

中文引用格式:牛路明,马壮林,邵逸恒,等.级联失效下多层地铁网络抗毁性分析[J].中国安全科学学报,2025,35(6):181-190.

英文引用格式:NIU Luming, MA Zhuanglin, SHAO Yiheng, et al. Invulnerability analysis of multi-layer metro network under cascading failure[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 181-190.

级联失效下多层地铁网络抗毁性分析*

牛路明¹, 马壮林^{**1}教授, 邵逸恒², 刘悦^{3,4}, 吴可^{3,4}

(1 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 2 比亚迪汽车有限公司, 陕西 西安 710119;

3 交通运输部 科学研究院, 北京 100029; 4 交通运输部 城市公共交通智能化交通
运输行业重点实验室, 北京 100029)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1222

资助项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2024JC-YBMS-359);交通运输部科学研究院城市公共交通智能化
交通运输行业重点实验室开放课题(2022-APTS-05)。

【摘要】 为探讨车站失效后层间和层内客流转移比例对地铁网络抗毁性的影响差异,在综合考虑列车区间运行时间和到站停车时间,以及乘客换乘步行时间和候车等候时间的基础上,构建多层有向加权地铁网络模型。基于车站实际客流量确定车站初始负载,采用非线性负载容量模型计算车站容量,并根据车站重要性确定攻击顺序。选取最大连通子图比和乘客出行效率比作为地铁网络抗毁性的度量指标,结合2021年西安市地铁网络进行实证分析,研究不同的层间和层内客流转移比例、不同容量调节系数对地铁网络抗毁性的影响。结果表明:当层间客流转移比例为0.7时,对多层地铁网络抗毁性的影响最小;当容量调节系数参数 $b = 0.6$ 、 $c = 0.8$ 时,适当提高车站的服务水平有助于提高地铁网络抗毁性;随着攻击车站数量的增加,地铁网络的抗毁性逐渐减弱;在相同的攻击条件下,多层有向加权地铁网络比单层地铁网络表现出更强的抗毁性,考虑级联失效的网络抗毁性更差。

【关键词】 级联失效; 多层有向加权地铁网络; 抗毁性; 攻击策略; 负载分配; 容量调节系数

Invulnerability analysis of multi-layer metro network under cascading failure

NIU Luming¹, MA Zhuanglin¹, SHAO Yiheng², LIU Yue^{3,4}, WU Ke^{3,4}

(1 School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2 BYD Auto Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710119, China; 3 Ministry of Transport,

China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China; 4 Key Laboratory of

Advanced Public Transportation Science, Ministry of Transport, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to investigate the impact differences of inter-layer and intra-layer passenger flow transfer proportions after stations failure on the invulnerability of the metro network, a multi-layer directed weighted metro network model was constructed, considering the train running time between stations, station dwell time, passenger transfer walking time, and waiting time. Station initial loads were determined by the actual passenger flow, and the station capacity was calculated using a nonlinear load-capacity

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0181-10; 收稿日期:2025-02-14; 修稿日期:2025-04-18

** 通信作者:马壮林(1980—),男,辽宁鞍山人,博士,教授,主要从事城市轨道交通运营组织与优化等方面的研究。E-mail: zhuanglinma@chd.edu.cn。

model. Stations were sequentially targeted based on their relative importance. The maximum connected subgraph ratio and passenger travel efficiency ratio were selected as the metrics to measure the invulnerability of the metro network. An empirical analysis using the 2021 Xi'an metro network was conducted to study the effects of different inter-layer and intra-layer passenger flow transfer ratios and different capacity adjustment coefficients on the network's invulnerability. The results show that when the inter-layer passenger flow transfer ratio is 0.7, the impact on the invulnerability of the multi-layer metro network is minimal. When the capacity adjustment coefficients are set at $b = 0.6$ and $c = 0.8$, appropriately improving station service levels can enhance the network's invulnerability. As the number of attacked stations increases, the invulnerability of the metro network gradually decreases. Under the same attack conditions, the multi-layer directed weighted metro network demonstrates stronger invulnerability compared to the single-layer network, and the network's invulnerability is further reduced when cascading failures are considered.

Keywords: cascading failure; multi-layer directed weighted metro network; invulnerability; attack strategy; load distribution; capacity adjustment coefficient

0 引言

截至 2023 年底,我国(不含港澳台地区)内地有 59 个城市开通运营城市轨道交通系统,运营里程为 11 232.65 km,其中,地铁运营里程为 8 547.67 km^[1]。可见:地铁已成为城市轨道交通系统的主体,承担着城市内部大量的乘客流动,为缓解城市交通拥堵发挥着关键作用。随着大城市人口的高度集聚和极端气候事件的频发,人为因素、设备故障、极端天气等造成的地铁车站故障和线路停运,严重影响地铁系统的正常运行。因此,研究地铁网络的抗毁性并提升其运营安全性,可为相关管理部门制定有效的管理措施提供理论支撑。

现有关于地铁网络抗毁性的研究主要集中在网络模型构建和级联失效分析 2 个方面。在网络模型构建方面,大多数研究将地铁车站抽象为网络节点,将相邻车站之间的轨道区间抽象为连边,采用 Space L 法构建单层地铁拓扑网络^[2-4]。然而,随着地铁网络规模的扩大,这种建模方法难以捕捉到不同地铁线路之间的特征差异、相互依赖性以及换乘通道之间的异质性。为解决上述问题,一些学者尝试从多层网络视角构建多层地铁网络模型,以更准确地反映复杂的线路特征差异、相互依赖性以及换乘通道之间的异质性。YIN Dezhi 等^[5]构建了多层有向加权地铁网络模型,分析多层有向加权地铁网络的结构特征。马壮林等^[6]提出多层有向加权地铁网络模型,探讨多层有向加权地铁网络的脆弱性。在网络级联失效分析方面,MOTTER 等^[7]率先提出负载-容量模型,该模型假设节点负载与容量之间

