

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105741

基于网络接入价值的城市群数据网络布局优化^{*}

朱临千 行鸿彦

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要:为解决城市群数据网络布局成本最优化的问题,利用城市互联网产业规模和人口结构数据构建城市网络接入价值评估模型,提出基于网络接入价值的城市群网络布线优化方法。模型根据互联网使用场景得到城市产业和消费者数据网络需求指标,评估出不同城市网络接入价值指数,结合网络拓扑结构、城市区域和 K-means 聚类对最小生成树算法进行改进。以广东省 21 个城市人口和产业数据为例,经过验证,布线决策结果有效减少了 66.59% 的成本投入,适用于不同地区不同发展层次的城市群之间进行数据网络布线决策,保证城市发展的同时实现整体布局成本最低,具有较高的可靠性和应用价值。

关键词: 网络接入价值;城市网络连接决策;拓扑优化

中图分类号: TN915.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Data network layout optimization of urban agglomeration based on network access value

Zhu Linqian Xing Hongyan

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to solve the problem of optimizing the cost of data network layout in urban agglomerations, uses the data of urban Internet industry size and population structure to build an evaluation model of urban network access value, and puts forward an optimization method of network layout in urban agglomerations based on network access value. According to the Internet usage scenarios, the network demand indexes of urban industry and consumer data are obtained, the network access value indexes of different cities are evaluated, and the minimum spanning tree algorithm is improved by combining the network topology, urban geographical location, and K-means clustering. The population and industry data of 21 cities in Guangdong Province are taken as examples to verify the method. The layout decision results show that the cost is reduced by 66.59%. It is suitable for data network layout decision among urban agglomerations of different regions and different development levels, which ensures the urban development and achieves the lowest overall layout cost, and has high reliability and application value.

Keywords: urban network access value; urban network layout decision; topology optimization

0 引言

数字信息化是国家发展的重点领域^[1],随着信息社会不断深化发展,网络成为了社会发展最重要的基础设施之一^[2],城市数据网络建设近十年来得到了空前的推广。新一代无线网络通信(5G)的加速普及,使社会信息化、城市智能化不断深入发展,城市对于高质量网络“高速公路”需求不断增强,如何在充分考虑发展空间的基础上,实现区域城市群数据网络的合理布局达到建设成本最优的效果,是信息产业健康可持续发展的重要课题。

当前,国内外研究人员对网络拓扑结构理论展开了一定的研究,将拓扑结构运用在如交通网、电力网和无线传感设备组网等领域的工程问题中,部分学者也为此建立了相应的优化模型,如李澄等^[3]引入多智能体机制,结合机器学习算法,使异构低压配电网生成最优拓扑结构和数据自主建模,便于实现全局最优模型的可视化。胥鹏等^[4]提出一种基于网络拓扑优化调节的电压控制方法,用于配电网放射性拓扑方案的快速生成并改进了传统拓扑算法组合爆炸的问题。蒋航等^[5]根据拓扑结构提出电力系统网络损耗的管控方法,优化系统计算性能和控制稳定性,实现即时优化

