

# 基于 ISM-AHP 模型的排水管网修复决策研究

郭佩昕<sup>1</sup>, 王晨曦<sup>2</sup>, 张 栋<sup>1</sup>

(1. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266000; 2. 山东胶东航空城投资有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘 要:** 排水管网修复决策是复杂的系统问题, 受多因素的共同作用, 需综合考虑各影响因素, 应用系统方法科学地选取修复方案。通过某城区排水管网修复工程的实证研究, 检视了该工程中的主要影响因素; 同时根据建立的解释结构模型(ISM)-层次分析法(AHP)组合模型, 计算了各指标及各方案对于决策目标的权重, 据此确定了影响排水管网修复决策的关键因素和适宜该工程的修复方案, 可为相关决策提供参考。

**关键词:** 排水管网; 非开挖修复; 系统决策; 解释结构模型(ISM); 层次分析法(AHP)

中图分类号: TU992.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0178-05

## 0 引言

排水管网是城市基础设施的重要组成部分, 是维持社会正常运转的重要内容。随着城镇化进程的加速, 排水管网规模日益增大, 在提高社会治理效益的同时也逐步产生了新的问题, 管网老化、渗漏、脱节等问题日益增多, 严重地影响了城市交通和居民生活。

管网修复已经成为城市水体治理、提质增效的重要环节, 随之而来的研究和实际应用也不断增多, 但过往的研究主要集中在技术工艺和工程造价等方面, 所涉及的因素较为单一, 缺乏对整体工程多影响因素和多层级关系的系统性决策研究<sup>[1-4]</sup>。科学评估排水管网修复工程所涉及各类影响因素, 梳理各影响因素的相互关系及其对整个系统的影响程度, 建立因素间层级关系, 为此类工程的修复决策提供参考依据, 具有重要的现实意义。

本研究针对排水管网修复方案决策, 采用解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM)和层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)进行实证研究, 通过构建一个具备系统性和科学性的 ISM-AHP 组合评价模型, 来探讨各因素对于排水管网修复工程的不同作用和视角差别, 以助力决策者更明确地处理实际问题。

收稿日期: 2024-02-02

作者简介: 郭佩昕(1992—), 女, 学士, 工程师, 从事市政给排水管网工程设计及研究工作。

## 1 工程概况

以某城区管网修复工程为例, 项目组经现场踏勘和资料收集, 明确了排水规划和区域, 并获得了现状管网及其附属设施等基础信息。现状管网敷设于 1995 年, 管径为 DN1000~DN1200, 管道埋深为 5.42~6.71 m, 为钢筋混凝土管材。该管道位于城区主干道的东侧非机动车道下, 距离道路中心线 14 m, 道路红线宽度 50 m, 道路两侧主要为商业区和住宅区。现状管线横断面图见图 1。

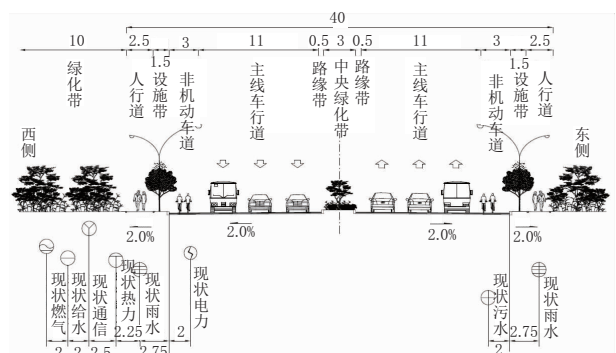


图 1 现状管线横断面图(单位:m)

由于管道坡度较小, 管内流速较低, 加之日常维护不充分, 造成管网常年高水位运行, 平均淤积率为 30%~50%, 管网均呈现较高缺陷等级的功能性或结构性缺陷。根据管道检测资料, 管网共发现缺陷 360 处, 按缺陷等级分类包括 17 处 1 级缺陷、232 处 2 级缺陷、109 处 3 级缺陷、2 处 4 级缺陷。按缺陷类型分类包括结构性缺陷 305 处, 功能性缺陷 55 处, 其中 305 处结构性缺陷类型为变形、错口、异物穿入、腐

