

[输电管廊]

基于多维实测数据的管廊结构状态反演模型的建立

文/苏澜¹ 钟成² 吴跃斌² 陈艺征³

1. 北京智芯微电子科技有限公司; 2. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司; 3. 国网智能电网研究院有限公司

输电管廊作为“地下生命线”，亟需稳定可靠的监测数据实现管廊接口健康状态风险的预警。现有模型一般是针对一维或二维受力下弹性、连续和匀质的长线型结构已有较好的分析效果，然而实际输电管廊结构常设有接缝，不具有线弹性结构，而且在平原、山地和沿海等不同地域的管廊结构也存在差异。结合实际工程应用，有针对性、理论性和系统性地研究了影响管廊结构的有限值数理分析方法，提出了一种基于物理驱动的神经网络算法，实现管廊结构多维参量融合的反演评估模型设计，克服管廊结构在实际工况下所受荷载的不确定性、材料性能非线性等影响，实现结构损伤、地质灾害和外部破坏等风险事件的识别和研判。

随着我国社会经济的发展，输电管廊建设规模快速增长，对优化电网网架结构，打造城市智能电网具有重要意义。输电管廊位于地下，设备部署密集，地质条件复杂，沿线建筑物多，结构健康监测是输电管廊安全运行的重要支撑。通过先进的在线监测感知与分析技术来提升输电管廊的数字化水平，是技术与需求发展的必然趋势。目前需要建立高保真仿真分析与评估模型，结合位移、形变、压强和沉降等力学量的监测，视频图像、地质环境等多维度数据，实现输电管廊结构健康特性的准确分析^[1]。但由于输电管廊的结构状态量通常以微小变形为主，受限于超长地下结构、电磁环境以及地质环境差异等因素的影响，对结构健康在线监测的准确度要求更高。但目前的结构监控与数据分析模型基本处于数据静态分析的阶段，动态环境的变化引起判断差异模型还无法捕捉。因此，本文针对提升输电管廊结构健康状态表征的准确性需求，开展基

于多维实测数据的管廊结构状态反演模型的技术及方法设计的研究^[2]。

输电管廊结构健康监测及评价系统现状

1. 管廊结构监测技术

由于综合管廊结构线路长、覆盖面广和穿越地层情况复杂等，容易产生结构变形问题。而在结构众多变形类型中，不均匀沉降是最重要的一种。长期累积的沉降变形会威胁到管廊自身结构安全、廊内防水性能和混凝土材料的耐久性能等。常用的监测方法包括以下几种：

1) 电子式传感监测。静力水准仪测量是目前应用较多的装置，产品基于连通管原理，通过每个观测点的传感器可得出该观测点自身的液面高度差，将每个观测点的液面高度差与基准点的液面高度差相比较就可得出相对沉降量。该方法不受视距的影响，操作简单，测量准确度高，成本低^[3]。

基金项目：基于光纤微纳测量的输电管廊结构健康状态在线监测关键技术研究及应用（5700-202313621A-3-2-ZN）

2) 光纤传感监测。大体可分为全分布式光纤传感器、点式和准分布式光纤传感器三类。全分布式光纤传感技术可以实现整个光纤链路连续空间上对被测量的测量；准分布式光纤传感器测量是在沿着一根光缆的若干固定点、离散点上确定的，实现对光在光栅区域的传播方式的改变或控制；点传感是测量在空间中的一个点上进行的，但可能使用多个通道来处理多个点。这类产品灵敏度响应均有很好的线性响应，并且结构和制作简单，有很好的实用性^[4]。

3) 图像监测。目前主要有两种方式：三维激光扫描方式和摄影测量方式。前者是通过激光测距仪发射激光扫描待测对象，获取其几何图像数据，建立三维模型，获得地面沉降因素的相关性以及特定场所的沉降灾害模式，结果表明其预测结果误差较小，拟合效果较好^[5]。

4) 卫星遥感监测。利用卫星遥感的技术优势，研究卫星遥感地质调查在地下工程选址所需地质、地形及其环境指标要素的获取、量化分析及其在地下工程选址中的应用问题，不受时间地域、地形限制，可有效提升地下工程选址的时效性，节约前期勘察成本^[6]。