收稿日期:2021-01-26

^{*} 基金项目:国家级大学生创新创业项目(202010300061)、江苏省大学生创新创业项目(202010300008Z)资助

• 9 •

减小传输消耗。刘征宇等^[6]根据两种电池组均衡能量流向过程,设计了一种高效分层均衡电路拓扑结构,提升电池组整体性能。廖畔等^[7]基于网络最大流模型结合 A* 算法构造了一种改进的道路网络最大流模型,提升道路最大通行能力,达到拓宽成本最优。吴耀东^[8]根据网络节点的中继聚类特性,结合二维拓扑参数,实现数据节点定位,提高了整体网络的收敛性和定位精度。Hou 等^[9]分析了异构负载复杂网络中过载级联故障问题,提出一种非均匀负载再分配计值,利用再分配的弱非均匀性缓解级联效应。韦运玲^[10]提出了一种新型层次型拓扑结构优化方法,根据网络节点的能量消耗和位置信息对节点赋权值,改善了组网后传感器网络寿命和能量消耗。谢百明等^[11]基于双向直流变压器设计了一种有源功率单元模块拓扑结构,实现电压隔离、功率控制等功能。张铮等^[12]针对多跳树形拓扑结构网络,提出了一种根据数据节点唤醒时间的优化调度策略,提高网络寿命减少功耗。Zhou 等^[13]提出一种控制能量消耗平衡的无线传感器网络模型,平衡传感器网络能耗和传输功率并优化了计算方法。高梅等^[14]依据无线传感器网络节点簇头的能量消耗,结合 Dijkstra 图论算法设计了最佳跳数计算模型,实现网络能耗的优化。李林等^[15]结合通信网络架构与拓扑自适应组网特性提出了一种光储充电站网络的控制策略,提高了网络传输性能并使电能流动平衡。上述研究成果可以归结为拓扑结构对运输网络容量、网络结点性能、拓扑稳定性以及路径生成优化研究。但是城市间数据网络布局相较于以上应用场景还具有高成本、高附加值、质量需求多样、多应用场景并行等特点,以上的研究成果未涉及对不同地区数据网络接入价值的评估,传统的网络拓扑方法无法很好地适用于城市群数据网络布局的综合决策,城市网络布局规划也缺少理论支撑。

本文将建立一种基于网络接入价值的城市数据网络布局优化模型。根据城市产业布局、网络用户人口结构评估城市网络接入价值,对不同层次城市进行分类组合;综合接入价值、地理距离与现实约束条件;最后改进最小生成树算法得到基于网络接入价值的城市群数据网络布线优化方法并对优化效果进行检验。

1 方 法

城市群间的数据网络建设成本高,同时产业附加值也高,如何合理布局是典型的损益优化问题^[16]。不同城市之间对数据网络性能的需求各不相同,主要与当地产业与人口结构紧密相关。数据网络布局存在最大流量的问题,为了保证数据网络稳定性需要根据不同的网络性能需求进行合理组合。针对上述城市群数据网络的特点,需要在传统拓扑结构的基础上综合考虑不同城市网络接入价值和实际地理环境要素,构建基于网络接入价值的城市群网络布线优化方法。

• 10 •

1.1 网络接入价值评估模型

网络接入价值即地区对数据网络的需求,本文中将一个地区的数据网络需求划分为城市产业数据网络需求量和城市消费者数据网络需求量,根据两个指标的特征,确定合适量化方式。

数据中心是互联网的基础设施,主要用于处理数据信息^[17],城市建设数据中心的规模和类型可以直观地反映出城市产业数据网络需求。根据业务类型的分类和对应的网络设计要求,数据中心划分为“边缘计算类”“低时延类”“中时延类”和“高时延类”4 种^[18],如表 1 所示。

表 1 数据中心业务类型分类及设计要求

业务类型	边缘计算类	低时延类	中时延类	高时延类
时延要求/ms	<10	≤20	≤200	其他
应用场景		车联网、 网络游戏、 金融证券、 远程医疗	云计算、 大数据、 区块链、 人工智能、 视频播放	网页浏览、 数据存储、 数据备份

将业务类型按设计要求从高到底进行分级: L_1 为边缘计算类, L_2 为低时延类, L_3 为中时延类, L_4 为高时延类。城市数据网络产业发展往往多种类型并行,定义单个城市在 n 个城市中产业网络需求:

$$Id_{bi} = \sum_{j=1}^n k_j \cdot L_j + L_{\max}, i = 1, 2, \dots, n \quad n \geq 2 \quad (1)$$

其中, k_j 为城市产业中属于第 j 级业务类型的比例。采用最大值进行归一化,得到每个城市的产业网络需求指标:

$$Id_i = \frac{Id_{bi}}{\max(Id_{b1}, Id_{b2}, \dots, Id_{bn})}, i = 1, 2, \dots, n \quad n \geq 2 \quad (2)$$