呈简单线性关系。随着研究的深入,一些学者提出更符合实际的非线性负载-容量模型^[8-9]。针对级联失效情况下,早期研究结合网络结构特征采用基于节点度或节点介数的负载分配策略^[10-11],然而这些研究都忽略了车站的容量限制,因此,一些学者从实际客流量出发,提出全有全无客流量重分配法^[12]、剩余容量负载分配法^[13]等分配失效车站的负载,探讨不同负载分配方式缓解级联失效对地铁网络的影响程度。综上所述,现有的地铁网络抗毁性研究取得了一些成果,但多数研究还是构建单层地铁网络,忽略换乘车站与非换乘车站的差异;此外,尽管多数研究考虑了级联失效传播效应,但没有深入探讨换乘车站客流的层间和层内转移比例对网络抗毁性的影响差异。

鉴于此,笔者拟构建多层有向加权地铁网络模型,基于车站实际客流量确定车站初始负载,采用非线性负载容量模型计算车站容量,根据车站重要性确定攻击顺序;选取最大连通子图比和乘客出行效率比作为地铁网络抗毁性的度量指标,探讨不同层间和层内容流转移比例、不同容量调节系数对地铁网络抗毁性的影响,并以 2021 年西安市地铁网络为例进行实证分析,为提升地铁网络运营安全提供理论支撑。

1 地铁网络模型构建与结构性分析

1.1 多层地铁网络模型构建

为研究地铁网络在级联失效下的抗毁性,构建多层地铁网络空间结构模型,记为 $S = (L, G, A, W)$ 。其中, L 为网络层集合, G 为不同网络层之间

的换乘边集合, A 为网络层间的邻接矩阵, W 为网络的边权矩阵。

多层地铁网络的网络层集合表示为 $L = \{L_\alpha \subseteq (N_\alpha, E_\alpha), \alpha \in \{1, 2, \dots, M\}\}$ 。其中, L_α 表示第 α 层网络, N_α 表示第 α 层网络的节点集合, 定义为 $N_\alpha = \{1^\alpha, 2^\alpha, \dots, n^\alpha\}$, n 为第 α 层网络的节点数量; E_α 表示第 α 层网络的连边集合; M 为地铁线路的条数。不同网络层之间的换乘边集合表示为 $G = \{E_{\alpha\beta} \subseteq N_\alpha \times N_\beta; \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, M\}, \alpha \neq \beta\}$, $E_{\alpha\beta}$ 表示第 α 层网络到第 β 层网络的换乘边集合。多层地铁网络的邻接矩阵表示为 $A = \{A^{[\alpha\beta]} = a_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}, i^\alpha \in N_\alpha, j^\beta \in N_\beta, \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, M\}, \alpha \neq \beta\}$, 当 $\alpha = \beta$ 时, $A = \{A^{[\alpha]} = a_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha, i^\alpha, j^\alpha \in N_\alpha\}$ 。当第 α 层网络车站 i 到车站 j 有连边时, $a_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha = 1$; 反之, $a_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha = 0$ 。当第 α 层网络车站 i 到第 β 层网络车站 j 有连边时, $a_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} = 1$; 反之, $a_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} = 0$ 。多层地铁网络的边权矩阵表示为 $W = \{W^{[\alpha\beta]} = w_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}, \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, M\}, \alpha \neq \beta\}$, 当 $\alpha = \beta$ 时, 用 $W = \{W^{[\alpha]} = \{w_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha, i^\alpha, j^\alpha \in N_\alpha\}\}$, $\alpha \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

当 $a_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha = 1$ 时, 边权 $w_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha$ 的计算公式为:

$$w_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha = r_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha + s_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha \quad (1)$$

式中: $r_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha$ 为从车站 i^α 到车站 j^α 的出行时间, 即地铁车辆从车站 i^α 到车站 j^α 的实际运行时间, min; $s_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha$ 为地铁车辆从车站 i^α 到达车站 j^α 后的乘客等待时间, min。

当 $a_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} = 1$ 时, 边权 $w_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}$ 的计算公式为:

$$w_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} = r_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} + s_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中: $r_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}$ 为从车站 i^α 到车站 j^β 的出行时间, 即乘客从车站 i^α 到车站 j^β 的步行时间, min; $s_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}$ 为地铁车辆从车站 i^α 到达车站 j^β 后的乘客等待时间, min, 这里用地铁车辆在车站 j^β 的停车时间来表示。

1.2 多层地铁网络结构特征指标

采用度、网络直径、网络聚集系数和网络相关系数作为衡量多层有向加权地铁网络结构特征指标, 这些指标的含义如下:

1) 度。在多层有向加权地铁网络中, 车站的度值为网络中各车站入度和出度的和。车站的度值越大, 表明该车站越重要, 其计算公式为:

$$k_{i^\alpha} = \sum_{j^\alpha=1, j^\alpha \neq i^\alpha}^{n^\alpha} (a_{j^\alpha i^\alpha}^\alpha + a_{i^\alpha j^\alpha}^\alpha) + \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^M \sum_{j^\beta=1}^{n^\beta} (a_{j^\beta i^\alpha}^{\beta\alpha} + a_{i^\alpha j^\beta}^{\alpha\beta}) \quad (3)$$

式中 k_{i^α} 为 α 层网络车站 i 的度。

对所有车站的度值求平均, 可得到网络的平均度, 其计算公式为:

$$\bar{k} = \frac{1}{M} \sum_{\alpha=1}^M \sum_{i^\alpha=1}^{n^\alpha} k_{i^\alpha}^\alpha \quad (4)$$

