信息是否被后续工程读取并改变判断。

（三）工程接续的证据与断点诊断

各个转换界面留有可追溯证据是工程科学逻辑经受真实项目检验的关键，涉及至少六类信息：现状测量及其精度，冲突要求、调整方案和责任单位，设计变更与施工窗口，竣工偏差、资产移交与数据更新，后续项目读取及设计修改，降雨、积水、水位、服务中断和重复开挖等效果记录。其中，前五类信息用于判断工程链的接续性，第六类信息用于判断工程的见效，不能混用。

1. 三类证据的区分

治理转化、跨期反馈、工程效果是三类不同的判断，相应的证据也不能互换。治理转化关注共同校核要求进入当前项目文件并改变施工、验收移交和运行承接，跨期反馈关注建成与运行信息进入后续项目并改变判断，工程效果关注工程质量、服务水平、安全风险的改善程度。

冲突清单、协调意见、数据记录、责任清单、移交文件、运维协议不能单独证明工程条件完成转换。治理转化关注相关材料改变设计方案、施工条件、验收移交内容，跨期反馈关注建成资料更新统一底图并被后续项目实际读取。如果工程链已经接续但效果未见改善，则应将诊断重点转向专业方案、参数、施工质量、运维条件；如果工程短期见效但资料与责任没有接续，那么下一轮工程仍可能重复原有问题。

运行责任容易在施工完成与运行接管之间中断。在投入运行前，确认接口和检修空间，核对实际管位和高程，完成建设单位与资产接收、运行维护单位之间的书面交接是必要内容[13,29]，尚未完成的事项应进入移交前的问题清单。

工程接续诊断以各专业安全底线均满足为前提。燃气安全距离、消防疏散等要求是不可突破的底线，涉及排水等重力流设施时水力连续也是前置条件。如安全底线尚未通过，不得开展后续接续评分；待整改完成后，再评价其他条件的落实情况。

2. 接续诊断与断点识别

真实项目的工程接续具有阶段性，不宜简单归为完成或未完成。工程接续诊断以具体的跨专业事项为对象（如高程冲突、管线交叉、安全距离不足、施工窗口不明），可沿共同边界识别、共同校核、路径确定、文件与责任写入、施工验收与责任交接、资料更新、后续采用逐项记录。阶段记录、阶段分项值用于识别断点位置，工程接续诊断指数C用于表征同一项目内部的接续程度。

$$C=100\times\sum_{i=1}^{n}w_i\times c_i \qquad (1)$$

式（1）中，n为纳入评价的有效阶段记录数，w_i为第i条有效阶段记录的权重，c_i为相应阶段记录的分项值。对于主分析，$w_i=1/n$。在尚未形成该阶段要求的成果或证据时，$c_i=0$；如成果已经形成而该阶段要求尚未完成时，$c_i=0.5$；如工作已经完成且证据可追溯时，$c_i=1$。（0、0.5、1对应未形成、中间状态、已完成三类过程状态，用于概括接续程度，而不表示工程量、工程效果或相邻状态之间的等距比例）。具体赋值以可追溯的原始工程文件为依据，可由两名评价者独立判读并进行一致性检验；在出现分歧时，再回到对应证据进行复核。

工程效果指标随项目类型分别设置，如内涝治理关注积水范围、水位、排口顶托状况、恢复时间，生命线工程关注事故、服务中断、抢修条件，综合改造可记录重复开挖、投资偏差、跨专业协调耗时。工程接续诊断、工程效果宜并列报告：前者

说明工程链的连续性和中断位置，后者用于判断专业目标的改善程度。

工程接续诊断的意义是将问题带回实际发生中断的阶段（见表4）。当过程接续不足时，应核查共同条件形成、项目与责任承接、资料进入后续判断等情况。当工程效果不佳时，需另行检查专业方案、参数、施工、运维。尚未到达后续读取时点的事项应列为待核验，待实际读取记录形成后再判断跨期反馈。真实项目应用时应以连续原始文件、运行数据为基础，报告诊断结果、证据缺口、对判断可靠性的影响程度。

四项机制最终均需由工程证据检验：机制成立由对应的工程变化判断，过程中断由阶段记录和分项值定位，项目总体接续程度由诊断指数表征，工程效果改善由相应专业指标评价。上述四类判断各有证据对象，可以避免将过程记录、文件形成、平台建成简单等同于治理成效。

