

孙聪辉, 姚红光. 基于负载重分配算法改进的加权路网实证研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(6): 213-218. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240632

基于负载重分配算法改进的加权路网实证研究

孙聪辉, 姚红光

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 稳定运行的城市道路交通网络对于城市正常活动的高效运行以及国民循环经济的快速增长至关重要, 城市道路交通网络的交叉口节点遭到破坏, 引发拥堵持续蔓延扩散, 导致大面积路网产生相继拥堵现象, 影响城市区域交通流动性。本文基于改进的负载重分配算法研究负载-容量模型下路网相继拥堵后的负载重分配引导策略, 基于上海松江新城部分区域路网进行实证仿真研究。进行实际路网网络拓扑并建立负载-容量模型, 利用随机攻击和蓄意攻击在相继拥堵模型上基于新加权节点综合重要度和节点强度中分析拥堵引导策略。研究表明复杂加权路网受到攻击后基于新加权节点综合重要度负载重分配策略提高了路网的鲁棒性, 对识别城市运输网络中的重要节点、在拥堵后对于城市道路交通拥堵发生前制定预案、失效发生后道路交通管理控制等方面具有重要意义。

关键词: 相继拥堵; 负载-容量模型; 复杂加权路网; 负载重分配算法

中图分类号: TP301.6; V35

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)06-0213-06

Empirical study of road network based on improved load redistribution algorithm

SUN Conghui, YAO Hongguang

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A stable urban road transportation network is crucial for the efficient operation of normal urban activities and the rapid growth of the national recycling economy. Damage to the intersection nodes of the urban road transportation network triggers the continuous spread and diffusion of congestion, which leads to the phenomenon of successive congestion on a large area of the road network and affects the mobility of urban regional traffic. This paper studies the load redistribution guidance strategy after successive congestion in the road network under the load-capacity model based on the improved load redistribution algorithm, and carries out an empirical simulation study based on part of the regional road network in Songjiang New City, Shanghai. The actual road network topology is carried out and the load-capacity model is established, and the congestion guidance strategy is analyzed based on the new weighted node comprehensive importance and node strength in the successive congestion model using random attack and intentional attack. The study shows that the load redistribution strategy based on the integrated importance of the newly weighted nodes after the attack on the complex weighted road network improves the robustness of the road network, which is of great significance in identifying the important nodes in the urban transportation network, formulating a preplan before the occurrence of traffic congestion on urban roads after congestion, and controlling the management of road traffic after the occurrence of failures.

Key words: sequential congestion; load-capacity model; weighted road network; load reassignment algorithm

0 引言

城市道路交通网络是城市交通系统必不可少的一环, 对于确保城市居民的日常生活以及城市经济的正常运行至关重要。随着全球化经济的飞速发

展, 居民生活圈出行半径不断扩大, 对于城市道路交通需求也日益增加, 路网拥堵问题已逐渐成为人们关注的焦点。

城市道路交通网络中, 对于一些节点来说, 如果交通负载大于其容量, 就会因交通拥堵而失效。当

作者简介: 孙聪辉(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。

通讯作者: 姚红光(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 交通运输, 物流管理。Email: hongguang_yao@sues.edu.cn

收稿日期: 2023-12-26

一个节点失效时传输负载流量的节点将选择新的节点进行负载重分配。这可能导致新的节点因过载而失效。这些新的失效节点将触发下一轮次的相继拥堵循环^[1]。因此,相继拥堵过程是影响网络安全或保障的关键因素,城市道路网络中的相继拥堵故障现象往往更加严重,相继拥堵故障的威胁不容忽视。很多研究关注于复杂网络的相继拥堵问题。容量-负载模型大规模应用在中国城市道路网络研究中,强调节点负载与容量的相关性^[2-3]。吴建军^[4]在城市交通网络基础上,考虑不同的特殊情况建立了3种相继拥堵模型进行研究。接着 Zheng 等学者^[5]改进 CLM 模型采用了动态且自动更新的相继拥堵模型。田杭等学者^[6]综合考虑城市路网的有向性和路段阻抗的差异来分析研究路网的相继拥堵。王正武等学者^[7]对城市路网相继拥堵模型进行灾害蔓延仿真。

目前在研究路网相继拥堵的方法上,主要集中在研究去除失效节点后路网的鲁棒性,对于路网相继拥堵后负载重分配算法策略的研究尚且不多。因此本文将着重研究城市道路网络相继拥堵后的负载重分配算法策略。相继拥堵研究路线示意如图1所示。

