

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.06.037

基于复杂网络理论的城市供排水系统规划优化

龙霞¹, 朱建树²

(1.中国市政工程西南设计研究总院有限公司,四川成都 610000; 2.中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北武汉 430000)

摘要: 研究一种可以用于城市供排水系统规划优化过程的复杂网络理论应用策略,并将其应用于规划个案。通过复杂网络理论对某城市供排水系统进行分析,同时通过仿真分析法得到其规划优化方案的复杂网络结构熵和特征谱结果,在差值分析、minmax重投影分析、二次熵值分析的流程下,对其结构熵和特征谱进行深度分析并使其统计学特征显著化。分析后发现单纯使用复杂网络模型对方案进行分析,其分析结果的特征并不明显,所以在此基础上进行算法扩增,引入二次熵值法使其数据特征更加显著。最终选择单独新建水源井B井的方案作为城市供排水方案的规划优化方案。

关键词: 复杂网络理论;城市供排水;系统规划;优化设计;算法优化

中图分类号: TU99

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)06-0142-04

0 引言

城市供排水系统属于典型的复杂网络架构。四线以上城市的供排水系统一般存在多个水源设施、多个污水处理设施、多个雨水泄出系统,即城市供排水系统属于多个相互关联、相对独立、相互制约的供水网络、污水网络、雨水网络的集合体^[1]。分析城市供排水系统的性能,找到其中的薄弱点,从而获得供排水系统持续优化过程中的重要步骤^[2]。

早期的城市供排水系统规划优化过程,多将城市供排水网络中的供水网络、污水网络、雨水网络分别进行设计规划,甚至将多个子系统分别进行设计规划,使得城市供排水系统被化成孤立的多个构成部分。这种规划方式难以充分发挥城市供排水网络设施的最大效能,使部分设施冗余闲置、部分设施超负荷运行^[3]。

复杂网络理论是一种基于网络结构熵与特征谱的网络评价体系,将城市供排水系统看作一个整合网络,对其结构熵和特征谱做出评价,在所有优化方案中选择对其结构熵与特征谱优化效果最佳的方案,从而做出最大限度的城市供排水系统规划优化^[4]。

之前的复杂网络理论在电网、交通网、社会关系网、生物新陈代谢网络中有较多应用,但在供排水系统中的相关文献并未出现在包含知网、万方、龙源等

在内的常规文献中,即本文研究的复杂网络理论在城市供排水网络中的应用属于基础理论的应用空白。因此,这是本文研究的最大创新点^[5]。

1 复杂网络理论中的结构熵与特征谱

复杂网络理论的本质是分析非典型拓扑结构网络的混乱度和自组织性,进而得到网络的紊乱度和稳定性。复杂网络理论并不将网络的拓扑结构和成树方法作为核心关注点,而是考虑网络中较深层次的运转状态和流量性能^[6]。在复杂网络理论中,应首先确立网络的非拓扑视角结构特征,一般从其积累度分布特征进行模型搭建。

如果复杂网络为幂率分布关系,即在 $P_k = \sum P(k)$, $k \in \infty$ 条件下,将网络约束为幂率分布关系($P(k) \propto k^{-v}$)或者指数分布关系($P(k) \propto k^{-k}$)。二者分别约束为公式(1)和公式(2)

幂率分布关系下:

$$P_k \propto \sum_{x=k}^{\infty} x^{-v} \propto k^{-(v-1)} \quad (1)$$

式中: $P(k) \propto k^{-v}$, v 为幂率指数,此时网络的累积度分布函数符合幂函数的 $v-1$ 幂率分布关系;

$$P_k \propto \sum_{x=k}^{\infty} e^{-x} \propto e^{-k} \quad (2)$$

式中: $P(k) \propto e^{-k}$,此时网络的累积度分布函数符合自然常数指数的分布关系。

在对应的复杂网络累积度结构的基础上,可以进行网络的密度、介入度、距离分布等计算。因为这些量

收稿日期: 2021-03-28

作者简介: 龙霞(1986—),女,本科,工程师,从事给排水设计工作。

化指标均为简单累加或算数平均关系,所以受限于本文篇幅,不在此进行深入函数分解分析。该研究对供排水网络的复杂网络分析中使用到的其中最重要的两个评价指标,是供排水网络的结构熵和特征谱。