蚀、破裂、起伏、渗漏、脱节;55处功能性缺陷类型为沉积、浮渣、结垢。经统计,检测管网总长3 761 m,管段数量共71段;存在缺陷的管网总长约3 284 m,缺陷比例为87.32%;建议修复管段数量68段,建议修复指数达9.4。

基于管网检测资料,决策者还应综合考虑规划、投资、社会、环境、交通等影响因素,合理制定修复方案,在恢复管网原有结构的基础上适当延长其使用寿命,同时应尽量降低修复工程对交通和环境等的负面影响,以提升社会效益并响应智慧城市建设规划。

## 2 基础理论

### 2.1 解释结构模型

排水管网修复工程本质上是一个较为复杂的系统,存在多种相互影响的因素,各因素关系和变化趋势错综不一,难以简单地运用定量方法进行研究。

解释结构模型是十分常见的系统科学方法之一,被广泛应用于解构自然科学和社会科学系统。具体步骤为:建立二元关系和邻接矩阵→计算可达矩阵→划分要素层级并建立递阶结构模型。

### 2.2 层次分析法

复杂系统问题往往包含了多指标、多层次和多目标,难以简单地做出判断和决策。

层次分析法能够将定性与定量相结合,使决策参与者的思维过程和主观判断规范化、数量化,降低各类因素的不确定性,提高复杂系统问题决策的系统性和科学性。具体步骤为:建立层次结构模型→构造判断矩阵→计算一致性指标CI和一致性比例CR(当 $CR < 0.10$ 时,该判断矩阵的一致性检验合格,否则应对判断矩阵进行适当修正)→层次排序和一致性检验(若层次排序 $CR < 0.10$ ,则认为其具备较为满意的一致性,此时得到的结果即为合适的满意解)。

## 3 ISM-AHP 组合模型

### 3.1 影响因素检视

本文经过实际分析、文献研究和专家咨询,按照选取影响因素的基本要求,最终确定影响排水管网修复决策的主要因素为13个。将这13个因素按功能划分为4种类别,分别是政策类、管理类、经济类和技术类<sup>[5-10]</sup>。排水管网修复决策的影响因素和说明见表1。

#### 3.1.1 政策类

标准和规范可为工程各参与单位提供科学依

表1 排水管网修复决策的影响因素和说明

类别	影响因素	因素说明
政策类 A	标准规范 A1	各类技术规程规范和方案导则
	政策干预 A2	政策管制、引导和调控
	城市规划 A3	城市发展、布局和建设的综合部署
管理类 B	工程概算 B1	融资和预算编制等初设情况
	专业人才 B2	管理、技术人员知识和经验水平
	质量控制 B3	对工程质量的综合控制
经济类 C	施工成本 C1	设备、运输、人工和耗材等成本
	其他成本 C2	交通干扰、噪音和扬尘污染等成本
	经济效益 C3	工程成果可转化的经济价值
	其他效益 C4	社会效益和环境效益等非经济价值
技术类 D	施工条件 D1	周边管线、道路交通、资源配置和工期要求等实际条件
	技术工艺 D2	各技术的应用难度和要求
	修复质量 D3	结构强度、过流能力和截污效果等修复情况

据,从而确保工程的可靠性和安全性。如对城镇排水管道非开挖修复更新工程的设计、施工和验收作出规定的《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ 210—2014)等。

政策干预指政府对于此类工程的开展进行引导和监督,如该工程所在城市水务管理局发布的《关于开展城市污水处理提质增效三年行动实施方案》中提到,应系统开展管网改造修复工作,基本解决管网破损、渗漏、错接、淤积等问题,提高污水收集效能,减少污水外渗和外水渗入。

