

分类号 C93/78
UDC

密级 公开
编号 10741



硕士学位论文

论文题目 航空网络演化对节点城市经济的影响研究
——以兰州市为例

研究生姓名：马娇

指导教师姓名、职称：彭会萍 教授

学科、专业名称：管理科学与工程

研究方向：物流与供应链管理

提交日期：2023年6月14日

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 马斌 签字日期： 2023年5月20日

导师签名： 彭会萍 签字日期： 2023年6月6日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意” / “不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 马斌 签字日期： 2023年5月20日

导师签名： 彭会萍 签字日期： 2023年6月6日

Study on the Impact of Aviation Network Evolution on the Economy of Node Cities-Lanzhou City as an Example

Candidate :Ma Jiao

Supervisor: Peng Huiping

摘要

在我国航空网络快速发展的背景下，如何承接航空网络的影响，促进节点城市的发展，刺激地方经济增长已成为学术界和当地政府关注的热点问题，然而，现有研究仍存在一定弊端，如研究视角单一、忽略各影响因素内部之间关系、忽略航空网络的相关特征等问题。从系统性，动态把握航空网络对节点城市经济的影响，可全面、准确的帮助地方政府制定合适的政策和措施，发挥航空网络的优势，促进城市培育新的经济增长点。因此，系统探究航空网络演化对节点城市经济的影响，把握各影响要素之间的关系，具有重要的理论意义和实践价值。基于此，本研究运用文献分析法、复杂网络分析法、系统动力学等方法对航空网络演化影响节点城市经济的机理展开研究：

(1) 构建我国近十年航空网络模型，对航空网络的演化特征进行分析。基于复杂网络理论，构建2010-2019年航空网络模型，从网络结构指标和网络节点指标分析航空网络的演化特征。分析表明：我国航空网络符合小世界网络特征，航空网络规模不断扩大，航线结构不断优化；航空网络整体结构逐渐向钻石型演化；各节点城市间的航空联系日益紧密；东部领先、西部崛起和中部相对滞后的区域格局基本形成。

(2) 探索航空网络对节点城市经济的影响要素及关系，构建航空网络演化对节点城市经济影响的系统动力学模型。本研究认为节点城市经济系统是一个复杂的宏观经济系统，其发展受多方面要素的影响。首先，明确建模目的并对模型做出假设；其次，利用文献研究法确定系统边界和细化航空网络对节点城市经济的影响，分析各影响要素之间的关系绘制成因果关系图；最后，在因果分析图的基础上引入相关方程和参数，细化成系统动力学流图。

(3) 动态仿真航空网络演化对节点城市经济的影响。以兰州市为具体案例，收集相关数据对模型方程和参数进行设定，验证模型的有效性，量化分析航空网络演化对节点城市经济的影响。研究发现：本研究所建模型是有效的；航空网络扩张影响节点城市经济发展，但短期内影响不明显；航空网络演化对航空旅客运输量的影响较大，对常住人口以及区域生产总值的影响相对较弱。

关键词：航空网络 节点城市 空间演化 系统动力学

Abstract

In the context of the rapid development of China's aviation network, how to undertake the impact of the aviation network, promote the development of node cities and stimulate local economic growth has become a hot issue of concern for academics and local governments. However, there are still certain drawbacks in the existing research, such as single perspective of research, ignoring the relationship between the internal factors of each influence, ignoring the relevant characteristics of aviation network, etc. From the systemic, dynamic grasp of the impact of aviation network on node cities can comprehensively and accurately help local governments to formulate appropriate policies and measures to give full play to the advantages of aviation network and promote the sustainable development of cities, so systematically explore the aviation network. Therefore, it is of great significance and practical value to investigate systematically the influence of aviation network evolution on the economy of nodal cities and to grasp the relationship between the influencing elements. Based on this, this study uses literature analysis, complex network analysis, and system dynamics to investigate the mechanism of aviation network affecting the economy of nodal cities.

(1) Construct the aviation network model of China in the past ten years and analyze the evolution characteristics of aviation network. Based on complex network theory, the aviation network model is constructed

from 2010-2019, and the evolution characteristics of aviation network are analyzed from network structure indicators and node indicators. The analysis shows that: China's aviation network is in line with the characteristics of a small world network, with the scale of the aviation network expanding and the route structure being optimized; the overall structure of the aviation network is gradually evolving towards a diamond type; the aviation connection among node cities is getting closer; the regional pattern of leading in the east, rising in the west and relatively lagging in the center is basically formed.

(2) To explore the elements and relationships of the influence of aviation network on the economy of nodal cities and to construct a system dynamics model of the influence of aviation network evolution on the economy of nodal cities. This study considers the nodal city economic system as a complex macroeconomic system, whose development is influenced by various elements. Firstly, the modeling purpose is clarified and assumptions are made on the model; secondly, the literature research method is used to determine the system boundary and refine the influence of aviation network on the economy of node cities, and the relationship between the influencing elements is analyzed and drawn into a cause-effect diagram; finally, the relevant equations and parameters are introduced on the basis of the cause-effect analysis diagram and refined into a system dynamics flow diagram.

(3) Dynamic simulation of the impact of aviation network evolution on the economy of node cities. Taking Lanzhou city as a specific case, we collect relevant data to set the model equations and parameters, verify the validity of the model, and quantitatively analyze the impact of airline network evolution on the economy of node cities. It is found that: the model proposed in this study is effective; the expansion of aviation network affects the economic development of node cities, but the impact is not obvious in the short term; the impact of aviation network evolution on air passenger traffic is large, and the impact on resident population as well as regional gross product is relatively weak.

Keywords: Aviation network; Nodal City; Spatial Evolution; System Dynamics

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 我国航空运输呈现网络化发展格局	1
1.1.2 航空网络对节点城市经济发展带来影响	2
1.2 问题引出.....	2
1.3 研究目的及意义.....	3
1.3.1 研究目的	3
1.3.2 研究意义	3
1.4 文献综述.....	4
1.4.1 航空网络的研究	4
1.4.2 航空网络对节点城市经济发展的影响研究	6
1.4.3 文献述评	8
1.5 研究内容及方法.....	9
1.5.1 研究内容	9
1.5.2 研究方法	12
1.6 主要创新点.....	12
2 理论基础	14
2.1 复杂网络理论.....	14
2.1.1 复杂网络概述	14
2.1.2 复杂网络结构指标	14
2.1.3 复杂网络节点指标	16
2.2 系统动力学方法理论.....	17
2.2.1 系统动力学概述	17
2.2.2 系统动力学基本构成	18
2.2.3 系统动力学建模步骤	20
3 我国航空网络演化分析	22
3.1 航空网络的构建.....	22

3.2 航空网络结构特征演化分析	22
3.3 航空网络节点特征演化分析	24
3.4 本章小结	27
4 航空网络演化对节点城市经济的影响模型构建	29
4.1 系统建模目的与模型假设	29
4.2 系统边界的确定	30
4.3 系统因果关系分析	31
4.4 系统存量流量图	34
4.5 本章小结	36
5 航空网络演化对节点城市经济的影响仿真分析	37
5.1 案例选取	37
5.2 相关参数及变量的设定	38
5.2.1 参数确定的方法	38
5.2.2 初始值的确定	39
5.2.3 辅助变量参数确定	39
5.2.4 模型主要系统方程	43
5.3 模型的有效性检验	45
5.4 仿真结果分析	46
5.5 航空网络演化对节点城市经济影响的对比分析	48
5.5.1 对比分析—网络结构演化	48
5.5.2 对比分析—网络节点演化	51
5.5.3 对比分析—网络综合演化	54
5.6 本章小结	57
6 结论与对策建议	58
6.1 主要研究结论	58
6.2 对策建议	59
6.3 研究不足	60
参考文献	61

攻读硕士学位期间发表论文及科研情况	67
致谢	68

1 引言

1.1 研究背景

随着世界航空的不断发展，我国的航空建设也驶入“快车道”，我国航空网络的规模不断扩大，航空客、货吞吐量位列世界前茅，并带动地区经济、旅游业、航空工业的发展，与此同时，借助航空的独特优势，提高可达性，加速要素流动，建设航空新城等项目也在如火如荼地开展。在未来一段时间，我国航空网络规模还将持续扩张，网络效能不断提高，研究如何发挥网络优势，促进节点城市经济发展至关重要。

1.1.1 我国航空运输呈现网络化发展格局

1920 年我国第一条国内航线北京—天津的开通，意味着我国的民航事业从此拉开序幕，改革发展后，我国开始民航发展的浪潮，航线网络逐步完善^[1]，2010 年至 2019 年我国航空班列通达城市由 156 增长至 232 个，年均增长率达到 5.87%，近五年开通航空网络的节点城市虽然在持续增加，但是增长速度降低，表明越来越多的城市开通航空服务，航空网络中的航线数也由 4076 条增加到 7602 条，年均增长率为 8.65%，这说明我国节点城市之间的航空联系越来越密切。

民航“十五”计划提出，到 2005 年，建成北京、上海、广州三个大型枢纽机场，初步形成轮辐式网络结构；民航“十一五”提出建设枢纽机场 3 个，大型机场 8 个，加强枢纽机场和大型机场之间的联系；民航“十二五”规划提出打造华东、北方、中南、西南、西北五大机场群；民航“十三五”着力构建层次清晰的现代机场体系，在提高北京、上海、广州关键枢纽机场的同时，逐渐完善成都、昆明、乌鲁木齐等机场的枢纽功能；民航“十四五”规划提出完善航空枢纽机场功能是优化航空运输网络的基石，要在加强枢纽机场建设的同时，增强对支线机场的辐射带动作用。从民航“十五”规划到民航“十四五”规划可以看出我国航空机场不但数量上不断增长，质量上也不断跃升，航空网络在进一步扩张和优化。