4G 时代手机网民规模达 9.3 亿,占总网民的 99.2%,表明移动互联网是普通消费者数据网络的主要使用场景之一,因此以移动网络场景来确定城市消费者数据网络需求量自然合适不过。移动网络占据前 5 的应用场景是即时通信、网络视频、短视频、网络音频和音乐,分别占比为 14.8%、13.9%、11.0%、9.0% 和 8.9%^[19]。由此可见,移动互联网使用场景均对网络带宽和即时性等性能指标有较高的要求,可以将城市消费者对网络的需求量等效为城市中主要互联网人口的占比,以此来定义不同城市消费者基数:

$$Cu_{bi} = \frac{P_i}{\max(P_1, P_2, \dots, P_n)}, i = 1, 2, \dots, n \quad n \geq 2 \quad (3)$$

其中, P_i 为不同城市的人口总数。

当然,不同城市人口结构也不相同。为了强化模型的

适用性,还应该将人口结构对城市消费者网络需求的影响纳入综合评估。根据最新的《中国互联网行业发展报告》显示,截止到2020年3月,我国互联网人口中10~60岁占比为89.7%,为绝对主体。中国网络人口年龄分布,如图1所示^[20]。

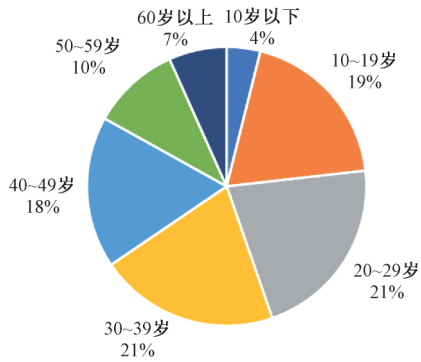


图1 2020年中国网络人口年龄分布

定义10~60岁人口为网络用户主体,考察每个城市中10~60岁人口的占比,得到城市网络用户系数 $\alpha = \text{城市网络用户主体人口} / \text{城市总人口}$ 。因此得到城市消费者网络需求指标:

$$Cu_i = \alpha \cdot Cu_{bi} \quad (4)$$

其中, Cu_i 是一个1以内的指标数,能够反映第*i*个城市的消费者在多个城市中对网络需求的大小。

城市产业网络需求指标和城市消费者网络需求指标共同组成了城市网络接入价值函数,定义每个城市网络接入价值指数 N_i ,指数越高表明该城市的产业和人口对网络的需求越高,而指数最高的城市一般为这些城市的网络中心节点。

$$N_i = Id_i + Cu_i, i = 1, 2, \dots, n \quad n \geq 2 \quad (5)$$

1.2 城际网络连接决策模型

为了保证在这*n*个城市之中网络布局合理、网络资源最大化利用还需要将具有不同层次接入价值的城市进行组合。城市间网络连接以城市作为节点采用拓扑结构的形式进行组网。将每个局部组网中接入价值最高的城市作为中心节点与另一个局部组网的中心节点城市连接,从而这些中心节点城市形成新的组网,以此类推最终实现将所有城市连通的局面。

每个层次的城市组网结构都类似于计算机网络的拓扑结构。拓扑结构有星型、环型和总线型,对于城市组网来说一般适用于采用星型结构,也可以进一步拓展星型拓扑结构为树状拓扑结构以提高网络连接的灵活性和稳定性^[21]。采用树状拓扑结构进行分层,一方面防止网络数据过于集中负荷压力过大,同时防止网络数据浪费,使网络部局更加合理。

城市网络建设成本 v 与布线的长度 l 成正比 $v = \beta l (\beta > 0)$,连线总长越短成本越低。将两个城市网络连线的距离等效为两个城市地理中心的距离,将经纬度转化为二维平面坐