网络结构熵可定义为节点的重要度分布熵,如公式(3):

$$I_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (3)$$

式中: k_i 为累积度评价中第*i*个节点的*k*值; N 为模型考察的节点数。

在节点重要度评价 I_i 指标的基础上进行数据整合,可以得到网络的整体结构熵,如公式(4):

$$E = \sum_{i=1}^N I_i \cdot \ln I_i \quad (4)$$

式中:相关数学符号同前文各公式。

早期相关机构对复杂网络模型进行研究过程中,特别是在社会关系网络的研究中,发现封闭社会关系网络中存在多个节点之间的互通联系显著高于其他网络节点。这些节点代表的自然人节点多为社会关系网络封闭网络中的“富人”群体,故提出了复杂网络的富人俱乐部模型(Rich-Club)。在后续研究中发现这一模型在其他类型网络中同样适用。当前,该模型多用于在结构熵指标基础上进一步分析网络的特征谱结构。

Rich-Club 模型的基函数可写作公式(5):

$$\phi(r) = \frac{2 \cdot E_r}{r(r-1)} \quad (5)$$

式中:将复杂网络分为 r 个子区域,研究子区域的整体结构熵 E_r ,同时对复杂网络体系中存在的 r 个子区域按照上述公式建立均值构型,从而得出 Rich-Club 模型评估结果 $\phi(r)$ 。

2 复杂网络理论对供排水网络的实际意义

2.1 城市供排水系统一般模式

城市供排水系统一般需要满足 3 个网络功能。从水源井中汲取的饮用水水源,经过自来水设施充分净化后,由自来水网络向住户处进行供水,其间经过多次加压以满足住户的用水需要^[7]。住户生产与生活产生的污水,经过分布式的社区污水池初步汇聚并沉淀后,经过多次加压,经历分布式污水处理设施后,汇总到区域中心的污水处理设施。处理达标后,进行污水排放处理^[8]。污水排放一般分为 3 个方向,高标准处理后的污水,可以达到自来水水源级别的,

可以直接向自来水设施进行供水,但大部分城市当前缺少该污水处理技术。如果区域中心污水处理设施紧邻排水口,其他污水可以直接向排水口排出;无此条件的,可以通过雨水排放设施向排污口进行排水,详见图 1。

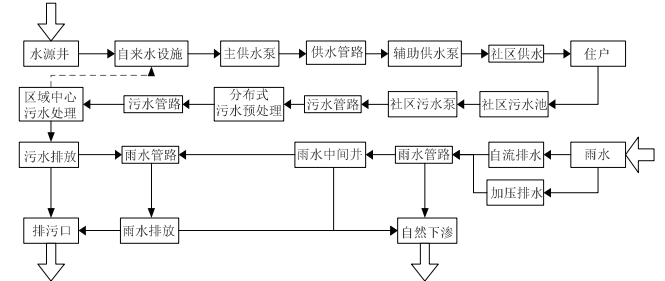


图 1 城市供排水网络一般模式

图 1 中,系统内水源主要有两个:一是水源井的水源汲取系统,二是城市区域内的雨水汇聚收集系统。系统内排水设施也主要有两个方向:一是在雨水排污过程中通过自然下渗向浅层地下水排放,二是通过排污口向地面径流排放。城市供排水系统的复杂度主要来自网络节点的并发性,即在系统中存在多个住户节点。对一般城市来说,该节点数量可能达到数万至数十万个,且水源井、社区污水池、分布式污水预处理设施、区域中心污水处理设施、雨水中间井、排污口等,均存在多个并行设施。这些并行设施在相应网络的驱动下,会将城市供排水设施划分为多个子系统。这些子系统功能上相对独立,均有能力独立完成对应功能,但在拓扑上又彼此互联、互为补充。所以,城市供排水网络难以实现传统拓扑视角下的拓扑分析^[9]。

2.2 城市供排水系统的结构熵与特征谱

分析城市供排水系统的结构熵与特征谱的统计学意义是:其结构熵代表了城市供排水系统的复杂度,同时约束了城市供排水系统的网络流量交叉程度。其特征谱的统计学意义为:分析城市供排水网络中的网络主干显著程度、特征谱评价指标较高的网络存在显著的网络干线提供网络主干功能。而结构熵与特征谱均属于熵值指标或熵值累加、熵值均值指标,低于 1.000 的评价结果表明相关统计学表达较弱,而高于 1.000 的评价结果表明相关统计学表达较强^[10]。