1.1.2 航空网络对节点城市经济发展带来影响

城市经济系统是指以这个城市为节点，形成一个经济交流和合作的网络系统。城市经济系统是一个复杂系统，各要素之间相互作用，影响经济发展的方向和速度。航空网络的进一步扩张，给要素在节点城市之间流动提供了便利条件，加速了生产、交换、流动等环节，催化了各种经济活动在城市之间进行^[2]，帮助城市吸引投资，促进城市常住人口数量不断增加，从而促进城市的经济发展和社会进步，但是也带来一定的环境和交通问题，如噪音、空气污染和交通拥堵^[3]。一些城市借助航空网络对城市的触媒影响，以机场业务为核心，发展航空物流业务、客运、货运、旅游、商业等产业，以促进区域产业升级、加速城市化进程^[4]。机场作为城市对外交流的窗口，集聚着对内对外的资源，比如，截止 2019 年我国航空全行业完成旅客运输量约 66000 万人次，完成货邮运输量达到 750 万吨，如此庞大的客流量和货流量，加上所携带的资源、信息等不可估量，也将会节点城市带来巨大的发展潜力。基于航空网络的这种潜能，许多政府期望依托航空产业建立临空经济开发区，进一步带动城市经济发展。随着我国航空网络的进一步扩张，航空网络的演化对于所在城市的经济发展的影响将会更加显著。政府和企业应该认识、把握和利用这种影响，通过扩大航空网络、提升服务质量和拓展市场空间等手段，刺激增加新增长点，提高城市的发展活力，促进城市的可持续发展。

1.2 问题引出

近几十年来，我国航空事业快速发展，对于城市的发展和社会进步起到了显著的促进作用。此外，随着我国进一步推进新型城镇化，城市规模将进一步扩大，人口流动性也将增强，这将进一步提高对航空等基础设施的需求，推动航空事业进一步发展。未来几十年，我国的航空建设将继续蓬勃发展，这将带来更加完善的航空网络，也将为城市经济的发展注入新的活力。然而，由于航空建设的周期长、投资高，一些基于航空进行的开发项目在设计过程中往往只考虑经济效益，忽视城市原有的社会公共服务、社会资源和环境因素。这种单

纯追求经济效益的做法，可能会导致机场和城市的发展不可持续，成为一种浪费资源的负担。

因此，“什么是航空网络？航空网络的演化格局是怎样的？航空网络对节点城市经济发展带来哪些影响？航空网络的演化是否对节点城市经济发展带来显著影响？”等基础性问题的探究和回答可以帮助城市更有效的利用航空发展所带来的机遇，发挥航空的辐射作用，带动节点城市经济发展。

1.3 研究目的及意义

1.3.1 研究目的

本研究以航空网络和节点城市为主要的研究对象，探索航空网络的演化对节点城市经济发展的影响。试图达到以下目的：

探究近十年航空网络演化特征及趋势。以2010-2019年航空数据为基础，构建航空网络，研究航空网络的节点指标和结构指标空间演化特征，了解“什么是航空网络？航空网络演化格局具有怎样的特征？”

探寻航空网络演化对城市经济发展的影响。相对全面的认识航空网络对城市带来的影响，以兰州市为案例，运用系统动力学动态模拟航空网络演化对节点城市关键指标的影响差异，揭示航空网络对兰州市发展的影响程度，以期对兰州市的航空经济发展提出建议。

1.3.2 研究意义

根据我国《“十四五”航空运输网络专项规划》，我国航空网络在未来很长时间内都将不断完善和扩张，也将对节点城市经济产生更加深刻的影响，许多地方政府期望借助航空优势带动城市经济发展，并以此盲目开展相关项目建设，但是结果可能不会特别理想，甚至会对城市经济发展产生阻碍作用。因此，探究航空网络对节点城市经济的影响机理，可有效发挥航空网络的催化作用，以此促进城市的可持续发展。

(1) 理论意义

探究航空网络空间演化的理论框架及客观规律，丰富了航空复杂性体系的研究成果，多角度、动态性深入分析航空网络对节点城市经济的复合影响及各种影响因素之间的关系，丰富了航空网络演化理论和研究成果，从系统性和复杂性对已有的单一、线性的研究范式进行补充，提高研究的准确性和适用性。

(2) 实际意义

理解航空网络对节点城市经济发展带来哪些影响，这些影响要素之间存在怎样的关系，航空网络的演化在节点城市经济发展过程中发挥多大的作用，可为地方政府、行业规划提供一定的价值参考，更好地将航空网络带来的潜在影响转化为实际发展成果，推动我国航空网络的不断发展，也推动城市的可持续发展。

1.4 文献综述

1.4.1 航空网络的研究

交通网络作为一个复杂、综合、动态的系统，具有大规模性、多样性、动态性、同步性等特征，是典型的复杂网络^[5]。复杂网络分析方法为各类交通网络的复杂性研究提供了新的视角和方法。将各类交通实体如机场、高铁、港口定义为节点，节点之间的交通连接如航线、铁路线作为复杂网络的边，距离、时间、运输量、费用等因素可以看成复杂网络的边权^[6]。

(1) 基于复杂网络的航空网络研究现状

航空网络作为具有复杂特性的交通网络，用复杂网络理论去研究静态结构与动态演化机理，得到普遍运用，已有研究通过全球国际航空网络^{[7][8]}、中国国际航空网络^[9]、印度航空网络^[10]、意大利航空网络^[11]、中日韩航空联盟网络^[12]实证分析，得到类似结论，即：航空网络是一个具有高聚类低平均的小世界网络，网络中的节点度数呈现幂律分布。党亚茹^[13]、曾小舟^[14]、杨丽^[15]、李红启^[16]等人基于中国的航空网络数据，以平均路径长度、聚类系数、网络密度、度分布等复杂网络相关指标为依据，分析了我国航空网络和区域航空网络的结构特点，研究发现均是小世界网络，具有“高聚类、低平均”的特征，由少数关键节点控制整个航空网络。在研究航空网络的基本网络特征后，网络的中心化

水平逐渐成为研究热点问题，Petter Holme 等人最先引用紧密度、介数等中心性指标对航空网络的中心性进行测试，国内学者莫辉辉^[17]、曾小舟等^[18]也在对航空网络进行结构性分析后引入网络中心性评价方法，认为我国航空网络呈现不同层次的中心化。

随后，众学者将复杂网络理论和不同学科理论相结合，对航空网络展开多方面研究。例如，冯霞等^[19]运用复杂网络的方法构建航空网络模型，并分析网络的拓扑结构，并在此基础上提出一种考虑节点失效和边失效的鲁棒性评价方法，评估不同的攻击策略下航空网络的稳定性。He Hang^[20]基于复杂网络理论和 K-means 算法对我国航空网络展开研究，并通过聚类仿真实验，得到不同 K 值下中国航空网络节点的视觉聚类结果，得到不同指标下航空网络的层次分类。褚艳玲^[21]构建航空货运加权网络，以复杂网络理论和计量经济学理论为基础，计算空间基尼系数和 NC 系数，分析航空货运网络中机场的聚集程度。陈欣等^[22]以我国航线网络为研究对象，运用空间计量经济学理论，构建空间面板计量模型，研究主要机场对区域经济的溢出效应。

（2）航空网络的空间演化研究现状

在关于航空网络的空间演化研究中，成果颇为丰富，节点城市之间的航空联系数据主要以航线数据或者城市之间的旅客运输量为主。例如，Kashin^[23]以航班数为基础构建网络，研究 1987-2019 年美国航空网络的结构演化特征。Chung^[24]以亚洲航空公司的国际旅客来源地构建加权网络，研究 2014-2018 年亚洲国际客运市场的关键网络特征演化趋势。Li Hongchang^[25]使用 2015 年至 2019 年中国国内航线的新数据集，探索网络的属性与影响因素之间的联系规律。戢晓峰^[26]以云南省的航空网络为研究对象，分析旅游业驱动下的区域航空网络演化特征，认为旅游客流量对航空布局产生显著影响。张培文等^[27]以节点城市之间旅客运输量为联系数据，构建客运加权航空网络，分析近十年来我国客运网络空间结构演化特征。马学广等^[28]采用社会网络分析和 GIS 空间分析相结合的方法，基于航空客流研究我国航空客运网络的总体空间形态、总体联系及局部联系。张婷婷等^[29]基于全国民航机场及航线客流的截面数据构建航空联系网络，并分析基于航空联系网络所反映的城市网络的格局演变。李恩康等^[30]基于 2014 年至 2018 年的全球航空客流数据构建全球城市网络，并运用网络分析法探讨城

市网络中联系强度的演化规律。张凡^[31]以 1997、2002、2007、2012 为典型年份,分析基于航空客流的城市联系网络结构与演化。蒲亚琼^[32]对我国航空货运航空网络拓扑结构现状与演化分析,并在此基础上分析航空货运网络遭遇随机攻击和蓄意攻击时网络的健壮性演化规律。王波^[33]收集地区间机场的跨境客运、货运和航班数目,构建跨境航空客运、货运网络,探究近 20 年航空网络的整体结构和空间格局演化特征。

航线可通过航班时刻表获得,但是只能反映本身是否有联系,并不能精准反映城市间的联系;航空旅客运输量、航空货邮运输量更接近城市间的真实联系^[31],但是已有研究以航空旅客运输量为主,用航空货邮运输量作为节点之间联系数据较少缺乏对两者的综合分析^{[34][35]}。

1.4.2 航空网络对节点城市经济发展的影响研究

航空网络的建设和完善对于节点城市的经济发展具有重要意义,可以加速城市的发展进程,提升城市的综合实力和国际竞争力。机场的建立、航线的开通对城市发展来说最直接的影响就是提高城市的交通效率,减少人们的交通时间和成本,增加城市的便利性和可达性^[36],此外还能促进城市经济发展、提高城市形象、加强与外部联系、机场周边的经济活动区域和物流基地可以成为城市经济发展的新的增长点,促进城市的全面发展,但是还会对环境造成一定的影响。又因为城市经济系统是个复合系统,由许多相互作用的要素构成,其中每个要素可以影响整个系统的行为和性质,由于涉及要素过多,不可能一一穷尽,因此本研究着重分析主要要素。根据文献识别航空网络对节点城市的影响主要分为社会经济、交通两个方面。

(1) 社会经济层面影响

航空网络的发展促进客流量和货流量的增加,吸引人口入驻,促进节点城市的区域经济发展。张杨茗媛^[37]采用了协整和格兰杰因果关系研究江苏省内各机场的客流量与区域经济的关系,认为两者存在正相关关系,机场客流量越大,所在区域的经济越发达。水静远^[38]建立面板向量自回归模型研究中心城市航空运输业与区域经济互动关系,认为飞机座位旅客和货邮的载体,必然促进经济的发展;王天宇^[39]以我国省域机场为研究对象,认为节点城市的消费水平和贸