标^[22]。假设地球为一半径为*R*的球体,某物体所处纬度为 φ 。对于不同经度间的物体,纬度相隔一度所代表的实际距离 la 变化较小,本文将其视为常数: $la = 2\pi R / 360$,对于处在不同维度间的物体,精度相隔一度所代表的实际距离 lo 有较大差异: $lo = 2\pi R \cos\varphi / 360$ 。假设所有连线都是直线,那么连线最短也就是要保证在这些节点全部连接的基础上,边数最少(两点连线组成一条边),这是典型的最小生成树问题。最小生成树是图论的一项应用,城市经纬度虽然是固定值,但是多个城市如何连接、连接的方向都是未知的,城市的各个节点形成了一张无向图,记为*G*。城市是网中的顶点*V*,所有的连接方法记为集合*E*,如果存在一条无循环的连接方式,且各边的长度(权重)最短,那么这条路径就被认为是最小权重生成树^[23]。

$$w(t) = \sum_{(u,v) \in t} w(u,v) \quad (6)$$

其中, (u,v) 表示顶点*u*和*v*之间的边, $w(u,v)$ 代表边的权重,*t*为无循环的连接方式。

仅根据空间分布进行城市网络连线布局虽然能保证总连线距离最短,但是不符合城市实际网络需求,结果不具有实际操作价值。利用该方法找到一定范围内最短的布线方法,结合接入价值指数来实现进一步优化。根据城市实际情况设置多级节点,节点的设置首先根据网络接入价值引入K-means聚类方法,基于聚类准则函数最小化准则的^[24]将各个城市的接入价值指数等效为欧氏距离分为4类。聚类后得到局部组网节点,每个节点应该与组网内的其他城市距离尽可能靠近。以节点城市作为中心,使用最小生成树得到局部组网连接方式,再将节点城市连接,得到优化后的城市网络布局。

2 分析与讨论

广东省是全国最大的信息产业聚集地,在5G网络建设方面领跑全国,其网络结构升级对全国有巨大的引领和示范意义。本文以广东省21个城市为例,验证城市群数据网络布线优化方法的可靠性。

2.1 消费者指标

根据2017年各市《1%人口抽样调查》得到城市人口总数和人口年龄结构比例,其中韶关和云浮两地年龄比例数据为2010年第六次人口普查代入公式得到不同城市消费者基数 Cu_{bi} ,获得不同城市消费者网络需求指标 Cu_i ,如表2所示。

2.2 产业指标

根据广东省城市“互联网+”综合竞争力指标和数据中心建设情况^[25],代入公式得到城市产业数据网络需求指标。由于文件仅披露了18个城市的建设情况,揭阳、潮州、中山三市并未获得相应的数据,这3个城市采用取众数的方法,将0.1定为需求指数,从而确定21个城市各自的城市产业需求指标 Id_i ,如表3所示。

表 2 广东各城市消费者网络需求指标

城市	广州	深圳	东莞	佛山	湛江	汕头	惠州	江门	梅州	肇庆	河源
比例/%	79.20	88.40	86.08	80.00	69.20	70.69	74.39	74.60	65.99	64.32	66.69
消费者指标 (Cu_i)	0.790	0.773	0.485	0.424	0.341	0.267	0.241	0.230	0.194	0.179	0.138
城市	韶关	汕尾	潮州	阳江	茂名	揭阳	清远	中山	云浮	珠海	
比例/%	71.64	72.39	72.97	69.41	64.78	71.95	69.11	80.27	67.85	78.50	
消费者指标 (Cu_i)	0.144	0.145	0.130	0.119	0.274	0.294	0.180	0.178	0.115	0.100	

表 3 广东各城市产业网络需求指标

城市	广州	深圳	东莞	佛山	湛江	珠海	惠州	肇庆	江门	汕头	韶关
产业指标 (Id_i)	0.991	1.000	0.804	0.807	0.625	0.757	0.750	0.664	0.630	0.205	0.159
城市	梅州	汕尾	清远	中山	茂名	揭阳	河源	云浮	阳江	潮州	
产业指标 (Id_i)	0.024	0.173	0.620	0.734	0.165	0.100	0.100	0.065	0.112	0.100	

2.3 广东省数据网络布线决策

仅根据城市地理距离,通过最小生成树得到广东省最短的路径连接方式,结果如图 2 所示,连线的总长度为 17 150 km。佛山(Node 8)有 4 个连接点是所有城市当中最多的,广州(Node 10)仅仅是一个边缘城市。显然仅根据空间分布进行城市网络连线布局有很大的局限性,不符合城市实际网络需求。