式中 $\bar{k}$ 为网络的平均度。

2) 网络直径。在多层有向加权网络中, 网络直径为网络中 2 车站之间最短路径长度的最大值, 其计算公式为:

$$D = \max \{d_{i^\alpha j^\beta}\} \quad (5)$$

式中: D 为网络直径; $d_{i^\alpha j^\beta}$ 为从车站 i^α 到车站 j^β 之间的最短路径长度。

3) 网络聚集系数。在多层有向加权地铁网络中, 网络聚集系数为车站相邻车站数目占车站可能最大连接车站数目的比例, 反映车站与相邻车站的紧密程度或聚集程度^[14], 其计算公式为:

$$P_{i^\alpha} = \frac{g_{i^\alpha}}{f_{i^\alpha}(f_{i^\alpha} - 1)/2} \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^M n^\alpha} \sum_{i^\alpha=1}^{n^\alpha} P_{i^\alpha} \quad (7)$$

式中: P_{i^α} 为车站 i^α 平均聚集系数; g_{i^α} 为与车站 i^α 的相邻车站相连的边数; f_{i^α} 为车站 i^α 的相邻车站个数; P 为网络平均聚集系数。

4) 网络相关系数 γ 。网络的相关系数反映车站间的连接趋势^[15], 其计算公式为:

$$\gamma = \frac{\left[F^{-1} \sum_{e=1}^F y_e z_e \right] - \left[F^{-1} \sum_{e=1}^F \frac{1}{2} (y_e + z_e) \right]^2}{\left[F^{-1} \sum_{e=1}^F \frac{1}{2} (y_e^2 + z_e^2) \right] - \left[F^{-1} \sum_{e=1}^F \frac{1}{2} (y_e + z_e) \right]^2} \quad (8)$$

式中: F 为多层有向加权地铁网络中边的总数; y_e 和 z_e 分别为在边 e 两端车站的节点度。

2 多层地铁网络级联失效模型构建

2.1 车站初始负载

将车站初始负载定义为单位小时内该车站进站、出站和换乘客流量之和, 其计算公式为:

$$Q_{i^\alpha} = \begin{cases} Q'_{i^\alpha} + Q''_{i^\alpha}, & \text{当 } i^\alpha \text{ 为非换乘站} \\ Q'_{i^\alpha} + Q''_{i^\alpha} + Q'''_{i^\alpha}, & \text{当 } i^\alpha \text{ 为换乘站} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Q_{i^α} 为第 α 层网络中车站 i 的初始负载, 人; Q'_{i^α} 、 Q''_{i^α} 和 Q'''_{i^α} 分别为车站 i^α 在单位小时内的进

站客流量、出站客流量和换乘客流量,人。

2.2 车站容量

采用非线性负载容量模型确定车站最大容量,其计算公式为:

$$C_{i^{\alpha}} = \begin{cases} R_{i^{\alpha}}^0 + b \times Q_{i^{\alpha}}^c, & \text{当 } i^{\alpha} \text{ 为非换乘站} \\ R_{i^{\alpha}}^{0'} + b \times Q_{i^{\alpha}}^c, & \text{当 } i^{\alpha} \text{ 为换乘站} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_{i^{\alpha}}$ 为车站 i^{α} 的最大容量,人; $R_{i^{\alpha}}^0$ 为非换乘站 i^{α} 的基本容量,人; $R_{i^{\alpha}}^{0'}$ 为换乘站 i^{α} 的基本容量,人; b 和 c 分别为容量调节系数,满足 $0 < b < 1$ 和 $0 < c < 1$ 。

2.3 攻击策略

从攻击方式来看,攻击策略包括节点攻击和连边攻击2类。相比于连边攻击,节点攻击更易引发网络的广泛中断和服务瘫痪,尤其是在网络级联失效情况下^[16]。根据是否有特定攻击目标,攻击策略分为随机攻击和蓄意攻击。研究发现,蓄意攻击某些重要性更大的车站对地铁网络的破坏更为显著^[17]。车站的重要性通过车站的度中心性、介数中心性、紧密度中心性等指标来衡量^[18]。此外,地铁客流量的变化对车站运营影响显著,客流量也是评估车站重要性的关键指标之一^[19]。参照文献^[6,20],综合考虑度中心性、介数中心性、紧密度中心性与车站客流量因素计算车站重要性,其计算公式如下:

$$I_{i^{\alpha}} = K_{i^{\alpha}} \times B_{i^{\alpha}} \times X_{i^{\alpha}} \times Q_{i^{\alpha}}, \alpha \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (11)$$

式中: $I_{i^{\alpha}}$ 为车站 i^{α} 的重要性; $K_{i^{\alpha}}$ 为车站 i^{α} 的度中心性; $B_{i^{\alpha}}$ 为车站 i^{α} 的介数中心性; $X_{i^{\alpha}}$ 为车站 i^{α} 的紧密度中心性。

2.4 考虑客流负载再分配的级联失效传播过程

在多层有向加权地铁网络中,非换乘车站失效主要影响故障车站及其相邻车站;而换乘车站失效不仅影响故障车站及其相邻车站,还能通过换乘边影响到相邻网络的其他车站。因此,非换乘站失效后,仅需考虑负载向同层网络相邻车站转移;而换乘车站失效后,则需同时考虑负载向相邻网络层和同层网络相邻车站转移。假设车站客流仅在地铁车站内转移,不考虑其他交通方式,客流分配机制将基于客流负载再分配(图1),具体分配规则如下:

1) 非换乘车站负载分配。非换乘车站采用剩余容量负载分配法进行负载分配,其计算公式为:

$$\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}^1 = Q_{i^{\alpha}} \times \frac{C_{j^{\alpha}} - O_{j^{\alpha}}}{\sum_{l \in \Gamma_{i^{\alpha}}} (C_{l^{\alpha}} - O_{l^{\alpha}})} \quad (12)$$