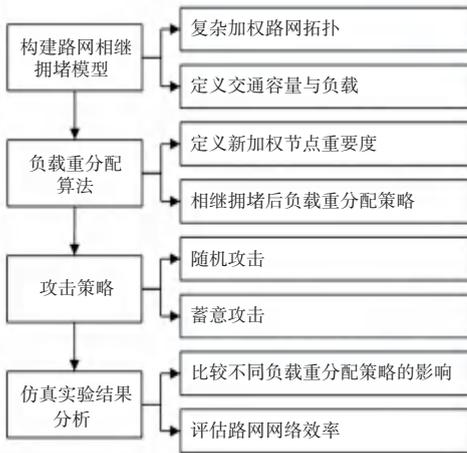


图1 相继拥堵研究路线示意图

Fig. 1 Diagram of successive congestion study routes

1 数学模型

1.1 新加权节点综合重要度定义

设图 $G = (V, L, \omega)$ 是无自环的无向加权连通网络,其中 V 为节点集合, L 为边集合, ω 为边权值。借鉴周漩等学者^[8]提出的重要度评估方法,对于新加权节点综合重要度的定义如下。

(1) 定义边权矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$, α_{ij} 表示 G 中节

点 v_i 和 v_j 之间边的权值。边的权重可以代表负载传递的难易程度。定义邻接矩阵 $A' = (\alpha'_{ij})_{n \times n}$, 这里 α'_{ij} 表示 G 中节点 v_i 和 v_j 之间的相邻情况。这个矩阵用于描述节点之间是否直接相连的关系,如果 v_i 和 v_j 相邻,则对应数值为1,否则为0。定义相连矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$, 这里 z_{ij} 表示 G 中节点 v_i 相连的第 j 个节点, m 为节点度, n 为节点总数。

(2) 定义节点距离 d_{ij} 是节点两两之间最短路径的边权和。

d_{ij} 可由式(1)来确定:

$$d_{ij} = \min \left\{ \sum_{pq} \omega_{pq} \right\} \quad (1)$$

网络中节点之间距离的最大值为直径 $R, R = \max \{d_{ij}\}$ 。在图 $G = (V, L, \omega)$ 中,若节点 v_i 与 D_i 个节点相连,则 v_i 将自身重要度的 $D_i / (\alpha_{ij} \times <k>^2)$ 配置给相邻节点 v_j , 并构造矩阵 H_{lc} 表示节点和相邻节点的重要度贡献比值。

H_{lc} 可由式(2)表示为:

$$H_{lc} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\alpha'_{12} D_2}{\alpha_{12} \times <k>^2} & \dots & \frac{\alpha'_{1n} D_n}{\alpha_{1n} \times <k>^2} \\ \frac{\alpha'_{21} D_1}{\alpha_{21} \times <k>^2} & 1 & \dots & \frac{\alpha'_{2n} D_n}{\alpha_{2n} \times <k>^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\alpha'_{n1} D_1}{\alpha_{n1} \times <k>^2} & \frac{\alpha'_{n2} D_2}{\alpha_{n2} \times <k>^2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(3) H_{lc} 的形式与文献中的有所不同,目的是为了考虑边权对网络节点重要度贡献的影响力,边权越小,贡献度越大。本文以节点效率 I_k 来判断节点在网络信息交流中的作用。

I_k 计算公式如式(3)所示:

$$I_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{d_{ki}} \quad (3)$$

其中, d_{ki} 表示节点 k 和 i 之间的距离 n , 节点效率 I_k 表示节点在网络信息传输中的平均难易程度。节点效率值的增加表示节点对于网络信息传输的贡献更为突出,反映了网络性能的提升。

(4) 综合考虑用后节点的度表示相邻关系,用效率描述节点的位置信息,构建节点重要度矩阵评价体系。最后使用节点的重要度贡献值替换 H_{lc} 中的比值得到节点重要度评价矩阵 H_E 。

