

# 基于ISM-MICMAC的钢混组合桥梁质量控制途径分析

侯成文

(中铁十六局集团第三工程有限公司, 安徽 宣城 242200)

**摘要:** 为研究钢混组合桥梁质量控制途径,从桥梁构件、施工、荷载及环境等方面建立质量解释结构模型(interpretive structural modeling, ISM),系统性揭示各因子之间的逻辑关联性,找出影响桥梁质量的表层因子、中层因子和深层因子。结合在役桥梁质量因子驱动力和依赖度情况,运用交叉矩阵相乘法(matrix cross impact multiplication applied to a classification, MICMAC)分析得出在役桥梁质量的自治、依赖和独立等因素,将二者结果验证对比,结果显示:中层因素和深层因素驱动界限不够明显,关键因素与其他因素关联性较弱,驱动力不足,二者均能从各自维度独立地对在役桥梁质量构成一定的影响,因此,在役桥梁质量控制,需将深层因素和中层因素同时作为关键因素采取质量防治措施,以提高桥梁服役使用的耐久性、安全性。

**关键词:** 钢混桥梁;ISM;MICMAC;质量控制

中图分类号: U445.551; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0126-05

## Analysis of Quality Control Approaches for Steel Concrete-Composite Bridges Based on ISM-MICMAC

HOU Chengwen

(China Railway 16th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Xuancheng 242200, China)

**Abstract:** To study the quality control approaches for steel-concrete composite bridges, an interpretive structural modeling (ISM) of quality is established from the aspects of bridge components, construction, loads and environment to systematically reveal the logical correlation among various factors and to identify the surface, middle and deep factors affecting bridge quality. Combined with the driving force and dependency of the quality factors of in-service bridges, the cross-impact matrix multiplication applied to classification (MICMAC) is used to analyze the autonomous, dependency and independent factors of in-service bridge quality. And the results of the both are validated and compared. The results show that the driving boundary between middle-level and deep-level factors is not clear enough, and the correlation between key factors and other factors is weak, resulting in insufficient driving force. Both factors can independently affect the quality of in-service bridges from each respective dimension. Therefore, for the quality control of in-service bridges, it is necessary to take quality prevention and control measures for both deep-level and middle-level factors as key factors to improve the durability and safety of bridge service.

**Keywords:** steel-concrete bridges; ISM; MICMAC; quality control

### 0 引言

桥梁是交通工程重要组成部分,关系着日常出行、物资运输,连接着城市与地区,推动着经济发展和区域互动,因此,桥梁质量控制和安全维护意义重大<sup>[1-2]</sup>。针对桥梁质量研究,杨小彪<sup>[3]</sup>从桥梁耐久性视角出发,分析了影响质量关键因素,宏观上给出了质量控制和防治策略;崔凌秋等<sup>[4]</sup>将质量控制焦点落在桥梁伸缩缝上,通过合理的施工方案、采用先进

的技术设备和严控施工要点,达到延长桥梁的使用寿命的目的;谢助兵等<sup>[5]</sup>指出桥梁质量隐患来源于材料腐蚀、疲劳损伤和环境侵蚀,质量控制需要采用先进的材料和技术手段,并建立科学有效的质量监控方法;Rob E. Melchers等<sup>[6]</sup>分析了影响桥梁耐久性的原理,指出氯化物是影响桥梁耐久性重要因素;张宏伟<sup>[7]</sup>基于网络分析法分析了桥梁质量各影响因素间相互依存关系和指标重要度,并认为管理人员水平、技术人员专业水准、地质条件是施工阶段质量主要影响因素;张威威<sup>[8]</sup>指出桥梁施工质量控制主要关注点在人员、材料、设备及进度等维度,并从前期

收稿日期: 2025-02-06

作者简介: 侯成文(1994—),男,本科,工程师,主要从事桥梁施工与质量安全管理。

准备、施工及验收三个阶段给出桥梁质量管理措施。

综上,现有研究成果一定程度上促进了桥梁质量管理的进步,但宏观来看,大多数质量管理研究视角零散,忽略了质量因子之间的关联性和驱动性,未能从系统性视角探索出质量控制途径。因此,本研究从桥梁构件、施工、荷载及环境等方面建立质量解释结构模型,系统性揭示各因子之间的逻辑关联性,找出影响桥梁质量的表层因子、中层因子和深层因子,并运用交叉矩阵相乘法分析桥梁质量因子驱动力和依赖度,通过验证对比,进一步寻求质量控制途径。