式中: $\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}^1$ 为车站 i^{α} 再分配到相邻车站 j^{α} 的负载,人; $C_{j^{\alpha}}$ 为车站 j^{α} 的容量,人; $O_{j^{\alpha}}$ 为车站 j^{α} 的负载,人; $\Gamma_{i^{\alpha}}$ 为与车站 i^{α} 相邻车站的集合。

2) 换乘车站负载分配。当失效车站为换乘站时,按不同比例将换乘车站客流分配层间网络的换乘车站和同层网络中的相邻车站。

换乘车站客流分配给相邻网络层换乘车站的计算公式为:

$$\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\beta}}^2 = \mu_1 \times Q_{i^{\alpha}} \times \frac{B_{j^{\beta}}}{\sum_{l \in \Gamma_{i^{\alpha}}} B_{l^{\beta}}} \quad (13)$$

式中: $\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\beta}}^2$ 为换乘车站 i^{α} 转移到车站 j^{β} 的负载,人; μ_1 为换乘车站 i^{α} 转移到 β 层网络的客流比例; $\sum_{l \in \Gamma_{i^{\alpha}}} B_{l^{\beta}}$ 为车站 i^{α} 所有相邻车站的介数。

换乘车站客流分配给同层相邻车站,其计算公式为:

$$\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}^3 = \mu_2 \times Q_{i^{\alpha}} \times \frac{C_{j^{\alpha}} - O_{j^{\alpha}}}{\sum_{l \in \Gamma_{i^{\alpha}}} (C_{l^{\alpha}} - O_{l^{\alpha}})} \quad (14)$$

式中: $\Delta Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}^3$ 为车站 i^{α} 分配到相邻车站 j^{α} 的负载,人; μ_2 为换乘车站 i^{α} 留在 α 层的客流比例。

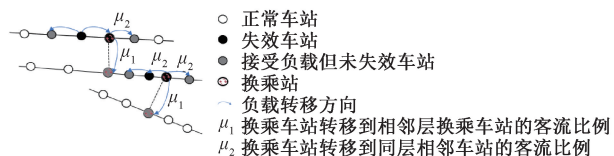


图1 车站客流负载分配

Fig. 1 Station passenger flow load distribution

由于车站失效或客流转移,车站负载将发生动态变化,采用车站负载重分配描述这种变化过程,其计算公式为:

$$Q_{i^{\alpha}}(t) = Q_{i^{\alpha}}(t-1) + \Delta Q_i(t) \quad (15)$$

式中: $Q_{i^{\alpha}}(t)$ 和 $Q_{i^{\alpha}}(t-1)$ 分别为 t 和 $(t-1)$ 时刻车站 i^{α} 的负载,人; $\Delta Q_i(t)$ 为 t 时刻向车站 i^{α} 转移的负载,人。

负载分配需要根据车站负载与车站容量的关系,判断车站是否会发生级联失效。在级联失效过程中,负载重分配会导致失效车站及其相邻车站的负载发生变化。当车站 i^{α} 负载超过其容量,即 $Q_{i^{\alpha}}(t) > C_{i^{\alpha}}$,车站 i^{α} 失效,并触发新一轮的负载重分配;当车站 i^{α} 负载未超出其容量,即 $Q_{i^{\alpha}}(t) \leq C_{i^{\alpha}}$,车站 i^{α} 不失效,不会进行新一轮的负载重分配,级联失效的传播过程结束。

3 多层地铁网络抗毁性评估方法

地铁网络抗毁性评估指标分为结构抗毁性和功能抗毁性评估指标 2 类。分别选取最大连通子图比率和乘客出行效率比作为结构抗毁性和功能抗毁性评估指标,并在此基础上结合博弈论理念提出多层地铁网络抗毁性的综合评价指标。

1) 最大连通子图比。最大连通子图比指地铁网络在遭受攻击后最大连通子图中剩余车站数占原始网络车站总数的比例^[18,20],其计算公式为:

$$\lambda = \frac{U'}{U} \tag{16}$$

式中: λ 为最大连通子图比; U' 为车站失效后剩余网络最大连通子图的车站数; U 为车站失效前网络最大连通子图的车站数。

2) 乘客出行效率比。乘客出行效率比指车站失效后剩余加权网络效率与原始加权网络效率的比值^[5-6],其计算公式为:

$$\eta = \frac{o_n}{o_0} \times 100\% \tag{17}$$

$$o_n = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^M n^{\alpha} \left(\sum_{\alpha=1}^M n^{\alpha} - 1 \right)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}}{t_{i^{\alpha}j^{\alpha}}}, N = \bigcup_{\alpha=1}^M N_{\alpha} \tag{18}$$

式中: η 为乘客出行效率比; o_n 和 o_0 分别为车站级联失效后剩余加权网络效率和原始加权网络效率; $Q_{i^{\alpha}j^{\alpha}}$ 为从车站 i^{α} 到车站 j^{α} 的客流量,人; $t_{i^{\alpha}j^{\alpha}}$ 为从车站 i^{α} 到车站 j^{α} 的最短出行时间,min。

3) 网络综合性能。综合考虑最大连通子图比和乘客出行效率比 2 个因素,提出网络抗毁性综合评估指标,称为网络综合性能,用于定量评估车站失效后的地铁网络抗毁性,其计算公式为:

$$H = \varphi \times \lambda + (1 - \varphi) \times \eta \tag{19}$$

式中: H 为网络综合性能; φ 和 $(1-\varphi)$ 分别为最大连通子图比和乘客出行效率比的权重系数。

4 多层地铁网络抗毁性方法实例分析

4.1 西安市多层地铁网络模型构建

截至 2021 年 6 月 25 日,西安市地铁网络已开通运营 8 条线路,共设车站 152 座,其中,换乘站 13 座。采用 Pajek 软件分别建立单层地铁网络和多层地铁网络。单层地铁拓扑网络包括 152 个节点和 158 条边,多层地铁拓扑网络包括 166 个节点和

