

3.6 压水试验

压水试验：用高压方式把水压入钻孔，根据岩体吸水量计算了解岩体裂隙发育情况和透水性的一种原位试验。压水试验是用专门的止水设备把一定长度的钻孔试验段隔离出来，然后用固定的水头向这一段钻孔压水，水通过孔壁周围的裂隙向岩体内渗透，最终渗透的水量会趋于一个稳定值。根据压水水头、试段长度和稳定渗入水量，可以判定岩体透水性的强弱。通常以透水率 q 表示，单位为吕荣 (Lu)。

本次压水试验主要在 XLDXZK1 钻孔的探灌段进行，原则上按每 30 ~ 50m 做一段压水试验 (按照 50m 一段计列工作量)，富水洞段适当加密，小计 500m/10 段。

探查项目及主要工程量见表 1。

表 1 XLDXZK1-1 钻孔探查工作量统计表

方法	物性参数	单位	工作量	备注	
钻孔总长	\	m	1757	造孔总长，其中探灌段长 500m	
定向取芯	\	次	5	探灌段取芯，平均每 100m 取芯一次，每次不少于 2m	
钻时录井	\	点	1757	每钻进 1m 记录 1 个点	
钻井液录井	\	m	1757	钻井液录井全孔做，岩屑录井每 2m 做 1 次	
岩屑录井	\	次	879		
随钻测井	核测井	自然伽玛 (GR)	m	500	探灌段
	热测井	井温 (TEM)	m	500	
	电阻率测井	\	m	500	
综合测井 (裸孔)	声测井	声波速度 (CV)	m	100	探灌段前部 50~100m 孔段成孔灌浆前，按照 100m 计列，可动态调整
	工程测井	井径	m	100	
综合测井 (成孔灌浆后)	声测井	声波速度 (CV)	m	500	探灌段
	核测井	自然伽玛 (GR)	m	500	
	热测井	井温 (TEM)	m	500	
	工程测井	井径	m	500	
	电阻率测试	\	m	500	
钻孔电视	钻孔摄像	m	200	在垂直段适宜部位做 (可以洗孔)	
压水试验	\	段	10	探灌段，50m 一段计列，试验总长不少于 500m	

注：综合测井达到计划工作量的 85% 即满足要求。

4 探查内容的地质解释

4.1 岩性的划分及其厚度确定

通过钻孔定向取芯、钻孔录井、综合测井及孔内试验，结合最新地质资料对洞身段地层岩性进行确定；利用钻进参数、综合测井等成果推断岩体的完整性程度，特别是凝灰岩、软弱夹层、断层破碎带等的分布情况^[5]。

(1) 凝灰岩、软弱夹层及破碎带的确定：在岩层定性、定厚解译的基础上，声波速度曲线跳变参差及低

幅值层段判释为软弱夹层或破碎带 (层)。

(2) 岩体完整性判定：岩体完整性系数 K_v 是指岩体中弹性波纵波传播速度与岩块中弹性波纵波传播速度之比的平方，公式如下：

$$K_v = \left(\frac{V_{ml}}{V_{cl}} \right)^2$$

式中： K_v 为岩体完整性系数； V_{ml} 为现场声波测试的岩体纵波速度，即 V_p , m/s； V_{cl} 为岩块纵波速度，m/s，在实际应用中，可将钻孔各段岩层的最大纵波速度作为岩块纵波速度，取未风化岩体最大纵波速度作为岩块纵波速度。

4.2 强富 (透) 水层的判定

破碎岩带、裂隙密集带、岩溶地层或蚀变岩带岩体破碎且往往富水，设计单位在上述地质解释的基础上，再叠加水文地质观测与压水试验成果，可以进一步判定强富水洞段的分布情况^[6]。

