



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

全日制专业学位研究生 专业实习报告

学 院	<u>交通科学与工程学院</u>
姓 名	<u>刘力宁</u>
学 号	<u>ZY2013306</u>
导 师	<u>陈鹏</u>

北京航空航天大学研究生院

2022 年 09 月 30 日

毕业实习是研究生培养计划中的重要组成部分，是在进行专业学习后不可缺少的重要环节。它对培养我们的实际操作能力有很大的意义，是我们走向工作岗位的必要准备。通过专业实习，我们可以更广泛直接地了解社会需求、增强对社会的适应性、培养自己的实践能力、缩短与一名专业技术人员的距离。

因此，我于 2022 年 3 月到 2022 年 9 月期间进入北京智行汇通科技有限公司进行专业实习。实习期间，我担任“数据分析实习生”职位，参与完成数据分析、建模仿真、节点重要性研判、路网态势评估等工作。

此次实习使我充分了解了交通信号控制的基本生产实践，熟悉了各类典型产品的工作原理、技术参数、结构特点，初步学习了综合运用“交通信息采集与集成”、“交通运输系统分析技术”、“交通运输系统规划”等课程知识，掌握了部分建模、仿真、优化的实际知识，印证和巩固了已学的专业理论。同时，在生产实践中获取了对于专业知识的实际认知，加深了对交通行业在国民经济中的地位、作用、发展趋势的认识，在专业知识的应用方面有了较明显的长进，锻炼了分析和解决工程实际问题的能力。

一、实习目的

在硕士研究生阶段的课程学习中，我们曾从多个维度理解和研究在现实生活中的交通现象，包括：交通仿真、交通规划、交通数据统计建模与分析、交通运输系统分析等。但是，交通是从生活实际中延伸出来的学科，如果不把学习的专业理论应用到现实的交通场景中，很难对整体交通系统拥有深入的认识。因此，有必要通过专业实习，加深对于交通专业知识的理解程度，并了解不同理论的应用场景。

具体来说，专业实习有以下目的：

- 1.熟悉工程技术人员的工作职责和工作程序，获得组织和管理生产的初步知识，虚心向工人和技术人员学习，增强大众意识、劳动观点和社会责任感。

- 2.在学习理论知识后，通过专业实习，在了解企业概况的基础上，对与交通理论知识应用密切相关的某一方面的业务活动进行详细调查和系统分析，建立智能交通系统与交通态势评估的整体概念，运用专业知识去发现问题和解决问题，增强业务实践能力。

- 3.了解现实工作内容，接触实际交通数据，在对实际交通数据进行处理的过程

程中，加深对交通行业不同理论模型和经典方法的理解。

4.通过实习，对实际工作和学校内的科研活动之间的区别有所了解，理解科研成果应用落地的方法和流程，体验行业内企事业单位的工作内容和模式，助力未来的科研和就业。

二、实习公司简介

北京智行汇通科技有限公司成立于 2015 年 10 月。以提升城市交通管理的快速反应能力、公众出行的快捷服务能力为己任，依托智能交通信号控制专业技术与行业经验，创造性应用大数据分析技术、人工智能技术、移动互联网技术，打造实战化“云+端”城市交通信号综合应用软件产品体系，并为未来智能网联汽车产业链提供“专项、专业、专精”的交通信号智慧控制与数据信息服务。

公司的主营业务包括有：信号控制、领航交警、应急通行、态势监管，并面向不同交通场景提出多种解决方案，如：交通信号管控方案、应急通行保障方案、交通设备运维管理方案、交通信号优化服务方案等。以应用最为广泛的交通信号管控方案为例，公司自主研发搭建了互联网智能交通信号控制综合应用平台。此系统由三层逻辑架构构成。第一层为通用信号机网关，用于完成与外场信号机或内场信号控制系统的控制功能对接，从而实现对外场信号机的实时数据获取与长臂控制。第二层为数据层，包括分布式数据库和 ETL 数据处理服务、内部数据交换服务、GIS 地图服务、互联网数据接入与发布服务、基础 UTC 控制服务、AI 智能分析服务等一系列后台数据处理与交换服务软件。第三层为应用层，包括管控中心使用智能交通信号综合管控平台，交通信号移动 APP 应用和互联网交通信息服务（信息发布）。

目前，公司已在全国范围内，成功实施众多统一智能交通信号管控工程，包括山西省忻州市、湖北省黄石市等。

三、实习内容

在 2022 年的 3 月至 9 月，我于北京智行汇通科技有限公司实习，在公司担任数据分析实习生，共完成建模仿真、数据挖掘、态势评估、节点重要性研判、信号失效评价等多部分内容。

其中，建模仿真基于交通仿真模拟软件 SUMO 实现，建立现实路网的仿真

场景，并加载与现实交通系统运行状况相同的仿真车流和交叉口控制模式，进行模拟仿真；数据挖掘基于 Python 语言实现，依托交叉口车辆检测数据，还原车辆行驶路径和通行时间。同时，依托交叉口信控数据，还原不同时间段的路网交叉口信号控制方案；态势评估基于路网宏观基本图实现，以 10s 为间隔进行数据节点集聚，进行基本图标定；节点重要性研判基于车辆检测数据，结合统计学原理，应用客观加权方法，建立路网关键节点识别模型；信号失效评价面向关键交叉口信号灯异常场景，从交通层面和复杂网络层面选定研究指标，进行拥堵传播效应特征评价。

具体的工作内容如下：

1 建模仿真

1.1 研究路网概况

研究路网选用河北省保定市中心城区路网，覆盖 120 余个交叉口和 200 余条路段。其中，研究路段涵盖多种道路等级，包括：主干路、次干路、支路等。不同道路具有不同车道数，以双向四车道和双向六车道最为普遍。部分交叉口存在展宽现象。研究路网的空间分布如图 1 所示。