五、工程科学逻辑的应用形式与适用边界

（一）典型工程情境中的应用形式

具体工程应用时，四项机制落实为一组连续的工程判断。高程冲突、管线交叉、安全距离、施工窗口用于识别共同边界，专业计算、交叉校核用于判断共同可行条件的形成，空间固化程度、资料可靠性、施工机会用于选择实施路径，项目文件、责任变化用于检验治理转化。在工程建成后，根据建成与运行信息改变后续判断来检查跨期反馈的形成。可见，三次条件转换分别对应明确的工程对象、可观察的变化、可核验的完成标志。

对于具体工程，同一项条件转换可能依托不同的项目文件、责任主体、实施路径。以综合管廊为例，在空间方案进入项目后，入廊范围、费用承担、运行维护、故障处置、退出规则落实到具体单位才是责任接续的直接表现[35-36]，否则廊体即使建成，责任链仍可能在运行阶段中断。同理，治理转

表4　工程接续诊断指数的阶段记录、赋值依据与核查重点

检查阶段	统一统计单元	赋值依据	核查重点
共同边界识别	某一候选跨专业事项在影响识别阶段的状态记录	0：未识别；0.5：已发现影响但位置、对象或资料可靠性尚未明确；1：触发关系、具体位置、受影响设施、依据、资料可靠性均可追溯	明确某一专业条件改变其他设施的可行条件
共同校核与共同可行条件形成	某一共同边界事项在共同校核与共同可行条件形成阶段的状态记录	0：未开展共同校核或未形成处理意见；0.5：已形成处理意见但冲突尚未解决，或尚未解决事项的安全、时点、处置条件尚未明确；1：冲突已解决，或经审查确认可延期处理且不影响安全底线和本阶段实施，已明确后续条件、责任单位、完成时间	围绕同一位置、接口、资料版本解决实质冲突，不以无关单位签字或会议次数代替处理结果
实施路径确定	某一共同边界事项在路径选择阶段的状态记录	0：未确定路径；0.5：已有原则方案但未形成项目组合或后续保留条件；1：已根据空间、资料、施工窗口确定前置统筹或渐进更新路径	路径与空间固化程度、资料可靠性、施工窗口相适应
项目文件与责任写入	某一共同边界事项在治理转化阶段的状态记录	0：未写入且责任未明确；0.5：文件或责任清单已形成但尚未成为执行条件；1：已改变项目范围、设计或施工条件，明确责任单位及承担事项	对象、位置、依据、责任单位、项目版本明确
施工、验收、责任交接	某一共同边界事项在施工、验收、责任交接阶段的状态记录	0：未核对实际状态或未明确接收、运维责任；0.5：移交文件或运维协议已形成但尚未完成交接；1：实际状态已经核对，责任单位及其承担事项完成书面交接	实际管位、接口、资产归属、费用、故障处置责任连续可追溯
建成与运行资料更新	某一共同边界事项在资料更新阶段的状态记录	0：未记录；0.5：已归档但未更新统一底图或资产台账；1：已按来源、精度、时间、版本更新，具备后续工程读取条件	数据更新单位明确，设计变更、实际状态、故障信息可追溯
建成与运行信息进入后续工程	某一共同边界事项在跨期反馈阶段的状态记录	0：未使用；0.5：形成复盘建议但未进入后续工程；1：已实际改变后续规划、设计、维修或改造	保留后续项目读取记录和设计修改记录，与工程效果数据分开保存

化关注项目文件因共同校核而改变，跨期反馈关注竣工与运行资料被后续项目实际读取并改变判断。实施路径同样受城市空间条件制约，不存在脱离现场条件的统一最优解。例如，赫尔辛基通过地下空间规划预留长期通道，适用于空间仍可前置安排的情形[62]；伦敦、哥本哈根在既有城市格局中围绕排水防涝分阶段组织工程，更接近施工窗口受限条件下的渐进更新[45-46]。这些实践都依据本地空间条件和组织能力安排通道与项目时序，可为路径分化提供跨情境参照。

