

## PREFACE >>>>

### 前 言

---

城市群是由于城市聚集区域内存在的各种物质、信息、资金等多个流动要素，导致内部多个复杂系统与自然要素相关联组成的有机整体。在城市群内部，由于存在多种交通方式（如铁路交通、公路交通、航空运输、水路运输等），导致城市群综合交通系统整体呈现出复杂、多变、动态的显著特点，由此给城市群交通网络的维护带来了极大的挑战。面对诸如客流突增、恐怖袭击、自然灾害等原因导致的级联失效现象，如何提高网络抵御外来灾害的能力，降低级联失效带来的影响，是当下亟待解决的问题。在这一问题上，目前尚没有学者进行系统全面的研究与介绍。本书由此着眼，基于复杂网络的思想，运用仿真的方法，结合实际的交通流数据对城市群交通网络的抗毁性特征进行了全面的探究与解析。

第1章介绍了本书的研究背景与意义、研究目标及主要内容，并对全书的组织结构、写作思路做了总结。

第2章分析了城市群交通网络的特点，并由此选择“站点映射法”作为城市群交通网络的建模方法；给出交通子网的概念，首先构建了四种（道路、铁路、航空、水路）交通子网络模型，而后分别以复合与耦合的方式给出构建城市群综合客运交通复合网络与城市群综合客运耦合网络的方法；最后介绍了城市群客运交通网络的加权方法。

第3章介绍了三种在城市群客运交通网络中构建级联失效模型的代表性方法，基于容量-负荷模型，考虑了网络负载在级联失效传播的过程中对网络可能造成的节点过载、连边过载的情况，给出了网络节点、

连边过载状态的判断依据，将级联失效的动态过程转化为数学模型清楚地阐述出来。

第4章介绍了城市群客运交通网络特性测度指标的含义及数学表达，包括节点度和度分布、平均路径长度、网络聚集系数。而后，以呼包鄂城市群为研究对象，构建城市群客运交通网络模型，运用 Pajek 及 Matlab 软件仿真计算了网络的特性指标变化情况并进行了详细的分析，在实际算例中阐述了城市群客运交通网络特性指标的内涵及意义。

第5章介绍了两种传统的城市交通网络抗毁性测度指标——网络效率和最大连通子图相对规模，并根据城市群的特点对两种指标进行改进，构建了全新的城市群交通网络抗毁性测度指标体系。

第6章运用复合的方法构建城市群综合交通网络模型，在此基础上基于容量-负荷理论提出一种新的级联失效模型，定义节点的三种状态：正常、暂停、失效，给出基于过载程度的节点状态判定依据，重点研究了级联效应传递过程中加权网络的流量重分配机制。通过对呼包鄂城市群实际客流数据的仿真发现：① 网络的过载能力参数存在阈值为 1.2；② 城市群交通网络表现出极强的无标度特征。

第7章以复合交通网络模型研究城市群客运交通网络级联抗毁性。首先，构建城市群客运复合交通网络模型，并用实际客流加权。其次，采用改进的剩余容量分配策略，构建复合交通网络级联失效模型。再次，提出了网络效率和加权最大连通子图相对规模两个指标的网络抗毁性评估标准。最后，采用蓄意攻击策略，以呼包鄂城市群为实例进行仿真，仿真发现：① 蓄意攻击对于城市群客运交通网络的打击是致命的；② 过载能力的存在使大量失效节点变为暂停节点，且过载能力调节参数越大，网络连通性越强，而网络效率却与过载调节能力关系不大，所以暂停节点的存在可以增加受攻击之后网络的连通性，但网络运行效率却不会因此而改善；③ 相较于连通性，城市群客运交通网络的网络效率对破坏更加敏感。