174 条边,多层有向加权地铁网络包括 166 个节点和 348 条边。西安市多层地铁网络空间结构如图 2 所示。

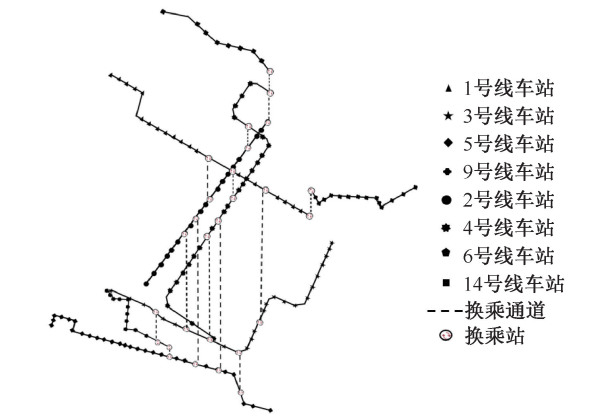


图 2 西安市多层地铁网络空间结构
Fig.2 Spatial structure of multi-layer metro network in Xi'an

采用网络节点数、网络边数、平均度、网络直径、网络聚集系数和网络相关系数反映西安市地铁网络结构特征,西安市单层拓扑网络、多层拓扑网络与多层有向加权网络的计算指标见表 1。

表 1 西安市地铁网络结构指标
Table 1 Structural indicators of Xi'an's metro network

网络结构性指标	单层地铁拓扑网络	多层地铁拓扑网络	多层地铁有向加权网络
节点数	152	166	166
网络边数	159	174	348
平均度	2.08	2.14	3.93
网络直径	48	51	78
网络聚集系数	0	0.006	0.049 7
网络相关系数	0.098	0.288	0.323

由表 1 可知:多层地铁网络的节点数、网络边数、网络平均度、网络直径均大于单层地铁网络,这是因为多层地铁网络考虑了换乘站之间的换乘边;多层有向加权网络的网络边数、平均度、网络直径、网络聚集系数和网络相关系数均大于多层地铁拓扑网络,表明考虑连边权重和方向的网络更贴近实际,网络结构更复杂。

4.2 模型参数的选取

参照文献[6]的研究成果,选取 $b = 0.3, c = 0.8$ 。结合西安市早高峰单位小时的平均客流量,利用式(9)和式(10)分别计算各车站的初始负载和容量。由于数据量较大,随机抽取车站总数的 10%,即 17 个车站的初始负载和容量,见表 2。通过式(11)计算出车站重要度,如图 3 所示。

表 2 代表性车站的初始负载和容量

Table 2 Initial load and capacity of representative stations				人
编号	车站名称	所属路线	初始负载	容量
1	行政中心	2 号线	5 278	7 920
2	体育场	2 号线	5 588	6 098
3	枣园	1 号线	2 809	5 972
4	大雁塔	3 号线	4 107	7 868
5	造字台	6 号线	1 166	5 885
6	渭河南	14 号线	128	5 815
7	高桥	5 号线	152	5 817
8	东三岔	9 号线	889	5 869
9	北大街	1 号线	5 221	7 918
10	市图书馆	2 号线	6 064	6 119
11	钟楼	2 号线	5 844	6 109
12	石桥立交	5 号线	1 275	5 891
13	丈八六路	6 号线	3 836	6 021
14	科技路	3 号线	4 112	7 869
15	文景路	4 号线	4 622	6 056
16	丈八一路	6 号线	5 800	6 108
17	通化门	3 号线	4 523	7 887

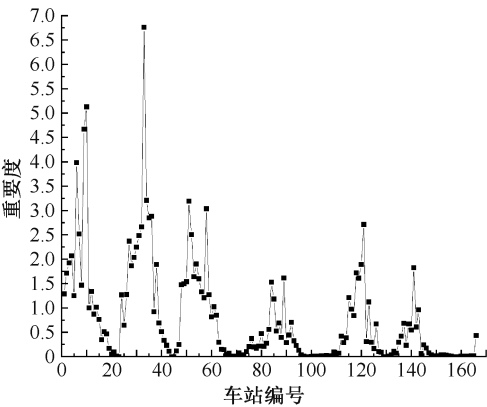


图 3 车站重要度
Fig. 3 Station importance

分别采用直觉模糊层次分析法 (Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process, IFAHP)^[21]和熵权法^[22]确定网络最大连通子图比和乘客出行效率比的主观和客观权重,并采用博弈论的理念确定这 2 个指标的综合权重,见表 3。

表 3 指标综合权重

Table 3 Comprehensive weight of indicators			
权重	IFAHP	熵权法	综合权重
λ	0. 54	0. 42	0. 46
η	0. 46	0. 58	0. 54

4. 3 多层地铁网络级联失效分析

4. 3. 1 基于重要度攻击策略攻击地铁网络

假设 $\mu_1=0.5, \mu_2=0.5$, 根据车站重要性排序依

次攻击西安地铁网络 10% 的车站,攻击顺序见表 4。当攻击目标为换乘站时,考虑乘客换乘意愿,分析车站失效时,乘客选择换乘到相邻网络层车站与转移至同层网络相邻车站的比例对网络抗毁性的影响;当攻击目标为非换乘站时,乘客则转移至同层网络相邻车站。西安多层有向加权地铁网络抗毁性的变化情况如图 4 所示。