易规模促进民航旅客运输量的增加。徐鹏杰^[40]建立面板回归模型研究认为民航运输业的发展对区域经济的发展具有较为可观的推动作用。苗志阳^[41]认为人均可支配收入、地面网络可达性及人口数量是影响机场吸引力规模的前三项指标；Volodymyr^[42]以美国所有机场为研究对象，商业旅客航空运输数据为数据源，用面板数据广义矩阵方法，研究机场通航城市数量对区域经济发展的影响，结果发现，每多一个通航城市，可创造 98 个就业机会。Min^[43]以仁川国际机场为案例分析，认为机场的可持续发展对节点城市的社会经济模式发展有重要作用。Nigel Halpern^[44]认为社会经济发展较好的地区，人们选择飞机出行的频率较高。II Aun^[45]通过问卷调查研究认为机场基础设施建设与国家社会经济发展之间存在相关性。

有机场的城市会给城市带来积极的可达性影响，然而也会对周边区域产生一定的负面影响，如空气污染和噪声污染。邢大伟^[46]指出，我国的快速城市化是城市发展的必然趋势，在航空运输业带来便利和繁荣的同时也引发一系列环境问题。赵悦^[47]在研究中指出，在目前全球机场扩张和新机场建设的浪潮中，飞机噪声是影响发展的最大障碍之一。飞机噪声对机场周围居民的干扰最常表现为烦恼和睡眠障碍^{[48][49]}，除噪声问题，环境污染问题也是机场发展过程中遇到的一大障碍，樊重俊^[50]以英国希思罗机场为例认为机场的可持续发展与机场区域的空气质量、机场的三废排放量有关；汪亚男^[51]以北京大兴机场为例，认为机场排放及对环境污染制约了城市发展；曹惠玲^[52]认为机场的环境污染排放对人员健康存在一定的威胁。因此，飞机噪声和污染物排放问题目前已成为制约城市发展的因素，在一定程度上制约节点城市的经济社会发展，因此对负面环境管理十分必要。

（2）交通层面影响

交通可达性是指一个地区或一个城市在航空运输网络中可以到达其他地区或城市的程度，可达性的提高可以促进地区或城市之间的贸易、投资、旅游等经济活动的发展，从而推动地区或城市经济的增长。Aisling^[53]等通过对爱尔兰和英国机场的案例研究，Agrawal^[54]等通过对印度机场的案例研究，Amaya Vega^[55]等通过对爱尔兰机场的研究，国内学者黄洁^[56]以北京双枢纽机场为例，汪瑞琪^[57]以粤港澳大湾区民用机场，均对航空产生的可达性进行研究，发现航

空网络可提高交通可达性，降低出行时间，提高出行效率，相关经济活动的进程被加速进行。潘竟虎等^[58]基于最短路径算法和 GIS 空间分析算法，分别计算了 1991 年和 2012 年我国民用航空机场的可达性，发现随着航空网络的逐渐完善，机场可达性水平逐渐提高。随着航空业的发展和全球化进程的加速，且航空运输以速度快、准时性高、具有高附加值、出行便利等优势，诱使居民越来越多的选择航空出行，扩大了居民出行半径，促进客流量和货流量的提升。比如，Oesingmann Katrin^[59]研究航空运输和客运、货流的关系，通过问卷调查和回归分析，发现机场的开通，可有效促进当地城市的旅客运输量和货物运输量。程谦^[60]研究发现中长距离旅客更偏向于选择航空这一方式出行。

此外，随着机场水平可达性的提升，促使节点城市完善相关配套设施。贾鹏等^[61]认为航空网络的不断发展使得城市之间联系的水平得到极大地提升，然而如果节点城市配套设施得不到改善，将会严重制约人口的流动。王喆冰^[62]以杭州萧山机场为例认为，如不完善空港交通配套设施，将削弱航空交通方式快速、高效的优点，限值空港枢纽的发展，城市发展效能得不到提升。熊娜等^[63]认为如果城市陆侧的可达性较差，这将会影响航空使用的频率。因此，航空网络虽然直接改善了节点城市之间的联系水平，但若想最大限度发挥航空优势，完善节点城市配套交通设施也十分有必要。

1.4.3 文献述评

通过对航空网络及航空网络对城市经济发展影响进行综述，发现已有研究较多的集中于静态航空网络的拓扑结构研究、航空的可达性影响，通过对比分析航空网络对节点城市经济影响的文献发现仍存在以下不足。

(1) 研究视角单一

目前已经有很多研究关注航空网络对城市的影响，但它们往往只从单一学科的视角（如城市规划、经济学、交通等）来探究航空网络对城市的影响，这种方法无法反映航空影响的复杂性和交叉性。虽然有一些研究已经从自己的领域探讨了一些影响，但是没有对这些影响进行全面的总结，导致研究结果往往是片面的和不完整的。因此，我们需要从多个学科的视角来全面梳理航空网络对城市的影响。

（2）忽略影响要素之间的联系

城市经济系统是由人口、产业、交通、基础设施等多个要素相互作用，互相影响形成的一个复合系统，然而，多数研究航空网络对节点城市经济的影响仅仅用区域生产总值这一指标作为表征，忽略系统中其它要素之间的相互作用或依赖关系，这将影响结论的准确性和可靠性。因此，为了更好地理解航空网络对节点城市经济的影响，需要从联系的角度进行研究，着重处理不同影响因素之间的相互作用关系。

（3）遗漏航空的网络特性

已有研究对交通网络进行了很多拓扑特性分析，并认为节点在交通网络拓扑结构中扮演重要作用，同样，航空运输作为交通方式的一种，可以看成由节点和线路构成的网络，节点城市在网络中的作用也十分重要，航空网络规模扩张，扩大节点城市的联系半径，从而扩大其市场范围，加速相关经济活动的生成，但是较少有研究从网络角度探究航空网络演化对城市经济的发展影响。

综上所述，已有文献虽研究航空发展与城市经济之间的关系，但是较多使用定性或线性定量的方法研究单一因素的影响，且忽视航空的网络特性，因此，为全面了解什么是航空网络？航空网络演化对节点城市经济发展带来怎样的影响？本研究运用系统动力学的方法关注航空网络的演化，从网络整体角度和节点角度研究航空网络的演化对节点城市经济的影响机理。

1.5 研究内容及方法

1.5.1 研究内容

本研究按照“什么是航空网络？航空网络的演化有什么规律？航空网络演化对节点城市经济有怎样的影响？”的逻辑，确定本文的研究框架图如图 1.1 所示。

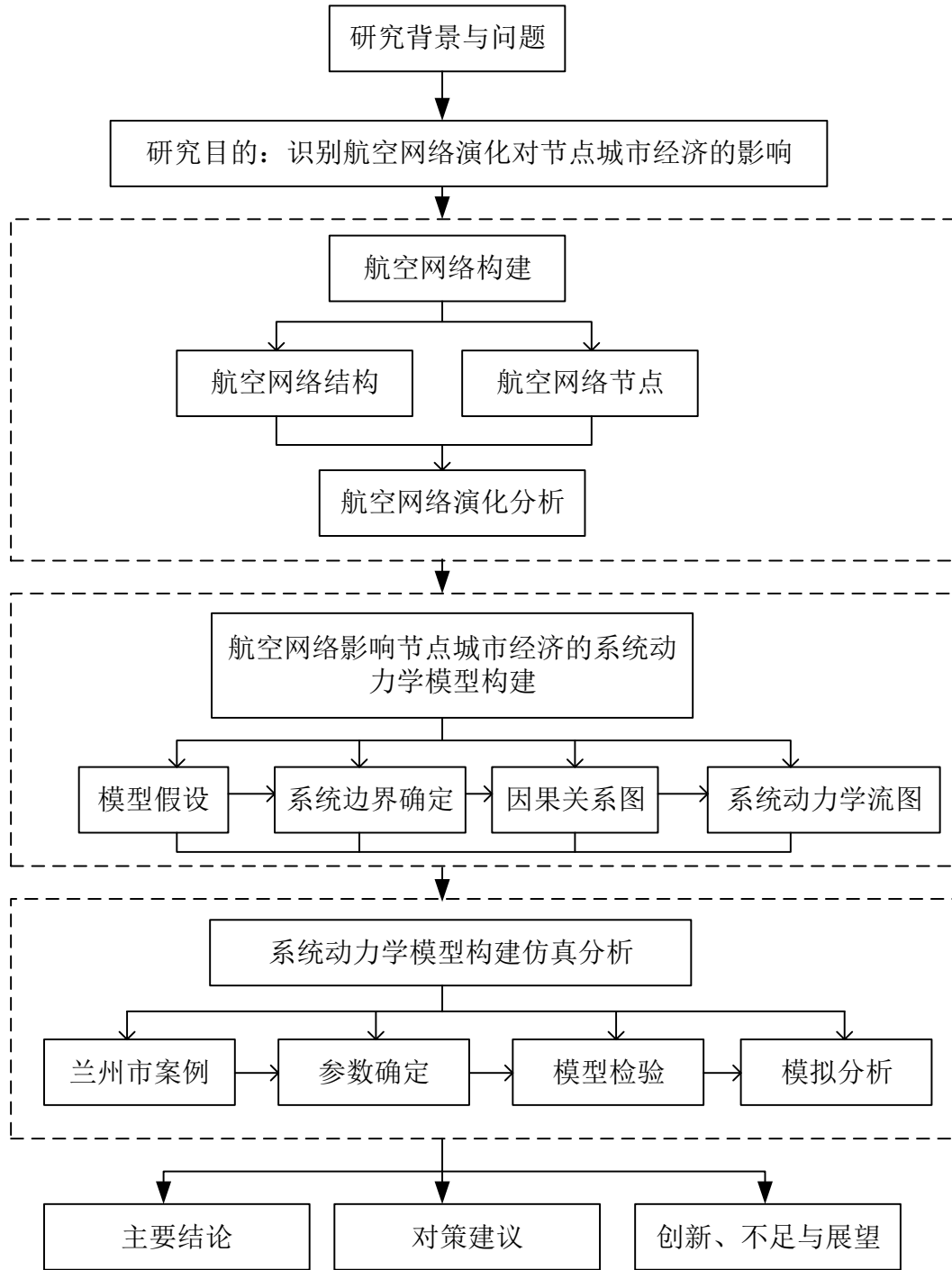


图 1.1 论文研究框架图

根据图 1.1 的研究框架，本文的研究内容主要有以下三个方面：

(1) 航空网络演化及其特征分析。从复杂网络的视角对我国航空网络进行演化特征分析有助于了解航空迅速发展的宏观环境，主要研究“航空网络是什么？航空网络的演化格局是怎样的？”的问题。首先，通过收集航空相关数据；然后，选用经典交通网络建模方法构建复杂网络视角的航空网络模型；最后，