第 8 章运用复合的方法构建城市群综合客运交通网络模型，基于改进的容量负荷模型构建了网络级联失效模型，通过定义信息指数，引入信息精度与信息广度完成对不完全信息攻击策略的搭建，而后对呼包鄂榆城市群交通网络内实际的交通数据进行仿真，研究了网络面对不同攻击信息、不同节点负载因子、不同负载分配机制所表现出来的抗毁性能。

第 9 章在运用复合的方法构建城市群客运交通网络模型之后，介绍了城市群客运交通网络的拓扑特征指标，并构建了城市群客运交通网络脆弱性指标体系，而后以呼包鄂城市群为例进行仿真，对复合交通网络的拓扑特征和脆弱性进行分析，识别路网中的关键站点和线路。结果表明：城市群复合交通网络的构建可以降低单一运输方式交通网络的脆弱性，通过对识别出的关键站点和线路加强防护，可以进一步降低城市群复合交通网络的脆弱性，减小突发灾害造成交通网络瘫痪的风险。

第 10 章采用耦合的方法构建了城市群轨道-道路耦合交通网络，基于容量-负荷模型构建了耦合网络级联失效模型，基于改进的 PSO 算法构建了城市群轨道-道路耦合交通网络容量优化模型，通过仿真对呼包鄂榆城市群交通网络的抗毁性能进行了优化分析。该方法通过智能算法的运用，实现了对于城市群交通网络资源的优化重组，对于城市群交通网络的规划与改进具有一定的指导意义。

第 11 章首先构建了城市群客运交通网络模型，而后建立城市群客运交通网络抗毁性修复模型，将城市群交通网络受到破坏之后的修复的动态过程数学化地表现出来，并在实际算例中对既定地修复策略进行仿真分析，并得到相关的结论。

第 12 章总结性地介绍了本书取得的主要研究成果，指出了既有研究的不足之处，并对未来的研究方向做出了展望。

本书对城市群客运交通网络抗毁性研究过程中涉及的理论方法进行了系统的阐述及创新，并基于现实的交通网络对所提理论方法进行了实践，研究成果对加深城市群客运交通网络抗毁性的理解具有重要意义。

本书在写作过程中得到了很多同行学者、朋友的帮助，在此特别感谢北京交通大学杨志成同学和内蒙古大学刘振宇副教授，感谢北京交通大学郝羽成博士、李奉孝同学，感谢北京航空航天大学魏磊博士，感谢西南交通大学张帅同学，感谢内蒙古大学武钧教授、朱援副研究员，有了他们的支持本书才得以完成。本书在写作过程中参考了国内外大量书籍和文献，在此谨向文献作者表示感谢。

本书得到以下基金的支持：国家自然科学基金专项项目（71940010）、内蒙古自治区自然科学基金面上项目（2019MS05083）、内蒙古自治区高等学校科学研究项目（NJZY19013）、内蒙古自治区交通厅建设科技项目（NJ-2019-02）。

由于笔者专业视野和学术水平有限，书中难免存在错漏和不足之处，敬请读者批评指正，特此致谢。

作 者

2020年8月

<b>第 1 章 绪 论</b>	<b>\001</b>
● 1.1 研究背景及意义	\001
● 1.2 研究目标及主要内容	\001
● 1.3 本书组织结构	\002
<b>第 2 章 城市群客运交通网络建模</b>	<b>\003</b>
● 2.1 城市群客运交通子网络模型的构建	\004
● 2.2 城市群客运复合交通网络模型构建	\005
● 2.3 城市群客运耦合交通网络模型构建	\008
● 2.4 城市群客运交通网络模型加权方法	\011
● 2.5 本章小结	\013
<b>第 3 章 城市群客运交通网络级联失效模型</b>	<b>\014</b>
● 3.1 城市群中考虑节点过载的级联失效模型	\014
● 3.2 城市群中考虑连边过载的级联失效模型	\017
● 3.3 城市群中考虑实际距离的级联失效模型	\019
● 3.4 本章小结	\020
<b>第 4 章 城市群客运交通网络特性测度指标</b>	<b>\021</b>
● 4.1 节点度和度分布	\021
● 4.2 平均路径长度	\021
● 4.3 网络聚集系数	\022
● 4.4 实证研究	\024

