

地理视角下的城市供水管网压力等值图研究

文 / 戴雷杰 上海市供水调度监测中心

摘要：供水管网是城市发展的生命线，管网的压力是维持正常供水运行的关键因素。随着上海城市规模的不断扩大和供水需求的增加，管网系统愈发复杂。由此，本研究从地理视角出发，聚焦于城市供水管网压力监测，通过克里金插值法绘制等值图，直观可视化的呈现管网压力分布，精准定位事故点并模拟推演，提升调度决策效率。研究显示，克里金插值法在模拟等压图时表现出较高的精准度，能够有效捕捉管网压力的空间变化规律，相较于反距离权重法和经验叶贝斯克里金法，其插值精度和事故定位效率均有显著提升。

关键词：供水管网；地理信息；压力监测；等压图；克里金插值

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.017

引言

随着城市供水管理精细化要求的提升，上海市供水调度监测中心不断加强调度系统建设，促进供水效能提升。信息化建设成为提升调度监测中心效能的关键因素，为城市供水系统的稳定运行和高效管理提供了强有力的支持。目前，国内外学者在供水管网压力监测方面已开展了大量研究。例如，吴杰（2020）基于流量和压力数据分析提出了管网漏损定位方法，但其依赖于大量传感器数据，成本较高；张慧（2019）研究了压力分区及低压改善方法，但未能解决空间插值精度不足的问题。现有方法如反距离权重法和经验叶贝斯克里金法在插值精度和计算效率上存在局限性，难以满足大规模管网压力监测的需求。

为了更好地理解和应对管网压力的动态变化，本文提出基于克里金插值法的管网压力监测方法。克里金插值法能够综合考虑空间自相关性，通过优化样本点权重分配和变程参数调整，显著提高插值精度。

一、背景

截至2024年，目前上海市布设了压力监测站点1088个，对上海市的管网压力进行监测。通过实时在线数据、衍生数据，实现了对全市供水的“全过程、全范围”的实时监控。面对成千上万的数据，用1个点对应1个数据的方式显然已经无法有效实施监控，而且传统压力监测方法依赖于单一数据点的分析，难以捕捉管网压力的空间分布规律。克里金插值法通过空间自协方差优化插值过程，能够有效填补监测点之间的数据空白，提供更连续、平滑的压力分布图。进一步，结合地理信息技术的优势，可以在电子地图上以直观的方式展示压力等值图，即“图形化监控”替代传统的“数字表格”，可以为调度人员提供极大的便利。

二、痛点

目前，管网运行压力异常情况下，导致管网漏损等问题频繁发生，给人们的生活和财产安全带来了严重的威胁。管网损坏的原因多种多样且难以预测，而大多数水务企业缺乏有效的管网评估方法，难以迅速识别管网的薄弱环节。在实际工作中，管网运行产生的压力异常

情况，往往导致爆管、漏损事件等突发事件的频发，对供水系统的可靠性和安全性构成了严重威胁。克里金插值法通过优化空间自相关性和样本点权重分配，能够显著提高插值精度和事故定位效率，满足大规模管网压力监测点的等值图分析需求。

针对以上痛点问题，通过建立以IT基础设施为实施保障，管网运行压力监测数据为基础，依托互联网、云计算、大数据、物联网等技术，基于SOA架构体系，实现对管网运行压力的全面监测和精细管理。

三、技术路线

（一）克里金插值法

克里金插值法（Kriging），又称空间自协方差最佳插值法，它是以南非矿业工程师D. G. Krige的名字命名的一种最优内插法。克里金法根据样品空间位置不同、样品间相关程度的不同，对每个样品品位赋予不同的权，进行滑动加权平均，以估计中心块段平均品位。在数据网格化的过程中考虑了描述对象的空间相关性质，使插值结果更科学、更接近于实际情况；并能给出插值的误差（克里金方差），使插值的可靠程度一目了然。

本文主要研究应用克里金插值法，对上海市在线管网压力监测点以克里金插值法估算出上海每个点位的压力值，采用一定的渲染规则，形成等压图。根据克里金插值法估算出来的点位坐标压力值进行匹配，进而根据等压图的渲染规则判断当前管网运行处于高压还是低压状态。