从城市供排水系统网络的规划优化视角出发,降低其结构熵并提升其特征谱有助于使网络发挥出更大作用。而结构熵与特征谱属于相互制约关系,在较低结构熵条件下难以获得更高特征谱。所以,应对方案之间的结构熵、特征谱评价结果进行比较,或在

时间线上评价单一方案的结构熵、特征谱表达结果,单纯查看单一方案的结构熵、特征谱评价结果,而非进行上述横向或纵向比较,则该两个数据没有统计学逻辑意义。

3 个案条件下的供排水网络复杂网络分析

3.1 个案基本情况

某城市城区常住人口 204 万人,63 万户。另有工业用水用户 1 079 户,商业用水用户 476 户,城市面积 132 km²。当前拥有水源井 9 个,沿河排污口 3 个,区域中心化污水处理设施 5 个,雨水中间井 12 个。供排水系统升级前,该市用水用户社区接入口供水水压 0.63 ± 0.14 MPa, 低于国家相关标准要求的 0.70 MPa 标准。城市内涝 (>150 mm) 超出城市面积 15% 范围的天数约为 4.3 ± 0.2 d/y, 相对于地区其他省市,该指标略显优势。3 个沿河排污口经过持续定期抽检,未发生污水排放污染物超标现象。

技术升级过程中分析发现,城市供水水压偏低的核心原因,是自来水供应水量小于城市用水需求水量。当前 9 个水源井汲取量为 750~800 kt/d,实际居民全压供水能力为每户 0.8~0.9 t/d,而居民实际用水需求超过每户 1.2 t/d。该供需矛盾是该市供水能力的核心矛盾。所以,加大自来水水源汲取量是解决该问题的关键。

3.2 网络升级规划方案的比较结果

为实现上述个案需求,该市规划 3 个新建水源井并建设配套自来水处理设施,同时鼓励工业用水企业与自来水公司合建专用小规模水源井。传统方案分析路径下,必然出现 3 个新建水源井同时投入条件下获得最大供水能力的结果,所以本文研究 3 个新建水源井的开工量与城市供排水网络结构熵与特征谱之间的统计学关系(见表 1)。

表 1 城市供排水网络新建水源井数量与复杂网络特征的关系

比较项目	结构熵	结构熵差值	特征谱	特征谱差值
当前现状	1.653	-	1.584	-
新建 A 井	1.469	-0.184	1.639	+0.055
新建 B 井	1.152	-0.501	1.698	+0.114
新建 C 井	1.393	-0.260	1.627	+0.043
新建 A+B 井	1.547	-0.106	1.705	+0.121
新建 B+C 井	1.509	-0.144	1.711	+0.127
新建 A+C 井	1.854	+0.201	1.949	+0.365
新建 A+B+C 井	1.963	+0.310	2.097	+0.513

表 1 中,因为该城市供排水网络优化策略的多目标优化体系,其核心目标是结构熵的降低和特征谱的增加。受制于供水能力提升后的污水、雨水排水能力制约,其结构熵除新建 A+C 井方案和新建 A+B+C 井方案结构熵出现增加外,其余所有方案均出现了结构熵降低;而所有方案的特征谱均出现了增加。所以,单纯考察多套方案的结构熵与特征谱变化情况,无法对相关方案作出有效选择。本文在结构熵、特征谱变化趋势的基础上,进行了数据深度挖掘,以求发现在结构熵熵减最大幅度的基础上,选择特征谱的最优表现。其数据处理策略详见图 2。

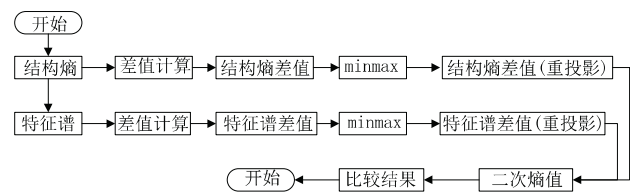


图 2 结构熵及特征谱的二次处理流程

图 2 中,特征谱解算结果来自结构熵计算结果,详见公式(4)与公式(5)的代入关系。差值计算结果已在表 1 中得出,而 minmax 计算方法与二次熵值计算方法,详见公式(6):

$$\text{minmax} \frac{X_i - \min}{\max - \min} + 1 \quad (6)$$

式中: X_i 为该列数据中的第 i 个输入值; \min, \max 分别为该列数据的最小值与最大值。minmax 算法的统计学意义是将上述结构熵差值与特征谱差值在[1, 2]区间上进行重投影。其中,最小值投影为 1.000,最大值投影为 2.000。之所以要在传统 minmax 模型基础上加位移常数 1,是因为传统 minmax 投影区间为[0, 1],单列数据经过处理后必然出现至少一个 0 值,影响后续熵值处理。加位移常数 1 后,其投影区间可以充分避开 0 值且不影响投影效率。