- 4.5 本章小结 \030

## **第 5 章 城市群客运交通网络抗毁性测度指标 \031**

- 5.1 网络效率 \032
- 5.2 加权最大连通子图相对规模 \033

## **第 6 章 随机攻击策略下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真 \034**

- 6.1 城市群客运交通网络模型构建 \034
- 6.2 随机攻击策略下的城市群客运交通网络级联失效模型构建 \036
- 6.3 随机攻击策略下的城市群客运交通网络抗毁性测度指标构建 \040
- 6.4 随机攻击策略下的城市群客运交通网络级联抗毁性仿真方法 \040
- 6.5 随机攻击策略下的城市群客运交通网络级联抗毁性实例仿真 \042
- 6.6 本章小结 \048

## **第 7 章 蓄意攻击策略下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真 \050**

- 7.1 城市群客运交通网络模型构建 \050
- 7.2 蓄意攻击策略下的城市群客运交通网络级联失效模型构建 \051
- 7.3 蓄意攻击策略下的城市群客运交通网络抗毁性测度指标构建 \053
- 7.4 蓄意攻击策略下的城市群客运交通网络级联抗毁性仿真方法 \055

- 7.5 蓄意攻击策略下的城市群客运交通网络  
级联抗毁性实例仿真 \056

- 7.6 本章小结 \063

## **第 8 章 不完全信息攻击策略下城市群客运交通网络 级联抗毁性仿真 \064**

- 8.1 城市群客运交通网络模型构建 \064
- 8.2 不完全信息攻击策略下的城市群客运交通网络  
级联失效模型构建 \065
- 8.3 不完全信息攻击策略下的城市群客运交通网络  
抗毁性测度指标构建 \067
- 8.4 不完全信息攻击策略下的城市群客运交通网络  
级联抗毁性仿真方法 \068
- 8.5 不完全信息攻击策略下的城市群客运交通网络  
级联抗毁性实例仿真 \070
- 8.6 本章小结 \078

## **第 9 章 基于不同攻击策略的城市群客运交通网络 脆弱性仿真 \080**

- 9.1 城市群客运交通网络模型构建 \080
- 9.2 城市群客运交通网络拓扑特征指标 \081
- 9.3 城市群客运交通网络脆弱性测度指标构建 \082
- 9.4 城市群客运交通网络攻击策略 \084
- 9.5 城市群客运交通网络脆弱性实例仿真 \084
- 9.6 本章小结 \096

## **第 10 章 城市群客运交通网络级联抗毁性优化研究 \097**

- 10.1 城市群轨道-道路耦合交通网络模型 \097

- 10.2 城市群轨道-道路耦合交通网络级联失效模型 \099
- 10.3 城市群客运交通网络攻击策略分析与抗毁性测度指标构建 \101
- 10.4 基于改进 PSO 算法的城市群轨道-道路耦合交通网络容量优化模型 \103
- 10.5 城市群客运交通网络级联抗毁性优化实例仿真 \108
- 10.6 本章小结 \116

## 第 11 章 城市群客运交通网络级联抗毁性修复研究 \118

- 11.1 城市群客运交通网络模型构建 \118
- 11.2 城市群客运交通网络抗毁性修复模型 \119
- 11.3 城市群客运交通网络级联抗毁性修复实例仿真 \125
- 11.4 本章小结 \131

## 第 12 章 结论与展望 \132

- 12.1 主要研究成果 \132
- 12.2 研究的不足与展望 \132

## 参考文献 \134

## 附 录 \138

- 附录 A 不完全信息攻击代码 \138
- 附录 B 不完全信息容量参数抗毁性仿真代码 \140
- 附录 C 连边距离权代码 \154
- 附录 D 粒子群目标函数代码 \155
- 附录 E 粒子群变异函数代码 \165
- 附录 F 优化粒子群代码 \166
- 附录 G 粒子群实验检验代码 \169
- 附录 H 粒子群随机攻击策略仿真代码 \189