1 指标体系

通过文献梳理、专家咨询及已有研究基础上,甄别筛选了桥梁质量影响因素,最终汇总为桥梁构件性能、施工阶段质量控制、运维期承受荷载及使用环境 4 个类别维度,指标具体分类及说明见表 1。

2 研究方法

2.1 方法概述

ISM 方法,即解释结构模型,依据研究对象指标相互关联性,分析系统构成要素间本质因果关系,并按照深层、中层、表层逻辑关系构造递阶模型<sup>[9-10]</sup>。系统层级确定主要通过可达矩阵中可达集合和先行集合的交集进行抽取,然后根据系统特征进一步归类划分,以便于逻辑关系表示<sup>[11]</sup>。

MICMAC 方法,即交叉影响矩阵相乘法,主要用于分析指标之间驱动力、依赖性,通过运用矩阵相乘原理,对不同影响因素通过坐标区域分类,以可达路径和层次循环来分析因素间的影响度<sup>[12-13]</sup>。

将 ISM 方法和 MICMAC 方法结合使用,可有效降低专家判断的分歧和极个别专家的偏见,削弱人为主观性,增强模型可信度。

2.2 方法应用流程

首先运用 ISM 法分析各项指标之间关联性和影响性,确定指标层级关系,再运用 MICMAC 法确定各指标依赖性和驱动力。最后将二者结合分析验证,可有效降低专家判断的分歧和极个别专家的偏见,削弱人为主观性,增强模型可信度,具体运用流程如图 1 所示。

3 ISM-MICMAC 质量分析模型

3.1 指标逻辑关系

组建课题组,邀请桥梁专家分析各质量因素之间相互影响性、关联性,以 0 或 1 记录指标因果关系。将  $S_i$  与  $S_j$  作关联性对比,影响一方记作 1,被影响一

表 1 桥梁质量影响因素

| 控制要素 | 编号       | 影响因子      | 因子内涵说明                                                       |
|------|----------|-----------|--------------------------------------------------------------|
| 构件因素 | $S_1$    | 混凝土性能     | 桥梁在不同气候、环境服役中,混凝土结构强度等硬性指标会随时间变化,需要不定期检测其能否达到安全使用要求。         |
|      | $S_2$    | 钢筋性能      | 桥梁中的钢筋等级类型应符合设计规范要求,并做好服役过程中的监测、养护,避免腐蚀、损伤,进而影响承载力、拉力和安全耐久性。 |
|      | $S_3$    | 钢筋与混凝土粘结力 | 该指标质量控制不到位会导致锈蚀,降低钢筋截面和损坏保护层,影响桥梁的结构整体性和使用性                  |
| 施工因素 | $S_4$    | 水泥质量      | 施工过程对水泥质量把控不到位,部分水泥可能水化,结合能力降低,达不到使用要求,影响后期桥梁服役强度            |
|      | $S_5$    | 水质量       | 施工过程水质不达标,水中含有酸、碱、油等杂质可能过多,影响水泥功能属性                          |
|      | $S_6$    | 集料质量      | 粗、细集料级配关系到混凝土综合性能                                            |
|      | $S_7$    | 外加剂质量     | 外加剂是影响混凝土性能一项重要指标                                            |
| 荷载因素 | $S_8$    | 车辆超载      | 车辆超载会导致桥梁结构承受超出标准规定的裂缝和变形,产生不可逆的裂缝和桥梁结构质量损害                  |
|      | $S_9$    | 承重疲劳      | 随着超重和超限车辆通过数量上升,引起桥梁重要部件疲劳损伤,长期会对桥梁的承载力以及整体造成质量破坏            |
| 环境因素 | $S_{10}$ | 氯离子侵蚀     | 氯离子易破坏钢筋表面钝化膜和 pH 环境,影响钢筋耐久性                                 |
|      | $S_{11}$ | 混凝土碳化     | 桥梁服役过程中混凝土结构常处于干湿交替复杂环境,且长期缺乏养护易受外界侵蚀,进而导致微观结构受损,整体强度降低      |
|      | $S_{12}$ | 钢筋锈蚀      | 混凝土碳化和氯离子浓度超标时,易引起钢筋表面局部点蚀或坑蚀,破坏钢筋和影响构件之间粘结性能                |