表 4 基于车站重要性的车站攻击顺序
Table 4 Station attack sequence based on station importance

排序	车站名称	线路	性质
1	北大街	2 号线	换乘站
2	北大街	1 号线	换乘站
3	五路口	1 号线	换乘站
4	通化门	1 号线	换乘站
5	钟楼	2 号线	非换乘站
6	小寨	3 号线	换乘站
7	通化门	3 号线	换乘站
8	南稍门	5 号线	换乘站
9	永宁门	2 号线	非换乘站
10	南稍门	5 号线	换乘站
11	安远门	2 号线	非换乘站
12	康复路	1 号线	非换乘站
13	大雁塔	3 号线	换乘站
14	龙首原	2 号线	非换乘站
15	行政中心	2 号线	换乘站
16	大明宫	2 号线	非换乘站
17	长月坡	1 号线	非换乘站

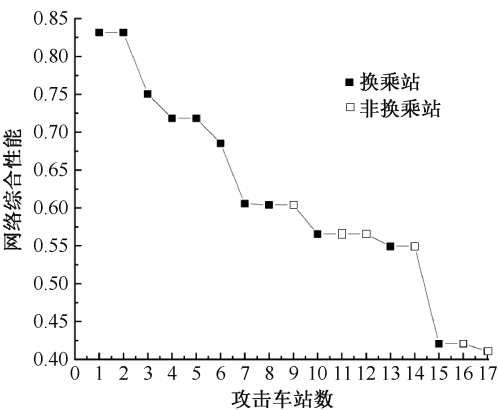


图 4 西安市地铁网络综合性能变化
Fig. 4 Comprehensive performance changes in Xi'an metro network

由图 4 可知:在西安市地铁网络中,换乘站的重要性高于非换乘站。在被攻击的前 10% 车站中,10 个为换乘站,7 个为非换乘站;并且在被攻击的 10 个车站中,有 8 个车站为换乘站。随着攻击车站数的增加,西安市地铁网络综合性能逐步下降;攻击

17 个车站后,网络综合性能降到 0.45 以下,表明西安市地铁网络抗毁性随攻击车站数量增多而逐渐减弱。

4.3.2 换乘系数 μ_1 和 μ_2 的影响

为进一步探讨层间和层内客流转移比例对地铁网络抗毁性的影响,分别探讨 $\mu_1 = 0.1 \sim 0.9$ 和 $\mu_2 = 0.9 \sim 0.1$ 对地铁网络抗毁性的影响。不同客流转移比例对地铁网络抗毁性的影响如图 5 所示,其中,黑色实心 and 空心图形分别表示换乘站和非换乘站。

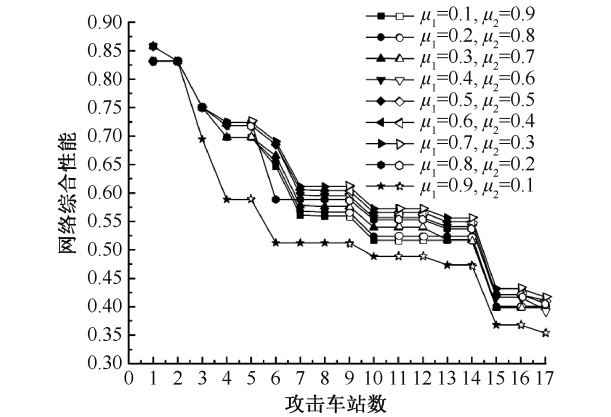


图 5 客流转移比例对地铁网络抗毁性的影响
Fig.5 Impact of passenger transfer ratios on invulnerability of metro network

由图 5 可知:随着攻击车站数量的增加,地铁网络综合性能逐步下降,表明网络抗毁性随攻击范围扩大而逐渐减弱。当层间客流转移比例从 0.1 (即 $\mu_1 = 0.1, \mu_2 = 0.9$) 逐渐增加至 0.7 (即 $\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.3$) 时,无论攻击车站多少,网络的综合性能均能显著提升,表明适度提高层间乘客换乘比例可减缓多层地铁网络的失效传播,增强网络抗毁性。然而,当层间客流转移比例从 0.7 (即 $\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.3$) 继续增加至 0.9 (即 $\mu_1 = 0.9, \mu_2 = 0.1$) 时,网络综合性能显著下降,网络抗毁性明显减弱,表明过高的层间客流转移比例可能导致换乘车站承载压力过大,进一步恶化级联失效的传播范围和速度。因此,笔者认为层间客流转移比例为 0.7 时,多层地铁网络抗毁性受到影响最小,此时多层地铁网络能够在层间和层内客流分配之间实现良好的平衡,最大限度地缓解失效传播对整体网络性能的影响。

4.3.3 容量调节系数 b 的影响

当层间客流转移比例为 0.7 时,探讨不同的 b 对地铁网络抗毁性的影响。假设 $c = 0.8$, 分别取 $b = 0.1, 0.2, \dots, 0.9$, 根据车站重要性依次模拟同时攻击不同数量的车站,共攻击 10% 的车站 (即 17 个车站)。不同 b 对地铁网络抗毁性的影响如图 6 所示。

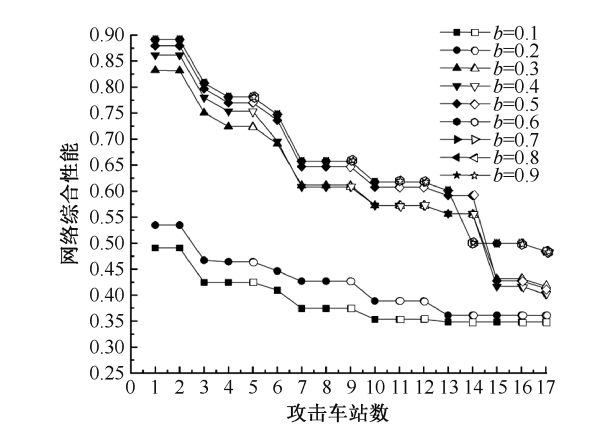


图 6 容量调节系数 b 对地铁网络抗毁性的影响
Fig.6 Impact of capacity adjustment factor b on invulnerability of metro network