2. 管廊结构健康分析与评估技术

在管廊工程实践中，对于结构服役状态的评价大多采用单一判据，其中以收敛变形作为判据的应用实例最多。这种判断方法本质上是一种对于隧道结构服役状态的感性认识，定量计算更有助于了解隧道结构性能的演变。目前采用巡检获取的多项数据指标加以综合判别，如使用层次分析法、模糊理论和专家打分方法等。通过各种方法建立表观病害、变形与结构内力之间的关系，以期构建更全面、更具说服力隧道结构服役状态评价体系。

1) 专家打分法是通过匿名方式咨询专家的意见，对意见进行统计、处理、分析和归纳，客观地综合多数专家经验与主观判断，经过多轮意见征询、反馈和调整，完成对目标的评价^[7]。

2) 模糊综合评价法通常用于处理多指标、多目标和多不确定性的问题。例如由于原始数据的不一致性和不确定性。模糊算法在数据计算与处理时会出现评价不准的问题，并且在算法方面需要选择效率更高、贴合性更强的模型进行训练，提升评价结

果的准确性^[8]。

3) 层次分析法是一种定性分析与定量分析相结合的多目标决策方法，通过构建判断矩阵，求解矩阵特征向量的办法求出对应的特征向量。此方法易于实现，能将复杂问题简单化处理。对于复杂的管廊环境，层次分析法准确度会较弱^[9]。

4) 因子分析法是通过研究众多变量之间的内部依赖关系，探求观测数据中的基本结构，用少数几个假想变量来表示基本的数据结构。此方法对数据逻辑初始化要求较高，并且对于数据变异过程的评价结果不准^[10]。

输电管廊结构健康评估方法理论

输电管廊属于典型的长线型土工结构，选择有限值数值分析方法构建管廊结构的精细化力学模型较为合适。有限元法是一种离散化的数值计算方法，对于结构分析而言，它的理论基础是能量原理。在外力作用下，弹性体的变形、应力和外力之间的关系受能量原理的支配。能量原理与微分方程和定解条件具有等价关系，有限元法中经常使用虚位移原理和最小势能原理。虚位移原理是指如果物体在发生虚位移之前所受的力系是平衡的，那么在发生虚位移时，外力在虚位移上所做的虚功等于虚应变能^[11-12]。最小势能原理是指弹性体受到外力作用时，在所有满足位移边界条件和变形协调条件的可以位移中，真实位移为最小值。

弹性力学中的有限元法是一种数值计算方法，对于不同物理性质和数学模型的问题，有限元法的基本步骤是相同的，只是具体方式推导和运算求解不同，有限元求解问题的基本步骤如下^[13]。

有限元数值分析法构建管廊结构的流程逻辑图如图1所示，基本思路为问题提出到基础建模再到优化模型的过程。

(1) 基本问题提出

管廊结构的变化一般源于管片接头破坏，最终由于中柱破坏导致结构失去承载力导致。在衬砌结构管片接头承载力偏小时，结构破坏过程一般会表现出三阶段：弹性受力阶段、带裂缝工作阶段和屈服阶段。根据常规测试数据显示，管廊结构受力的荷载与结构位移呈现出一定的曲线规律，如图2所示。