H_E 数学定义公式为:

$$\mathbf{H}_E = \begin{pmatrix} I_1 & \frac{\alpha'_{12} D_2 I_2}{\alpha_{12} \times \langle k \rangle^2} & \dots & \frac{\alpha'_{1n} D_n I_n}{\alpha_{1n} \times \langle k \rangle^2} \\ \frac{\alpha'_{21} D_1 I_1}{\alpha_{21} \times \langle k \rangle^2} & I_2 & \dots & \frac{\alpha'_{2n} D_n I_n}{\alpha_{2n} \times \langle k \rangle^2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\alpha'_{n1} D_1 I_1}{\alpha_{n1} \times \langle k \rangle^2} & \frac{\alpha'_{n2} D_2 I_2}{\alpha_{n2} \times \langle k \rangle^2} & \dots & I_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, H_i 为节点 i 的效率值。最后, 考虑了效率、度值和网络边权对节点在整个网络中的影响, 给出复杂网络中节点的综合重要性依据, 使用 \mathbf{H}_E 节点重要度评价矩阵定义节点 i 的综合重要度 Q_i 。数学定义公式可写为:

$$Q_i = I_i \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\alpha'_{ij} D_j I_j}{\alpha_{ij} \times \langle k \rangle^2} \quad (5)$$

新加权网络节点综合重要度贡献矩阵 \mathbf{H}_{lc} 和新加权节点重要度评价矩阵 \mathbf{H}_E 算法综合了网络拓扑结构、节点的效率和节点之间的边权信息多重因素。最终节点的综合重要度 Q_i 提供了一个新的加权节点重要度的度量, 为复杂加权网络后续分析和优化提供了更具实际意义的参考。

1.2 数学公式定义

综合以往王建伟等学者^[9-11]对节点特征在复杂网络中研究的成果, 具体城市道路交通相继拥堵数学模型的构建参考如下。

(1) 定义网络中交叉口节点 i 的初始负载 L_i 为:

$$L_i = \beta \left(k_i \sum_{n \in \tau_i} k_n \right)^\alpha \quad (6)$$

其中, α 和 β 是可调参数。

(2) 定义网络中交叉口节点 i 的容量为:

$$C_i = L_i + \gamma L_i^\delta, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

(3) 基于节点度的负载重分配策略是将失效节点 i 的负载按照其邻居节点的剩余容量的比例重新分配到邻居节点 j 上。具体计算公式如下:

$$\pi_j = \frac{C_j - L_j}{\sum_{n \in \tau_i} (C_n - L_n)} = \frac{(k_j \sum_{m \in \tau_j} k_m)^\alpha}{\sum_{n \in \tau_i} (k_n \sum_{f \in \tau_n} k_f)^\alpha} \quad (8)$$

当节点 i 失效后, 基于节点度重分配策略邻居节点 j 收到的额外负载 ΔL_{ji} 为:

$$\Delta L_{ji} = \beta \left(k_i \sum_{n \in \tau_i} k_n \right)^\alpha \times \frac{(k_j \sum_{m \in \tau_j} k_m)^\alpha}{\sum_{n \in \tau_i} (k_n \sum_{f \in \tau_n} k_f)^\alpha} \quad (9)$$

(4) 由假设失效节点 i 上的负载为 L_i , 而邻居节点集合为 $\{j_1, j_2, \dots, j_k\}$, 各自的剩余容量分别为 $\{C_{j_1}, C_{j_2}, \dots, C_{j_k}\}$ 。失效节点 i 上的负载将依据新加权节点综合重要度和邻居节点的剩余容量的比例重新分配到邻居节点 j 上。研究推得的公式为:

$$\pi_j = \frac{C_j - L_j}{\sum_{n \in \tau_i} (C_n - L_n)} = \frac{(Q_j \sum_{m \in \tau_j} Q_m)^\alpha}{\sum_{n \in \tau_i} (Q_n \sum_{f \in \tau_n} Q_f)^\alpha} \quad (10)$$

网络中节点失效后, 基于新的加权节点综合重要度 Q_i 进行周围节点负载的重新分配, 以保持网络的平衡和鲁棒性。权重参数和条件的选择可以根据具体网络特性和设计目标进行调整。邻居节点 j 接收的剩余负载 ΔL_{ji} 为:

$$\Delta L_{ji} = \frac{[\beta (Q_i \sum_{n \in \tau_i} Q_n)^\alpha] (Q_j \sum_{m \in \tau_j} Q_m)^\alpha}{\sum_{n \in \tau_i} (Q_n \sum_{f \in \tau_n} Q_f)^\alpha} \quad (11)$$