由图 6 可知:网络综合性能随着 b 的变化和攻击车站数量的增加呈逐渐下降趋势,表明攻击范围扩大将持续削弱网络抗毁性。当 b 从 0.1 增加至 0.6 时,网络综合性能显著提升,表明适当提高 b 可提高车站容量,增加网络抵御风险的能力;当 b 从 0.6 增加至 0.9 时,网络综合性能变化趋于平稳,表明过高的 b 对网络抗毁性的提升效果有限。因此,笔者认为 $b = 0.6$ 是非常合适的,网络综合性能达到最优状态,不仅在提高车站容量和优化资源分配之间实现良好平衡,而且能最大程度地增加网络的抗毁性。

4.3.4 容量调节系数 c 的影响

为进一步分析 c 对地铁网络抗毁性的影响,取 $b = 0.6$, 分别取 $c = 0.1, 0.2, \dots, 0.9$, 根据车站重要性依次模拟同时攻击不同数量的车站,共攻击 10% 的车站 (即 17 个车站)。不同 c 对地铁网络抗毁性的影响如图 7 所示。

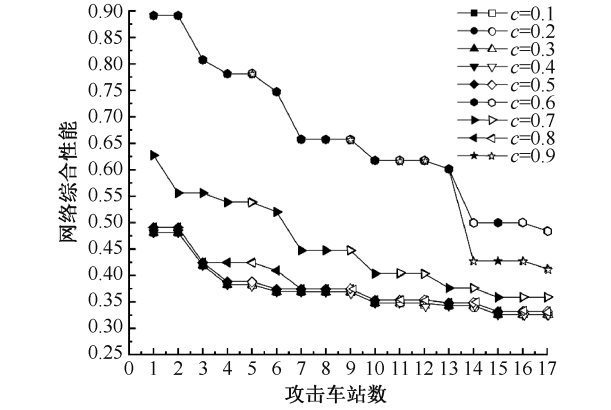


图 7 容量调节系数 c 对地铁网络抗毁性的影响
Fig.7 Impact of capacity adjustment factor c on invulnerability of metro network

由图 7 可知:在 b 保持不变的情况下,网络综合性能随着 c 值的变化和攻击车站数量的增加呈逐渐下降趋势,表明攻击范围扩大将持续削弱网络抗毁性。当 c 从 0.1 增加至 0.8 时,网络综合性能逐步提升,表明适当提高 c ,能够显著增强车站的服务能力,减少级联失效对网络性能的影响,从而提高地铁网络的抗毁性;当 c 从 0.8 增加至 0.9 时,网络综合性能变化趋于平稳,表明过高的 c 对网络抗毁性的提升效果有限。因此, $c=0.8$ 是非常合适的,网络综合性能达到最优状态,不仅在提高车站容量和优化资源分配之间实现良好平衡,而且最大程度地增加了网络的抗毁性。

4.3.5 不同网络场景下的对比分析

在 $b = 0.6, c = 0.8, \mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.3$ 的条件下,根据车站重要性依次模拟增加攻击车站数量,共攻击 10% 的车站(即 17 个车站),探讨单层与多层网络、是否发生级联失效对地铁网络抗毁性的影响。不同网络场景对地铁网络抗毁性的影响如图 8 所示。

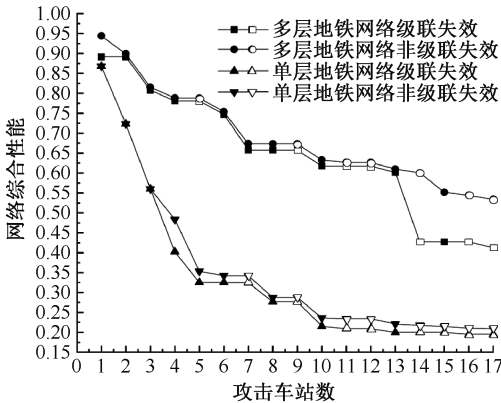


图 8 不同网络场景下对比分析

Fig. 8 Comparative analysis in different network scenarios

由图 8 可知:随着攻击车站数量的增加,地铁网络的综合性能逐渐下降,表明网络抗毁性随攻击范围扩大而逐渐减弱。在相同的攻击场景下,多层地铁网络比单层地铁网络表现出更强的抗毁性,这主

要是因为多层地铁网络通过设计换乘车站和换乘通道,增强了网络的冗余性,使得即使部分车站失效,仍能通过其他通道和路径分担客流,保持网络的正常运行。无论是单层地铁网络,还是多层地铁网络,考虑级联失效后的网络抗毁性均有所下降,这主要是因为失效车站的负载转移会影响到与其相邻的车站,进而触发更多的失效,形成级联效应,导致地铁网络的抗毁性进一步减弱。

5 结 论

1) 综合考虑列车区间运行时间和到站停车时间,以及乘客换乘步行时间和候车等候时间的多层有向加权地铁网络模型更贴近实际,网络结构更复杂;考虑非换乘车站和换乘车站的不同负载再分配,更能准确反映多层有向加权地铁网络级联失效下的乘客选择行为。

2) 根据车站重要性排序,依次攻击西安地铁网络 10% 的车站,发现当层间和层内客流转移比例分别为 0.7 和 0.3 时,多层地铁网络抗毁性受到的影响最小;容量调节系数 $b = 0.6, c = 0.8$ 是最合适的,适当提高车站的服务水平可有效减少级联失效对网络的影响,有助于提高网络的抗毁性。

3) 随着攻击车站数量的增加,地铁网络的综合性能逐渐下降,表明其抗毁性逐渐减弱。在相同的攻击场景下,多层地铁网络比单层地铁网络表现出更强的抗毁性,这主要得益于多层网络的冗余性设计;然而,无论是单层地铁网络,还是多层地铁网络,考虑级联失效的影响后,地铁网络抗毁性有所下降,表明级联失效会加剧网络崩溃的风险,进一步削弱系统的稳定性。

4) 文中主要考虑了地铁网络在级联失效下的抗毁性,没有考虑地铁与其他公共交通的衔接问题。未来研究将深入探讨地铁-公交网络、地铁-公交-共享单车网络在级联失效下的抗毁性,以优化综合交通系统。

参 考 文 献

[1] 侯秀芳,冯晨,燕汉民,等. 2023 年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 10-16.
HOU Xiufang, FENG Chen, YAN Hanmin, et al. Overview of urban rail transit operational lines in Chinese mainland in 2023[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(1): 10-16.