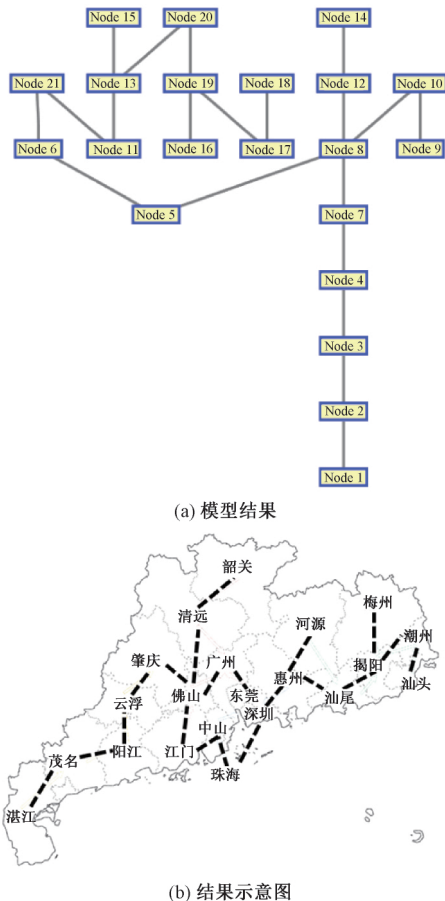


图 2 传统的最小生成树布线结果

引入城市网络接入价值评估模型。根据式(5)得到 21 城市网络接入价值指数 N_i , 均值聚类得到需求分级结果,如图 3 所示。从结果中明显看出 4 种需求类型:需求最高的城市为深圳和广州,第 2 类为东莞和佛山,第 3 类为中山、珠海、江门、惠州、湛江、清远和肇庆,第 4 类为潮州、汕尾、揭阳、韶关、汕头、阳江、云浮、河源、梅州以及茂名。从分级结果可以看出广州、深圳同属第 1 梯队,指数接近其他城市的两倍,这与广深发展水平和规划目标相符合,体现了超一线城市的定位^[26]。第 2 级别是广州、深圳都市圈的重要城市。第 3 类城市从地理位置看大多数处于各城市群的中心地带。城市需求量分级符合实际情况。广州是网络接入价值最大的两个城市之一,并且在地理位置上处于广东中部,适合作为核心节点城市。以广州为中心,按照地理距离进行聚类,结果得到距离广州最近的 4 个城市为江门、佛山、东莞和清远,需求分级符合网状拓扑结构要求。

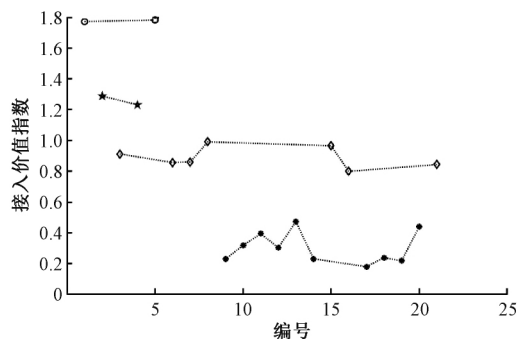


图 3 广东省各市网络接入价值分级

以此类推,以深圳作为中心节点聚类得到邻近城市云浮和肇庆。根据接入价值,选择汕头、湛江作为粤东、粤西城市群中心节点分别聚类,最终得到的结果如表 4 所示。

根据城际网络连接决策模型,以各片区为单位,使用最小生成树算法得到片区内的连接方式。粤西片区呈现

表4 片区中心节点与对应连接城市

城市片区	节点	连接城市	连线长度/km
粤中	广州	江门、佛山、东莞、清远、韶关	3 581
珠海	深圳	中山、惠州、珠海	198
粤东	汕头	河源、梅州、潮州、揭阳、汕尾	540
粤西	湛江	茂名、阳江、云浮、肇庆	431