以建成区内涝治理为例，考察四项机制沿同一工程链连续的情况。排水能力、燃气和电力安全、资料精度、产权关系、施工时间共同构成约束，任何一项约束未被识别、处理或落实责任，都可能使工程方案无法实施或者将冲突留给下一轮工程。首先，由现状核验、专业计算确定各自条件及相互影响；当共享高程、安全距离、施工时序导致其他设施调整时，相关专业需围绕同一位置开展交叉校核。能够在同一路段、同一施工期完成且建设、接收、运行维护主体已经明确的任务，可以纳入同一项目实施；对于本轮暂不实施的事项，在项目记录中需保留接口并明确触发条件与后续责任。随后，在施工、验收移交、运行阶段继续记录设计变更、实际管位、资产责任、工程效果，这些信息再由后续项目读取并据此调整判断。相关应用过程，各阶段的承接主体、工程成果与检验证据如图4、表5所示。

（二）应用判断与适用边界

工程协调的完成情况由协调结果转化为项目条件来判断，不能仅以开展过协调作为判断依据。在专业安全底线尚未满足时，不应进入工程接续评分，而应在完成整改后再评价其他条件的承接程度。在空间尚未固化、资料可靠、通道可以提前安

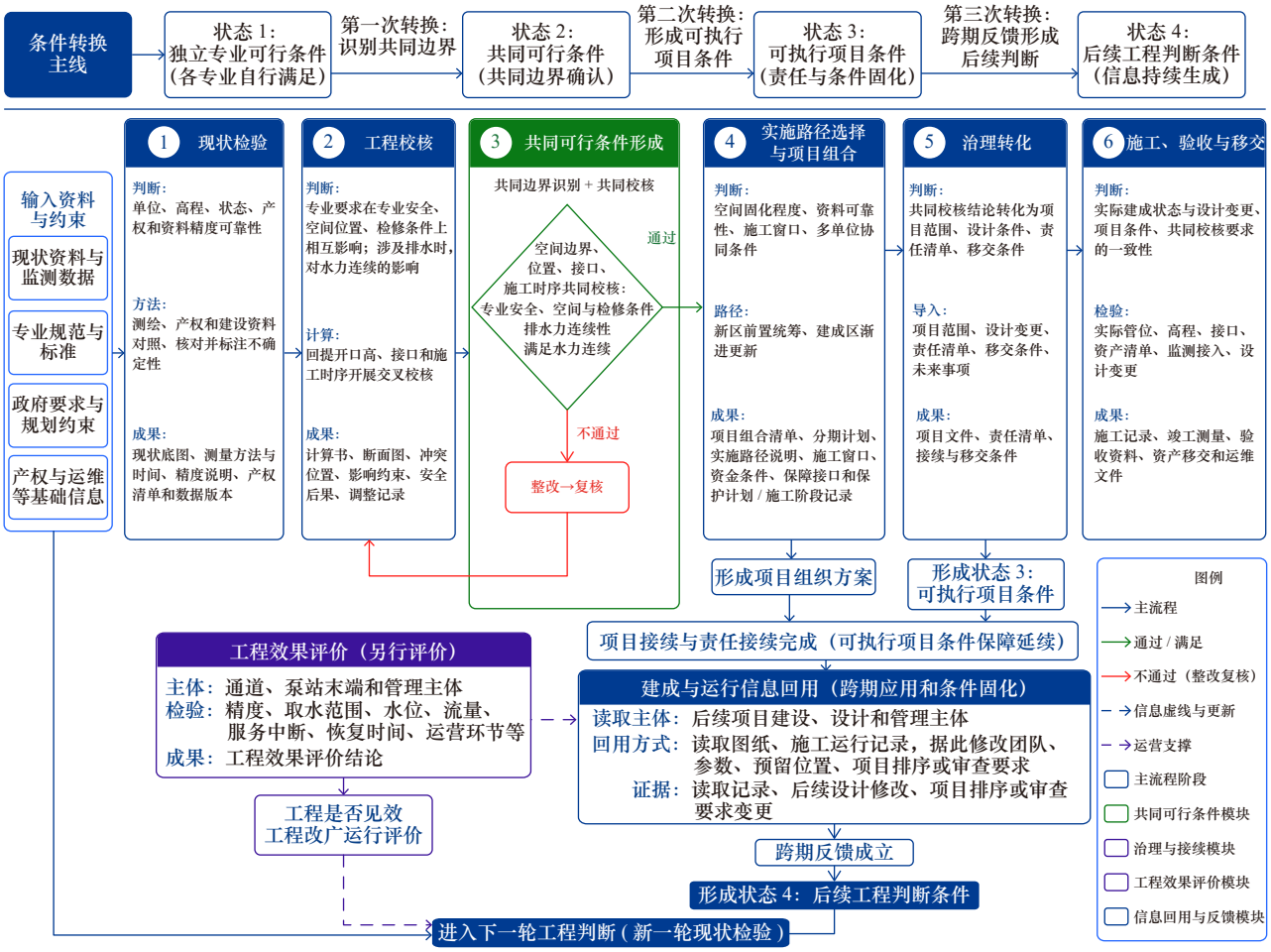

图4　条件转换逻辑在建成区内涝治理中的应用过程

排时，适合前置统筹；在既有管位、连续服务、施工窗口约束较强时，适合渐进更新。对于暂不具备实施条件的事项，可在安全底线得到保证并明确保留接口、触发条件、责任主体后延期处理。在比较工程条件后再具体选择综合管廊、共沟、独立敷设等方式，跨期反馈以信息在后续工程中的实际作用为基准，而工程效果仍由积水、事故、服务中断等指标另行评价。C值用于表征同一项目内部的接续程度并辅助定位断点，不用于其他城市、不同情境项目的简单排序。由此，管线冲突、责任失续、建成信息失用可分别追溯共同可行条件的形成、共同校核结论取得执行力、建成与运行信息进入后续判断。

这一逻辑适用于存在实质性跨专业影响且工程条件需要跨项目、阶段或责任主体继续传递的情境。内涝风险较高、地下空间复杂、管线密集的建成区更新，更容易形成此类关联[11,18,20]；设施类型单一、产权与接口清晰、施工影响有限的局部维修，仍可按照现行的专项设计和管线综合方式处理；在单一项目、单一责任主体内即可完成的事项，只需核查实际发生的转换环节，不必套用全部阶段。实际应用时要求每次条件转换都有连续、可追溯的工程记录，跨项目比较还需控制设施类型、建设年代、空间固化程度、施工窗口等情境差异。管线综合、水力计算、安全设计、数字平台、资产管理仍然分别解决各自专业边界内的问题，系统治理则关注这些专业判断进入共同校核、取得项目执行力并服务后续更新，具体的专业底线、实施参数、效果指标仍由相应工程规律确定。