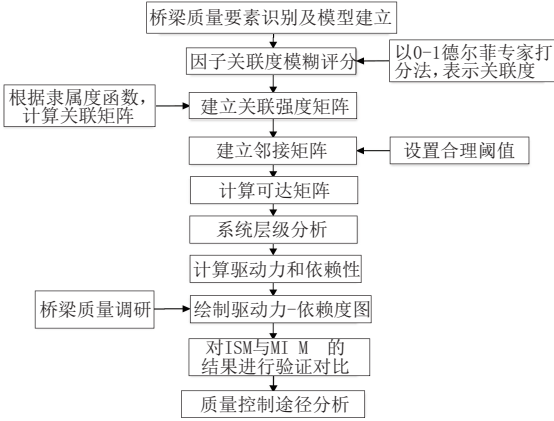


图 1 ISM 法和 MICMAC 法结合应用流程图

方记作 0,若二者之间互相关联影响,影响较大一方记作 1。将系统内 12 项指标进行逻辑关系对比,结果见表 2。

表2 指标关联结果

|          | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ | $S_6$ | $S_7$ | $S_8$ | $S_9$ | $S_{10}$ | $S_{11}$ | $S_{12}$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| $S_1$    | —     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        |
| $S_2$    | 0     | —     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        |
| $S_3$    | 0     | 0     | —     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        |
| $S_4$    | 1     | 1     | 1     | —     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 1        |
| $S_5$    | 1     | 1     | 1     | 0     | —     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 1        |
| $S_6$    | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | —     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 1        |
| $S_7$    | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | —     | 0     | 0     | 0        | 0        | 1        |
| $S_8$    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | —     | 1     | 0        | 0        | 0        |
| $S_9$    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | —     | 0        | 0        | 0        |
| $S_{10}$ | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | —        | 1        | 1        |
| $S_{11}$ | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | —        | 1        |
| $S_{12}$ | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | —        |

3.2 构建邻接矩阵

根据桥梁质量影响因子之间的关联性和影响性结果,构建形成质量因子邻接矩阵 $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3 求解可达矩阵

根据桥梁质量因子邻接矩阵 $A$ ,运用软件编程计算可达矩阵 $M$ 。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 划分影响因子层级

桥梁质量解释结构模型中,顶层、中层、底层分别对应系统目标、致使因素、最直接原因或深层要素,层级的划分充分体现了各因子之间的层级关系和关联度。根据可达矩阵中的因素分布特征,对层

级进行划分抽取,抽取结果如下。

$$\Pi(S) = [P_1, P_2, P_3, P_9; P_8; P_{12}; P_4, P_5, P_6, P_7, P_{11}; P_{10}]$$

通过层级计算,可初步细分为5层,为了便于分析及逻辑关系考虑,将层级关系归集为表层因素、中层因素和深层因素。表层因素包括 $S_1$ 混凝土性能、 $S_2$ 钢筋性能、 $S_3$ 钢筋与混凝土黏结力;中层因素包括 $S_8$ 车辆超载、 $S_9$ 承重疲劳、 $S_{12}$ 钢筋锈蚀、 $S_{11}$ 混凝土碳化;深层因素包括 $S_{10}$ 氯离子侵蚀、 $S_4$ 水泥质量、 $S_5$ 水质量、 $S_6$ 集料质量、 $S_7$ 外加剂质量。