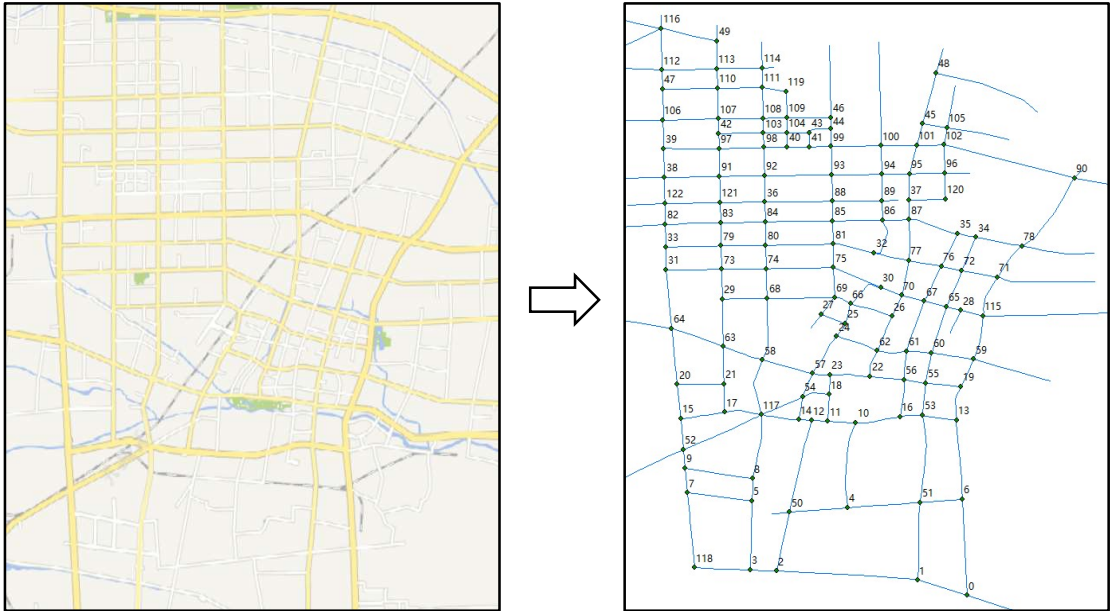


图 1 研究路网空间分布图

在此基础上，使用 SUMO 建立城市道路仿真环境，如图 2 所示。

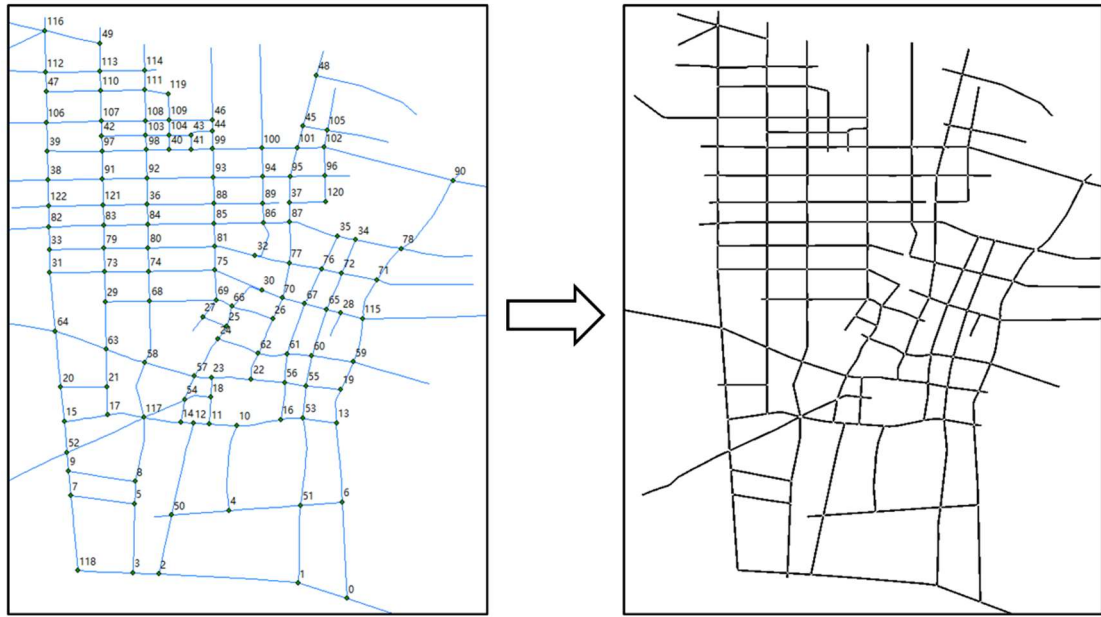


图 2 城市道路建模环境

2 数据挖掘

2.1 研究数据概况

研究数据包括原始的交叉口检测数据和交叉口信号控制方案数据。

经过算法转换，得到交叉口检测数据包含被检测车辆通过交叉口的多种信息，包括：车牌号、交叉口 ID、通行时间、车道 ID 等，转换后的数据部分示例如表 1 所示。选定研究时段为 2021 年 9 月 1 日(周三)的高峰时段。

表 1 交叉口检测数据部分示例

车牌号	通行时间	路口 ID	车道 ID	日期
冀 F038Q0	16:35:52	137801	137801_1	2021/9/1
冀 F038Q0	16:37:59	137802	137802_2	2021/9/1
冀 F038U9	17:26:40	186014	186014_0	2021/9/1
...

转换得到的交叉口信号控制方案数据包含研究路网中各信号交叉口的信号控制参数，包括：路口 ID、周期时长、相位差、相序、控制方向、绿灯时间等数据信息，原始数据部分示例如表 2 所示，其中，控制方向与原始数据中数字索引的对应关系如图 3 所示。

表 2 交叉口信号控制方案数据部分示例

方案 ID	路口 ID	周期 时长	相位差	相序 控制方向 绿灯时间	相序 控制方向 绿灯时间	相序 控制方向 绿灯时间
0	137801	150s	0	1 2+6 40	2 1+5 35	...
1	137802	120s	11s	1 1+5 32	2 4+8 20	...
2	137802	135s	0	1 4+8 40	2 3+7 25	...
3	137802	120s	55s	1 3+7 35	2 2+6 30	...
...