六、结语

城市地下管网系统治理面临分别成立的专业条件进入共享地下空间和连续工程链后能否共同成立并持续有效的核心问题。本文以跨专业工程关联为分析单元，将管线冲突、项目失续、信息失用归结为工程条件在共同判断、项目执行、后续更新三个界面上的承接中断，再以共同边界识别、实施路径

表5　建成区内涝治理条件转换的主要承接主体、成果与检验证据

步骤及检验对象	主要判断	处理方法与主要承接主体	必需成果与检验证据
现状核验（共同边界识别与实施路径分化的前置条件）	管位、高程、状态、产权和资料精度是否可信	测绘、产权和建设单位补测、核权，并标注仍未核实的管位、权属事项和资料精度	现状底图、测量方法与时间、精度说明、产权清单和数据版本
工程校核（共同边界识别命题）	专业条件是否在安全边界、空间布置和抢修条件等方面相互影响；涉及排水等重力流设施时，是否影响水力连续	各专业需先完成计算，受影响专业再围绕共享位置、接口及其关联影响开展交叉校核	计算书、断面图、冲突位置、受影响设施、安全底线和调整记录
实施路径与项目组合（实施路径分化命题）	任务能否在同一路段和同一施工期内组合实施，应采用前置统筹还是分步实施	规划、建设和投资主体可组合同期实施的任务，并保留未纳入本轮实施任务的接口和条件	项目组合清单、分期计划、施工窗口、资金条件、保留接口，以及任务进入项目库、年度计划或施工阶段的记录
项目落实（治理转化）	是否仍有安全、产权、建设主体或施工时序冲突	涉及冲突的设计、建设、产权和运维单位需形成调整意见，建设主体再将结论写入项目范围和责任清单	设计变更、项目范围、责任清单、完成时间、移交条件、尚未解决事项及后续处置要求
施工、验收与移交（治理转化结果检验）	实际建成状态是否与设计变更、项目条件和共同校核要求一致，资产接收单位和运维单位是否完成书面交接	建设、施工、测绘、验收和接收单位核对实际位置、资产编码、接口	施工记录、竣工测量、偏差说明、数据提交、资产移交和运维文件
运行评价（工程效果）	工程运行效果是否达到设计目标或预先设定的改善指标	运维、监测和城市管理主体持续记录降雨、积水、水位、故障、服务中断与恢复情况	降雨与积水记录、关键节点水位、事故与服务中断、恢复时间和重复开挖
跨期反馈检验	建成与运行信息是否被后续工程读取并改变判断	后续项目建设、设计和审查主体读取底图、竣工与运行记录，并据此修改参数、项目排序或审查条件	读取记录、后续设计修改、项目排序或审查要求调整