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

城市群是一定区域内多个复杂系统和自然要素构成的有机整体，近年来对城市群相关问题的研究受到越来越多学者的关注。在城市群内，由各种方式组成的交通网络为城市群内各城市之间密切的人员物资流动提供了条件。与此同时，日益复杂的交通网络也面临着客流突增、自然灾害、恐怖袭击等威胁，一旦城市群中的某个站点发生故障，无法正常运行，势必导致其本应承担的客流向周边站点分散，进而对其他站点的正常运行造成影响，如此反复，将会影响城市群交通网络的正常运转，给人们的生产、生活带来极大不便。如何提高网络抵御外来灾害的能力，降低级联失效带来的影响，是当下亟待解决的问题。

## 1.2 研究目标及主要内容

本书基于复杂网络思想对城市群客运交通网络抗毁性进行研究。首先，对复杂网络视角下的城市群客运交通网络建模方法进行阐述；其次，针对城市群交通网络的特性，对城市群交通网络的级联失效模型、网络特性测度指标、抗毁性测度指标的构建方法进行探究；而后，分别给出基于随机、蓄意、不完全信息三种攻击策略的城市群客运交通网络抗毁

性仿真方法，并以实际网络为例进行仿真，对城市群交通网络的级联失效机理和网络特征进行探究；最后，对城市群交通网络的优化方法和网络受损时的修复策略进行研究，以提高城市群交通网络的抗毁性能。

### 1.3 本书组织结构

在本书中，第 1 章为绪论，第 2~5 章分别介绍复杂网络下的城市群客运交通网络抗毁性研究的核心部分，第 6~11 章则是基于第 2~5 章介绍的内容进行更进一步的研究，第 12 章对本书的主要研究成果、创新点以及研究的局限处进行了回顾与总结。具体来说，第 2 章对城市群客运交通网络的几种建模方法进行介绍，并给出了网络的加权方式；第 3 章从三个角度分别构建 3 种适用于城市群交通网络的级联失效模型；第 4 章对复杂网络中的特性指标进行介绍，将其对应到城市群客运交通网络的研究中，并基于 3 种指标对城市群视角下的网络特性进行探究；第 5 章对当下复杂网络中两种主流的抗毁度测度方法进行介绍；第 6 章在随机攻击策略下对城市群客运交通网络的级联抗毁性进行研究；第 7 章在蓄意攻击策略下对城市群客运交通网络的级联抗毁性进行研究；第 8 章在不完全信息攻击策略下对城市群客运交通网络的级联抗毁性进行研究；第 9 章基于不同攻击策略对城市群客运交通网络的级联抗毁性进行对比研究；第 10 章以耦合网络为基础，运用粒子群算法对城市群客运交通网络的抗毁能力进行优化；第 11 章对城市群客运交通网络的抗毁性修复进行研究；第 12 章对本书的主要研究成果、创新点以及研究的局限处进行回顾与总结。

## 第 2 章 城市群客运交通网络建模

目前,交通网络的构建主要有两种方法,即“道路映射法”和“站点映射法”。对于城市群而言,若采用“道路映射法”,由于网络节点众多,边分布不均匀,导致网络复杂性较高且误差较大,不仅无法说明实际交通流状态,而且很难精准反映交通网络特性。为了更好地揭示城市群交通网络的特性,本章根据城市群内交通基础设施布局现状,采用“站点映射法”分别以不同运输方式的所有站点为网络的节点,连接站点的各条线路为网络的边,构建城市群不同运输方式网络拓扑结构模型。

在构建城市群交通网络模型之前,先做出如下假设和定义:

假设 1:不考虑交通网络的方向性。若某一节点可以到达另一节点,则假设另一节点也可返回该节点,即城市群交通网络是无向图。

假设 2:城市群交通网络任意两站点间客流在一定时间内保持不变。

定义 1:交通子网。将城市群内的道路、轨道、水运、航空四种运输方式交通网络定义为交通子网。以城市群内站点为网络节点,连接站点的各条线路为网络连边,构建交通子网模型,记作  $G_s(V_s, E_s, W_s, H_s)$ 。

定义 2:复合节点。对两个或两个以上的交通子网进行叠加,将地理位置较近的汽车站、火车站、港口、机场忽略地理距离进行合并得到的节点称为复合节点。若旅客在站点之间换乘的步行时间在可接受的合理范围内,则认为站点地理位置较近。用  $V'$  表示所有合并节点的集合,  $V''$  表示复合节点的集合。

定义 3: 复合边。交通子网叠加后, 若两个节点之间有多条边相连, 将其视为一条边相连, 称该边为复合边。用  $E'$  表示所有合并连边的集合,  $E''$  表示复合边的集合。

## 2.1 城市群客运交通子网络模型的构建

### 2.1.1 城市群道路交通加权子网模型的构建

以城市群内所有汽车站为节点, 连接各汽车站的道路为边, 构建城市群道路交通子网, 记作  $F_1(D_1, B_1, W_1, H_1)$ 。其中,  $D_1$  表示  $F_1$  内节点的集合,  $D_1 = \{d_1^1, d_1^2, \dots, d_1^i, \dots, d_1^{n_1}\}$ ,  $n_1$  表示  $D_1$  内节点的数目;  $B_1$  表示  $D_1$  对应的边集,  $B_1 = (b_1^{ij})_{n_1 \times n_1}$ , 若  $d_1^i R d_1^j$ , 则  $b_1^{ij} = 1$ , 若  $d_1^i \bar{R} d_1^j$ , 则  $b_1^{ij} = 0$ ;  $W_1$  表示  $B_1$  内初始边权的集合,  $W_1 = \{w_1^1, w_1^2, \dots, w_1^i, \dots, w_1^{n_1}\}$ ,  $n_1'$  表示  $B_1$  内边的数目,  $H_1$  表示  $D_1$  内各节点点权的集合,  $H_1 = \{h_1^1, h_1^2, \dots, h_1^i, \dots, h_1^{n_1}\}$ , 其中,  $h_1^i = \sum_{w_1^f \in K_1^i} w_1^f$ ,  $K_1^i$  表示与节点  $h_1^i$  相连的边的集合。

### 2.1.2 城市群铁路交通加权子网模型的构建

以城市群内所有火车站为节点, 连接各火车站的轨道为边, 构建城市群铁路交通子网, 记作  $F_2(D_2, B_2, W_2, H_2)$ 。其中,  $D_2$  表示  $F_2$  内节点的集合,  $D_2 = \{d_2^1, d_2^2, \dots, d_2^i, \dots, d_2^{n_2}\}$ ,  $n_2$  表示  $D_2$  内节点的数目;  $B_2$  表示  $D_2$  对应的边集,  $B_2 = (b_2^{ij})_{n_2 \times n_2}$ , 若  $d_2^i R d_2^j$ , 则  $b_2^{ij} = 1$ , 若  $d_2^i \bar{R} d_2^j$ , 则  $b_2^{ij} = 0$ ;  $W_2$  表示  $B_2$  内初始边权的集合,  $W_2 = \{w_2^1, w_2^2, \dots, w_2^i, \dots, w_2^{n_2}\}$ ,  $n_2'$  表示  $B_2$  内边的数目,  $H_2$  表示  $D_2$  内各节点点权的集合,  $H_2 = \{h_2^1, h_2^2, \dots, h_2^i, \dots, h_2^{n_2}\}$ , 其中,  $h_2^i = \sum_{w_2^f \in K_2^i} w_2^f$ ,  $K_2^i$  表示与节点  $h_2^i$  相连的边的集合。