(5) 节点容量因为网络成本是有限的, 邻居节点 j 接收到的负载加自身初始负载大于节点容量时, 即 $L_j + \Delta L_{ji} > C_j$, 节点 j 失效进行负载重分配过程, 可能触发其他节点失效, 形成相继拥堵。相继拥堵发生后, 网络效率降低。所以在复杂路网中用网络效率进行测度:

$$E = \left(\frac{1}{n} \right) \times \sum \left(\frac{1}{d(i, j)} \right) \quad (12)$$

其中, n 表示网络中的节点数, $d(i, j)$ 表示节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度。式(12)计算了所有节点对之间的最短路径的倒数之和, 并将其除以节点数来得到平均值。这个倒数之和越大, 网络效率就越高, 表示网络中的节点之间可以更快速地传输信息, 路径更短, 交通流动更高效。在城市道路网络研究中, 网络效率是一个重要的指标, 可以帮助研究者了解城市交通网络的通信效率, 评估道路网络的拓扑结构, 揭示网络中瓶颈节点, 从而优化交通规划和提高交通流动性。同时网络效率可衡量城市道路网络在突发事件时的鲁棒性, 确保信息传输和交通流动高效。本文通过进行随机攻击和蓄意攻击分析城市路网在攻击下网络效率变化全过程的鲁棒性。通过对网络效率的观察, 研究者可以在不同条件下评估城市道路网络的性能, 特别是在路网发生交通拥堵或突发攻击的情况下。

本文利用 Python 语言对构建的相继拥堵模型进行编程, 并在构建的网络相继拥堵模型中运行。假设网络中的某个节点由于随机攻击和蓄意攻击被

移除,通过程序仿真相继拥堵与负载重分配过程,分别得到仿真网络在不同分配策略下的网络效率变化,以此来观察实验结果。

1.3 相继拥堵和负载重分配算法

在节点遭受攻击后,失效并产生相继拥堵时,节点负载超过了最大限度。采用局部负载重分配算法来将节点的剩余负载按照负载重分配算法分配给相邻节点以减缓拥堵。负载具体分配流程如图2所示。

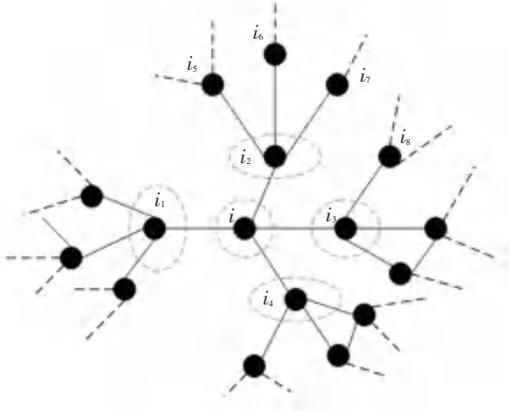


图2 局部负载重分配算法流程图

Fig. 2 Flowchart of local load redistribution algorithm

由图2可知,节点 i 遭受攻击后失效,产生拥堵,此时负载超过最大限度,采用局部负载重分配算法,节点 i 的剩余负载基于节点强度按照负载重分配算法策略分配给相邻节点 i_1 、 i_2 、 i_3 和 i_4 ;接下来,如果 i_2 的负载超过最大限度,则按照负载重分配算法分配给邻域内的相邻节点 i_5 、 i_6 和 i_7 。其他节点依次类推进行负载重分配,直到节点的负载不超过最大负载容量为止。

2 仿真实验

2.1 路网拓扑设定

本次路网区域选择范围是以上海市松江区松江新城为主体,部分青浦道路,选取以沪昆高速、上海绕城高速、沪渝高速和沈海高速区域内的实际路网作为仿真网络。区域内涉及到松江新城主体、松江大学城、广富林等旅游景点多个综合体,具有研究价值意义。在城市交通网络研究中,将实际交通网络抽象为无向加权连通图,其中 V 为节点集合, L 为节点间边集合, ω 为边权。使用Python的Network X进行网络拓扑,得到有权重的复杂路网进行可视化如图3所示。图3中,网络有163个节点,512条边。