城市规划主要考虑管线的埋深和管径是否符合要求,如排水专项规划对管网有无翻建扩容计划,如无计划则可采用非开挖工艺进行修复。

#### 3.1.2 管理类

工程概算是编制建设项目投资计划,确定和控制建设项目投资的依据。

专业人才指管理和技术人员可建立有效的沟通渠道,促进项目团队的交流和协作,从而提高沟通和协作效率,确保项目按计划顺利进行。

质量控制直接关系工程的安全性和耐久性。如在管道修复环节,设计单位根据检测单位提供的检测报告和视频资料,出具修复方案,施工单位则根据修复方案组织施工,完成后再由检测单位对修复管道进行检测,形成“检测—修复—检测”质量闭环管理。

#### 3.1.3 经济类

施工成本主要考虑开挖路面、管线迁改、基坑支

护、施工范围围挡涉及的人、机、料等工程直接成本。

其他成本主要考虑施工机械占用停泊沿线路面发生的交通调流费用、防止扬尘配备的监测监控、雾化喷淋、车辆冲洗设施的费用。

经济效益指修复过程中可能产生的各项成本,以及竣工后的经济效益。

其他效益指修复过程中产生的各项成本,以及竣工后可能带来的社会效益和环境效益。

### 3.1.4 技术类

施工条件主要考虑现状管道所处位置交通是否繁忙、附近现状管线复杂情况、地质条件情况、管道缺陷及其等级是否具备开挖换管条件等。

技术工艺指不同条件下采用的修复技术,如整体修复常采用的原位固化法、螺旋缠绕内衬法;局部修复常采用的不锈钢快速锁法等。

修复质量主要考虑不同管径对应的内衬管壁厚是否满足外部水土荷载作用下的承载力、刚度、变形;管道整体修复前后内径变化对过流能力的影响等。

## 3.2 解释结构模型建立

本文应用ISM来理清影响排水管网修复决策的各级影响因素,同时为建立组合评价模型提供指标和赋权依据。本项目专家组经过分析和讨论,确定了各因素间的邻接矩阵X,见式(1)。

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

运用Matlab计算得到该解释结构模型的层级划分结果。层级划分结果说明了不同因素在该模型中的层级间位置,层级数越高则其重要程度越高。基于层级划分结果绘制的递阶结构模型见图2。

依据递阶结构模型,本文将各影响因素简要划分为直接影响因素(B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>3</sub>),主要影响因素(A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、D<sub>3</sub>),重要影响因素(A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>)和根本影响因

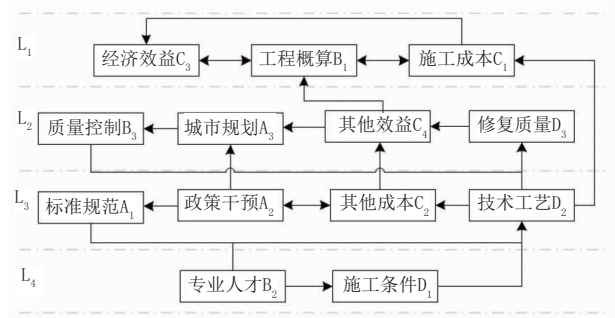


图2 递阶结构模型

素(B<sub>2</sub>、D<sub>1</sub>)这4类,以便探讨各类影响因素对于排水管网修复方案决策的影响情况和原因。

结合模型结果可知,专业人才和施工条件是影响排水管网修复决策的根本因素,它们会直接或间接地影响其他因素,在整个解释结构模型中占据着核心地位;标准规范、政策干预、其他成本和技术工艺作为模型逻辑的链接层,起着纽带作用;城市规划、质量控制、其他效益和修复质量则担任了承上启下的职能,连通并弥补了模型逻辑和框架的联系;工程概算、施工成本和经济效益直接反映了模型的表层影响因素,表明经济考量是影响排水管网修复决策的直接因素。