### 2.1.3 城市群航空交通加权子网模型的构建

以城市群内所有飞机场为节点，机场之间有航班通行则认为两机场有边相连，构建城市群航空交通子网，记作  $F_3(D_3, B_3, W_3, H_3)$ 。其中， $D_3$  表示  $F_3$  内节点的集合， $D_3 = \{d_3^1, d_3^2, \dots, d_3^i, \dots, d_3^{n_3}\}$ ， $n_3$  表示  $D_3$  内节点的数目； $B_3$  表示  $D_3$  对应的边集， $B_3 = (b_3^{ij})_{n_3 \times n_3}$ ，若  $d_3^i R d_3^j$ ，则  $b_3^{ij} = 1$ ，若  $d_3^i \bar{R} d_3^j$ ，则  $b_3^{ij} = 0$ ； $W_3$  表示  $B_3$  内初始边权的集合， $W_3 = \{w_3^1, w_3^2, \dots, w_3^i, \dots, w_3^{n_3}\}$ ， $n_3$  表示  $B_3$  内边的数目， $H_3$  表示  $D_3$  内各节点点权的集合， $H_3 = \{h_3^1, h_3^2, \dots, h_3^i, \dots, h_3^{n_3}\}$ ，其中， $h_3^i = \sum_{w_3^f \in K_3^i} w_3^f$ ， $K_3^i$  表示与节点  $h_3^i$  相连的边的集合。

### 2.1.4 城市群水路交通加权子网模型的构建

以城市群内所有的港口为节点，连接港口的航线为边，构建城市群水路交通子网，记作  $F_4(D_4, B_4, W_4, H_4)$ 。其中， $D_4$  表示  $F_4$  内节点的集合， $D_4 = \{d_4^1, d_4^2, \dots, d_4^i, \dots, d_4^{n_4}\}$ ， $n_4$  表示  $D_4$  内节点的数目； $B_4$  表示  $D_4$  对应的边集， $B_4 = (b_4^{ij})_{n_4 \times n_4}$ ，若  $d_4^i R d_4^j$ ，则  $b_4^{ij} = 1$ ，若  $d_4^i \bar{R} d_4^j$ ，则  $b_4^{ij} = 0$ ； $W_4$  表示  $B_4$  内初始边权的集合， $W_4 = \{w_4^1, w_4^2, \dots, w_4^i, \dots, w_4^{n_4}\}$ ， $n_4$  表示  $B_4$  内边的数目， $H_4$  表示  $D_4$  内各节点点权的集合， $H_4 = \{h_4^1, h_4^2, \dots, h_4^i, \dots, h_4^{n_4}\}$ ，其中， $h_4^i = \sum_{w_4^f \in K_4^i} w_4^f$ ， $K_4^i$  表示与节点  $h_4^i$  相连的边的集合。

## 2.2 城市群客运复合交通网络模型构建

城市群复合交通网络区别于综合交通运输网络。综合交通运输网络是道路、轨道、水路、航空、管道五种运输方式网络的综合体，注重运输方式间的协作发展。对其的研究多采用定性方法，最终为政府部门提

供战略性发展意见。而城市群复合交通网络是任意几种运输方式交通网络叠加的复合体,构建的意义在于采用定量化方法,将城市群交通系统内不同运输方式间的相互影响作用定量化表示。对其进行的研究以不同运输方式网络的拓扑结构为基础,找出复合交通网络中的关键站点线路,为交通规划提供更为直接具体的参考依据。此时,虽然不同交通方式结构具有不同的特点,但在复杂网络拓扑结构模型中,不同运输方式的站点都以节点表示,无论是道路路段还是轨道线等,它们都是线性元素,都以连边表示。因此,对网络的拓扑结构进行叠加可以忽略运输方式的载运特点。