从网络结构和节点地位两个视角下对我国航空网络 2010-2019 年的演化特征进行识别，较为全面地认识我国航空网络演化过程。

(2) 航空网络演化对节点城市经济影响的动态模型研究。通过文献分析识别航空网络对节点城市经济的影响表现以及各影响因素之间的相互作用关系；根据分析构建航空网络对节点城市经济影响的因果关系图；在因果关系图的基础上引入相关方程和参数，细化为系统动力学流图，完成模型的构建。

(3) 以兰州市为具体案例定量模拟航空网络节点城市经济发展的影响与趋势。首先，分析以兰州市作为案例的原因；其次，根据收集的兰州市实际数据对系统动力学模型的方程和相关参数进行设定并验证模型的有效性；最后，对节点城市相关指标进行仿真分析，选择航空旅客运输量、常住人口数量以及区域生产总值作为代表性指标，分别模拟航空网络演化对相关指标的影响。

根据主要的研究内容，确定本文的论文框架如下：

第 1 章研究背景。首先，需要通过对研究背景的分析和研究现状的调查，确定研究问题。其次，总结研究目的和意义，并通过文献综述从理论上进一步突出研究的必要性和前瞻性。然后，根据研究问题，确定主要内容，并在此基础上确定研究方法和技术路线。最后，需要根据研究内容的承接关系，确定论文框架。

第 2 章理论基础。基于国内外相关文献的基础上，对复杂网络理论和系统动力学理论进行阐述，为后文分析打下基础。

第 3 章我国航空网络演化及特征分析。此部分运用复杂网络理论进行模型构建，从网络结构指标和网络节点指标分析我国航空网络的演化特征，并用 ArcGIS 将我国航空网络的整体联系可视化。

第 4 章构建航空网络对节点城市经济影响的动态模型。首先，确定建模目标并对模型做出假设；其次，根据相关文献识别航空网络对节点城市的影响，界定系统边界，建立系统因果回路图；最后，并在因果回路图的基础上细化为系统流图。

第 5 章航空网络对节点城市经济影响的仿真分析。首先，对本研究选取兰州市作为具体案例的原因进行分析；然后，以具体案例的实际数据对相关方程

和参数进行估计；最后，检验模型的有效性并定量化模拟航空网络演化对节点城市影响的趋势。

第 6 章结论与对策。对文章的主要结论进行提炼，并以此为基础，对节点城市可持续发展提出相关建议，最后，对本文章的研究不足进行阐述。

1.5.2 研究方法

为实现探究航空网络演化对节点城市经济影响的研究目的，本研究具体运用的研究方法如下：

（1）文献研究法

文献研究法是指通过对已发表文献进行系统性收集、筛选、综述和分析，以获取、整合和总结关于航空网络对节点城市影响机理这一研究问题的信息和知识的研究方法。文献研究法贯穿论文全文，主要用于第 1 章的文献综述，明确国内外关于研究问题的必要性和前沿性；第 4 章构建航空网络对节点城市影响机理的系统动力学模型中系统边界的识别和因果回路图的构建

（2）复杂网络分析法

本研究通过对收集的航空数据进行整理，基于复杂网络理论，构建近十年的航空网络，运用网络分析法从整体指标和节点指标方面对航空货运网络的动态演化进行分析，并运用 ArcGIS 进行空间的可视化处理。

（3）系统仿真方法

系统动力学仿真方法通过建立系统动力学模型来描述各组成部分之间相互作用，能描述各部分之间的关系并模拟要素虽时间变化的行为规律。本研究在文献分析的基础上建立能描述航空网络影响节点城市经济发展的系统动力学模型，并进行模型有效性进行验证，定量模拟航空网络演化对节点城市经济的影响和趋势。

1.6 主要创新点

归纳本研究，主要创新点如下：

（1）得到航空网络空间演化的一般规律，弥补已有研究复杂性分析不足的缺陷。基于航空相关数据，构建航空网络，采用复杂网络分析法从网络结构和

网络节点两个方面对我国航空网络 2010-2019 年的演化特征进行识别，相对全面地认识我国航空网络演化过程。

(2) 将系统动力学的研究方法引入航空网络对节点城市经济影响的研究中，弥补现有研究动态性、系统性不足的缺陷。节点城市经济系统是个复合系统，受人口、运输、环境等多方面要素的影响，各要素相互联系、相互依赖，而现有研究大多忽视系统中各要素之间的关系。本研究运用系统思维，考虑多种影响要素之间的关系并进行建模、仿真，探寻航空网络对节点城市经济影响的机理。

2 理论基础

2.1 复杂网络理论

2.1.1 复杂网络概述

复杂网络是由大量相互连接的节点组成的网络结构，这些节点之间的联系可能是物理或抽象的，例如社交网络中的人与人之间的联系、电力系统中的电力传输线路之间的联系、蛋白质相互作用网络中的蛋白质之间的联系等。复杂网络研究的主要目标是理解网络的性质和行为，并研究网络在不同领域中的应用。复杂网络的拓扑结构可以用图论中的图（Graph）来描述，任何网络都可看成是由节点和边组成的系统。

复杂网络的研究起源于欧拉在 18 世纪提出的“七桥问题”，随着图论和统计物理学的发展，复杂网络研究逐渐形成了自己的学科领域。在 20 世纪初，Erdős 和 Renyi 建立随机图模型，随机图的研究奠定了复杂网络研究的基础，但是随机图并不能很好地描述真实世界中的复杂网络。20 世纪 90 年代，Watts 和 Strogatz 提出了小世界模型，小世界模型是一种介于规则图和随机图之间的图模型，它解释了现实世界中的许多网络具有高连通性和短路径的现象。随后，Barabasi 和 Albert 提出了 BA 模型。BA 模型是一种基于“优先连接”的图模型，它解释了现实世界中许多网络的“富者愈富”的现象。BA 模型是现代复杂网络理论的重要组成部分，它在许多领域中得到了广泛的应用。到 20 世纪即将结束之际，复杂网络研究已得到广泛普及，从数学领域扩展到物理学、生物学等领域。

2.1.2 复杂网络结构指标

在图论中，具体网络可由一个节点集合 V 和一个边集合 E 组成，表示为 $G=(V,E)$ ，对于一个无向图，边是没有方向的，表示为 (i,j) 和 (j,i) ；对于有向图，边有方向；边还可以带权，表示实体之间的关系强度或距离。

①网络密度

网络密度^[64]是指航空网络中实际存在的连接数与可能存在的连接数之比。网络密度是一个重要的指标，可以用来描述网络的紧密程度，网络密度越高，表示节点之间的连接越紧密，信息传递的效率也会更高^[65]。

②小世界网络

小世界网络是一种介于规则网络和随机网络之间的网络模型。在小世界网络中，网络的节点之间存在较高的局部聚集性，即同一区域内的节点彼此连接；同时，网络中也存在跨越较远距离的连接，以实现全局的连通性^[66]。

小世界网络的拓扑结构通常表现为一个具有高聚集度和短平均路径长度的网络。平均路径长度 L 指网络中任意两节点之间的最短路径的平均长度，计算公式如（2.1）所示：

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (2.1)$$

其中 N 为网络的节点总数， d_{ij} 为连接两节点 i 和 j 之间的最短路径长度。

聚类系数可衡量节点 i 的邻居节点之间的连接程度。对于节点 i ，假设有 k_i 个邻居节点， k_i 个节点实际情况下存在的边为 E_i ，则聚类系数的定义如（2.2）所示：

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2.2)$$

③平均点度

在复杂网络中，平均点度指的是所有节点的度数之和除以节点数量。可用如公式（2.3）来表示：

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2.3)$$

平均点度是衡量网络中节点连接程度的一个重要指标。它可以用来判断网络的稠密程度，即平均点度越大，网络越密集。另外，平均点度还可以用来判断网络的结构特征，例如，对于一个随机网络，其平均点度可以用来估算网络

中节点的连通性。在社交网络、交通网络等实际应用中，平均点度也被广泛地用来描述网络中节点的重要性和影响力。

2.1.3 复杂网络节点指标

复杂网络节点的中心性大小可反映节点在网络中的重要程度，常用指标有度数中心度、紧密中心度、介数中心度^[67]。

① 度数中心度 C_D

节点 i 的度中心性 $C_D(i)$ 就是其度 k_i 除以最大可能的度 $N-1$ ，表示某节点与其他节点建立直接联系的能力，具体公式如 (2.4)：

$$C_D(i) = \frac{k_i}{(N-1)} \quad (2.4)$$

从定义中可以看出，度数中心度越大的节点在网络中拥有更多的网络节点。在航空网络中，机场的度数中心度越高，表示该机场直接连接的其他机场数量越多，具有更广泛的航线覆盖和更多的出行选择，度数中心度高的机场通常是重要的转机中心和航空枢纽，对于整个航空网络的连通性和稳定性具有重要作用。

② 接近中心度 C_C

接近中心性是用来衡量网络中节点与其他节点之间距离的一个指标，其定义是节点到所有其他节点的平均最短路径的倒数，公式见 (2.5)：

$$C_C(i) = \frac{(N-1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}} \quad (2.5)$$

在交通网络的研究中，一般将接近中心性当作衡量可达性的指标^[68]，一个节点的接近中心性越高，表示该节点到其它节点的距离越近，与其它节点的联系更加紧密，交通成本就越低，可达性也越高。