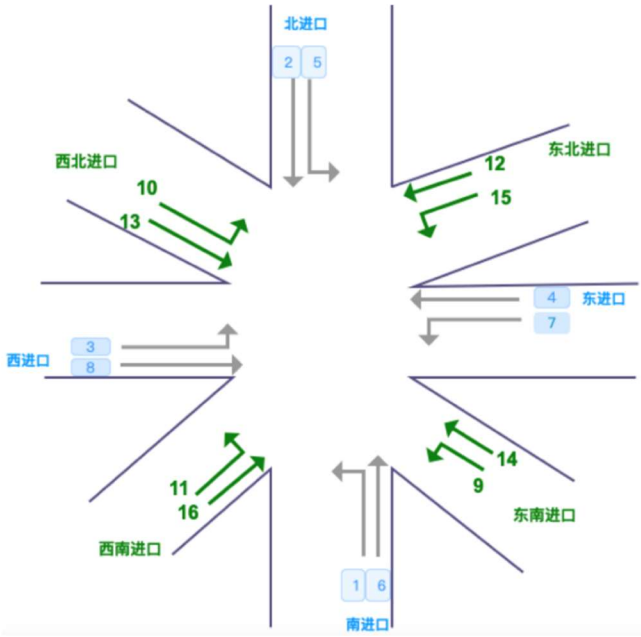


图 3 控制方向与原始数据中数字索引的对应关系

2.2 车辆行驶路径还原

在仿真路网中还原数据集中被检测车辆的行驶路径，以某车为例，还原得到的车辆路径如图 4 所示。

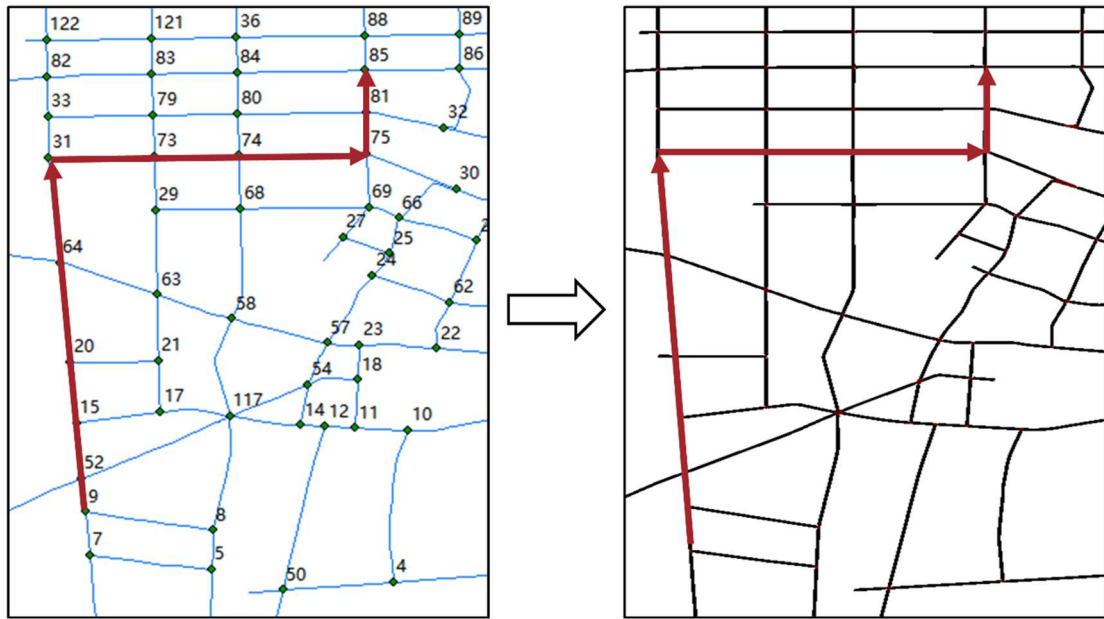


图 4 某车车辆路径还原图

2.3 交叉口信号控制方案还原

在仿真路网中还原数据集中交叉口的信号控制方案，以某交叉口为例，还原得到的信号控制方案如图 5 所示。

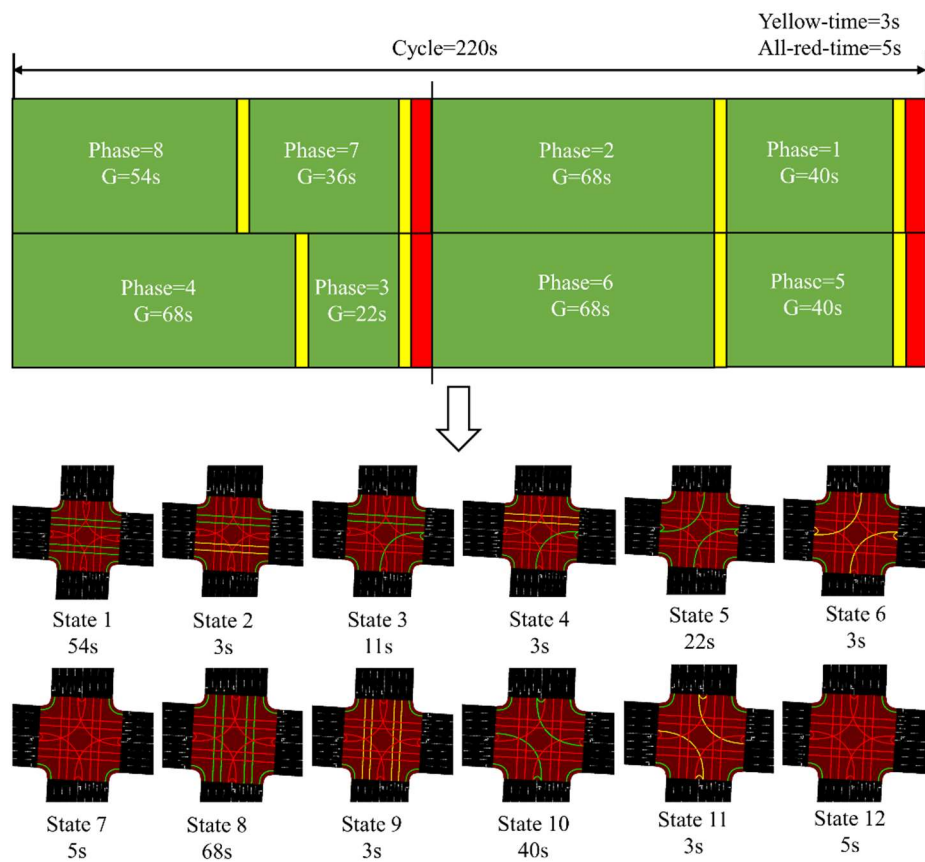


图 5 某交叉口信号控制方案还原图

3 路网态势评估

3.1 路网宏观基本图

在城市路网仿真环境中还原车辆行驶和交叉口信号控制后，进行仿真模拟，输出反映交通系统运行状态各类型参数，包括：行驶车辆数、车辆延误、车辆平均行驶速度等，进行不同角度的路网态势评估。

在实习中，路网运行态势评估主要通过路网宏观基本图实现。依据仿真模拟输出反映系统状态的数据点，以 10s 为间隔进行集聚，进行基本图标定。标定主要使用路网宏观交通数据，具体包括“路网内累计车辆数”和“路网平均流量”两类数据，统计方式分别如（1）和（2）所示。

$$N = N_{veh} - N_{out} + N_{in} \quad (1)$$

其中， N 表示路网内累计车辆数； N_{veh} 表示当前仿真步长中路网内存在的车辆数； N_{out} 表示当前仿真步长流出路网的车辆数； N_{in} 表示当前仿真步长流入路网的车辆数。

$$Flow = \frac{\sum_{r=1}^n (q_r l_r)}{\sum_{r=1}^n (l_r)} \quad (2)$$

其中， $Flow$ 表示路网平均流量； q_r 表示当前仿真步长中路段 r 的流量，单位为 veh/h ； l_r 表示路段 r 的长度。因此路网平均流量是路段流量关于路段长度的加权。

以 10s 作为一个仿真步长，输出在出行高峰时段，城市路网仿真环境中的“路网内累计车辆数”和“路网平均流量”，并进行宏观基本图标定，标定结果如图 6 所示。

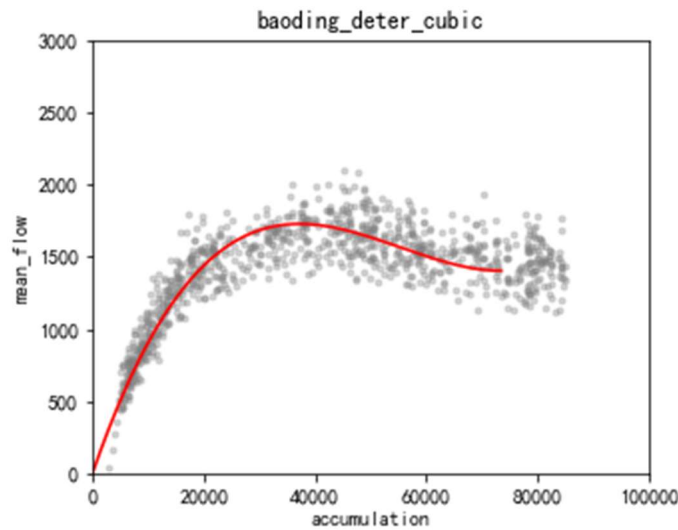


图 6 路网宏观基本图

3.2 结果分析

由图 6 可知：在研究网络区域中，路长加权平均流量约为 1750 辆，随着路网内累计车辆数的增加，路长加权平均流量先上升后下降，临界累计车辆数约为 35000 辆。

4 节点重要性研判

对于网络 G 来说，不同重要性的节点失效所引发的网络级联失效规模存在较大差别。当网络非关键节点出现失效时，可能由于弹性等因素自行恢复，无法对全局网络造成实质性影响。反之，当网络关键节点出现失效时，由于无法忽略的网络传播行为，极有可能对全局网络运行产生影响，引起较大规模的交通拥堵现象。换言之，关键节点对于城市路网运行的影响不可忽视，且关键节点对于网络研究具有重大的理论价值和现实意义。因此，本部分内容综合考虑交叉口运行特性，通过客观加权评价方法，建立网络节点关键性评价模型，实现城市路网关键节点的识别。