此时,可产生二次熵值的计算条件,即所有除数与被除数均为非负值。二次熵值是以经过重投影的特征谱差值为被除数,以结构熵差值为除数,求商值。经过上述治理,可以得到表 2 数据。

表 2 中,因为本文个案的多目标需求为结构熵值降低和特征谱值增加,经过求熵计算后,二次熵值最高的方案即平衡上述优化目标的最优结果。实际试算结果中,二次熵值最低为新建 A 井的 0.737,最高值为新建 B 井的 1.151。可见,选择新建 B 井而暂时搁置 A 井与 C 井建设规划的网络规划优化模式,是当前条件下可以采取的最优模式。

表2 复杂网络的二次熵值试算结果

方案	结构熵 差值	特征谱 差值	结构熵 投影	特征谱 投影	二次 熵值
新建 A 井	-0.184	+0.055	1.391	1.026	0.737
新建 B 井	-0.501	+0.114	1.000	1.151	1.151
新建 C 井	-0.260	+0.043	1.297	1.000	0.771
新建 A+B 井	-0.106	+0.121	1.487	1.166	0.784
新建 B+C 井	-0.144	+0.127	1.440	1.179	0.818
新建 A+C 井	+0.201	+0.365	1.866	1.685	0.903
新建 A+B+C 井	+0.310	+0.513	2.000	2.000	1.000

4 结 语

使用复杂网络模型对个案城市的3个规划新建水源井的建设关键度进行分析,选择可启用的水源井建设项目。通过分析,发现单纯使用复杂网络模型对方案进行分析,其分析结果的特征并不明显。所以,本文在此基础上进行算法扩增,引入二次熵值法使其数据特征更加显著。最终选择单独新建水源井B井的方案作为城市供排水方案的规划优化方案。

该研究的创新点主要有两点:一是将复杂网络模型引入供排水网络的优化过程中;二是为了让复杂网络模型更适应城市供排水网络的分析需求,对复杂网络模型进行了分析算法的扩增。

参考文献:

[1] 王敏,朱明.基于复杂网络理论的空中交通流时间序列分析[J].航空计算技术,2020,50(5):61-65.

[2] Yuxuan Zhao,Shengyuan Liu,Zhenzhi Lin,et al. Identification of critical lines for enhancing disaster resilience of power systems with renewables based on complex network theory [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(20):4459-4467.

[3] 安沈昊,于荣欢.复杂网络理论研究综述[J].计算机系统应用,2020,29(9):26-31.

[4] 漆庆宇.基于复杂网络的中国高速铁路网络分析[J].物流工程与管理,2020,42(9):22-24,18.

[5] Shengyu Guo,Xinyu Zhou,Bing Tang, et al. Exploring the behavioral risk chains of accidents using complex network theory in the construction industry[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 560.

[6] E Frutos Bernal,A Martín del Rey,P Galindo Villardón.Analysis of Madrid Metro Network: From Structural to HJ-Biplot Perspective[J]. Applied Sciences, 2020, 10(16).

[7] Z Q Cai,Z H Cao.Channel Selection Strategy for a Retailer with Finance Constraint in a Supply Chain Based on Complex Network Theory[J]. Journal of Technology, 2020.

[8] Sun Na,Xia Zhengyun,et al. Invulnerability Analysis of Electric Power Optical Transmission Network in Smart Grid Based on Complex Networks[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1621(1).

[9] Javier Gomez Pilar. Characterization of Neural Activity Using Complex Network Theory[M]. Berlin:Springer, 2020.

[10] 刘广奇,赵志伟,白桦.基于复杂网络理论的城市供排水系统规划优化[J].中国给水排水,2020,36(13):113-118.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com