分化、治理转化、跨期反馈来解释工程链的延续性；由此将城市地下管网系统治理的基本对象由单项设施扩展为跨专业、跨项目、跨期持续存在的工程关系，治理完成情况转由项目文件、责任记录、后续读取记录来核验。这一区分也划定了系统治理、专业评价的边界：专业规范和计算形成单项设施成立的专业判断，系统治理关注这些判断在共同校核、项目实施、后续更新中的连续转化。共同校核使分散的专业判断在同一工程对象上相互校正，项目组织赋予共同判断以现实执行力，跨期反馈驱动建成与运行信息成为下一轮工程的判断依据。项目接续、责任接续、信息接续用于检查工程链的连续性，接续判断、效果判断相互联系但不能彼此替代，支持追溯工程关系失去承接的点位、检验完成承接以后工程绩效的改善程度。

城市更新逐步进入存量提质、基础设施趋于网络化的发展阶段，地下管网治理将由一次性项目协调走向“规划–建设–运行–再更新”贯通的全过程治理。在当前理论构建及应用的基础上，后续可选择跨专业影响明确、工程阶段完整、责任与资料链可追溯的更新项目，连续记录共同边界形成、项目条件改变、责任交接、建成信息更新、后续项目读取等情况，将接续诊断与积水、事故、服务中断、重复开挖等工程效果并列观察；比较不同设施类型、建设年代、空间固化程度、施工窗口下的实施路径差异，检验四项机制的稳定性及适用边界。随着工程记录的不断积累，共同边界、实施路径、责任安排、运行反馈将逐步沉淀为可复用、可校正的工程知识，推动数字平台由资料汇集工具转向保存工程条件、传递工程判断、支撑跨期决策的知识载体。经过不同城市情境、多类基础设施网络的持续检验，相关逻辑有望丰富现代化基础设施网络构建与长效运维的基本认识，为城市水网、能源网络、交通网络、地下空间的协同治理提供理论借鉴。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 15, 2026; **Revised date:** August 18, 2026

Corresponding author: Shang Yizi is a professor-level senior engineer from China Institute of Water Resources and Hydropower Research. His major research fields include resilient infrastructure network development, long-term operation and maintenance, modern water networks. E-mail: yzshang@foxmail.com

Funding project: Innovation and Expansion Talent Program for Intellectual Assistance to Xinjiang (E535020301); Young Scientific and Technological Talents Program in Water Resources (JHYC202303)

参考文献

[1] 国家发展改革委5月份新闻发布会文字实录[EB/OL].（2026-05-22）[2026-08-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/wszb/202605xwfbh/wzsl/202605/t20260522_1405388.html.
Transcript of the May press conference of the National Development and Reform Commission[EB/OL].（2026-05-22）[2026-08-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/wszb/202605xwfbh/wzsl/202605/t20260522_1405388.html.

[2] 深入实施以人为本的新型城镇化战略五年行动计划[EB/OL].（2024-07-28）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965543.htm.
Five-year action plan for further implementing the people-centered new urbanization strategy[EB/OL].（2024-07-28）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965543.htm.

[3] 中共中央办公厅 国务院办公厅关于持续推进城市更新行动的意见[EB/OL].（2025-05-02）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/202505/content_7023880.htm.
Opinions of the General Office of the Communist Party of China Central Committee，General Office of the State Council on continuously advancing urban renewal actions[EB/OL].（2025-05-02）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/202505/content_7023880.htm.

[4] 住房城乡建设部关于扎实有序推进城市更新工作的通知[EB/OL].（2023-07-05）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891045.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development’s notice on advancing urban renewal in a steady and orderly manner[EB/OL].（2023-07-05）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891045.htm.