③ 介数中心度 C_B

两个节点最短路径经过某节点的次数，反映节点在网络中的连接作用，公式见 (2.6)，其中 B_i 是节点 i 的介数：

$$C_B(i) = \frac{2B_i}{(N-1)(N-2)} \quad (2.6)$$

航空网络中介数中心度高的机场被认为是航空网络中的重要枢纽，因为它们可以作为中转站连接起多个机场之间的航班，此外，还可促进旅客的流动和货物的运输，对促进经济社会发展有重要作用。

2.2 系统动力学方法理论

2.2.1 系统动力学概述

系统动力学（System Dynamics, SD）的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代，是麻省理工学院的福雷斯特教授提出的，是一门集系统研究、信息反馈、行为分析的一种综合交叉学科^[69]。随着计算机技术的不断进步，系统动力学得到了迅速发展，并在许多领域得到了广泛应用，包括管理学、经济学、环境科学和社会科学等。系统动力学将系统科学理论与计算机仿真技术相结合，利用信息反馈原理分析系统要素之间的因果关系，寻找问题的根源，建立系统动力学模型，并应用计算机仿真技术来分析系统的宏观行为，从而找到解决问题的正确方法。换句话说，系统动力学是一种分析和解决复杂问题的方法，它利用计算机技术来模拟系统的行为，并通过对系统的分析和理解，提出有效的解决方案。

系统动力学主要适用于解决以下问题：

（1）系统动力学适用于解决长期性问题

系统动力学是一种系统性的方法，主要优势就是能够模拟和分析长期变化和复杂互动的动态系统，经常被用于研究经济、环境、社会和健康等领域的问题。该方法能帮助我们研究长期趋势、环境影响和策略干预等问题，是许多决策支持根据和政策制定根据的基础。

（2）系统动力学适用于数据量不足、精度不高问题

系统动力学的目的是理解和模拟系统的结构、行为和演化，对数据的精度和数量要求相对较低。在研究社会经济问题时，绝大多数变量需要数据的支持，但是仍有需要变量难以量化、时间久远数据难以获取等情况，系统动力学可在进行因果分析的基础上，借助以获取的数据进行推导得出。

(3) 系统动力学适用于解决非线性、高阶及时变等问题

复杂的社会经济系统很难都是线性形式的，往往是非线性、高阶的、时变的问题，系统动力学采用微分方程的形式描述系统的动态行为，并考虑系统内部各个部分之间的相互作用和反馈，重点关注系统的整体而非单个因素的行为。

航空系统作为一个复杂巨系统，对节点城市的影响是非线性的、相互作用的，系统内部有许多的要素和反馈回路，很难用一般的线性方法对解决。用系统的方法从整体把握航空网络对节点城市的影响机理是十分必要的，因此，使用系统动力学来研究航空网络对节点城市的影响具有较高的可行性，可通过对不同变量的进行仿真模拟，对比分析对节点城市更好发展提出科学的建议。

系统动力学建模和仿真中，最常用的软件是 Vensim。Vensim 是一个系统动力学建模和仿真软件，可以用来建立和分析动态复杂系统的行为。Vensim 具有用户友好的界面，可以使用鼠标和键盘快捷键进行操作，同时还支持多种语言和单位。它的核心功能包括模型构建、参数设置、仿真运行、敏感性分析和策略模拟等。Vensim 支持多种模型类型，包括动态系统、离散事件系统和代理模型等。用户可以使用 Vensim 中的图形工具来构建模型，并可以根据需要添加变量、方程、流和汇等元素来描述系统。Vensim 还支持模型的可视化，可以生成各种类型的图表和图形来展示模型的结果。除此之外，Vensim 还具备敏感性分析的功能，可以用来确定模型中不确定因素的影响，通过改变模型参数和假设条件来模拟系统行为，并可以比较不同情况下的结果。

2.2.2 系统动力学基本构成

(1) 因果关系图

系统动力学中因果分析图 (Causal Loop Diagram, CLD) 是一种图形化的工具，用于表示系统中不同变量之间的因果关系。它通过描述变量之间的相互作用和反馈循环来帮助分析系统的行为和演化。

① 因果链

因果分析图的基本构成是因果链，因果链是由变量和箭头组成，箭头方向表示变量之间的因果关系的方向，每条因果链都有极性，用正 (+) 或者负 (-)

表示，如图 2.1 所示，正极性表示在其他条件相同的情况下，X 和 Y 的变化呈现正相关关系，负极性表示两变量间呈现负相关关系。



图 2.1 因果链

②因果反馈环

因果反馈环是指一个系统中存在的一组变量之间的循环关系，其中某些变量的值影响其他变量的值，同时这些变量的值也受到其他变量的值的影响，从而形成一个循环。因此，这种循环关系可以被视为是一种反馈，因为系统的输出会影响系统的输入。具体来说，因果反馈环由以下几个要素构成：

变量：系统中的变量，可以是任何可以被测量或观察到的属性或状态。

关系：变量之间的相互作用和依赖关系。这些关系可以用图形表示，其中每个变量表示为一个节点，每个关系表示为一个箭头。

方向：箭头的方向表示变量之间的因果关系。例如，一个箭头从变量 A 指向变量 B，表示 A 的值会影响 B 的值。

循环：因果反馈环是指存在一个或多个箭头形成了一个闭合的循环，其中某些变量的值会影响它们自己，从而形成一个自我增强或自我抑制的循环。

因果反馈环是系统动力学中一个重要的概念，因为它们可以导致复杂的系统行为，例如非线性、不稳定、震荡和失控等现象。了解和分析因果反馈环可以帮助人们更好地理解和管理复杂系统。

(2) 存量流量图

系统动力学中，存量流量图是用于描述系统内各个变量之间关系的一种图形化工具，通常用于分析和预测动态系统的行为。存量流量图包括以下几个方面：

存量 (Stock): 指系统中可被累积的量, 例如物质、能量或资金等。在存量流量图中, 存量通常以矩形或圆圈的形式表示, 表示系统内一定时期内的储存量。

流量 (Flow): 指系统中流动的量, 例如物质、能量或资金等。在存量流量图中, 流量通常以箭头的形式表示, 表示系统内某个时期内的流动量。

累积函数 (Accumulation function): 指存量如何随着时间的变化而变化的函数, 也称为“储量方程”。累积函数通常用于描述存量的动态变化。

流量函数 (Flow function): 指流量如何随着时间的变化而变化的函数, 也称为“流量方程”。流量函数通常用于描述流量的动态变化。

条件 (Condition): 指影响存量和流量变化的外部因素, 例如环境、政策或人类活动等。条件通常以矩形的形式表示, 放置在存量流量图的外部。

通过绘制存量流量图, 系统动力学研究者可以更好地理解系统内各个变量之间的关系, 并且预测系统未来的行为。

2.2.3 系统动力学建模步骤

首先, 运用系统的方法对研究问题进行分析, 定义系统的边界及建模的目标; 然后, 根据目标和边界, 建立系统内部因果分析图, 如果系统较为复杂, 可将整个系统划分为多个子系统; 在因果分析图的基础上进行细化, 建立数学方程来描述变量之间的关系; 为使模型能够反映真实的系统行为, 需要根据现有数据和经验对方程中的参数进行估计, 进而进行模型检验和仿真。如果模型检验不合格, 需要进行调整修正, 直至符合实际情况为止。具体流程可见图 2.2。