其中,工程概算和技术工艺是系统中影响路径(即影响其他因素和被其他因素影响的路径)最多的因素,两者的影响路径数量较多,说明工程概算和技术工艺对于整个系统均存在较大的影响范围,是排水管网修复决策必须考虑的因素。工程概算作为直接影响因素,能够直观地显示出排水管网修复工程中各类经济活动的总体预算情况,为决策提供经济参考;技术工艺作为重要影响因素,分别对各类成本和修复质量产生影响,间接影响了系统中的其他层级,反映了技术工艺的选择及应用在排水管网修复决策中的重要程度。

### 3.3 层次分析法应用

应用AHP分析排水管网修复方案决策问题时,需对研究问题作层次化处理,构造层次结构模型。结合案例实际情况和ISM递阶结构模型结果,针对管网的基础信息,本文以修复方案为目标,将前文检视所得的13个影响因素作为指标层,选取原位固化法、螺旋缠绕法和内衬法这3种业内常用方法作为方案层N,所建立的结构模型见图3。

为保障组合评价模型的稳健性和一致性,本文分别采用ISM权重、AHP权重来确定ISM-AHP组合权重,并比较三者对于排水管网修复方案决策的权重计算结果。首先,依据ISM递阶结构模型中的层

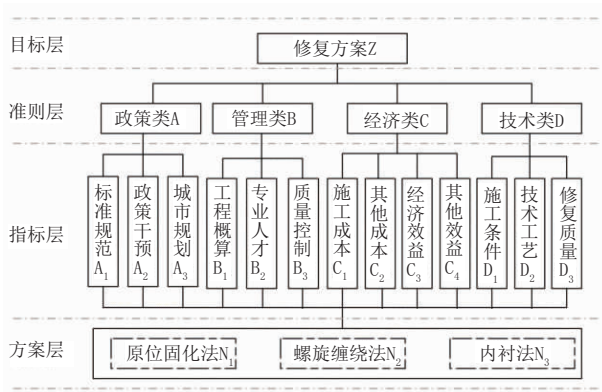


图 3 排水管网修复决策结构模型

级关系,按照层级间相对重要程度,结合专家组意见进行适当修正后,构造了 ISM 判断矩阵  $Y_1$ , 得出了 ISM 权重计算结果;其次,经过专家组打分构造了 AHP 判断矩阵  $Y_2$ , 得出了 AHP 权重计算结果;最后,经专家组建议,以 ISM 权重和 AHP 权重比为 4 : 6 的算术修正得到各方案对于排水管网修复决策的 ISM-AHP 组合权重,如表 2 所示。

表 2 排水管网修复决策的权重 单位:%

层级	因素 / 方法	ISM	AHP	差值	ISM-AHP
指标层	A <sub>1</sub>	11.92	9.60	2.32	10.53
	A <sub>2</sub>	11.92	5.28	6.64	7.94
	A <sub>3</sub>	5.96	2.91	3.05	4.13
	B <sub>1</sub>	3.36	8.84	5.48	6.65
	B <sub>2</sub>	15.39	2.95	12.44	7.93
	B <sub>3</sub>	5.87	8.84	2.97	7.65
	C <sub>1</sub>	3.00	18.30	15.30	12.18
	C <sub>2</sub>	9.48	12.16	2.68	11.09
	C <sub>3</sub>	4.44	4.59	0.15	4.53
	C <sub>4</sub>	4.04	10.43	6.39	7.87
	D <sub>1</sub>	13.29	8.81	4.48	10.60
	D <sub>2</sub>	7.31	1.75	5.56	3.97
D <sub>3</sub>	4.02	5.55	1.53	4.94	
方案层	N <sub>1</sub>	44.95	41.61	3.34	42.95
	N <sub>2</sub>	31.24	33.50	2.26	32.60
	N <sub>3</sub>	23.81	24.89	1.08	24.46