[5] 中共中央办公厅 国务院办公厅关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL].（2024-11-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11766/202412/content_6993325.html.
Opinions of the General Office of the Communist Party of China Central Committee，General Office of the State Council on promoting new-type urban infrastructure construction and building resilient cities[EB/OL].（2024-11-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11766/202412/content_6993325.html.

[6] Rinaldi S M，Peerenboom J P，Kelly T K. Identifying，understanding，and analyzing critical infrastructure interdependenciesb[J]. IEEE Control Systems Magazine，2001，21（6）：11-25.

[7] 支持城市更新的规划与土地政策指引（2023版）[EB/OL].（2023-11-10）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916516.htm.
Planning and land policy guidelines for supporting urban renewal（2023 edition）[EB/OL].（2023-11-10）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916516.htm.

[8] 城市更新规划编制导则[EB/OL].（2025-07-17）[2026-07-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2025/art_c2f8e25bece84825bd3d469ed24e6f35.html.
Guidelines for urban renewal planning[EB/OL].（2025-07-17）[2026-07-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2025/art_c2f8e25bece84825bd3d469ed24e6f35.html.

[9] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].
GB 50014—2021 Standard for design of outdoor wastewater engineering[S].

[10] von der Tann L，Sterling R，Zhou Y X，et al. Systems approaches to urban underground space planning and management—A review[J]. Underground Space，2020，5(2)：144-166.

[11] 城市更新“十五五”规划[EB/OL].（2026-05-22）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/gongbao/2026/issue_12786/202606/content_7071614.html.
Urban renewal plan for the 15th Five-Year Plan period[EB/OL].（2026-05-22）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/gongbao/2026/issue_12786/202606/content_7071614.html.

[12] Li S，Cai H B，Kamat V R. Uncertainty-aware geospatial system for mapping and visualizing underground utilities[J]. Automation in Construction，2015，53：105-119.

[13] ISO 55000：2024 Asset management—Vocabulary，overview and principles[S].

[14] GB 50289—2016 城市工程管线综合规划规范[S].
GB 50289—2016 Code for comprehensive planning of urban engineering pipelines[S].

[15] Whyte J，Stasis A，Lindkvist C. Managing change in the delivery of complex projects：Configuration management，asset information and “big data”[J]. International Journal of Project Management，2016，34(2)：339-351.

[16] ISO 55013：2024 Asset management—Guidance on the management of data assets[S].

[17] GB/T 50838—2015 城市综合管廊工程技术标准(2024 年版)[S].
GB/T 50838—2015 Technical standard for urban utility tunnel engineering (2024 edition)[S].

[18] 魏杰，任大伟，杨伟明，等. 超大城市系统化内涝防治规划探索与实践[J]. 给水排水，2022，58(7)：57-63.
Wei J，Ren D W，Yang W M，et al. Planning exploration and practice of systematic urban flooding prevention and control in mega city[J]. Water & Wastewater Engineering，2022，58(7)：57-63.

[19] 刘奕，张辉，王晶鑫，等. 我国城市安全韧性发展现状与技术发展方向展望[J]. 中国工程科学，2025，27(4)：13-27.
Liu Y，Zhang H，Wang J X，et al. Development status and technological prospects of urban safety resilience in China[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(4)：13-27.

[20] 王威，朱峻佚，王国盛，等. 城市地下空间“平急两用”规划建设思路与路径研究[J]. 中国工程科学，2025，27(4)：82-94.
Wang W，Zhu J Y，Wang G S，et al. Urban underground space planning idea and path based on a “dual-use” concept[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(4)：82-94.

[21] Luo S，Yao J Y，Wang S Q，et al. A sustainable BIM-based multidisciplinary framework for underground pipeline clash detection and analysis[J]. Journal of Cleaner Production，2022，374：133900.

[22] Wang M. Ontology-based modelling of lifecycle underground utility information to support operation and maintenance[J]. Automation in Construction，2021，132：103933.

[23] Emerson K，Nabatchi T，Balogh S. An integrative framework for collaborative governance[J]. Journal of Public Administration Research and Theory，2012，22(1)：1-29.

[24] Ahn S，Shokri S，Lee S，et al. Exploratory study on the effectiveness of interface-management practices in dealing with project complexity in large-scale engineering and construction projects[J]. Journal of Management in Engineering，2017，33(2)：04016039.