图3 路网拓扑示意图

Fig. 3 Schematic diagram of road network topology

2.2 攻击选择

在突发事故下城市道路网络面临随机攻击和蓄意攻击两种不同攻击类型的威胁,2种攻击方式对拥堵的产生具有不同的影响。其中,随机攻击是指以不同的概率随机破坏网络中的节点或边。在城市道路网络中,随机攻击可能体现为突发事件,比如交通事故、自然灾害或其他紧急状况,导致某些城市路段或交叉口失效。这种不可预测性和随机性使得拥堵往往是突发性的,难以提前预知。蓄意攻击与随机攻击不同,是有计划、有目的地按照一定顺序对路网进行破坏。在城市道路网络中,这可能表现为某些恶意行为,在城市道路中一般体现在常发性拥堵路段,例如故意在高流量路段制造交通事故、阻塞交叉口或者有组织地封锁特定区域的交通。常发性拥堵路段往往是蓄意攻击的目标,攻击者可能通过有序地阻碍交通来制造拥堵,达到其特定目的,例如抗议、故意破坏交通秩序等。

综合考虑这2种攻击方式可知,随机攻击和蓄意攻击在城市道路网络中都可能导致部分网络失效,引发交通拥堵,对交通流产生负面影响。这2种攻击方式都有共同的结果,即城市交通系统的部分瘫痪和阻塞,同时会在网络中引起拥堵的扩散效应。这种影响不仅只是局限于受攻击的具体位置,还可能通过交通网络的连接关系传播到其他区域。对于城市管理者来说,需要在综合考虑这些共同点的同时,根据攻击的类型采取相应的预防和应对策略。

3 结果与分析

3.1 随机攻击下对网络效率影响

根据上述实验使用Python对仿真实验模型进行求解,网络效率用 E 表示,攻击迭代次数用 T 表示。首先对于随机攻击进行模拟,分析在随机攻击下基于节点强度和基于新加权节点重要度分配网络

效率的变化,仿真实验得到数据结果如图 4 所示。

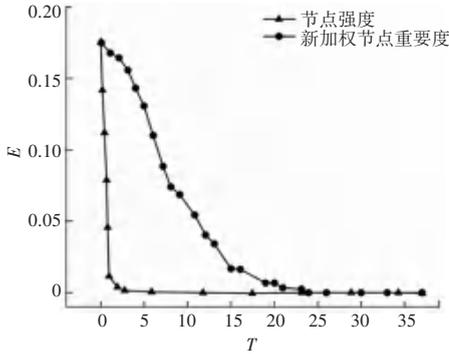


图 4 随机攻击和网络效率影响的关系

Fig. 4 Plot of the relationship between random attacks and the impact of network efficiency

图 4 的结果表明在随机攻击下,基于节点强度的负载重分配经过 2~3 次攻击迭代后导致网络效率迅速降至 0。这就说明采用基于节点强度的分配策略会引发路网大面积相继拥堵,最终导致整个网络失效和崩溃。相较之下,采用基于新加权节点强度的流量重分配方法,网络效率在攻击迭代次数达到 24 次后,从 0.18 降至 0,这一下降趋势相对较为缓慢。这表示着新的加权节点强度流量重分配方法相对于传统的节点强度分配策略,能够更有效地维持网络的稳定性,减缓了网络效率的下降速度,提高了网络的鲁棒性和抗攻击性。

3.2 蓄意攻击下对网络效率影响

研究中,通过蓄意攻击分析在蓄意攻击下基于节点强度和基于新加权节点重要度分配网络效率的变化,仿真实验得到的数据结果如图 5 所示。

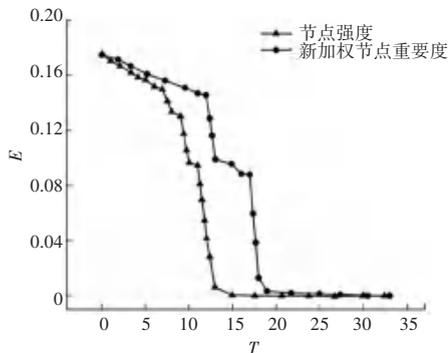


图 5 蓄意攻击和网络效率影响的关系

Fig. 5 Plot of the relationship between intentional attacks and the impact of network efficiency

图 5 表明,在蓄意攻击的情况下,基于节点强度的流量重分配在经历了 15 次攻击迭代后,网络效率呈现出阶梯式的下降趋势,迅速降至 0。与之不同的是,采用新加权节点强度进行负载重分配的算法,