4.3 特殊不良地质分布洞段的判定

在上述地质解释的基础上，综合判断各种特殊不良地质 (断层破碎带、凝灰岩、软岩集中段以及可能发生涌突的洞段等) 的集中分布洞段^[7]。

4.4 地面预灌浆洞段的判定

在上述探查内容地质解释基础上，综合判断各种特殊不良地质洞段分布位置，并提出进行地面预灌浆洞段的范围。

5 结语

根据香炉山隧洞已开挖洞段揭示地质条件与风险特点，结合新增勘察成果，对香炉山隧洞后续 TBM 未掘洞段地质问题与风险进行了分析；在前期常规勘察的基础上，针对不良地质或 V 类围岩集中分布洞段提出地面向钻“钻探灌一体”方案，尽量查明地质条件，同时对探查到的不良地质在地面采用定向钻超前灌浆处理^[8]。

本次选取 XLDXZK1 地面向钻勘探为例，计划采取定向取芯、钻孔录井、综合测井、钻孔电视、压水试验等手段，实现岩性及其厚度划分、岩体透水率与完整性的判定、软弱破碎围岩判断以及岩体部分力学指标的判定^[9]。

鉴于香炉山隧洞 TBM 后续掘进段地面钻探灌一体工程的复杂性和艰巨性，地面预灌浆方案实施过程中还需根据钻孔、探查情况以及隧洞各工作面的进展，动态

基于 Pearson 相关系数的监测数据修复研究

张雪凝*

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266525)

摘要: 桥梁健康监测采集的数据是评估结构状态、延长桥梁运营时间的关键。健康监测传感器由于长期暴露在恶劣环境中, 经常面临传感器故障或供电设备故障等现象, 从而导致监测数据缺失, 为解决监测数据中因数据缺失导致桥梁运行状态难以准确把握及决策出错的问题, 本文采用灰色关联度分析方法对采集到的监测数据进行有效性验证并结合 Pearson 相关系数进行修复, 通过实桥数据来验证缺失数据修复的结果。工程实例表明, 基于灰色关联度理论能确定数据的有效性, 通过 Pearson 相关系数能有效地修复缺失数据, 与三次样条插值相比, 还原精度更高, 更能够充分地利用采集到的健康监测数据。

关键词: 桥梁结构; 监测数据; 灰色关联度; 皮尔逊相关系数; 数据修复

中图分类号: U446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 21—0144—03

桥梁是交通系统中必要的组成部分, 方便人们出行的同时也带来了巨大的经济效益^[1]。桥梁健康监测利用传感、通讯技术实时采集反映结构运营状况是对结构进行服役评估和提供决策依据的重要手段^[2]。在长期的监测过程中, 由于受设备故障和传输问题等多种因素影响, 数据缺失在所难免^[3]。在桥梁健康监测数据异常类型的评估中, 缺失值被归为六类主要异常数据的类型之一^[4]。Yi^[5]等说明准确的传感器数据对于有效评估监测结构的健康状况的重要性。以上都说明数据修复对桥梁决策的重要性。

结合国内外研究发现, 对于监测数据可信性的验证还较为缺乏; 以及修复数据时相关的数据利用性不足。针对以上问题, 本文采取灰色关联度验证监测数据的可信度, 以结构温度和环境温度与应变数据的 Pearson 相关系数对缺失数据进行修复, 以一座连续梁桥验证了此方法。

1 工程实例

位于厦门的某 10 跨 (10×42) m 连续箱梁桥, 上部结构为预应力混凝土连续箱梁。已知在墩顶主梁纵向

调整钻孔灌浆工艺与参数及施工范围, 以进一步提高处理效果^[10]。通过地面预灌浆处理后, 在洞内施工过程中, 加强超前地质预报, 视情况对局部洞段进行洞内超前灌浆补强。

参考文献:

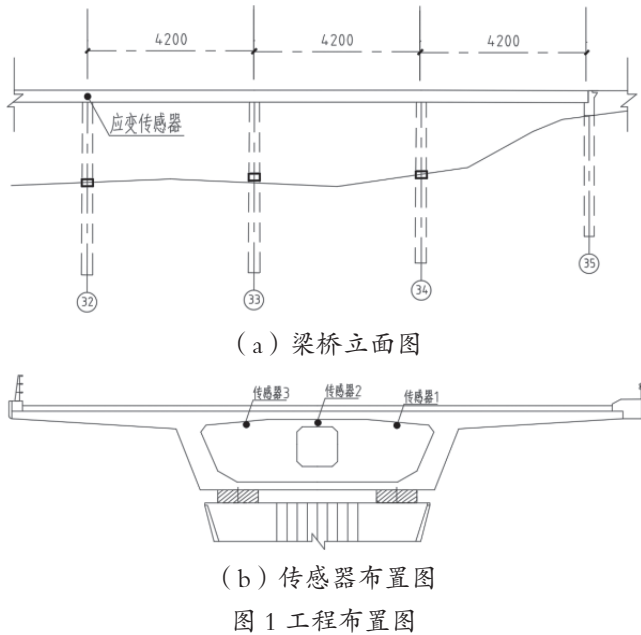
- [1] 贾国臣, 刘康和. 深埋长隧洞勘察技术与思考 [J]. 工程勘察, 2006, (S1): 70-74.
- [2] 司富安, 贾国臣, 高玉生. 深埋长隧洞工程地质问题与勘察 [C]// 大坝安全与新技术应用. 水利部水利水电规划设计总局; 中水北方勘测设计研究有限公司, 2013: 138-146.
- [3] 陈长生, 李银泉, 史存鹏, 等. 复杂岩溶区深埋长隧洞选线研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(11): 91-98.
- [4] 宋巍, 贾国臣. 深埋长隧洞主要工程地质问题与勘察 [C]// 中国地质学会. 第七届全国工程地质大会论文集. 水利部天津勘测设计研究院; 水利部天津勘测设计研究院, 2004: 230-234.
- [5] 傅冰骏. 国际隧道及地下工程发展动向 [J]. 探矿工

程, 2002, (05): 54-57.

- [6] 司富安, 贾国臣, 高玉生. 水利水电工程深埋长隧洞勘察技术方法 [J]. 中国水利, 2010, (20): 69-71+58.
- [7] 杜兴武. 综合勘察技术在复杂岩溶地区勘察中的应用——以九龙岭隧洞为例 [J]. 湖南水利水电, 2024, (01): 75-78.
- [8] 王家祥, 陈长生, 史存鹏, 等. 西南某大型引水工程关键地质问题初步研究 [J]. 人民长江, 2015, 46(14): 16-18+44.
- [9] 张小宝, 司富安, 段世委, 等. 深埋水工长隧洞主要工程地质问题与勘察经验 [J]. 水利规划与设计, 2021, (12): 55-60.
- [10] 王家祥, 周云, 李银泉, 等. 滇中引水工程香炉山深埋长隧洞高地应力与硬岩岩爆分析研究 [J]. 水利规划与设计, 2019, (12): 135-139.

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202002AF080003); 国家大坝安全工程技术研究中心研发计划 (CX2020Z29); 国家大坝安全工程技术研究中心研发计划 (CX2020Z30)。

安装结构应变和结构温度传感器，应变传感器为振弦式应变传感器，应变传感器共 3 个安装于箱梁内部顶板的中部和左右靠近腋角中心两侧。传感器 1 位于顶板右侧，传感器 2 位于顶板中部，传感器 3 位于顶板左侧；结构温度传感器与应变传感器布置于同一位置，传感器布置见图 1。



2 基于灰色关联度的数据有效性分析

选取 31 个应变数据为样本数据。样本数据是为进行桥梁健康监测所进行分析的第一批数据集。分别选取周期为 31d (2023-03-01~2023-03-31) 的温度数据与应变数据进行分析，工程实例中选取三个应变温度传感器，三个传感器选自于同一截面，选取 31 个数据为样本数据。参考序列和比较序列在各点的关联程度计算公式如式 (1)，其中， ρ 为分辨系数， ρ 通常取 0.5。各时刻的关联系数求其平均值，关联度可由式 (2) 算出数据的灰色关联度结果见表 1。