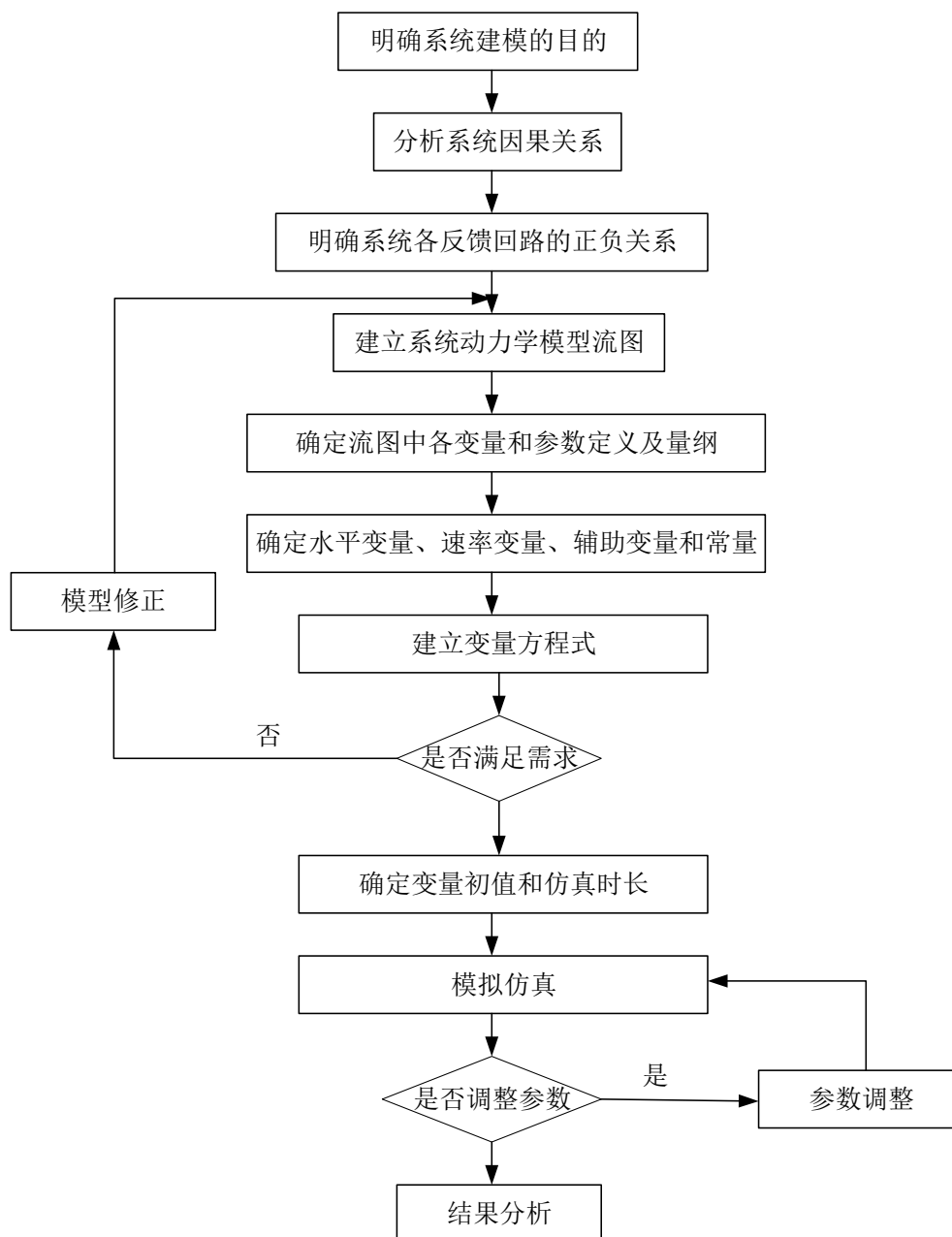


图 2.2 系统动力学建模流程图

3 我国航空网络演化分析

3.1 航空网络的构建

构建航空网络模型是对航空复杂系统进行网络特征分析的基础，可将地理上的航空网络抽象成网络分析可识别的节点和边。交通网络的建模常采用经典法进行构建，即将交通线路视作网络的边，交通线路的交叉口或者交汇点视作节点，这种建模方法能够较为经典，能较为直观反映道路网络的特征，被广泛用于城市地理学领域。本研究，主要研究航空网络的一般属性，对建模方法要求不高，因此参考已有研究关于航空网络^{[8][14]}的建模，采用经典法进行建模。

本文以中国境内（不包含香港、澳门和台湾地区的机场）民用机场所在的城市为节点，节点间的航线联系为边，节点间航线运输量为边权，构建加权航空网络。航线间的航空旅客运输量和航空货物运输量更能反映城市间的真实联系^[64]，为了更精确表示节点城市间的联系，本研究采用旅客运输量和货物运输量加权后得到的值作为节点间的边权。由于航空旅客运输量和货邮运输量单位不同，本研究参考宋函^[70]的研究，将旅客运输量与货邮运输量按每旅客 90KG 折算后相加，将折算后的值作为航线间的综合运输量。机场间旅客运输量和货邮运输量数据来源《从统计看民航 2009-2020》，并将同城机场进行合并，如：首都机场+大兴机场=北京机场，浦东机场+虹桥机场=上海机场。

3.2 航空网络结构特征演化分析

利用复杂网络的方法研究近十年我国航空网络的演化有利于较为全面的了解基于航空流的城市网络的整体概况和格局，2010-2019 年航空网络结构特征数据表如表 3.1 所示。

表 3.1 2010-2019 年航空网络结构特征数据表

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
聚集系数	0.745	0.740	0.738	0.739	0.732	0.711	0.707	0.698	0.687	0.675
随机网络聚类系数	0.980	0.979	0.971	0.963	0.961	0.951	0.943	0.931	0.925	0.910
比值	0.750	0.756	0.760	0.768	0.762	0.748	0.750	0.749	0.743	0.742
平均路径长度	2.260	2.256	2.226	2.234	2.232	2.206	2.197	2.185	2.103	2.095
随机网络平均路径	6.766	6.899	6.913	7.047	7.971	8.051	8.077	9.104	9.736	11.144
比值	0.334	0.327	0.322	0.317	0.280	0.274	0.272	0.240	0.216	0.188
网络密度	0.133	0.135	0.136	0.140	0.146	0.149	0.155	0.162	0.167	0.175
平均节点度	15.348	15.947	15.731	16.032	16.232	15.571	15.946	17.301	16.771	18.202

随着航空网络的规模不断扩大，航线结构不断优化。2010—2019 年我国航空网络集聚系数整体呈现下降趋势由 0.745 下降到 0.675，说明我国航空网络的聚集性减弱，我国国内机场之间航线连接更加紧密，航线基数大幅增加，是我国机场集聚系数降低的原因。

平均路径长度表示网络中任意两节点之间距离的平均值，就我国航空网络而言，平均路径长度体现出在从节点城市 i 到节点城市 j 的中转次数，平均路径长度越小，中转次数越少，其中所花费的时间越少。我国航空网络平均路径长度整体呈现缓慢下降趋势，由 2.260 下降至 2.095，说明我国航空网络的整体联系更加紧凑，出行效率有所提高。

与同规模的随机网络相比，我国航空网络具有与之较为接近的聚类系数，比值保持在 0.742~0.768，处于同一数量级，而我国航空网络的集聚系数和同规模随机网络相比具有较大差别，是随机网络的 0.188~0.334 倍，因此，我国航空货运网络符合复杂网络理论中小世界的“高聚类、低平均”的特征，局部网络中的节点联系更加密切，航空运输更为便捷。

网络平均节点度在观测年份中变化不明显，始终处于上下浮动的状态，但整体上看还是处于上升状态，说明航空网络结构的凝聚性随着时间推移逐渐增强，网络整体结构内部日益均衡；网络密度越高，网络成员的合作行为越多，信息流动越容易，网络性能越好，就航空网络密度而言，2010-2019 年我国航空

网络密度整体呈现递增趋势，由 2010 年的 0.133 增加到 2019 年的 0.175，增长幅度达到 31%，说明各节点城市间的航空联系逐年增强且日益紧密，主要是因为随我国经济的发展，制造和消费不断升级，对于高附加值、时效性强的需求越来越多，城市之间越来越依赖于航空这一运输方式。

3.3 航空网络节点特征演化分析

网络的中心性反映网络中的“主导者”，是复杂网络节点特征分析的重点之一，三个量化网络节点的重要指标分别是度数中心度、接近中心度和中介中心度。由于篇幅有限，以 2010 年为起始年，每间隔三年选取一个典型年份进行分析，最终选择 2010、2013、2016、2019 年四年典型年份的航空网络排名前十的中心性进行分析，具体结果如表 3.2—表 3.4 所示。

表 3.2 典型年份航空网络度数中心度的演化

排名	2010		2013		2016		2019	
	城市	度数中心度	城市	度数中心度	城市	度数中心度	城市	度数中心度
1	北京	37.135	北京	41.213	北京	45.014	北京	49.001
2	上海	36.214	上海	41.011	上海	43.998	上海	48.013
3	广州	34.534	广州	39.891	广州	41.979	广州	47.881
4	深圳	33.981	深圳	36.021	成都	40.154	成都	46.014
5	武汉	29.154	杭州	36.011	重庆	37.989	西安	44.867
6	杭州	28.981	郑州	35.673	杭州	35.991	重庆	42.517
7	郑州	28.881	成都	35.254	西安	35.817	深圳	40.751
8	长沙	27.561	重庆	34.871	深圳	35.001	郑州	38.101
9	成都	27.413	西安	34.215	长沙	34.516	杭州	35.889
10	南京	27.005	厦门	33.061	郑州	34.011	昆明	35.718

典型年份航空网络度数中心度演化如表 3.2 所示。度数中心度的计算能够反映航空网络的中心结构，节点城市 i 的度数中心度的数值越大，表明与该城市联系的城市就越多，在网络中的可支配地位就越高。从 2010 年到 2019 年北京、上海、广州的度数中心度一直位居前三地位，这可以反映近十年来，我国航空网络的重心一直以这三座城市为主，北京市作为头部城市，度数中心度一直居于首位，也说明北京市与其它城市的联系更为密切。以成都、重庆、西安、昆明为代表的西部城市的度数中心度地位逐步提高，上升势头较为迅速，2016、2019 年成都、重庆的度数中心度甚至超过深圳，杭州、长沙等城市的排名出现下降趋势，也从侧面说明了，随着西部城市的地位的崛起，我国的航空网络中心逐渐向西部转移。

表 3.3 典型年份航空网络接近中心度的演化

排名	2010		2013		2016		2019	
	城市	接近中心度	城市	接近中心度	城市	接近中心度	城市	接近中心度
1	北京	0.303	北京	0.314	北京	0.397	北京	0.401
2	上海	0.291	上海	0.310	上海	0.393	上海	0.399
3	广州	0.271	广州	0.304	成都	0.373	广州	0.391
4	深圳	0.264	深圳	0.297	广州	0.370	成都	0.381
5	成都	0.257	成都	0.297	重庆	0.366	西安	0.379
6	重庆	0.257	重庆	0.295	西安	0.357	昆明	0.369
7	郑州	0.255	西安	0.277	长沙	0.331	重庆	0.351
8	杭州	0.250	杭州	0.271	深圳	0.329	郑州	0.335
9	长沙	0.246	郑州	0.267	杭州	0.318	深圳	0.325
10	西安	0.246	长沙	0.265	郑州	0.309	杭州	0.311

典型年份航空网络接近中心度演化如表 3.3 所示。接近中心度可反映节点城市与网络中心的紧密程度。从观测年份中接近中心性排名前十的城市来看，排名城市与度数中心性排名较为相似，但还是反应一些额外的特点。西部城市接近中心性的起步较早，西部城市在 2013 年以后度数中心度才有大幅提升，并超过东部城市，但西部城市的接近中心性在 2010 年的时候就呈现增长势头，成都、重庆在 2010 年时接近中心性超过郑州、长沙、杭州等中、东部城市，这一现象也从侧面反映了西部城市的崛起路径，即通过与航空网络的中心城市建立和强化联系来完成初始化的扩张，与中心城市建立完善联系后逐步与二线、三线城市建立联系，最终努力实现在网络中心性上完成对东部城市的反超。

表 3.4 典型年份航空网络介数中心度的演化

排名	2010		2013		2016		2019	
	城市	介数中心度	城市	介数中心度	城市	介数中心度	城市	介数中心度
1	北京	0.223	北京	0.237	上海	0.253	北京	0.256
2	上海	0.220	广州	0.230	北京	0.247	上海	0.249
3	广州	0.217	上海	0.223	重庆	0.231	昆明	0.211
4	深圳	0.209	重庆	0.214	深圳	0.201	成都	0.203
5	重庆	0.201	西安	0.201	成都	0.198	重庆	0.191
6	西安	0.187	成都	0.193	重庆	0.189	西安	0.179
7	深圳	0.163	昆明	0.190	西安	0.189	乌鲁木齐	0.178
8	长沙	0.154	深圳	0.165	乌鲁木齐	0.171	广州	0.169
9	武汉	0.147	乌鲁木齐	0.143	广州	0.133	郑州	0.158
10	乌鲁木齐	0.111	南京	0.129	昆明	0.134	长沙	0.137