由表 2 可知各指标对目标层的 ISM 权重单排序和 AHP 权重单排序。对比差值发现,两者结果存在一定差异,主要表现为专业人才和施工成本 2 个指标的差值均超过 10%,说明 ISM 评价认为专业人才所占权重应更高,AHP 评价则认为施工成本等经济考量指标所占权重应更高。该现象的产生可能源于专家组构造的判断矩阵存在视角盲区:第一,专家组在 AHP 判断矩阵中对施工成本打分偏高,主要基于

知识水平和实践经验进行打分,可能受施工成本的限制更直观、更硬性;第二,专家组易忽略专业人才等非直观可量化因素。该差异可能源于 2 个指标展现的实际信息不同,施工成本往往更易量化且可视,而专业人才难以被量化和判断,其作用较施工成本更隐形,故专家组打分相对较低<sup>[11-12]</sup>。

各方案层对目标层的权重计算结果表明,ISM 权重和 AHP 权重所得权重相近,方案层排序一致。方案层 N 的优先次序为  $N_1 > N_2 > N_3$ , 即该排水管网修复工程更适用于原位固化法。对比方案层差值可知,各方案在 ISM 方法和 AHP 方法下的差异均较小,可以认为结果具有可靠性和满意性。方案层 N 的 ISM-AHP 权重优先次序为原位固化法 > 螺旋缠绕法 > 内衬法,与单一的 ISM 结果或 AHP 结果的适应性良好,大体上兼顾了 2 种方法的评价权重和次序,同时对于较为悬殊的偏差进行算术修正后,平衡了 2 种方法对个别指标权重结果的差距。

#### 4 工程实践效果

本工程实际修复管道 3 270 m,与前期检测缺陷管道长度 3 284 m 基本对应;修复方法采用原位固化法修复工艺,修复材料厚度为 11 mm。修复后的管道耐腐蚀,可防地下水渗入,整体修复效果好。

排水管道结构性缺陷修复前后的检测图见图 4、5。



图 4 排水管道结构性缺陷修复前检测图

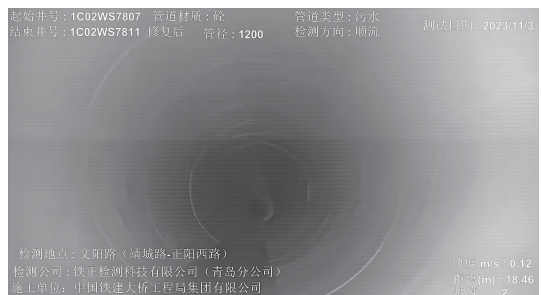


图 5 排水管道结构性缺陷修复后检测图

施工周期总计 6 个月,工作日早晚高峰和节假日施工未进场作业,对城市交通、商业活动影响较低;采用非开挖修复技术修复管道,施工过程中只涉及部分检查井口拆除恢复、井周边回填作业,有效减

少了扬尘、渣土车辆运输等问题,对途经沿线的相关生产、生活环境上仅产生了微量影响,有力保障了城市卫生环境;从投资角度,根据每延米造价测算,采用紫外光固化的原位固化法相较螺旋缠绕法、内衬法节约投资30%。

## 5 结语

(1)解释结构模型结果说明专业人才、施工条件是影响系统决策的关键因素,而工程概算和技术工艺对整个系统的影响辐射范围最广。决策者应更审慎地考虑这4个影响因素,着重注意实际施工条件的限制和专业人才的配备。

(2)ISM方法以递阶结构模型为依据,按照各要素的相对层级位置构造判断矩阵,所得权重更具理论性解释,但缺乏检验基础;而AHP方法以专家组的知识和经验为依据,所得权重更具经验性和实践性,但忽视了部分影响因素的作用。ISM-AHP组合模型能够在一定程度上协调2种方法的优劣,平衡其结果产生的差距。