具体实施步骤如下：

- 1、数据收集：从上海市1088个压力监测点获取实时压力数据，数据格式包括经纬度坐标和压力值。
- 2、变异函数建模：通过半变异函数分析压力数据的空间自相关性，确定变程（range）、基台值（sill）和块金效应（nugget）等参数。
- 3、插值计算：利用克里金插值公式，计算未监测点位的压力值。公式如下：

$$Z(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i)$$

其中， $Z(s_0)$ 为待插值点压力值， $Z(s_i)$ 为已知点压力值， λ_i 为权重系数。

4. 误差分析：计算克里金方差，评估插值结果的可靠性。

通过对比反距离权重法、经验叶贝斯克里金法和克里金插值法的模拟结果，克里金插值法的插值误差(RMSE)明显降低。

(二) 后台动态计算引擎

本文的主要利用分布式计算框架，通过克里金插值服务获取插值后的压力数据，再将插值后的压力数据转换为系统浏览器端的动态数据。异步加载的方式也保证系统对压力数据的高效处理，满足压力数据的秒级计算的需求，即可以进行大数据计算，对于 1088 个压力点的数据计算，系统算法能够将控制到 10 秒内。

(三) 前端渲染引擎

在系统前台渲染器，将计算得到的数据结果存储在数据库中，通过行政区域和 Canvas 绘图提供的灵活的图形展示方式，将插值后的时刻数据叠加生成图片。在拟

合压力图的过程中，实现压力数据在前端动态加载和渲染计算结果。通过行政区域的叠加，更清晰地了解数据在地理空间上的分布，使用户能够直观地查看压力数据的变化。

四、应用效果

(一) 宏观展示

上海地理面积约 6400 平方公里，单纯依靠人力很难掌握管网运行时压力的全局动态变化。系统将监测的等压点绘制成等压面，通过可视化的形式直观呈现，宏观的展示上海市管网运行压力的变化情况。

(二) 事故定位

GIS 可以提供管网地理位置的详细信息，将监测的等压点与地理信息系统结合，实现了管网在地理空间上精确定位。此外，由于系统前端渲染的等压图是实时更新的，若系统等压图显示异常变化，可快速定位事故发生地。通过对比反距离权重法和经验叶贝斯克里金法，克里金插值法在事故定位的准确度和响应时间均显著提升。