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta(\max)} \quad (1)$$

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{0i}(k) \quad (2)$$

表 1 样本应变灰色关联度

关联度	应变 1-1	应变 1-2	应变 1-3
应变 1-1	/	0.6621	0.6744
应变 2-1	0.6621	/	0.6642
应变 3-1	0.6744	0.6642	/

由表 1 中的数据可以得出，样本灰色关联度是可逆的，也就是说彼此作为参考序列时，其相关性相同。以整月的应变 1-1 数据作为参考序列，则整月应变 1-2 与整月应变 1-3 作为对比序列，关联度结果见表 2。

表 2 整月应变灰色关联度

关联度	应变 1-1	应变 1-2	应变 1-3
应变 1-1	/	0.6923	0.7367

根据灰色关联度的特性，两个数据序列之间的关联度，可以用样本关联度衡量整体关联度，由表 1 和表 2 的数据进行对比，可以看出关联度的值均满足阈值公式 $\theta = r_{0i} - 2\sqrt{\sigma_{0i}^2}$ ，即数据是可信的。

3 相关性数据修复

3.1 Pearson 相关性分析

对实测的温度数据与相应的应变数据进行时序的关联性分析，绘制应变与温度相关散点图能更好地展示数据间的线性关系，相关散点图见图 2。Pearson 相关系数计算由式可以得出。数据修复公式见式。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

预测值 y ：

$$y = \beta_0 + \beta_1 \omega_1 X_1 + \dots + \beta_n \omega_n X_n \quad (4)$$

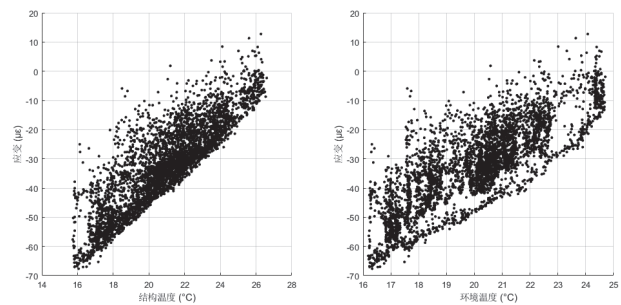


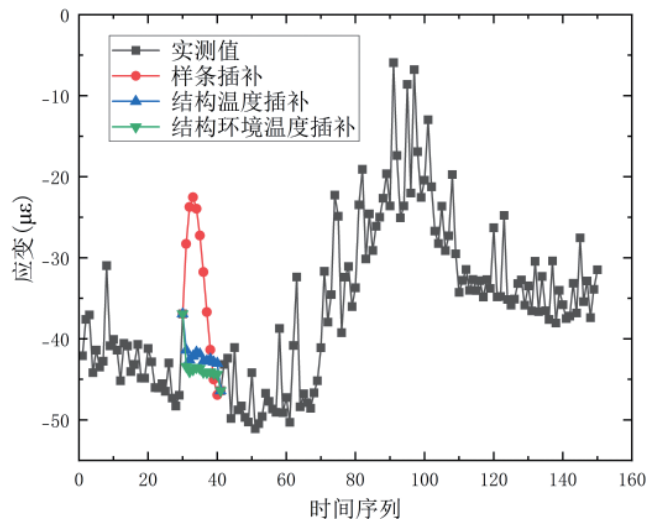
图 2 应变与温度相关性散点图

由图 2 可知，应变与结构、环境温度均展示出较好的线性相关性，通过 Pearson 相关系数计算可得，应变与结构温度的相关系数为 0.8621；应变与环境温度的相关系数为 0.8134。