[2] 邓旭东,王雪,徐文平,等. 城市地铁网络脆弱性对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 152-156.
DENG Xudong, WANG Xue, XU Wenping, et al. Comparative analysis of vulnerability of urban metro network[J].

- China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 152-156.
- [3] SUN Lishan, HUANG Yuchen, CHEN Yanyan, et al. Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing, China[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 108: 12-24.
- [4] 马敏, 胡大伟, 刘杰, 等. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 141-149.
- MA Min, HU Dawei, LIU Jie, et al. Invulnerability analysis of urban rail transit network based on weighted passenger flow[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 141-149.
- [5] YIN Dezhi, HUANG Wencheng, SHUAI Bin, et al. Structural characteristics analysis and cascading failure impact analysis of urban rail transit network: from the perspective of multi-layer network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 218: DOI: 10.1016/j.res.2021.108161.
- [6] 马壮林, 邵逸恒, 舒兰, 等. 多层网络视角下地铁网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 164-172.
- MA Zhuanglin, SHAO Yiheng, SHU Lan, et al. Vulnerability analysis of metro network from perspective of multi-layer network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 164-172.
- [7] MOTTER A E, LAI Yingcheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): DOI: 10.1103/PhysRevE.66.065102.
- [8] DOU Binglin, WANG Xueguang, ZHANG Shiyong. Robustness of networks against cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(11): 2310-2317.
- [9] 王学光, 张爱新, 窦炳琳. 复杂网络上的非线性负载容量模型[J]. 计算机科学, 2021, 48(6): 282-287.
- WANG Xueguang, ZHANG Aixin, DOU Binglin. Non-linear load capacity model of complex networks[J]. Computer Science, 2021, 48(6): 282-287.
- [10] HONG Chen, ZHANG Jun, DU Wenbo, et al. Cascading failures with local load redistribution in interdependent Watts-Strogatz networks[J]. International Journal of Modern Physics C, 2016, 27(11): DOI: 10.1142/S012918311650131X.
- [11] 李从东, 李文博, 曹策俊, 等. 面向级联故障的相依网络鲁棒性分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 538-548.
- LI Congdong, LI Wenbo, CAO Cejun, et al. Robustness analysis of interdependent networks for cascading failure[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 538-548.
- [12] 刘朝阳, 吕永波, 刘步实, 等. 城市轨道交通网络级联失效抗毁性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 82-87.
- LIU Zhaoyang, LYU Yongbo, LIU Bushi, et al. Cascading failure resistance of urban rail transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(5): 82-87.
- [13] PENG Xingzhao, YAO Hong, DU Jun, et al. Invulnerability of scale-free network against critical node failures based on a renewed cascading failure model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 421: 69-77.
- [14] 来逢波, 许冰, 续颖, 等. 高铁复杂网络拓扑特征及节点中心性研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2022, 52(6): 14-22.
- LAI Fengbo, XU Bing, XU Ying, et al. Study on topological characteristics and node centrality of high-speed railway complex network[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2022, 52(6): 14-22.
- [15] NIE Sen, WANG Xuwen, WANG Binghong. Effect of degree correlation on exact controllability of multiplex networks[J]. Physica A, 2015, 436(15): 98-102.
- [16] LU Zheming, LI Xinfeng. Attack vulnerability of network controllability[J]. Plos One, 2016, 11(9): DOI: 10.3390/su11051335.
- [17] SHI Jiangang, WEN Shiping, ZHAO Xianbo, et al. Sustainable development of urban rail transit networks: a vulnerability perspective[J]. Sustainability, 2019, 11(5): DOI: 10.3390/su11051335.
- [18] 杨景峰, 朱大鹏, 赵瑞琳. 城轨网络站点重要度评估与级联失效抗毁性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 161-167.
- YANG Jingfeng, ZHU Dapeng, ZHAO Ruilin. Evaluation of station importance and cascading failure resistance analysis of urban rail transit network[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 161-167.
- [19] 徐澍钡, 初宪武, 王运明, 等. 基于客流量的城市轨道交通网络站点重要度评估方法[J]. 大连交通大学学报,

2021, 42(4): 18-22,37.

XU Shukun, CHU Xianwu, WANG Yunming, et al. Evaluation method of station importance of urban rail transit network based on passenger flow[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(4): 18-22,37.

[20] 蔡鉴明, 邓薇. 长沙地铁网络复杂特性与级联失效鲁棒性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1 587-1 596.

CAI Jianming, DENG Wei. Complex characteristics of Changsha metro network and robustness analysis of cascading failures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1 587-1 596.

[21] XU Zeshui, LIAO Huchang. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(4): 749-761.

[22] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical during the 10th five-year of China[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(1): 34-42.

作者简介：牛路明（2000—），女，河南许昌人，硕士研究生，主要研究方向为城市轨道交通运营组织与优化。E-mail: 2022134030@chd.edu.cn。



《中国安全科学学报》再次被收录为“中国科技核心期刊”



经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,《学报》再次被收录为“中国科技核心期刊”。根据《中国科技期刊引证报告(核心版)》(2024年版),2023年《学报》影响因子为1.702(2 165种自然科学领域科技期刊的影响因子平均值为1.068),总被引频次为3 946次(2 165种核心期刊均值为1 673次)。