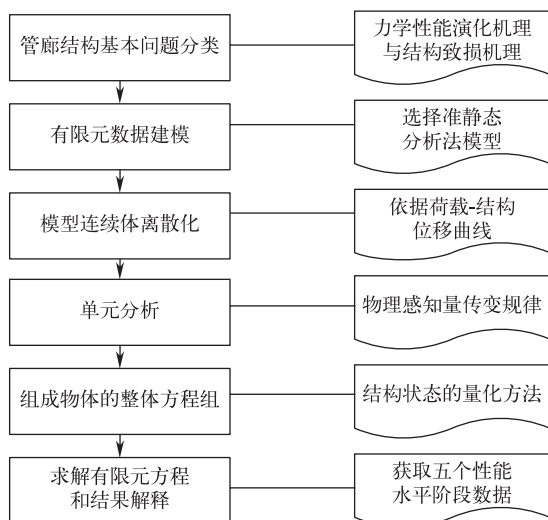


图1 有限元法构建管廊结构建模逻辑图

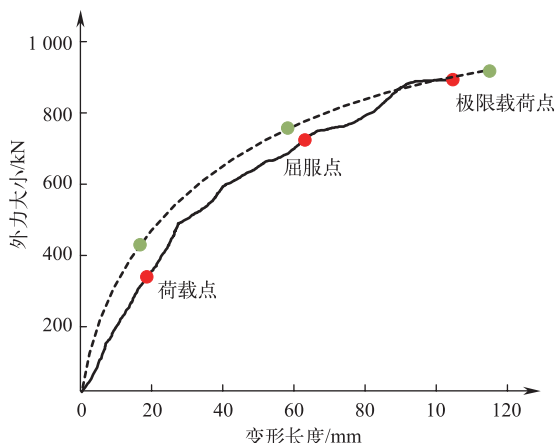


图2 管廊结构荷载与位移曲线图

(2) 基础模型构建

本文采用基于准静态分析法的有限元模型刻画管廊结构位移变化的基础模型，使用ANSYS/LS分析软件，假设管廊结构 $t+\Delta t$ 时刻的状态仅与 t 时刻状态有关，可由 t_n 及 t_{n-1} 时刻体系的物理量值直接外推到 t_{n+1} 的物理量值，通过直接离散解耦的模式求解时间上的关联数值。减小数值变化的加载速率参数，使得动静态加载结果误差最小。在管廊结构基础模型基础上求解受力与传变规律模型。

管廊结构主要感知量包括结构变形、接缝张开、外荷载（外侧渗透压）和混凝土表面应变等，通过研究各物理量及之间相互关系，获取物理感知量间的传变规律。在大量有限元基础模型参数的结构化量化分析后，确定不同参量因素的影响度与结构位移变化状态的间的关系，例如结构位置、走向

和长宽等参量的变化进行总结，并优化数值模型。

(3) 优化评估模型

按照不同参数敏感性分析的思路，将各项指标标准化、归一化处理，并按照对不同自变量敏感度大小进行排序，筛选出最能体现结构性能变化的物理量指标。对于管廊结构性能水平的划分依据结构刚度、强度的变化规律，设计结构塑性发展顺序和破坏机制，设计五个性能水平阶段。

在不同的荷载工况下，管廊结构的受力状态和破坏模式不同，造成不同性能水平阶段衬砌结构的关键性能点有所差异。受力水平包括功能完好、轻微破坏、较重破坏、严重破坏及接近倒塌。对应的性能水平包括正常使用、稍加修补、立即修复、加固后使用及防治倒塌。不同荷载工况下各阶段关键性能点的原因和量化指标量值同样有所差异，实际评估结构需要根据具体工况具体分析。针对超载工况和卸载工况的数值计算试验结果，分别对衬砌结构进行性能水平划分及性能评价，选取适当的结构状态表征指标。

管廊结构状态反演模型设计

为便于管廊安全运维人员监控与管理，急需获取管廊结构状态的反演分析结果，即通过结构表征状态反推结构实时的状态安全特征，有助于运维人员工作的精准判断，提升运维工作的整体效率。反演模型一般在基础的顺推模型数据分析上，采取自学习的算法获取反演的特征规律，推导反演模型，得到结构状态的反演定量评价。本文选择多层卷积神经网络模型，依据管廊结构特征，创新性提出基于物理驱动的神经网络模型，由位移场到内力场的反算，再基于反算得到的内力分布定量计算结构失效概率。管廊结构把物理方程迭代前后的差值加到神经网络的损失函数里，让物理方程也“参与”训练过程。这样神经网络在训练迭代时优化的不仅仅是网络的损失函数，还有物理方程每次迭代的差，最后训练出来的结果满足物理规律。对于该问题，结合数据与物理模型对物理问题进行分析。通过在模型中内置用以描述和约束所分析问题的物理方程，在有限步内迭代得出方程误差最小的场分布，得到方程的近似解，其反演模型主要流程如图3所示。