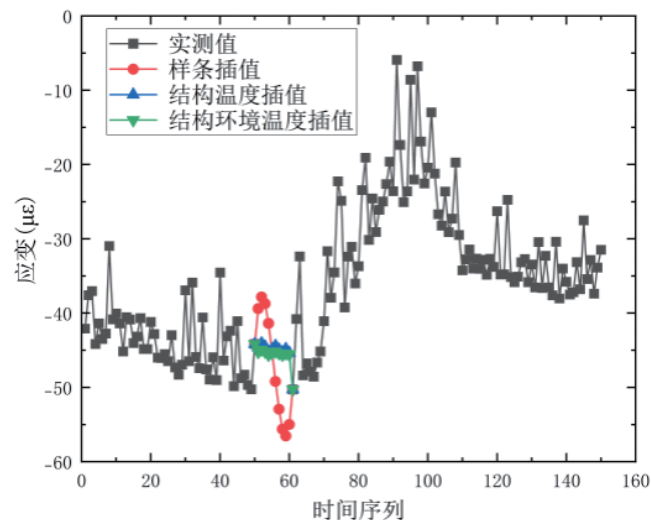
3.2 Pearson 相关系数修复数据

为验证 Pearson 相关系数修复桥梁健康监测数据的准确性，选取两段不同时间段内相同数量的连续数据进

行修复。通过结合应变与两种不同温度的相关性来进行数据的修复。选取三次样条插值法和结构温度插值（相关系数最高）作为对比来评价数据修复的结果。设置缺失数据为 10 个，基于不同的修复方式进行修复，修复对比情况见图三。



(a) 5:06-6:36 修复对比



(b) 6:46-7:06 修复对比

图 3 不同时段修复对比图

表 3 不同时段修复对比表

时间段	样条插值		结构温度插值		结构与环境温度插值	
	相关性	均方根差	相关性	均方根差	相关性	均方根差
5:06-6:36	0.9029	3.9546	0.9832	1.4235	0.9855	1.3230
6:46-7:06	0.9710	2.4013	0.9846	1.2069	0.9868	1.0985

由图 3 可知，在不同的缺失段内，采用结构与环境温度插值修复情况均优于其他结果，同时考虑两种不同温度相关性的修复结果分布更为平均，能更好地反映桥梁健康监测系统的正常运行状态。由表 3 可知，基于

结构与环境温度因素修复的数据在相关性系数均可达到 0.97 以上，同时均方根差结果也优于另外两种方式，同时能更大限度地利用桥梁健康监测中的数据，为后续桥梁的运营状态把握和安全维护得到更好的结论。

4 结论

本文以厦门市某混凝土连续梁桥健康监测系統为依托，对桥梁健康监测数据进行数据处理与分析，得到以下结论：

(1) 通过灰色关联度理论的可信性分析可知，同截面 3 组应变数据的关联度（以传感器 1 为参考序列）0.6923 和 0.7367，均通过阈值验证，证明数据是可信的。

(2) 经过实桥数据验证考虑应变数据与两种温度相关性的修复效果更优，数据修复的质量受数据缺失量的影响较小。通过 Pearson 相关系数修复数据的方法对桥梁健康监测系统中的缺失值进行修复，有助于更好地把握桥梁运行状况和后续桥梁运行安全预警。

参考文献：

- [1] 王亚飞, 杨钧羽, 钟继卫, 等. 桥梁结构状态评估方法研究现状与展望 [J]. 公路工程, 2024, 49(01): 45-52.
- [2] 黄永, 鲍跃全, 李惠. 结构状态识别与评估的机器学习方法研究进展 [J]. 力学进展, 2023, 53(04): 774-792.
- [3] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2020 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021, 43(S1): 129-134.
- [4] 刘阳, 桑永春, 刘晓, 等. 结构健康监测异常数据修复应用研究 [J]. 物联网技术, 2018, 8(09): 48-50.
- [5] BAO Y Q, TANG Z Y, LI H, et al. Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring [J]. Structural Health Monitoring—an International Journal, 2019, 18(02): 401-421.
- [6] YI T-H, HUANG H-B, LI H-N. Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review [J]. Measurement, 2017, 109: 200-214.
- [7] 罗小江. 桥梁健康监测的大数据关联分析与机理性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.