4.1 节点运行特性

所考虑的交叉口运行特性具体包括：静态拓扑特性、动态交通流特性、信号控制特性和供需水平时变特性。

静态拓扑特性通过节点度与节点介数中心性表示。节点度反映了该节点的局部影响能力，节点介数中心性反映了该节点在静态网络结构中的全局关联能力。节点*i*的节点度 D_i 和节点介数值 B_i 的计算方式如下

$$D_i = \sum_{j \in \Gamma_i} \rho_{ij} \quad (3)$$

$$B_i = \sum_{\substack{u, w \\ i \neq u \neq w}} [N_{uw}(i)/N_{uw}] \quad (4)$$

其中， Γ_i 表示节点*i*的邻接节点集合， $\rho_{ij} = 1$ 表示节点*i*与其邻接节点*j*相连接，否则， $\rho_{ij} = 0$ ， N_{uw} 表示连接任意两个不相邻节点*u*和*w*的最短路径数量， $N_{uw}(i)$ 表示节点*u*和节点*w*之间的最短路径中经过节点*i*的数量。

经计算，各交叉口的静态拓扑特性，即节点度和节点介数中心性的分布如图 7 所示。

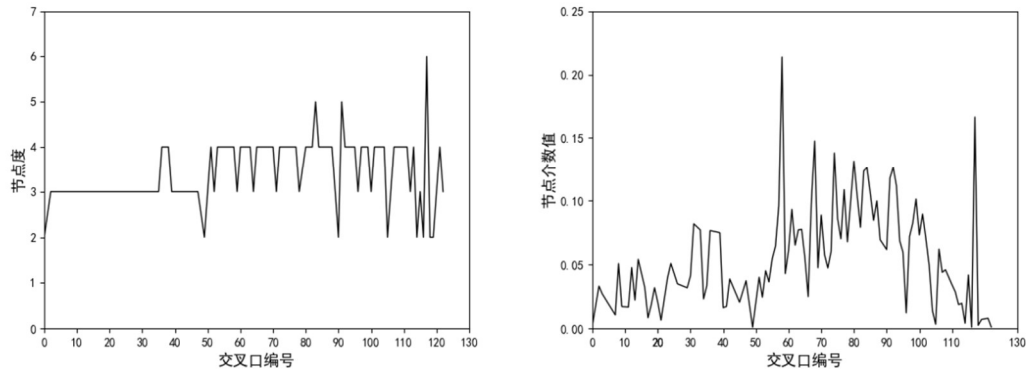


图 7 各交叉口的静态拓扑特性分布

动态交通流特性通过交叉口交通量和交叉口平均车速表示。交叉口交通量反映了交通出行主体对于此节点的交通需求，交叉口平均车速反映了此节点的车流通行时间。节点 i 的交通量 N_i 和速度 V_i 的计算方式如下

$$N_i = \sum_e n_e \quad (5)$$

$$V_i = \frac{1}{\theta} \sum_a v_a \quad (6)$$

其中， n_e 表示进口道 e 的交通量， θ 表示节点 i 的进口道与出口道数量之和， v_a 表示节点 i 各进口道、出口道的车辆平均速度。

经计算，各交叉口的动态交通流特性，即交叉口交通量和交叉口平均车速的分布如图 8 所示。

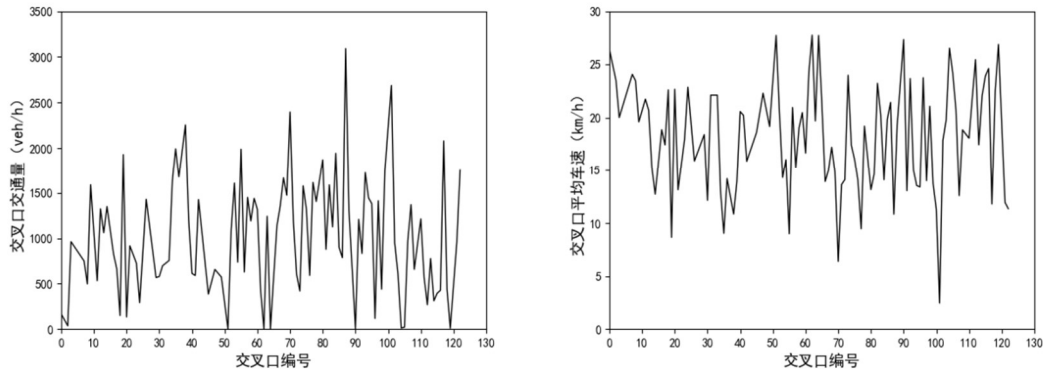


图 8 各交叉口的动态交通流特性分布

信号控制特性通过交叉口饱和度表示。饱和度是交叉口信号控制方案的重要参数，反映了此节点的交通供需情况。节点 i 的饱和度 α_i 的计算方式如下

$$\alpha_i = \frac{Q}{\lambda S} \quad (7)$$

其中， Q 表示节点 i 的关键车道流量， λ 表示此车道所对应的绿信比， S 表示此

车道所对应的饱和流率。

经计算，各交叉口的信号控制特性，即饱和度的分布如图 9 所示。

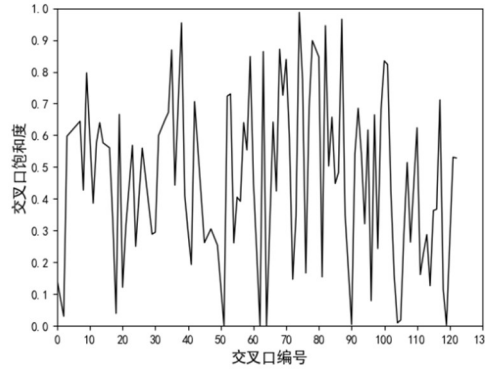


图 9 各交叉口的信号控制特性分布

供需水平时变特性通过交叉口饱和度标准差表示，反映了此节点随时间变化的交通供需波动。节点*i*的饱和度标准差 σ_i 的计算方式如下

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \mu)^2}{n}} \quad (8)$$

其中， n 表示饱和度样本总数， x_t 表示节点*i*的饱和度序列， μ 表示饱和度样本均值。

经计算，各交叉口的供需水平时变特性，即饱和度标准差的分布如图 10 所示。

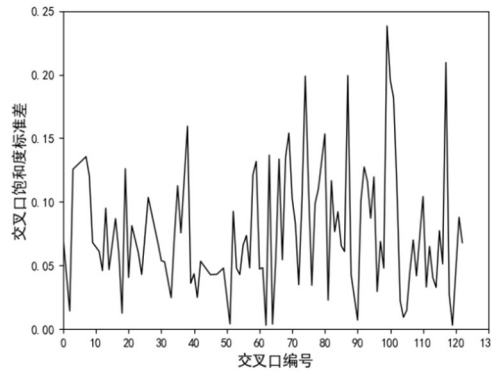


图 10 各交叉口的供需水平时变特性分布

4.2 客观加权方法

节点重要性主要通过客观加权方法——CRITIC 方法进行研究。客观加权评价法和主观加权评价法是基于多维数据的两类常用赋权评价方法。与主观评价法不同，客观评价法避免了由于人的主观认知而引起的评价偏差，完全利用数据自身的客观属性进行科学评价，显示出特定标准在评价时的实际影响。