典型年份航空网络介数中心度演化如表 3.4 所示。节点城市的介数中心度反映在网络中的中介能力，数值越大，说明该节点在网络中的协调能力越强，越处于网络中的枢纽位置。观测年份中，介数中心度的位序排名变动较大，有些核心城市的介数中心度排名小于边缘城市，如 2019 年昆明的介数中心度超越广州、深圳位居第三，乌鲁木齐的中介中心度排名逐渐上升，并超越广州、郑州等城市，这说明像昆明、乌鲁木齐这样的边缘城市在我国航空网络中扮演着越来越重要的战略角色，这种趋势与云南和新疆的区位体系有很大的联系。新疆地域广阔，人口分布相对分散，因此需要支线航空来维持城市之间的联系；而云南的地形条件限制了其他交通方式的发展，因此航空运输成为了连接城市之间的便捷方式。因此，乌鲁木齐和昆明在区域中扮演着重要的角色，这说明在西部大开发的战略背景下，我国西部城市的经济活力不断上升，与东部地区的差距变小，承担越来越重要的中转枢纽功能。

三种中心度的计算揭示了我国航空网络的中心结构，也揭示了我国中心机场的演化趋势，为了更直观的反映我国航空网络的整体变化，本研究还采用 GIS 空间可视化的方法将航空网络中的联系表现出来，根据图 3.1，可以得出 2010-2019 年我国航空网络的演化情况，可总结如下特点：

航空网络中节点城市的联系呈现递增态势。从 2010 年到 2019 年的加权航空网络的节点联系情况可以看出，节点城市的联系强度日益加深。2010 年各节点城市之间联系相对稀松，仅仅是建立联系，节点间的运输量较少，仅仅北京和上海这一条航线的联系达到 50 万吨以上，也从侧面说明了深圳在 2010 年的航空网络中联系度不够高，中心度低于上海。2013 年北京、上海、深圳的联系更加密切，深圳到上海的航线的运输量也达到 50 万吨，深圳的中心性地位上升。2016 年的航空网络中节点城市联系有了大幅提升，除了北京、上海、广州之间的主要航线外，成都到北京航线的运输量也突破 50 万吨。2019 年，我国航空网络进一步完善，重庆、西安等西部城市与一线城市的联系逐渐加强。

我国航空网络向钻石型结构演化。2010 年我国的航空网络的中心以北京和上海为主，2013 年网络结构由两中心向北京、上海、广州三中心演化，2016 年后随着成都这一节点城市的快速崛起，成都在网络中的地位越来越重要，网络结构逐渐向第四中心转化。

东部领先、西部崛起、中部相对滞后的区域格局基本形成。2010-2013 年以北京、上海为首的东部地区凭借优越的区位条件和领先的经济水平，率先实现航空网络快速发展，节点城市之间的联系大幅提升，2013-2019 年航线联系运输量达到 50 万吨以上的航线仍以东部地区为主。2016 年后以成都、重庆、西安为代表的西部城市在航空网络中的地位崛起，与北京、上海等城市的航空联系量达到 50 万吨以上；2010-2019 年以武汉、长沙为代表的城市航空运输量以 20 万—50 万之间为主，结合表 3.2-3.4 可知，随着东部城市的一路领先和西部城市的逐步崛起，中部城市的网络地位有所下降。

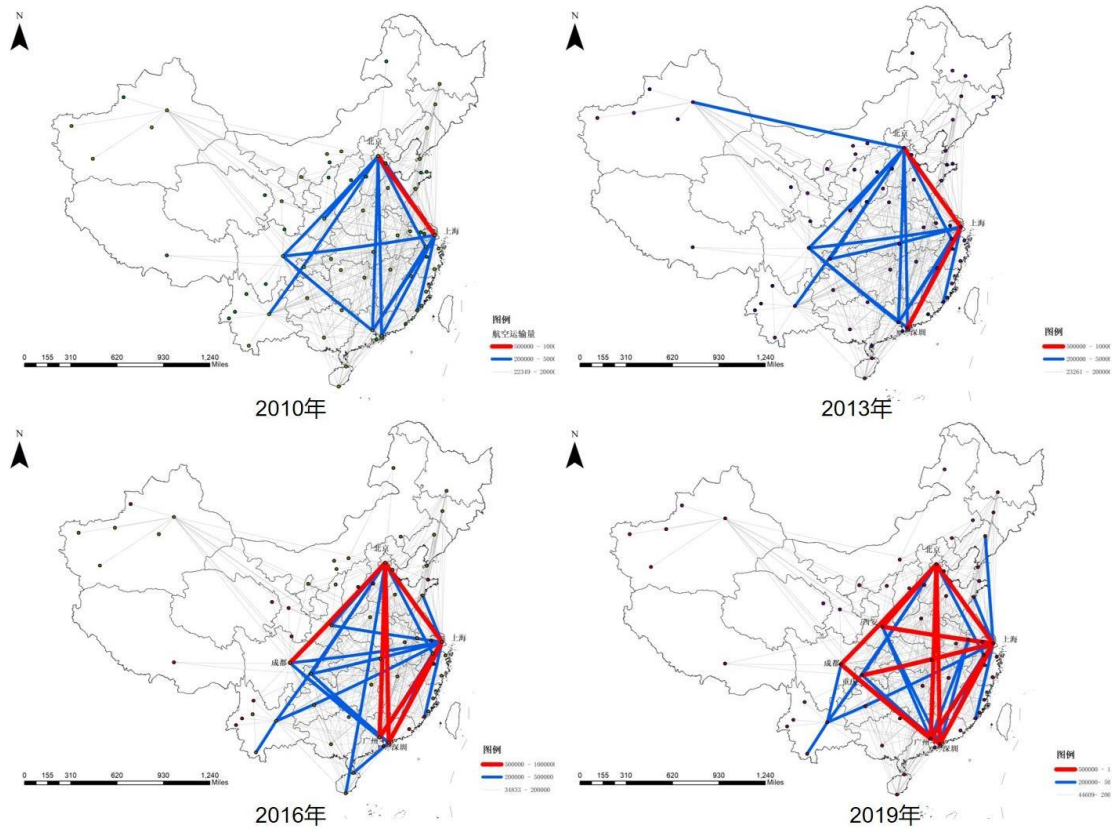


图 3.1 典型年份我国航空网络结构示意图

3.4 本章小结

本章通过收集国内航空数据，构建 2010-2019 年航空网络，基于复杂网络理论从我国航空网络的结构属性和节点属性进行演化分析，研究发现：（1）我国航空网络规模不断扩大，航线结构不断优化。航空网络联系更加紧凑，符合小

世界网络特征。(2) 我国航空网络逐渐向钻石结构演化。航空网络整体结构存在等级化特点,网络中心逐渐由北京、上海、广州向北京、上海、广州、成都四中心演化。(3) 节点城市联系逐渐加强。早期航空联系相对稀松,主要以东部地区为主,后来随中西部地区崛起,航空联系逐渐扩散,航空联系的条数和强度呈现增加态势。(4) 东部领先、西部崛起、中部相对滞后的区域格局基本形成。东部城市率先崛起并一直处于领先地位,西部大开发战略的实施,给重庆、成都等西部城市带来发展活力,网络地位逐渐变高,在东部领先、西部快速崛起的背景下,以武汉、长沙为代表的中部城市地位有所下降。

4 航空网络演化对节点城市经济的影响模型构建

4.1 系统建模目的与模型假设

(1) 建模目的

随着航空市场的扩大，航空网络的规模进一步扩张，其对节点城市的影响也会更加明显，许多政府希望借助航空的催化作用，着力打造临空经济区，进一步带动节点城市经济的发展，然而，航空网络的扩张对节点城市经济发展的影响并不一定都是积极的，其影响是复杂且系统的，此外，航空发展的不同阶段对节点城市经济的影响是不同的。因此，从系统角度、动态分析去研究航空网络对节点城市经济的引导作用，有利于指导节点城市经济的发展。基于此，本研究以航空网络演化对节点城市经济的影响机理为对象，建立系统动力学模型，梳理航空网络对节点城市经济的影响关系及机理，明确其内部反馈关系，定量模拟航空网络演化对节点城市经济的影响趋势。

(2) 模型假设

本研究认为节点城市经济系统是一个复杂的宏观经济系统，其受多方面因素的影响。这些因素包括国家宏观经济政策、地区经济环境、产业结构、自然环境、人口规模和结构等等。这些因素的相互作用和影响决定了节点城市的经济发展趋势和方向，但如果在建模过程中面面俱到，考虑较多变量，会造成模型较为复杂从而无法模拟，为了模型的操作性，对该系统动力学模型做出如下假设：

①模型的主要变量是基于第 1 章中航空网络对节点城市经济影响分类的关键指标进行量化建立，不考虑其它不明显变量。

②由于航空运输主要针对高附加值的货物，因此，对于该航空网络系统，只考虑第三产业的发展，不考虑农业、工业产业的发展。

③忽略要素间不重要的关系，本研究仅根据参考文献已有结论确定各变量之间的关系，不考虑影响不明显的关系以保证模型的精度。

4.2 系统边界的确定

本文研究的是航空网络演化对节点城市经济系统的影响，其中节点城市经济系统是指在一个区域中，以某个城市为中心，周边地区和其他城市都以这个城市为节点，形成一个经济交流和合作的网络系统。城市经济系统是一个复杂系统，各要素之间相互作用，影响经济发展的方向和速度。

本研究以目的性、综合性、科学性为原则，搜集相关资料，以相关文献为基础并结合实际情况进行系统边界的确定。由于该系统涉及的要素较多，下面对将着重对系统的核心要素进行归纳和分析。