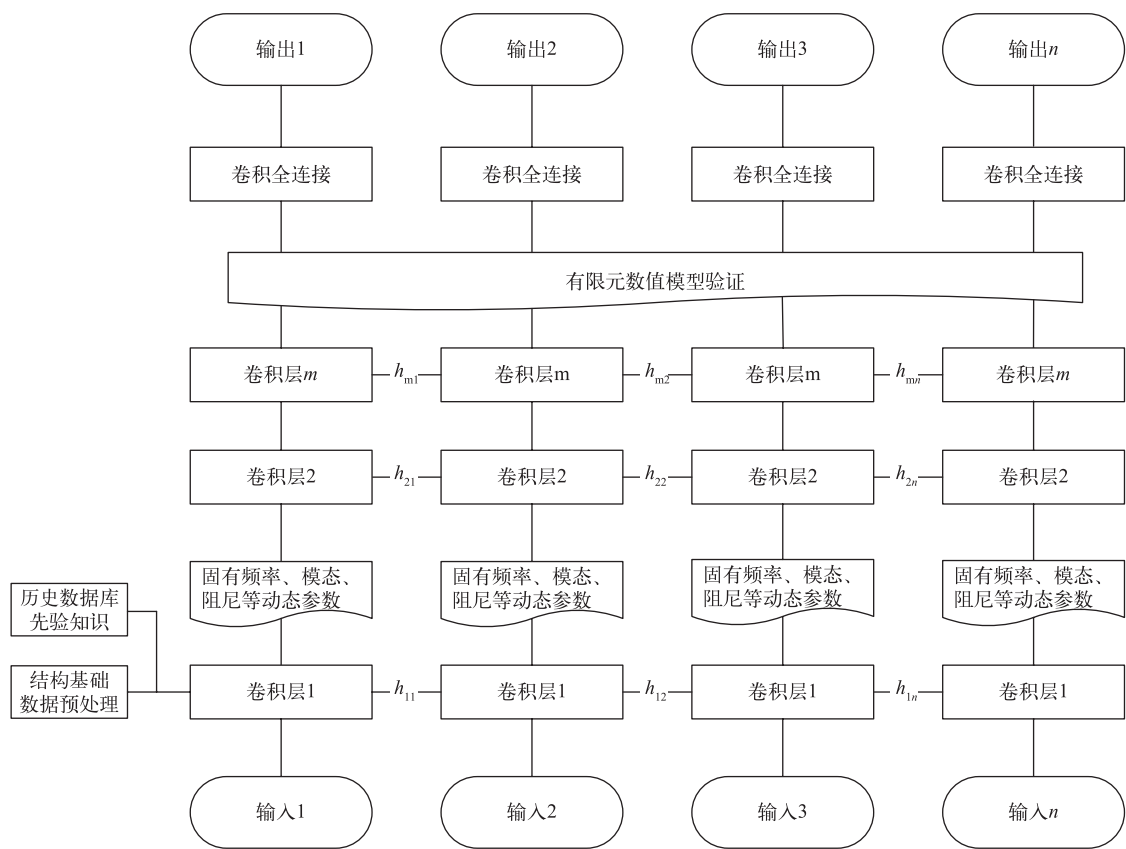


图3 管廊结构反演模型流程

针对损伤参数识别过程的不适定性问题，采用一个多层次的综合解决方案，从各层级上分析，不同层级执行了结构分析的不同功能。具体包括且不限于：管廊结构监测数据预处理分析、管廊结构损害原因初步识别判断、结构失效概率计算和损害处置全连接知识图谱建立四部分。根据数据的复杂度可以随时调整卷积层计算的层级数量，细分度越高一般数据分析的颗粒度越准确，但也需要注意训练结果的收敛性。基于图4整个反演模型包含以下几个步骤：

- 1) 获取先验信息主要来源两个渠道：一是历史故障数据库，提取管廊结构与损害数据间的关联数据；二是依据结构荷载与位移曲线理论值，选择频率和多个模态片段，以保证结构损害参数识别过程的适定性。
- 2) 基于结构的固有频率、模态和阻尼等动态参数，选择基于最小二乘估计和高斯-牛顿迭代算法，作为物理方程将参数带入每一层卷积神经网络进行训练，不断优化损伤参数。

- 3) 在有限元结构模型基础上，实现全链路集成式交叉训练，反复进行前两个步骤的分析，修正由于先验信息的不准确性所带来的评估误差。
- 4) 在以上结果的基础上，进一步用修正的扩展贝叶斯估计方法，改进损伤参数识别结果的准确度。

模型验证

通过以上步骤，将监测得到的结构数据输入训练多层卷积神经网络，最终输出对应结构损害产生的原因，即可得到涵盖管廊结构形变以及表观病害的形成机理，作为下一步进行原因识别的分析源。取多组不同环节损害及其识别特征的结果，在相同的地质条件下，建立有限元数值模拟模型。通过模拟数值模型得出结构变形以及可能产生的裂缝等薄弱位置破坏，最后将神经网络预测结果与模型数值模拟结果对比，判断结构损害原因分析准确度。使用ANSYS/LS分析软件，建立数据样本集，在求解区域内进行采样处理。选择典型物理模型进行训