出最明显的总线型连接方式,主要由于西部5个城市整体上成东西走向呈现出狭长形分布。另外3个片区基本上是星型分布,连接的中心节点分别是广州、深圳和揭阳,如图4所示。

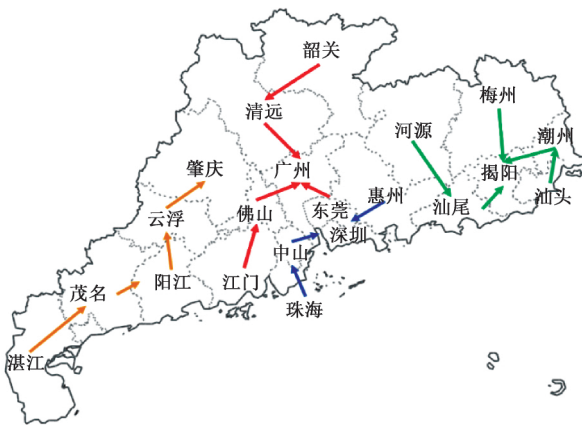


图4 广东省各市网络连接

在区域间连接中需要充分考虑地理位置和网络需求量。广州地处广东省中心位置,与另外3个片区节点城市距离适中,同时广州是省内网络需求指数最高的城市,因此湛江、深圳和汕头与广州相连,得到广东省数据网络布局结果,如图5所示。

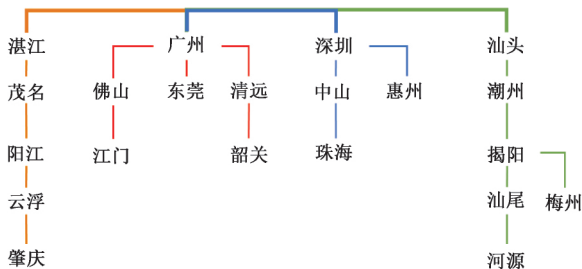


图5 最优化城市数据网络布局结果

2.4 结果分析

仅根据广东省21个城市的经纬度坐标使用最小生成树方法的结果(如图2所示),总长度为17 150 km,同时这种方法产生的最终节点城市并非局部组城市群中数据网络需求量最大的城市。与之相对,使用基于网络接入价值的城市群数据网络布线优化方法后的布线决策结果显示连线的总长度为5 731 km,仅为传统的最小生成树方法

长度的33.41%,缩短了66.59%。这是因为一次性对多个城市使用最小生成树方法时,可能使原本仅通过总线型拓扑结构就可以满足要求的布线方式变成星型甚至环型连接,造成了重复的情况也就导致连线总长度延长^[27]。而进行分区之后可以使布线更符合地理环境实际。

此外,使用传统最小生成树方法会使布线决策结果不符合城市需求。佛山是传统的最小生成树方法给出的中心节点城市,它需要承载广州和深圳的数据流量,在这种情况下佛山需要极大地扩充数据容量,远超自身需求,并且建设、运维成本极高,与损益优化目的背道而驰。因此,基于城市群网络接入价值指数进行分级分组,可以进一步减少重复建设,优化布局成本。

3 结 论

本文研究城市群数据网络资源搭配和建设成本最低的布局优化,提出了一种基于网络接入价值的城市群数据网络布线优化方法,根据城市网络接入价值指数和实际地理位置进行分级分组,达到布线总长度最短的目的。该方法综合考虑城市发展情况,分析了产业和消费者数据网络需求,推导了城市数据网络接入价值指数,结合城市群地理位置分布,将城市分级分组。计算得到组间城市间布线距离最短的布局结果,将节点城市连接实现了数据网络资源合理分配基础,使得城市群数据网络布线总长度最短,成本最低。通过实际案例分析了优化后布局的成本以及资源搭配效果。仿真实验表明,城市群数据网络布局的成本显著减少,资源分配合理,模型可靠性有明显提升。

本文构架的优化方法中,为了便于量化网络接入价值的评估模型,仅考虑了城市互联网产业发展水平和城市主要互联网人口规模。未来,可以进一步优化网络接入价值的评估方法,细化不同种类产业对数据网络的需求情况,同时考察城市人口使用互联网场景,实现更加精准评估城市网络接入价值的效果。