[25] ISO 19650-3：2020 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works，including building information modelling (BIM)—Information management using building information modelling：Part 3：Operational phase of the assets[S].

[26] Arthur W B. Increasing returns and path dependence in the economy[M]. Ann Arbor：University of Michigan Press，1994.

[27] North D C. Institutions[J]. Journal of Economic Perspectives，1991，5(1)：97-112.

[28] Ansell C，Gash A. Collaborative governance in theory and practice[J]. Journal of Public Administration Research and Theory，2008，18(4)：543-571.

[29] ISO 55001：2024 Asset management—Asset management system—Requirements[S].

[30] Walters C J. Adaptive management of renewable resources[M]. New York：Macmillan，1986.

[31] 国务院办公厅关于全面开展工程建设项目审批制度改革的实施意见[EB/OL].（2019-03-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2019-03/26/content_5376941.htm.
Implementation opinions of the General Office of the State Council on comprehensively reforming the construction project approval system[EB/OL].（2019-03-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2019-03/26/content_5376941.htm.

[32] 城市地下管线工程档案管理办法[EB/OL].[2026-07-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/gzk/art/2022/art_17337_763865.html.
Measures for the administration of urban underground pipeline engineering archives[EB/OL].[2026-07-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/gzk/art/2022/art_17337_763865.html.

[33] 城市地下综合管廊建设规划技术导则[EB/OL].（2023-05-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891947.htm.
Technical guidelines for urban utility tunnel construction planning[EB/OL].（2023-05-26）[2026-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6891947.htm.

[34] GB 51354—2019 城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准[S].
GB 51354—2019 Technical standard for operation，maintenance and safety of urban utility tunnel[S].

[35] ISO 37175：2024 Smart community infrastructures—Operation and maintenance of utility tunnels[S].

[36] Canto-Perello J，Curiel-Esparza J. Assessing governance issues of urban utility tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2013，33：82-87.

[37] Luo Y，Alaghbandrad A，Genger T K，et al. History and recent development of multi-purpose utility tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2020，103：103511.

[38] Wang T Y，Tan L X，Xie S Y，et al. Development and applications of common utility tunnels in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2018，76：92-106.

[39] Hunt D V L，Nash D，Rogers C D F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2014，39：15-26.

[40] 国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见[EB/OL].（2021-04-08）[2026-07-15]. https：//www. gov. cn/gongbao/content/2021/content_5605102.htm.
Implementation opinions of the General Office of the State Council on strengthening urban waterlogging management[EB/OL].（2021-04-08）[2026-07-15]. https：//www. gov. cn/gongbao/content/2021/content_5605102.htm.

[41] 王德康，王荣，辛慧宇，等. 基于平急两用思路下的非常规道路行泄通道设计[J]. 给水排水，2024，50（10）：73-80.
Wang D K，Wang R，Xin H Y，et al. Design of unconventional road drainage channels based on the principle of combining emergency and normal use[J]. Water & Wastewater Engineering，2024，50（10）：73-80.

[42] Schmitt T G，Thomas M，Ettrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology，2004，299（3/4）：300-311.

[43] Hammond M J，Chen A S，Djordjević S，et al. Urban flood impact assessment：A state-of-the-art review[J]. Urban Water Journal，2015，12（1）：14-29.

[44] Bach P M，Rauch W，Mikkelsen P S，et al. A critical review of integrated urban water modelling—Urban drainage and beyond[J]. Environmental Modelling & Software，2014，54：88-107.

[45] Thomas G B，Crawford D. London Tideway Tunnels：Tackling London's victorian legacy of combined sewer overflows[J]. Water Science and Technology，2011，63（1）：80-87.

[46] Rosenzweig B，Ruddell B L，McPhillips L，et al. Developing knowledge systems for urban resilience to cloudburst rain events[J]. Environmental Science & Policy，2019，99：150-159.

[47] 黄容，杨宗国，陈正，等. 深圳市排水管网数字孪生实现关键路径[J]. 水利信息化，2024（3）：23-29.
Huang R，Yang Z G，Chen Z，et al. Key path implementation of digital twin for Shenzhen drainage networks[J]. Water Resources Informatization，2024（3）：23-29.

[48] Fan C，Hou J，Li X，et al. Efficient urban flood control and drainage management framework based on digital twin technology and optimization scheduling algorithm[J]. Water Research，2025，282：123711.