在攻击迭代次数达到 28 次后,网络效率从 0.18 降至 0,同样也呈现出阶梯式的下降,但相较于基于节点强度的流量分配过程,其效果明显更好。这表明基于新加权节点强度的流量分配方法在网络抵抗蓄意攻击时表现更为稳健,具有更强的抗毁性。新的加权节点重要度分配策略更有效地保障了网络的鲁棒性,减缓了网络效率的下降速度,从而提高了网络在面对蓄意攻击时的抵御能力。

综上分析可知,基于新加权节点重要度的拥堵导引策略通过引导流量经过高综合强度的节点,成功提高了网络的整体韧性,并减缓了拥堵点的出现。具体而言,通过综合考虑节点的网络效率和相邻节点位置等,新加权节点重要度能够更全面地描述节点在整个网络中的重要性。这种方法相较于单一属性的节点强度分配更为灵活,能够更好地适应网络结构的变化。此外,新加权节点综合强度能够更精确地引导流量负载,提高整体网络效率,在不同攻击下对于路网结构的变化具有更强的适应性。基于节点强度负载重分配策略在一些简单情境下可能有效,但在复杂路网中可能面临鲁棒性不足的问题。

4 结束语

本文通过结合实际路网和加权节点综合重要度评价体系建立城市道路交通网络相继拥堵模型,进行实例分析,采用以松江新城为主体的实际城市局部道路网络进行道路数据网络拓扑,并在复杂网络下分析其路网参数特征,同时结合负载-容量模型定义,建立城市道路相继拥堵模型,分析路网相继拥堵状态下网络效率基于节点强度和新的加权节点综合重要度分配的不同负载重分配算法的影响,实现从理论到实践的仿真验证。

结果表明突发事故下在路网相继拥堵后基于新加权节点综合重要度进行流量重分配比基于节点强度重分配会使路网具有更好的鲁棒性,这种新的负载重分配算法导引策略的核心在于更全面和精细地评估网络中各节点的重要性,从而更智能地管理和引导交通流。为小型城市和城区街道范围内的路网在发生拥堵后的应急管理提供了很好的负载重分配算法预案,并可以根据实际路况以及交警人员站位配置进行合理的优化和相关建议,也可以进一步为路网的行人和司机提供了更好的行车路线提醒。

本文基于部分交通网络的实际情况和交通运行状态提出了解决方案,虽然为当前的交通问题提供了有效的应对策略,但在未来城镇化加速和路网复

杂化的背景下,这些解决方案可能面临一些局限性。为此,未来的研究和规划应当开发更为灵活和动态的交通管理系统,能够实时响应交通流量的变化和城市发展的新需求;将公共交通、私家车、非机动车和步行等多种出行方式整合在一起,制定综合的交通规划,以减轻单一交通模式带来的压力;利用大数据、人工智能和物联网等先进技术,提高交通系统的智能化程度,优化交通流量管理和路径规划;增强公众对交通规划的参与度和对新交通政策的认识,提高公众对交通系统改革的理解和支持;在城市规划中考虑交通的可持续性,如鼓励使用公共交通、促进绿色出行等,减少对私家车的依赖。

参考文献

- [1] HAN Weitao, YI Peng, MA Hailong, et al. Robustness of interdependent networks with heterogeneous weak inter-layer links [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(18): 186401.
- [2] MOTTERA E. Cascade control and defense in complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 098701.
- [3] SCHÄFER M, SCHOLZ J, GREINER M. Proactive robustness control of heterogeneously loaded networks [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(10): 108701.
- [4] 吴建军. 城市交通网络拓扑结构复杂性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [5] ZHENG Jianfeng, GAO Ziyou, ZHAO Xiaomei. Modeling cascading failures in congested complex networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 385(2): 700-706.
- [6] 田杭, 郭瑞军. 基于网络负载容量模型的城市路网级联失效研究 [J]. *大连交通大学学报*, 2019, 40(6): 15-20.
- [7] 王正武, 彭烁, 黄中祥, 等. 城市道路交通网络级联失效的灾害蔓延动力学模型 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(3): 1-4.
- [8] 周璇, 张晋武. 一种复杂加权网络节点重要度评估方法 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(S2): 268-273.
- [9] 王建伟, 荣莉莉, 王铎. 基于节点局域特征的复杂网络上相继故障模型 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(8): 42-50.
- [10] MOTTERA E, LAI Yingcheng. Cascade - based attacks on complex networks [J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): 065102.
- [11] 马翊华. 基于局域特征的复杂网络级联失效模型研究 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2018.