若叠加过程中两个或者两个以上的汽车站、火车站、机场、港口地理位置较近,可以忽略其地理距离,将它们看作一个站点,即在复合交通网络模型中视为一个节点。由于城市群包含多个城市,交通网络涵盖范围大、运行距离长,因此,站点之间的地理距离一般较远,地理距离较近的站点多集中于城市群中单一城市内部,此时,可通过电子地图获得单一城市内各站点之间的真实地理距离,估算旅客在站点之间换乘的步行时间。若步行时间在可接受范围内,则认为站点间地理距离较近,在复合交通网络中可以将其看作一个节点。其中,步行时间的可接受范围应根据具体的研究对象,考虑站点周边的交通状况、线路结构等实际条件而定。若网络叠加复合后,两个节点之间可以通过多种运输方式线路连接,在复合交通网络模型中将其视为一条边相连。

城市群复合交通网络模型构建如图 2-1 所示。

首先构建城市群不同运输方式交通网络拓扑图,之后对它们进行叠加复合,将城市群复合交通网络抽象成无向图  $G=(V,E)$ 。网络构建过程如图 2-1 所示。

$V=\{1,2,3,\dots,m,m+1,\dots,n-1,n\}$  表示城市群复合交通网络所有节点的集合;若城市群中包含的城市数目为  $p$ ,根据节点的地理位置,将  $V$  分为

$(p+1)$ 个部分, 即  $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup \dots \cup V_s \cup \dots \cup V_p \cup V_{p+1}$ , 如图 2-2 所示。  
 其中:  $V_s$  表示城市群内第  $s$  个城市中心地区节点的集合, 其节点数目为  $q_s$ ;  $V_{p+1}$  表示城市群内所有旗县地区节点的集合, 即  $V_{p+1} = V - V_1 - V_2 - V_3 - \dots - V_s - \dots - V_p$ , 其节点数目为  $q_{p+1}$ ; 若  $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_s + \dots + q_p = m$ , 则  $q_{p+1} = n - m$ ;

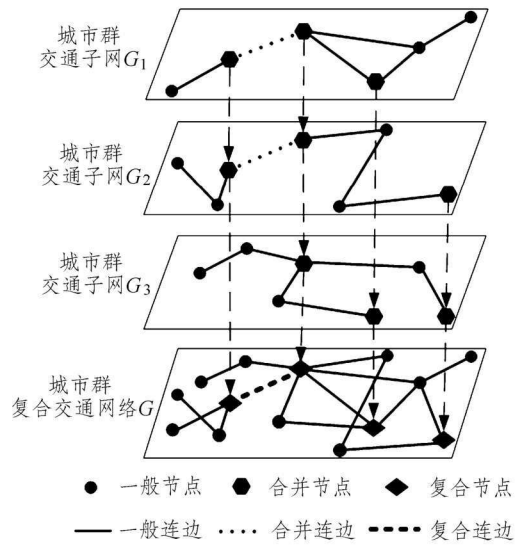


图 2-1 城市群复合交通网络模型构建示意图

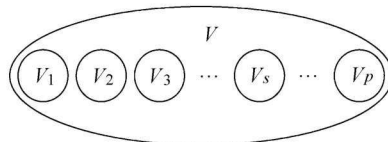


图 2-2 节点集合的韦恩图表示

$E = \{(i, j) | i, j \in V \text{ 且 } i \neq j\}$  表示边的集合;  $i$ 、 $j$  分别表示城市群复合交通网络中的任意两个节点; 图  $G = (V, E)$  所对应的邻接矩阵表示为  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 见式 (2-1), 其定义式见式 (2-2)。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 0 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2-1)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \text{ 对 } j \text{ 有某种二元关系, 即 } i \text{ 与 } j \text{ 直接相连}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2-2)$$