练，将方程左右端的差值以最小二乘意义的形式加入到损失函数中，再选择梯度下降方法优化模型误差，直到迭代次数到达指定值或损失函数误差小于指定值。测试结果如图4所示。

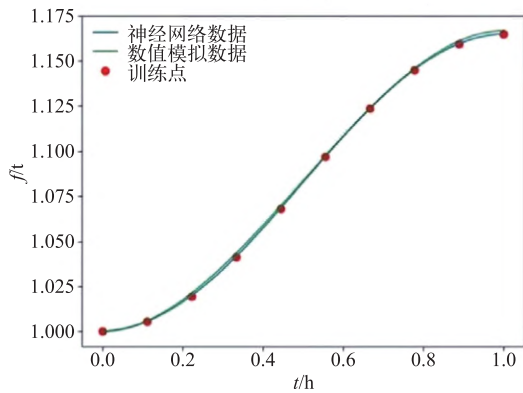


图4 测试结果

测试结果为检测与神经网络预测的误差比较，从图4上看出最终满足神经网络求解与解析解基本吻合。

结束语

随着输电管廊的大规模建设，管廊向着大型化、复杂化和多功能化发展，管廊结构的安全风险也在逐步增加。输电管廊为超长线状地下结构且很多埋深较浅，在服役过程中往往处于固液耦合作用环境下，受力体系易出现损害薄弱环节。分析管廊结构在复杂工况下承受设计载荷和多种突发性外在因素的影响，在理论层面研究输电管廊的结构状态分析方法及力学传变规律是至关重要的。本文全面研究了管廊结构力学参量传变规律，建立以数字化分析为基础的更全面的管廊结构状态表征模型，提出基于物理驱动的神经网络管廊结构健康状态评估方法实现输电管廊的数字化监测、反演诊断与健康评价，依托现场输电管廊工程进行数据分析和特征提取，实现结构损伤诊断全覆盖，填补在管廊结构健康监测反演控制方面的技术空白。EA

(收稿日期：2024-02-02)

参考文献

[1] 范福强. 城市地下综合管廊结构裂损病害演化

及修复堵漏机理研究[D]. 济南：山东建筑大学，2022.

[2] 薛瑞蕾. 黄土地区地下管廊盾构扩挖施工对地层的影响研究[D]. 西安：西安科技大学，2021.

[3] 王哲. 火灾下城市地下综合管廊结构力学性能与损伤分析[D]. 沈阳：沈阳建筑大学，2019.

[4] 卢彦明，石建勋，林景祥，等. 综合管廊超长段力学变形特性及施工措施探讨[J]. 山西建筑，2023，49(10)：190-192.

[5] 周玲雪. 基于盾构法施工的综合管廊数值模拟及优化设计[D]. 沈阳：沈阳建筑大学，2019.

[6] 丁勇，施斌，隋海波. 隧道结构健康监测系统与光纤传感技术[J]. 防灾减灾工程学报，2005(4)：375-380.

[7] 易朋兴，刘世元，杜润生，等. 分布式监测系统可靠性贝叶斯评估[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2006(3)：42-45.

[8] 张泽尧. 基于分布式光纤传感技术的隧道衬砌变形监测及评估研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2022.

[9] 猴百勇，陆秋海，向志海，等. 损伤识别的模态数据异常值分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2015，55(3)：356-360.

[10] 顾营迎. 基于振弦式传感器的钢结构建筑监测预警系统的设计[D]. 天津：天津大学，2009.

[11] 杨俊超. 基于大数据分析的铁路沉降灾害预警模型研究[D]. 成都：电子科技大学，2021.

[12] 郭伟. 基于线扫描相机的隧道表观病害采集装置与智能识别方法[D]. 济南：山东大学，2022.

[13] 覃禹. 智慧管廊云平台中人工智能及大数据模块的设计与实现[D]. 北京：北京邮电大学，2021.

[14] 胡联粤. 基于机器学习的地下综合管廊安全状况评估方法的研究[D]. 广州：广东技术师范大学，2020.

[15] 李杉杉. 基于机器学习的市政管网运维风险评估[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.