(3)对某城区排水管网修复工程的实证分析结果表明,该管网适宜采用原位固化法进行修复。各方案的评价结果在不同方法中基本一致,而单指标的ISM权重和AHP权重存在出入,体现为施工成本和专业人才指标差值过高。其中施工成本更容易引导决策者的决策偏向,而专业人才对实际决策的影响

容易“下沉”。实际决策应该提高对专业人才的重视,加强人才支撑体系的建设。

### 参考文献:

- [1] 汪路,张鹏,姚志华,等.UV-CIPP技术在城市排水管网修复中的应用[J].给水排水,2022,58(增刊2):447-453.
- [2] 唐其林.排水管道非开挖修复技术选择研究[J].工程技术研究,2019,4(19):44-46.
- [3] 沈云.排水管道非开挖修复技术的造价分析[J].城市道桥与防洪,2020(1):221-223,27.
- [4] 王远峰.两种非开挖修复工艺的现行标准条款的比较[J].给水排水,2022,58(增刊2):511-517.
- [5] 杨晓慧.城市排水管道修复技术适用性研究及工程应用[D].西安:西安工业大学,2019.
- [6] 周杨军,蒋仕兰,解铭,等.非开挖修复技术在城市排水管道维护中的应用[J].中国给水排水,2020,36(20):58-62.
- [7] 熊露.排水管道非开挖修复技术经济评价指标体系的研究[D].广州:广东工业大学,2015.
- [8] 何东强.浅析城中村道路排水管道的重要性及修复措施[J].江西建材,2022(8):335-336.
- [9] 郁片红,庄敏捷,曹依雯,等.上海市《城镇排水管道非开挖修复技术标准》解读[J].净水技术,2021,40(11):1-5,34.
- [10] 郁片红,孙跃平.排水管道原位固化法修复常见问题与质量控制方法[J].净水技术,2020,39(增刊1):252-255,259.
- [11] 孔晖.分析市政工程排水管道修复施工管理[J].科学中国人,2016(9):35.
- [12] 曾晓岚,崔福义,时文歆,等.人工智能+给排水科学与工程专业复合型人才的行业需求调研[J].中国给水排水,2021,37(24):11-16.

(上接第177页)

- [2] Chagas Patricia,Souza Rai mundo.Solution of Saint Venant's equation to study flood in rivers through numerical methods[J].Hydrology Days,2005:205-210.
- [3] 槐文信,赵明登,童汉毅.河道及近海水流的数值模拟[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 李高青.引汉济渭调水系统水质变化模拟与预测研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [5] 李荣辉.鱼类栖息迁徙习性及其监测技术研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [6] 王强,代振东.不可压缩 Navier-Stokes 方程的流函数-涡度形式流线扩散方法分析[J].西川大学学报(自然学科版),2002,39(2):197-201.
- [7] 耿艳芬,郑鑫,柯兴.基于一维二维耦合模型的衢州城市洪涝演进分

- 析[J].东南大学学报(自然学科版),2019:1005-1010.
- [8] 柯文杰.广州同德围高架桥工程对新市涌雍水影响分析[J].广东水利电力职业技术学院学报,2017(2):4-6.
- [9] 肖君健,罗强,王修贵,罗文兵,张晓春.感潮河网地区城镇化对排涝模数的影响分析[J].农业工程学报,2014(3):247-255.
- [10] 刘心玲.吉林市城区洪水风险图编制研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [11] 潘文俊,柳树票,徐嫣,等.基于多维耦合模型的城区内涝模拟及风险评估[J].陕西水利,2022(10):19-22.
- [12] 张志敏.三坑水库除险加固设计的优化研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.
- [13] 杨晨,张钰涵.平原感潮河网区暴雨潮位的计算及遭遇变化研究[J].甘肃水利水电技术,2021(8):5-9.