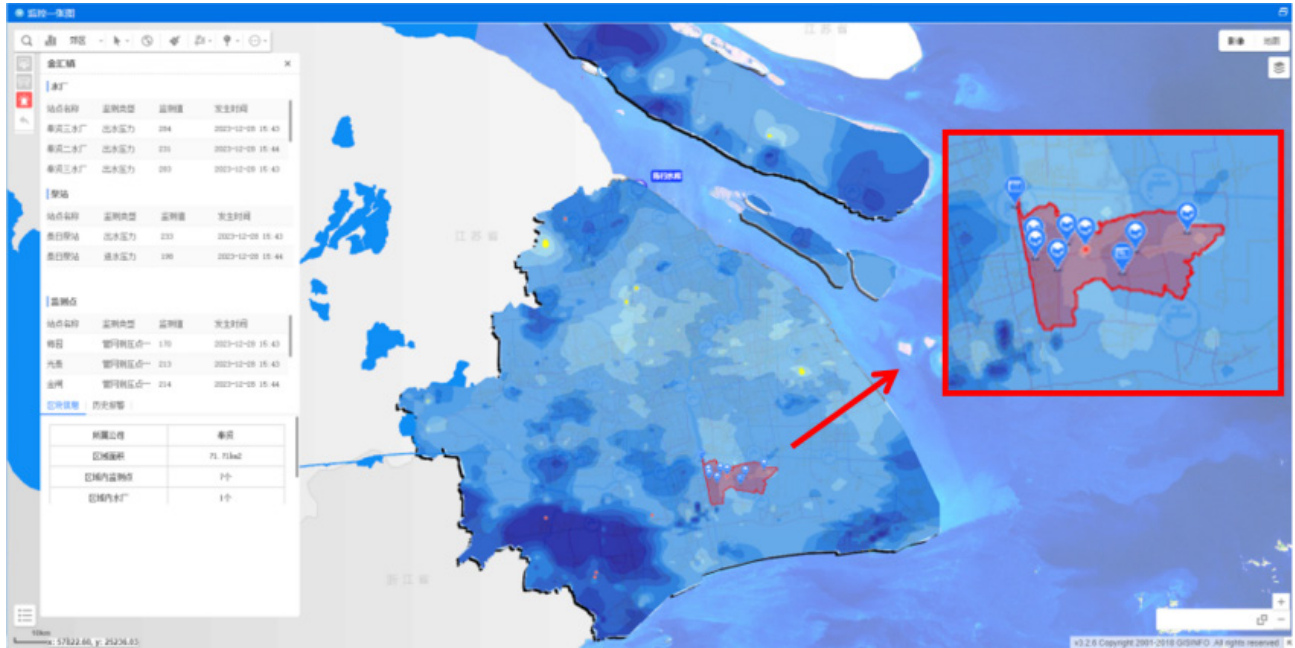


图 1 事故定位

(三) 模拟推演

通过记录观察到的等压图变化情况，对等压图进行详尽的事故分析，可通过等压图全面展示管网运行异常压力事件从发生到处理的整个过程，以及在事故处置的后期，克里金插值法能够更准确地模拟管网压力的时空演变，压力的变化情况通过可视化的形式直观呈现。

例如发生在新港路的一根 DN1500 口径供水管道的爆管事件，视频是事后从交警部门获取的路口监控信息。从等压图与视频的对比分析可以看出，“图形化监控”完全适合对突发事件的及时报警需求。

五、应用价值

(一) 可视化宏观监控

以等压面的形式呈现压力的宏观展示，使用户能够更快速地掌握重要信息，能够为提升全局洞察力，提供科学决策依据。方便调度人员进行宏观监控，能够使调度人员更迅速、更全面地了解整个系统的运行状况。通过直观的数据呈现、可视化的呈现效果，管理者和决策者能够更轻松地识别潜在问题和变化趋势，为制定科学决策提供可靠依据。通过帮助用户直观理解整个管网的压力分布情况，从而更迅速、准确地做出响应。