3.5 建立ISM模型

根据层级划分与质量考核因子之间关联度构造绘制桥梁ISM质量模型,系统模型按照深层因子、中层因子、表层因子、目标层进行层级划分,逻辑关系如图2所示。

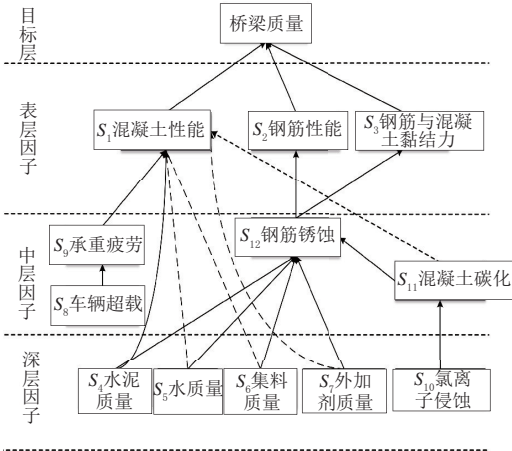


图2 桥梁质量影响因素解释结构模型

3.6 绘制因素驱动力—依赖度图

为了从另一个维度验证系统中各质量因子之间的逻辑关系与影响力,对安徽省合肥市已建成满5年的2座钢混组合桥梁进行质量问题调研,从桥梁

构件、施工、荷载及环境等指标切入,向 2 座桥梁设计方、施工方、运维管理方进行质量问题征求,通过与质量相关人员咨询、交流,分析质量各控制因子之间的因果关系、驱动力和依赖度。

驱动性和依赖度表示方式与解释结构模型思路类似,若一方对另一方有驱动性,则取值为 1,反之为依赖性,记作 0。根据调研结果及桥梁现场勘测分析,得出质量影响要素之间的驱动关系,形成矩阵  $A'$ 。

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

从矩阵  $A'$  横向和纵向统计“1”的数量,并以横坐标为依赖度,纵坐标为驱动力绘制坐标区域图,具体见表 3、图 3(实心六角代表驱动力和依赖度相同)。

表 3 质量因素驱动力-依赖度统计图

| 因子    | 驱动力 | 依赖度 | 因子       | 驱动力 | 依赖度 |
|-------|-----|-----|----------|-----|-----|
| $S_1$ | 4   | 8   | $S_7$    | 4   | 0   |
| $S_2$ | 1   | 10  | $S_8$    | 3   | 0   |
| $S_3$ | 1   | 8   | $S_9$    | 2   | 3   |
| $S_4$ | 4   | 1   | $S_{10}$ | 5   | 0   |
| $S_5$ | 4   | 0   | $S_{11}$ | 4   | 1   |
| $S_6$ | 4   | 0   | $S_{12}$ | 2   | 6   |

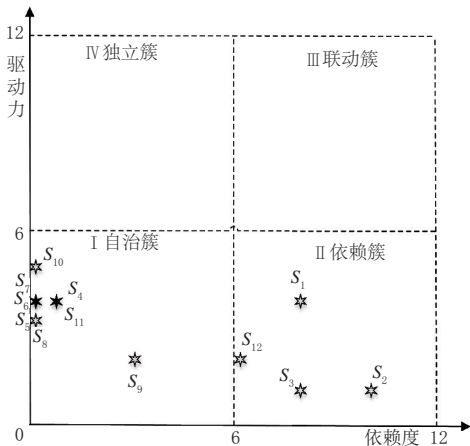


图 3 质量因素驱动力-依赖度图

图 3 中,自治簇指标两项性能均较弱,说明与其他指标关联性不大, $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $S_9$ 、 $S_{10}$ 、 $S_{11}$  等指标均落在该象限内。依赖簇指标依赖性较强、驱动力

很弱,容易受到其他因素制约,该象限包括指标  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_{12}$ 。联动簇指标相对稳定,互不冲突,该指标不存在,符合系统特征要求。独立簇指标数量为零,说明驱动力很强的质量影响因素不存在,即系统中对桥梁质量各类指标因素有普遍关联的关键因素并不明显<sup>[14]</sup>。

4 质量因素验证分析

ISM 模型与 MICMAC 驱动力-依赖度图,理想的对比结果应是深层因素分布在第四象限独立簇,中层因素分布在第一象限自治簇,表层因素分布在第二象限依赖簇。但从对比结果来看,表层因素基本散落在第二象限依赖簇,符合理想状态,深层因素和 中层因素却散落到了第一象限自治簇,说明中层因素和深层因素驱动界限不够明显,关键因素与其他因素关联性不强,驱动力不足,一定程度说明了二者均能从各自维度独立地对桥梁质量构成一定的影响。因此,在桥梁质量控制时,需将深层因素和中层因素同时作为关键因素采取质量保障措施,以提高桥梁服役使用的耐久性、安全性。水泥质量、水质 量、集料质量、外加剂质量等因素(主要在桥梁施工 环节涉及),车辆超载、承重疲劳及混凝土碳化等因 素(主要在桥梁运维环节涉及),它们在整个系统中 受其他因素制约和驱动其他因素的能力相对较小, 具有一定独立性,但两个维度指标影响性分别向役 桥梁质量表层因素层层传递,最终聚集在目标层,形 成质量系统管控骨架。