CRITIC 法是客观加权评价法的代表性方法之一, 考虑了不同评价指标间的对比强度和冲突关系, 为多指标决策问题提供各指标的客观权重, 从而进行相对重要性评价。对比强度指某个指标在其分布序列中的波动范围, 通过标准差表示, 标准差越大, 则波动范围越大, 权重越高。冲突关系指多个指标间的相关性, 通过相关系数表示, 若存在较强的正相关, 则其冲突性越小, 权重越低。

由于各交叉口平均速度间的波动性较大, 且平均速度与交通量存在相关性, 所以本研究选用 CRITIC 法进行客观评价。CRITIC 法计算各指标权重的步骤包括: ①原始数据矩阵建立, ②无量纲化处理, ③指标对比强度分析, ④指标冲突性分析, ⑤信息量呈现, ⑥客观权重计算。

①原始数据矩阵建立

假设有 n 个待评价样本, p 项评价指标, 则形成原始指标数据矩阵 X

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中, x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项评价指标的数值, 且满足 $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq p$ 。

②无量纲化处理

为消除量纲对评价结果的影响, 通过正向归一化和逆向归一化对各指标进行无量纲化处理。当某个指标的值越大, 最终的量化评价值越大时, 通过正向归一化进行处理

$$x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (10)$$

当某个指标的值越大, 最终的量化评价值越小时, 通过逆向归一化进行处理

$$x_{ij}' = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (11)$$

③指标对比强度分析

指标对比强度指某个指标在其分布序列中的波动范围, 以标准差的形式来表现, 即

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}' \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij}' - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, S_j 为第 j 个指标的标准差。

④指标冲突性分析

指标冲突性指多个指标间的相关性，以相关系数的形式来表现

$$R_j = \sum_{i=m}^p (1 - r_{mn}) \quad (13)$$

其中， r_{mn} 表示评价指标 m 和 n 之间的相关系数。

⑤信息量呈现

$$C_j = S_j \sum_{m=1}^p (1 - r_{mn}) = S_j \cdot R_j \quad (14)$$

当信息量 C_j 越大，指标 j 在整个评价指标体系中的作用越大，其权重就越高。

⑥客观权重计算

综上，指标 j 的客观权重 W_j 为：

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^p C_j} \quad (15)$$

4.3 关键节点识别模型

基于客观评价方法——CRITIC 法，分析交叉口不同特性参数对于节点关键性的影响程度，计算得到不同特性的客观权重如表 3 所示，建立节点关键性评价模型 $K_i = \sum \omega_n \cdot F_i$ ，并以此实现路网关键节点的识别。

表 3 交叉口不同特性的客观权重

		对比强度	冲突性	指标信息量	客观权重
$D(i)$	节点度	0.185	2.775	0.153	14.96%
$B(i)$	介数中心性	0.150	2.975	0.446	13.00%
$N(i)$	交叉口交通量	0.229	2.622	0.601	17.53%
$V(i)$	交叉口平均车速	0.097	5.487	0.532	15.50%
$\alpha(i)$	饱和度	0.303	2.604	0.790	23.04%
$\sigma(i)$	饱和度标准差	0.226	2.421	0.548	15.98%

在此基础上，获取路网各交叉口的关键性量化值，其中前十位关键交叉口 ID 如表 4 所示，其空间分布如图 11 所示。

表 4 路网前 10 位关键节点 ID

交叉口编号	关键性排序
101	1
117	2

87	3
70	4
74	5
38	6
68	7
80	8
82	9
84	10

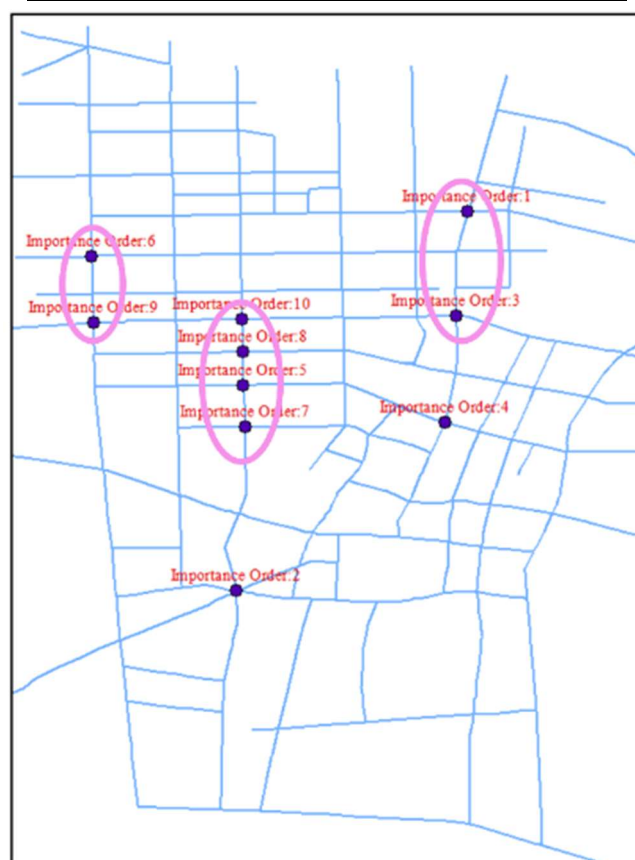


图 11 关键交叉口空间分布示意图

4.4 研究结果

本研究选定保定市中心城区路网作为研究路网，选定某个工作日的高峰时段作为研究时间，考虑交叉口不同运行特性，如图 7 至图 10，建立路网交叉口关键性评价模型，识别研究路网中的关键节点，以此获取路网前十位关键交叉口。

图 1 展示了研究路网的道路拓扑图示。表 4 和图 11 为前十位关键交叉口的 id 及其空间分布状况。

由图 11 可知，在该研究路网中，前 10 位关键交叉口的分布存在成团现象，

形成关键交叉口群支撑路网运行。

5 信号失效评价

信号失效评价面向关键交叉口信号灯异常场景，从交通层面和复杂网络层面选定研究指标，进行拥堵传播效应（即复杂网络中的级联失效现象）特征评价。

城市路网关键交叉口异常场景设置为：路网关键交叉口信号灯异常，失去控制功能，致使该交叉口以“主路优先方式”疏通交通流，导致大量车辆堆积，形成关键节点失效，从而出现拥堵传播，发生网络级联失效现象。

5.1 评价指标

关键节点失效对于路网运行水平的影响需要以量化形式呈现。实习中，基于改进后的渗流理论，从交通和复杂网络两个层面对关键节点失效后的网络级联失效现象进行特征评价。交通层面，特征评价指标选用路段平均速度；复杂网络层面，特征评价指标选用有效路段数、有效集群数、最大有效集群规模。

具体来说，路段平均速度反映了车辆在某条路段的行驶状况，直观表现了道路交通流的运行水平，说明了道路的拥堵或畅通状态，路段 l 的平均速度 $\bar{\vartheta}(l)$ 计算方式如下

$$\bar{\vartheta}(l) = \frac{1}{\text{Num}} \sum_{s=1}^{\text{Num}} \bar{\vartheta}_l(s) \quad (16)$$