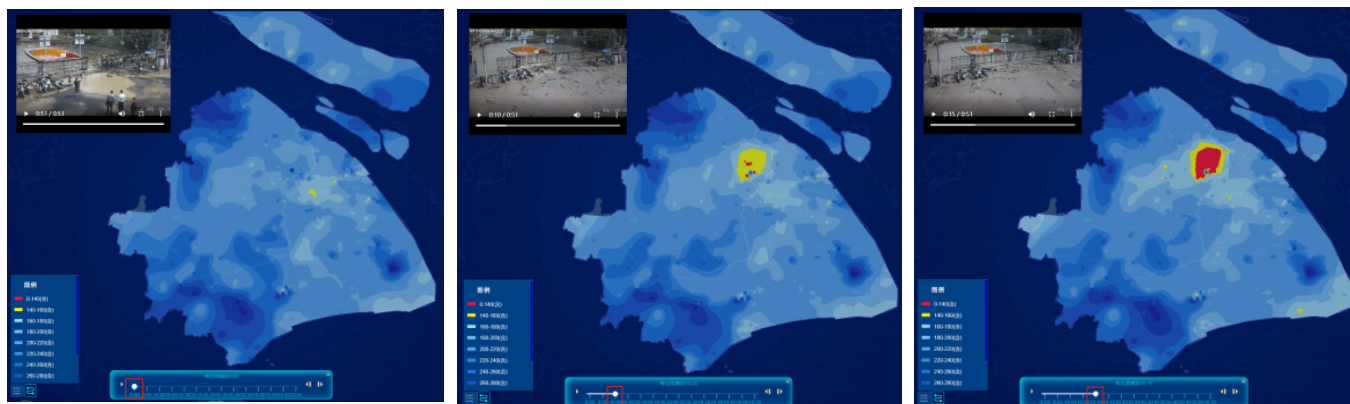


图 2 事故推演

(二) 地学分析助力供水管控

基于地学分析,清晰展示供水系统压力的空间分布及变化趋势,为压力管控提供支持。GIS 可以提供管道的地理位置,直观显示等压点的位置,在地理空间上对管道精确定位。通过为事故的定位和分析提供重要的地理空间上的精确定位和实时更新的等压图信息,进而提高管网安全性,减少事故对环境 and 人员的潜在影响。对于发生管道爆管等与压力变化密切相关事故,可便于工作人员迅速响应计划。相较于反距离权重法和经验叶贝斯克里金法,克里金插值法通过优化空间自相关性和样本点权重分配,能够更准确地呈现城市供水系统的压力分布及其变化趋势,提升管控效率。

(三) 动态追踪高效复盘

通过动态计算等压图的时态演变,不仅有助于实时应对爆管事故,还能为事后的动态总结和复盘提供支持。通过对整个事故发生过程的溯源,全面还原事件的发展轨迹,实现对事故起因、演变过程以及相关因素的详细追踪和记录。在事故发生后,通过对等压图的动态模拟推演溯源和复盘分析,深入了解事故的演变过程和影响因素,为未来的应急响应提供更有针对性改进。

结语

通过结合 GIS、地理科学算法、克里金插值、大数据分析、大数据挖掘等技术手段构建等压点图,实现了对管网压力的可视化展示,使得复杂的压力数据更加清晰直观,为调度决策提供了直观而可靠的依据。此外,考虑城市供水网络的复杂变化,进一步通过基于等压点图的监测点分布优化,确保监测点的合理布局,使得系统更好地适应不同情况下的压力变化。通过科学合理的监测点设置加强对供水网络的全面监控,不仅能够及时发现潜在问题,还能够提高调度决策的准确性和响应速度,对于未来智能城市供水系统的发展具有积极的推动作用。

参考文献

[1] 吴杰. 基于流量和压力数据分析的城市供水管网漏损定位研究 [D]. 太原理工大学, 2020.

[2] 张慧. 城市供水管网压力分区及低压改善 [D]. 杭州电子科技大学, 2019.

[3] 张伟倩. 基于泵阀联合调控的城市供水管网压力管理研究 [D]. 河北工程大学, 2021.

[4] 温长洲. 基于 GIS 技术的区域地表水变化特征监测分析 [J]. 绿色科技, 2022, 24 (14): 60-63.

[5] 汪瑞清. 基于 ArcGIS 的供水水压插值法比较分析 [J]. 净水技术, 2016, 35 (04): 77-80+120.

[6] 王重阳, 曲焯, 帅艳民. 基于 ArcGIS 的协同克里金法预测燃气管网空间分布 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45 (03): 28-32.

[7] 王重阳. 基于 GIS 技术的燃气低压管网预测分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (04): 142-145.

[8] 郭鑫. 基于时空面属性的克里金插值人工智能优化研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2023.

[9] 刘洪. 克里金插值算法在形变监测中的应用 [J]. 地理空间信息, 2018, 16 (04): 91-93+11.

[10] Wen Li, Jian-Guo Cui, Li-Bo Mao. Study on Trend-surface Analysis Model under Abnormal Pressure Condition in Water-supply Pipe Network and Its Application [J]. Water Saving Irrigation, 2011. [24]

[11] Zebin Sheng, Mou Lv. Pressure variation characteristic research for water supply network based on leakage variation analysis (C). World Automation Congress IEEE, 2012.

[12] Yoo D G, Suh M Y, Kim J H. Subsystem-based pressure dependent demand analysis in water distribution systems using effective supply [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16 (3): 457-464.

作者简介: 戴雷杰, 男, 1974 年 8 月 6 日, 浙江宁波, 本科, 高级工程师, 汉族, 研究方向: 供水管理和调度技术。