质量因素在整个质量管理系统中相互关联、相 互影响,不同层级因子经过递阶传递产生倍效效应, 驱动力可作为因素的倍效基<sup>[15-16]</sup>。为了系统性寻求 桥梁质量控制途径,结合研究结果,桥梁质量管理首 先应明确钢混组合桥梁质量管理因素之间的关联性和 驱动性,优化“头痛医头,脚痛医脚”的零碎式质量 管理模式,树立系统性的整体观念和认识到各因素 之间的内在关联,从施工源头和运维维护两个维度 分别做好关键要素的全过程、多维度质量管控,确保 符合设计规范和使 用要求。

5 结 语

基于钢混组合桥梁质量控制目标,从桥梁构件 性能、施工质量控制、运维期承受荷载及使用环境 4 个维度构建质量指标体系,根据质量因子之间逻辑 关系,建立 ISM 模型,实现层级阶梯性划分,确定 影响桥梁质量的不同深度影响指标。同时,结合多

个桥梁质量状况,调研分析质量控制关键点和因素间的驱动力,运用交叉矩阵相乘法对解释结构模型的研究成果进行对比分析,以验证二者之间差异性与一致性。通过影响因素之间关联度和驱动性对比研究,发现中层因素和深层因素驱动界限不够明显,关键因素与其他因素关联性较弱,驱动力不足,但二者指标影响性分别向桥梁质量表层因素层层传递,最终聚集在目标层,形成质量系统管控骨架。因此,桥梁质量控制,需将深层因素和中层因素同时作为关键因素采取质量防治措施,以提高桥梁服役使用的耐久性、安全性。

#### 参考文献:

- [1] 郑妍,李鸿钊,秦祖品,等.在役桥梁质量主控因素与损伤识别研究[J].工程质量,2024,42(增刊1):66-69.
- [2] 蔡文军.道桥工程施工的现场管理及其重要性[J].城市建设理论研究(电子版),2018(11):138.
- [3] 杨小彪.市政道路桥梁安全与耐久性分析[J].江西材,2022(9):165-166;170.
- [4] 崔凌秋,熊延华,张丽娟,等.影响桥梁伸缩缝耐久性的关键因素分析及技术对策[J].科技创新与应用,2023,13(15):152-155.
- [5] 谢助兵,李治国.桥梁设计的耐久性提升与质量监控方法[J].产品可靠性报告,2024(9):115-116.
- [6] Melchers R E, Chaves I A. Durability of reinforced concrete bridges in marine environments[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 169-180.
- [7] 张宏伟.基于ANP的桥梁施工质量影响因素分析[J].交通世界,2019(28):124-126.
- [8] 张威威.桥梁工程施工质量的影响因素及控制措施[J].交通世界,2018(20):104-105.
- [9] 陈森发.复杂系统建模理论与方法[M].东南大学出版社,2005:131-140.
- [10] 王喜红,张雷,邓建芳,等.基于改进ISM-MICMAC的装配式建筑工程质量控制研究[J].项目管理技术,2022,20(4):46-51.
- [11] 汪潇毅,梁传杰,高慧.基于ISM-MICMAC的重大工程社会责任风险影响因素研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2022,44(5):784-790;829.
- [12] 江小燕,闫碧琼,于竞宇,等.基于ISM-fuzzy MICMAC方法的PPP项目关键风险层级关系识别[J].土木工程与管理学报,2018,35(6):70-77.
- [13] 程灏,毛雪,李际明.基于ISM-MICMAC装配式建筑供应链弹性促进因素研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2024,40(6):738-745.
- [14] 蔡洁,杨田田,杨易,等.基于ISM-MICMAC的杭州市装配式建筑发展制约因素研究[J].湖北工业大学学报,2024,39(3):46-51;75.
- [15] 陆彦,夏楠.基于倍效理论的住宅工程质量问题倍效因素分析[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(5):928-931.
- [16] 赵维树.建筑工程质量影响因素的结构及倍效关系研究[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2014,22(2):116-121.