其中， $\bar{\vartheta}_l(s)$ 表示第 s 辆车在路段 l 上的平均速度， Num 表示研究时段内路段 l 的行驶车辆数。

复杂网路指标从网络层面说明了网络性能及其影响因素。其中，有效路段数反映了城市路网中车辆可按照理想状态通行的路段数，相邻的有效路段构成有效集群，有效集群数反映了网络功能子团的离散程度，最大有效集群规模反映了城市路网的可达性和连通性。

5.2 渗流理论

渗流理论是描述无序活动规律的简单模型，作为研究网络性能相变的基础理论之一，一般用于分析在给定空间上随机分布对象的连通性问题。

渗流理论的核心内容为：在网络中，以某个固定概率 p 随机占据网络中的边，不被占据的边认为失去连通功能。当 p 很小时，仅有少数条边被占据，难以形成较大连通团；当 p 很大时，网络中大多数的边均被占据，存在大规模连通团支撑网络运行。因此，网络会随着 p 的增加逐渐呈现连通性与功能性。

将渗流理论引入交通网络研究中，常把各边权重 ω_{ij} 设定为该路段平均速度与网络全路段最大速度的比值，即 $\omega_{ij} = v_{ij}/v_{\max}$ 。

p 作为一个固定的渗透阈值，通常介于 0 与 1 之间，依据 p 与路段平均速度的相对大小，可将路段分为有效路段和失效路段。研究中，常把有效路段记作 1，失效路段记作 0，即

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, \omega_{ij} \geq p \\ 0, \omega_{ij} < p \end{cases} \quad (17)$$

通过这种方式，可以在静态道路网络中，依据给定的 p 值构建功能性的交通网络，且随着 p 值的增加，交通功能网络逐渐呈现离散化状态。

考虑到本文研究场景，当交通流运行处于路网关键交叉口信号灯异常的交通环境，导致关键节点失效时，网络全路段最大速度 v_{\max} 相对于正常通行网络将会下降。为了避免由于网络最大速度不同所引起的渗流异常，同时更直观表达各路段速度与路网最大速度的变化，将 ω_{ij} 与 p 的相对大小等效为 v_{ij} 与 $p * v_{\max}$ 的大小，即

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, v_{ij} \geq v_p \\ 0, v_{ij} < v_p \end{cases} \quad (18)$$

基于上述路段有效性判定，引入有效路段数、有效集群数、最大有效集群规模对所构建的交通网络进行评价。

有效路段数 N_{fe} 的计算方式如下

$$N_{fe} = \sum e_{ij} \quad (19)$$

有效集群数和最大有效集群规模通过有效路段的连接性进行计算。

5.3 特征评价

5.3.1 单节点失效场景

基于 4.3 的关键交叉口排序，令疏通交通量最多的第 3 位关键交叉口信号灯异常，在信号灯失去控制功能后，冲突交通流以“主路优先”方式通行，此交叉口降维为“主路优先交叉口”，其他交叉口按原有信号方案正常运行。经仿真模拟对比，获取关键交叉口信号灯正常与异常两类情况下的各路段平均速度如图 12 所示。通过仿真结果，获取在此关键交叉口信号灯异常，出现单节点失效现象后网络层面评价指标的变化情况。其中，有效路段数、有效集群数、最大有效集群