### 2.3 城市群客运耦合交通网络模型构建

城市群复合交通网络是在构建交通子网的基础上通过叠加复合的方式将距离较近的站点进行合并, 从而完成复合网络的构建。与其区别的是耦合网络并不通过站点的合并来完成不同交通子网之间的衔接, 而是通过在相距较近站点之间生成耦合边的方式来完成交通子网的衔接, 模型的构建更加接近现实网络。

耦合网络的构建可根据需要选取两个或两个以上的交通子网, 通过耦合边的生成来完成网络的构建。同时, 在我国境内, 对于不同的城市群, 其内部的交通网络组成虽然有所不同, 但铁路由于其大运量、低运价的特性往往成为城市群内大批量客货流转运的主要通道; 与此同时, 道路运输以其灵活性高、机动性好的特点, 与铁路密切配合, 共同承担起城市群内大批量客货流的转运作业, 并由此形成了复杂的综合运输网络; 反观航空与水运, 由于成本、地形等因素的制约, 往往作为城市群内的辅助运输方式, 不对大批量客货流运转起决定作用。因此, 本部分选取城市群轨道交通子网络与道路交通子网络, 通过生成耦合边的方式来完成城市群耦合交通网络模型的构建, 具体如下: 将城市群内各交通方式的站点视为网络的节点, 将连接站点的各条线路视作网络的边,

分别构建城市群轨道、道路网络模型。之后，将城市群轨道、道路网络通过耦合边进行连接，构建城市群轨道-道路耦合交通网络模型。

### 2.3.1 城市群轨道交通网络

以城市群内所有火车站为网络节点，任意火车站之间的通车线路为连边，构建城市群轨道交通网络模型，记作  $G_p(V_p, E_p, W_p, H_p)$ 。其中， $V_p$  表示城市群轨道交通网络所有节点的集合， $V_p = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{N_p}\}$ ； $N_p$  为城市群轨道交通网络中的节点数目； $E_p = (e_{ij})_{N_p \times N_p}$ ，表示城市群轨道交通网络中任意两节点通车线路的集合，若  $v_i R v_j$ ，即节点  $v_i$  与节点  $v_j$  连通，则  $e_{ij} = 1$ ，若  $v_i \bar{R} v_j$ ，即节点  $v_i$  与节点  $v_j$  不连通，则  $e_{ij} = 0$ ； $W_p = (w_{ij})_{N_p \times N_p}$  表示城市群轨道交通网络连边权重矩阵，其中  $w_{ij}$  为边  $ij$  的权重； $H_p = \{h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{N_p}\}$  表示城市群轨道交通网络节点权重集合，其中  $h_i$  为节点  $v_i$  的权重，其值为节点  $v_i$  所有连边权重之和。

### 2.3.2 城市群道路网络

以城市群内所有汽车站为网络节点，任意汽车站之间的通车线路为连边，构建城市群道路网络模型，记作  $G_r(V_r, E_r, W_r, H_r)$ 。其中， $V_r$  表示城市群道路网络所有节点的集合， $V_r = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{N_r}\}$ ， $N_r$  为城市群道路网络中的节点数目； $E_r = (e_{ij})_{N_r \times N_r}$ ，表示城市群道路网络中任意两节点通车线路的集合，若  $v_i R v_j$ ，即节点  $v_i$  与节点  $v_j$  连通，则  $e_{ij} = 1$ ，若  $v_i \bar{R} v_j$ ，即节点  $v_i$  与节点  $v_j$  不通，则  $e_{ij} = 0$ ； $W_r = (w_{ij})_{N_r \times N_r}$  表示城市群道路网络连边权重矩阵，其中  $w_{ij}$  为边  $ij$  的权重； $H_r = \{h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{N_r}\}$  表示城市群道路网络节点权重集合，其中  $h_i$  为节点  $v_i$  的权重，其值为节点  $v_i$  所有连边权重之和。