[49] Yan J Y，Jaw S W，Soon K H，et al. Towards an underground utilities 3D data model for land administration[J]. Remote Sensing，2019，11（17）：1957.

[50] Wang M Z，Deng Y C，Won J，et al. An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS[J]. Automation in Construction，2019，107：102931.

[51] Karan E P，Irizarry J，Haymaker J. BIM and GIS integration and interoperability based on semantic web technology[J]. Journal of Computing in Civil Engineering，2016，30（3）：04015043.

[52] Halfawy M R. Integration of municipal infrastructure asset management processes：Challenges and solutions[J]. Journal of Computing in Civil Engineering，2008，22（3）：216-229.

[53] Liao K H. A theory on urban resilience to floods—A basis for alternative planning practices[J]. Ecology and Society，2012，17（4）：art48.

[54] Meerow S，Newell J P，Stults M. Defining urban resilience：A review[J]. Landscape and Urban Planning，2016，147：38-49.

[55] Butler D，Ward S，Sweetapple C，et al. Reliable，resilient and sustainable water management：The safe & SuRe approach[J]. Global Challenges，2017，1（1）：63-77.

[56] Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems[J]. Reliability Engineering & System Safety，2014，121：43-60.

[57] Chester M，Underwood B S，Allenby B，et al. Infrastructure resilience to navigate increasingly uncertain and complex conditions in the Anthropocene[J]. npj Urban Sustainability，2021，1：4.

[58] Ostrom E. Beyond markets and states：Polycentric governance of complex economic systems[J]. American Economic Review，2010，100（3）：641-672.

[59] Kuchler M，Craig-Thompson A，Alofe E，et al. SubCity：Planning for a sustainable subsurface in Stockholm[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2024，144：105545.

[60] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan：A case of urban underground space use[J]. Land Use Policy，2009，26（4）：1128-1137.

[61] Volchko Y，Norrman J，Ericsson L O，et al. Subsurface planning：Towards a common understanding of the subsurface as a multifunctional resource[J]. Land Use Policy，2020，90：104316.

[62] Vähäaho I. Underground space planning in Helsinki[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2014，6（5）：387-398.

[63] Delmastro C，Lavagno E，Schranz L. Underground urbanism：Master plans and sectorial plans[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2016，55：103-111.

[64] Folke C，Hahn T，Olsson P，et al. Adaptive governance of social-ecological systems[J]. Annual Review of Environment and Resources，2005，30：441-473.

[65] Pahl-Wostl C. A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes[J]. Global Environmental Change，2009，19（3）：354-365.

[66] Star S L，Griesemer J R. Institutional ecology，translations' and boundary objects：Amateurs and professionals in Berkeley's museum of vertebrate zoology，1907-39[J]. Social Studies of Science，1989，19（3）：387-420.

[67] Carlile P R. A pragmatic view of knowledge and boundaries：Boundary objects in new product development[J]. Organization Science，2002，13（4）：442-455.

[68] Carlile P R. Transferring，translating，and transforming：An integrative framework for managing knowledge across boundaries[J]. Organization Science，2004，15（5）：555-568.

[69] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报，1957，2（3）：97-104.

Qian X S. Technological science[J]. Chinese Science Bulletin，1957，2(3)：97-104.

[70] Simon H A. The sciences of the artificial[M]. Cambridge：MIT Press，1996.

[71] Zimmerman R. Social implications of infrastructure network interactions[J]. Journal of Urban Technology，2001，8(3)：97-119.

[72] Argyris C，Schön D A. Organizational learning：A theory of action perspective[M]. Reading：Addison-Wesley Publishing Company，1978.

[73] GB 55009—2021 燃气工程项目规范[S].
GB 55009—2021 Project code for gas engineering[S].

[74] GB/T 51301—2018 建筑信息模型设计交付标准[S].
GB/T 51301—2018 Standard for design delivery of building information modeling[S].

[75] GB 55027—2022 城乡排水工程项目规范[S].
GB 55027—2022 Project code for urban and rural drainage engineering[S].

[76] GB/T 51187—2016 城市排水防涝设施数据采集与维护技术规范[S].
GB/T 51187—2016 Technical code for data acquisition and maintenance of urban drainage and waterlogging prevention facilities[S].