规模的变化情况分别如图 13、图 14、图 15 所示。

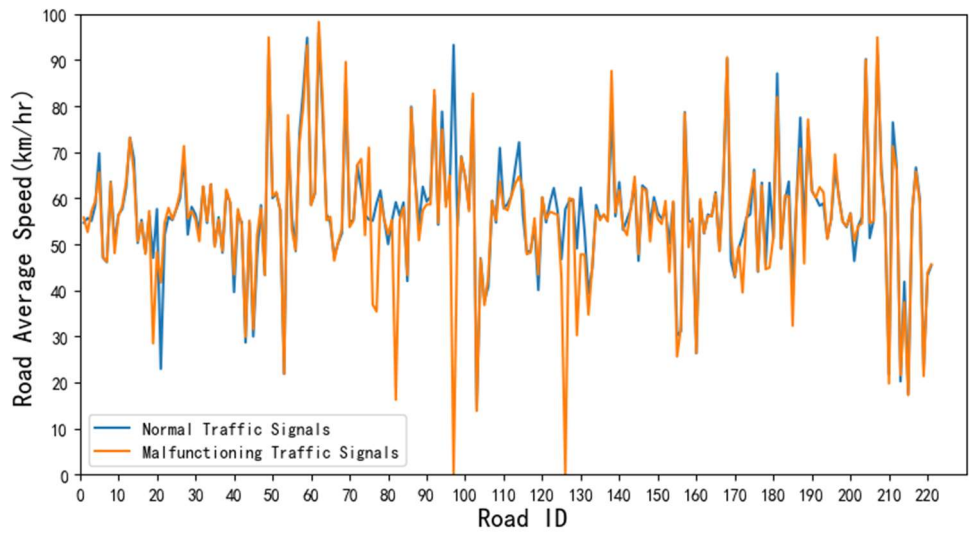


图 12 信控正常与异常两类情况下各路段平均速度

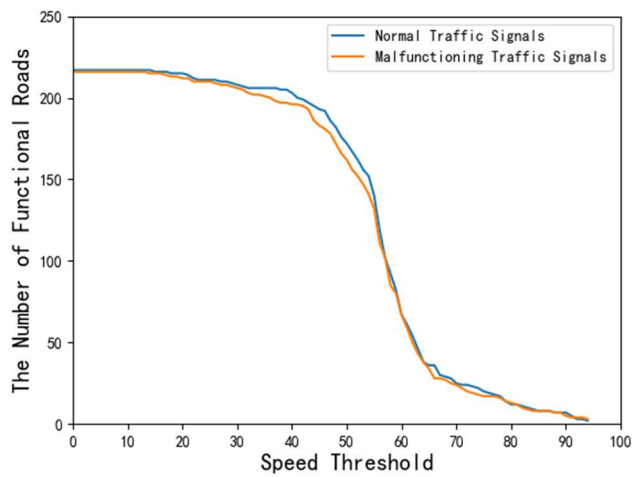


图 13 单节点失效后有效路段数变化情况图

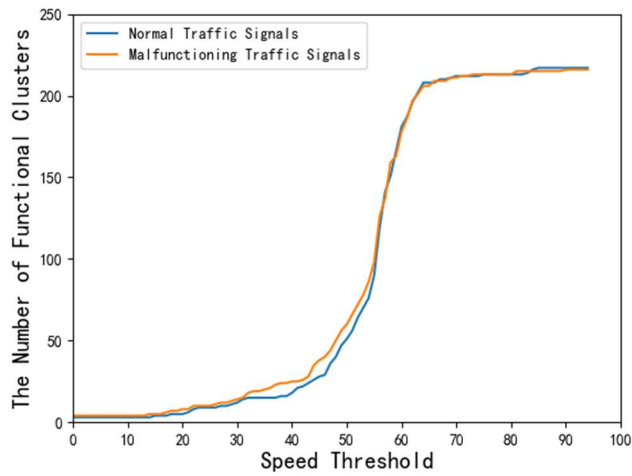


图 14 单节点失效后有效集群数变化情况图

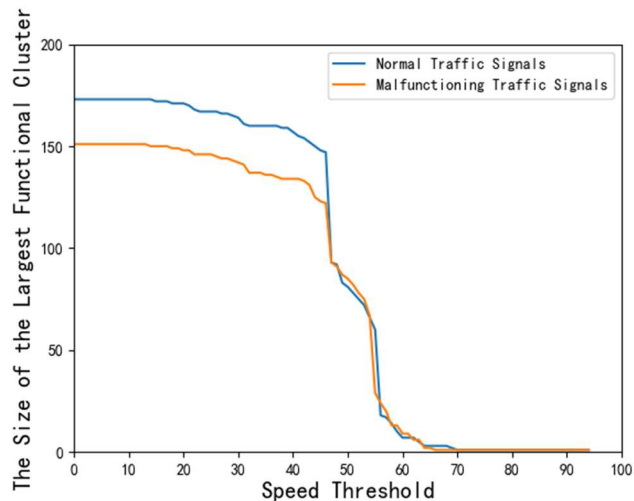


图 15 单节点失效后最大有效集群规模变化情况图

5.3.2 多节点失效场景

令路网前十位关键交叉口信号灯异常，冲突交通流的通行方式均降维至“主路优先通行”，出现多节点失效现象。以节点正常运行、5 个节点失效和 10 个节点失效作为典型场景对多节点失效状况进行研究，获取路段平均速度的频率分布状态。其中，节点正常运行、5 个关键节点失效、10 个关键节点失效分别如图 16，图 17，图 18 所示。通过仿真结果，获取不同典型场景下网络层面评价指标的变化情况。其中，有效路段数、有效集群数、最大有效集群规模的变化情况分别如图 19、图 20、图 21 所示。

同时，令路网前十位关键交叉口信号灯按照重要性排序依次异常，挖掘关键节点失效数量对网络运行性能的影响。网络运行性能通过复杂网络评价指标的平均水平表示，包括有效路段数平均水平和有效集群数平均水平，其变化情况分别如图 22、图 23 所示。