参考文献

- [1] 赛迪智库信息化与软件产业研究所.“十四五”时期我国信息化发展趋势[N].中国计算机报,2020-08-10(8).
- [2] 王志民.关于综合布线教学研究[J].电脑知识与技术,2015,11(5):67-69.
- [3] 李澄,陈颢,刘恢,等.基于多智能体共享信息的低压配电网拓扑与数据建模技术研究[J].电子测量技术,2020,43(12):18-25.
- [4] 胥鹏,王蓓蓓,包宇庆,等.基于网络拓扑资源的配电网在线电压控制方法及其迁移强化学习求解[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7317-7328.
- [5] 蒋航,方颖颖,周建英,等.基于网络拓扑结构优化的电力系统网损在线综合优化方法[J].自动化与仪器仪表,2020(11):210-215.
- [6] 刘征宇,许亚娟,余超,等.基于Buck-Boost电路的分

- 层均衡方案[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11):87-94.
- [7] 廖晔, 王顺意. 基于改进网络最大流的道路通行能力优化研究[J]. 工业工程, 2020, 23(5):96-102.
- [8] 吴耀东. 基于二维拓扑参数修正评估机制的 WSN 数据节点定位算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(10):10-14.
- [9] HOU Y Y, XING X Y, LI M H, et al. Overload cascading failure on complex networks with heterogeneous load redistribution [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applicat, 2017, 481: 160-166.
- [10] 韦运玲. 自适应人工免疫网络算法的无线传感网络拓扑结构优化[J]. 电子测量技术, 2020, 43(1):85-89.
- [11] 谢百明, 谈竹奎, 徐玉韬, 等. 基于直流配电中心的 DAB 直流变压器拓扑与参数设计研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6):86-92.
- [12] 张铮, 曹守启, 朱建平, 等. 面向实时监测的无线传感网低功耗通信策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 257-264.
- [13] ZHOU C L, WANG M, QU W Q, et al. A wireless sensor network model considering energy consumption balance[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(4):1-8.
- [14] 高梅, 王丙元. 图论在无线传感网络路由协议中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7):25-31.
- [15] 李林, 曹军, 陶维青. 光储充电站通信网络和系统控制技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 25-32.
- [16] 王博, 周厚贵, 李智勇, 等. 基于质量损益函数的大坝混凝土施工质量特性容差优化[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(23):90-99.
- [17] 李维虎, 张顶山, 崔慧明, 等. 数据中心网络 coflow 调度机制结构构建及仿真[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10):78-81.
- [18] 张瀚. 对新基建数据中心建设布局的有关思考[J]. 改革与开放, 2020(13):29-33.
- [19] 赵昕宇. 中国网民规模达 9.4 亿占世界五分之一网络视频用户占比 94.5%[J]. 高科技与产业化, 2020(10):7.
- [20] 于朝晖. CNNIC 发布《第 45 次中国互联网络发展状况统计报告》[J]. 网信军民融合, 2020(5):26-27.
- [21] 唐进. 树型结构光纤有线电视系统链路计算[J]. 中国有线电视, 2007(15):1360-1362.
- [22] 黎珍惜, 黎家勋. 基于经纬度快速计算两点间距离及测量误差[J]. 测绘与空间地理信, 2013, 36(11): 235-237.
- [23] 刘婷婷, 于卫红. 物流配送网络最短路线规划[J]. 电子商务, 2018(12):9-10, 14.
- [24] 张雪凤, 张桂珍, 刘鹏. 基于聚类准则函数的改进 K-means 算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(11): 123-127.
- [25] 宋昌发. 广东加快启动信息通信“十四五”规划编制工作[N]. 人民邮电报, 2020-08-06(1).
- [26] 滕琳雅, 姚键, 甘浩, 等. 广深港高铁 5G 覆盖及运营效益分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(10): 24-27.
- [27] 徐兴华. 基于图论的配网评估与辅助决策系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

作者简介

朱临干, 在读本科生, 主要研究方向为网络数据结构、信号检测与处理。

E-mail: zderrick28@163.com

行鸿彦(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为气象仪器设计与计量、信号检测与处理。

E-mail: xinghy@nuist.edu.cn