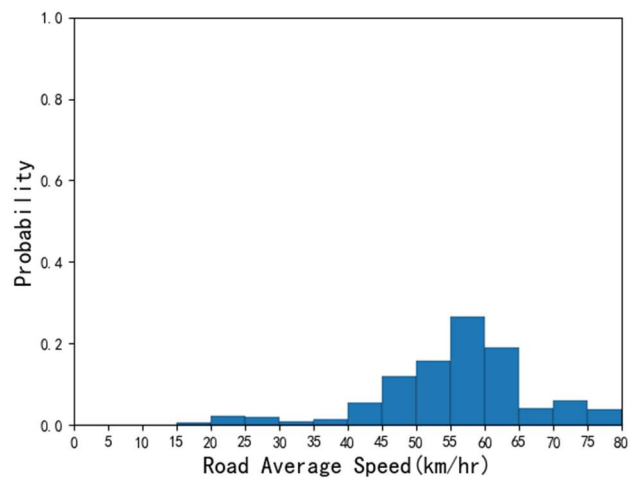


图 16 节点正常状态时路段平均速度分布

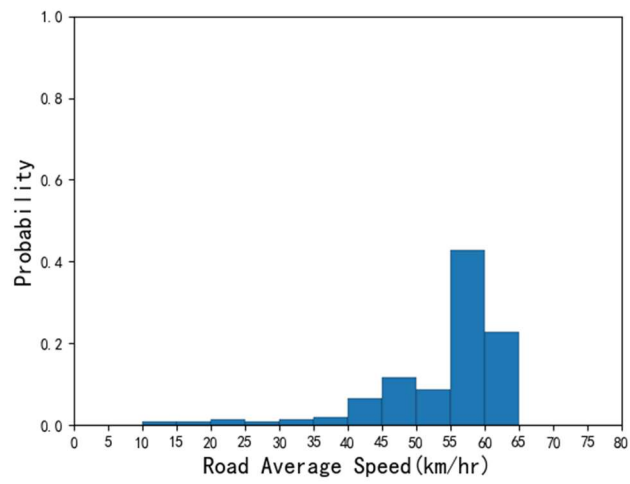


图 17 前 5 位关键节点失效后路段平均速度分布

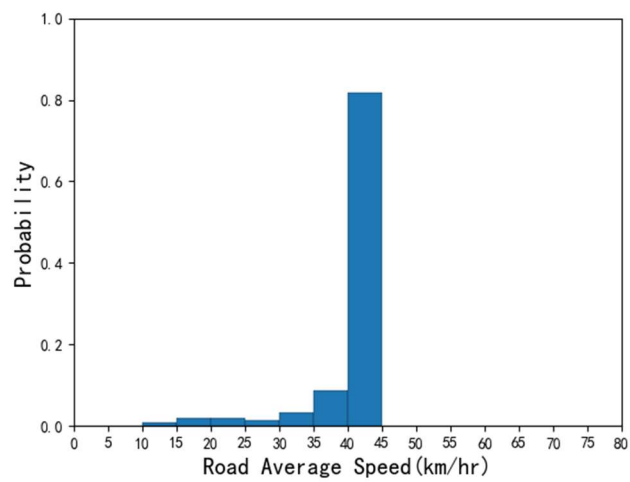


图 18 前 10 位关键节点失效后路段平均速度分布

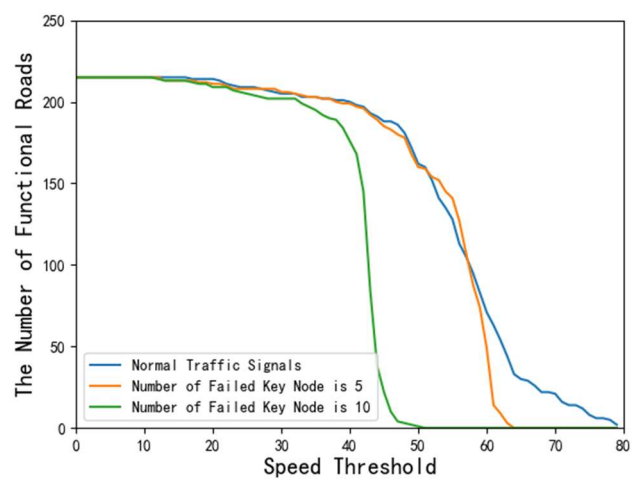


图 19 多节点失效后有效路段数变化情况图

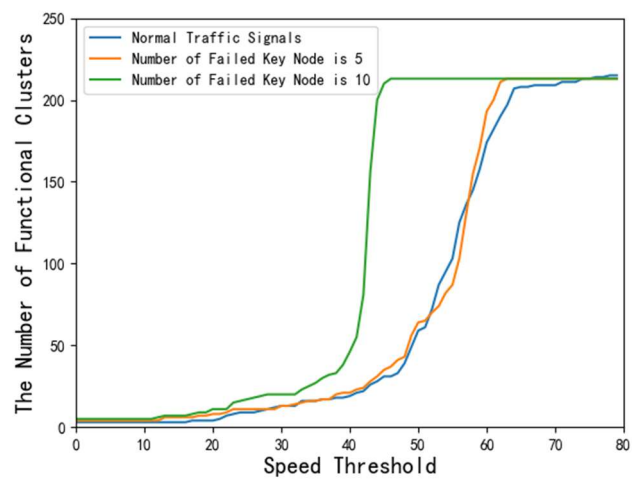


图 20 多节点失效后有效集群数变化情况图

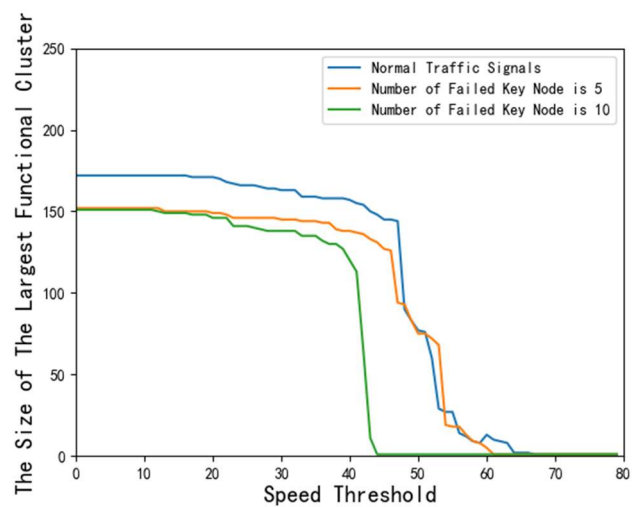


图 21 多节点失效后最大有效集群规模变化情况图

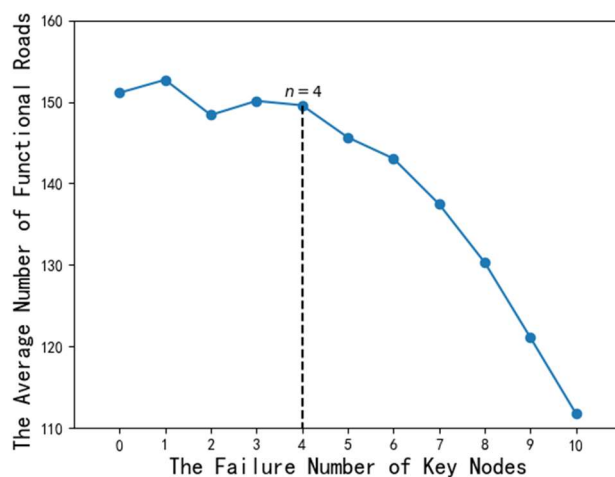


图 22 前 10 位关键节点依次失效后有效路段数平均水平变化情况

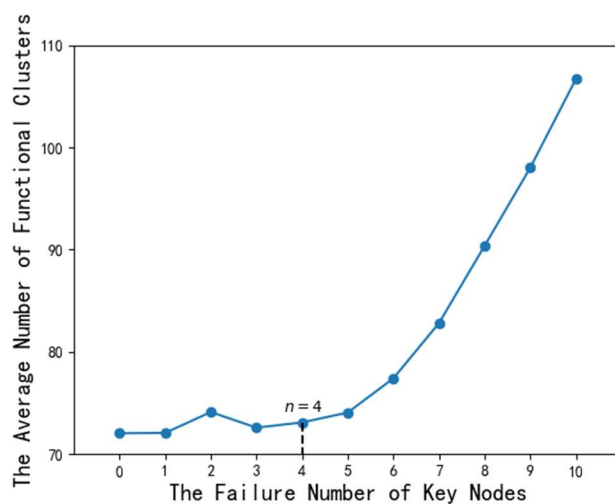


图 23 前 10 位关键节点依次失效后有效集群数平均水平变化情况

5.4 结果分析

当路网单个关键交叉口信号灯异常，导致单节点失效后，网络运行性能随之发生变化。其中，图 12 表明了单节点失效后路段平均速度的变化情况，图 13 至图 15 反映了单节点失效后网络评价指标的变化情况。

由图 12 至图 15 可知：

从路段平均速度的角度，当单节点失效后，部分路段的平均速度明显降低，少量路段出现严重拥堵现象，速度降为 0，但速度的整体分布与正常状态相比，并无明显区别。

从网络层面评价指标的角度，不论节点是否失效，随着速度阈值的增加，有效路段数均逐渐降低，有效集群数均逐渐增加，最大有效集群规模均逐渐降低，

且各指标随速度阈值的变化速度经历了“平缓-剧烈-平缓”的过程，符合预期的变化趋势。值得一提的是，在单节点失效的影响下，某些路段速度降为 0，且这些路段恰好为两个集群的连接路段，所以当速度阈值为 0 时，单节点失效后的最大集群规模明显小于正常状态，且单节点失效后的有效集群数为 4，而正常状态时的有效集群数为 3。并且由图可知，单节点失效无法在网络层面造成大规模影响，但在某一速度阈值下，节点失效场景的有效路段数、最大有效集群规模总略小于正常场景，有效集群数总略大于正常场景。

同时，令路网前十位关键交叉口信号灯异常，导致多节点失效。图 16 至 18 表明了多节点失效后路段平均速度的变化情况，图 19 至图 21 反映了多节点失效后网络评价指标的变化情况。

由图 16 至图 21 可知：

从路段平均速度的角度，路段平均速度的分布范围随关键节点失效数量的增多而缩小。正常状态时，路段平均速度分布于(15km/h,80km/h)；5 个节点失效时，路段平均速度分布于(10km/h,65km/h)；10 个节点失效时，路段平均速度分布于(10km/h,45km/h)。同时，路段平均速度分布最为集中的区间随关键节点失效数量的增多向左移动。正常状态时，路段平均速度大量集中于 60km/h 附近；5 个节点失效时，集中于 55km/h 附近；10 个节点失效时，集中于 40km/h 附近。可以发现，从累积效应的角度，第 5-第 10 个关键节点的失效相比于第 1-第 5 个关键节点的失效对于路网性能的影响更大

从网络层面评价指标的角度，随着路网关键节点失效数量的增加，各复杂网络指标变化的差别趋于明显，且当失效数量由 5 增加至 10 时，有效路段数明显下降，有效集群数明显上升，最大有效集群规模明显减小，也就是说，网络运行性能出现明显降低。

在此基础上，令路网前十位关键交叉口信号灯按照重要性排序依次异常，挖掘关键节点失效数量对网络运行性能的影响。图 22 和 23 表示了前 10 位关键节点依次失效对于有效路段数平均水平和有效集群数平均水平的影响。

由图 22 和图 23 可知：

道路网络功能受关键节点失效数量的影响存在阈值，当关键节点失效数量小于此阈值时，路网性能处于小范围波动状态，当关键节点失效数量大于此阈值时，

路网性能将大幅降低，且随着失效节点数量增多，下降速度加快。

在该研究路网中，关键节点失效数量的阈值为 4。当关键交叉口失效数量小于 4 时，路网功能由于交通供需动态变化等因素处于波动状态；当失效数量大于等于 4 时，路网功能逐渐受到影响，网络运行性能下降，且随着失效节点数量由 4 增加至 10 时，网络运行性能的下降速度逐渐加快。

四、主要成果及收获体会

在北京智行汇通科技有限公司实习的这段时间是我职场生涯的开端，令我受益匪浅。从对相关研究内容一无所知，到和同事们合作完成一项项工作，解决各种疑问，个人的能力成长是显而易见的。

在本次实习过程中，我了解并认真学习了交通信号控制的应用导向、需求情况和发展前沿，亲身完成了多项工作，了解了交通行业内项目开展的具体流程。实习不仅开阔了我的眼界，更重要的是使我了解交通行业现阶段发展状况和未来趋势。

这次的实习只是一个起点，我相信这个起点会使我逐步了解这个社会，开阔视野，增长才干。通过此次实习，我更加深刻地认识到在社会实践中自己的位置，发现了自己的不足，在未来，一定要充分挖掘自身价值，为交通行业贡献自己的一份力量。