（1）区域经济指标

区域生产总值是衡量一个地区或国家经济总量和增长速度的核心指标，是评估经济发展状况的重要依据，因此，选择区域生产总值作为衡量节点城市经济发展的重要指标。

机场地区是一个服务型的经济体系，第三产业也是以服务为主导的经济部门，因此，本研究只考虑第三产业生产总值带来的经济量。

虽然常住人口数量通常被认为是人口学和社会学领域的指标，但是在一定程度上能间接反映经济系统的状况，一般认为地区或国家的常住人口数量的增加意味着该地区或国家的经济发展较为活跃，吸引了更多的人口前来居住。

（2）机场评估指标

由于航空运输是经济全球化的一个重要组成部分，它对于各种经济活动的联结、合作和交流起着至关重要的作用。因此，航空客货运输量的增长通常与经济增长紧密相关。

环境损失值是衡量经济发展对环境造成的影响和代价的重要指标，对环境保护和可持续发展具有重要意义，也是评估经济活动对环境的影响的重要依据。

交通可达性是指一个地区或一个城市在航空运输网络中可以到达其他地区或城市的程度，它通常是用来衡量航空交通的便利程度和连通性，可达性的提高可以促进地区或城市之间的贸易、投资、旅游等经济活动的发展，从而推动地区或城市经济的增长。

（3）航空网络指标

根据第二章复杂网络的相关理论可知,复杂网络相关指标主要分为节点指标和结构指标。节点指标主要包括度数中心度、接近中心度和介数中心度,根据它们的定义和第三章的分析结果可知度数中心度和接近中心度有较大的相关性,度数中心度的大小和网络规模相关,接近中心性是拓扑结构的基本概念之一^[71]。参考Ye等^[72],本研究采用接近中心度和介数中心度作为后续研究航空网络演化对节点城市经济影响的节点指标。

在网络结构指标选取过程中发现,小世界模型结果输出具有定性化特性,不适合对航空网络进行量化模拟,接近中心度一定程度上可以反映网络密度,综合以上原因,本研究采用平均点度作为后续研究航空网络演化对节点城市经济影响的结构指标。

4.3 系统因果关系分析

因果关系反馈图可用于研究航空网络对节点城市影响的系统模型中各个要素反馈关系,揭示系统变化的动因。根据第一章对航空网络影响节点城市的经济发展进行分析可知,航空网络首先影响节点城市的交通现状。机场的建立提高节点城市对外联系水平,为节点城市之间的联系提供便利的条件^[62];同时为方便乘客和货物的运输,相关的配套设施也在逐渐完善,比如地铁,机场巴士,货运汽车等^[61]。航空的发展促进对内和对外联系水平的提升,进一步使得交通的时间成本降低,时间和成本的降低会吸引大批的乘客和货运的运输,提高城市的人口密度,加速要素的流动和集散,更有利于第三产业的集聚,为经济社会发展带来更多的机会^[38]。航空网络的运行也为节点城市带来一定的负面影响,如噪声污染、大气污染等,这些负面的环境影响,在一定程度上有害于节点城市交通活力和经济的发展^[63]。基于此,绘制航空网络对节点城市经济影响的系统因果回路图,如图4.1所示。

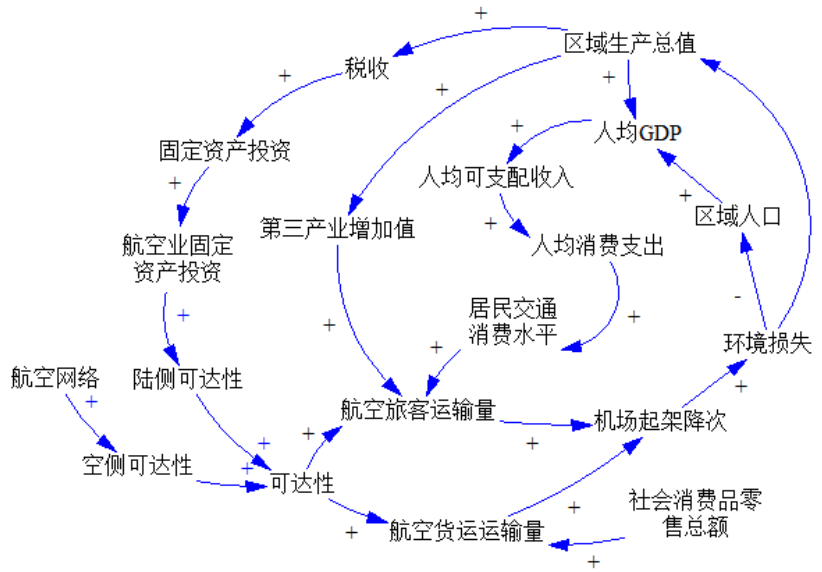


图 4.1 航空网络对节点城市经济影响因果关系图

总因果关系图可以拆分成多个简单的循环，论文将展示三个主要循环图：

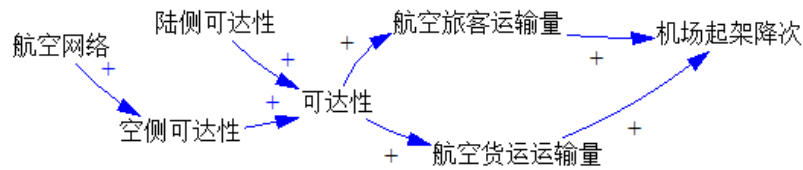


图 4.2 因果关系反馈图 1

如图 4.2 所示，航空网络是城市之间联系交流的通道，航空站点的开通首先提高了节点城市的对外联系能力，节点城市之间的联系更加密切，也即提高了航空网络的空侧可达性^[61]，降低城市之间乘客和货物运输的时间和成本；另一方面，如果仅仅设立机场，但是并未建立机场与城市市内其他公共设施的联系，陆侧可达性水平较低，就会造成客流和货物无法有效集散，无法达到催化节点城市经济发展的作用^[62]；可达性的提高会进一步促进客运量和货运量的提高，因此航空运输的起降次数就会增加^[58]。

基于以上分析，有如下的反馈关系：

航空网络→空侧可达性→可达性→航空旅客运输量→机场起降次数

航空网络→空侧可达性→可达性→航空货物运输量→机场起降次数

配套设施建设→陆侧可达性→可达性→航空旅客运输量→机场起架降次
 配套设施建设→陆侧可达性→可达性→航空货物运输量→机场起架降次

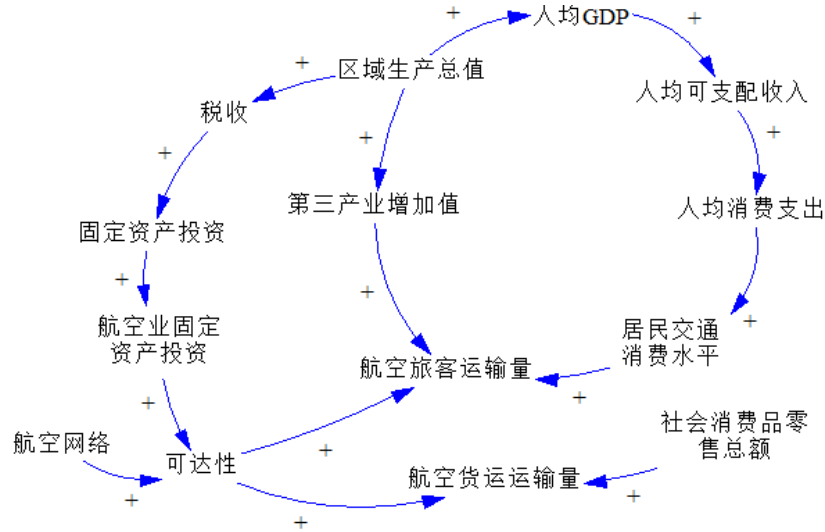


图 4.3 因果关系反馈图 2

如图 4.3 所示，随着经济腹地经济水平的提高，税收水平也进一步增加^[38]，相应的政府部门对固定资产投资也会增加，从而用于航空业的固定资产投资也会随之增加，投资的增加会加剧相关配套设施的建设，相应的也会使可达性提高^[31]，进而带动航空客运、货运的运输需求；此外，随着人均 GDP 的提高，人们在交通消费上的花费也会越来越多^[37]，从而，对于航空运输的需求也会进一步增加^[38]。

根据以上分析，可识别主要反馈关系：

区域生产总值→税收→固定资产投资→航空业固定资产投资→可达性→航空旅客运输量

区域生产总值→税收→固定资产投资→航空业固定资产投资→可达性→航空货物运输量

区域生产总值→第三产业增加值→航空旅客运输量

区域生产总值→人均 GDP→人均可支配收入→人均消费支出→居民交通消费水平→航空旅客运输量

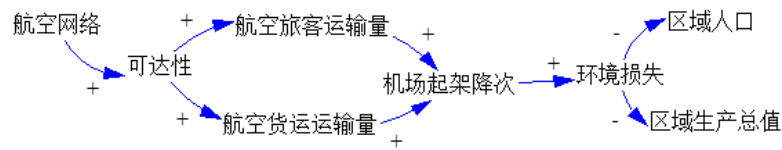


图 4.4 因果关系反馈图 3

如图 4.4 所示，航空网络的进一步扩张提高了交通可达性，使得航空旅客、货物运输量增加，从而带动机场起降架次的增加，机场的起降架次与环境损失有直接的影响，环境的污染会导致城市的生活质量下降，对人们健康产生负面影响，从而导致人口减少或移民流失^[52]，此外，环境污染也会影响城市的经济活动和投资^[51]。

根据以上分析，可识别主要反馈关系：

航空网络→可达性→航空旅客运输量→航空旅客运输量机场起降架次→环境损失→区域人口

航空网络→可达性→航空旅客运输量→航空旅客运输量机场起降架次→环境损失→区域生产总值

航空网络→可达性→航空货物运输量→航空旅客运输量机场起降架次→环境损失→区域人口

航空网络→可达性→航空货物运输量→航空旅客运输量机场起降架次→环境损失→区域生产总值

4.4 系统存量流量图

航空网络对节点城市影响过程可用图 4.1 的因果反馈图进行表示，但是因果图仅能表示各个变量之间的反馈关系，不能进行定量化模拟，因此对图 4.2 进行细化，引入相关参数，绘制系统动力学流图，如图 4.5 所示，动态化模拟系统变化过程。

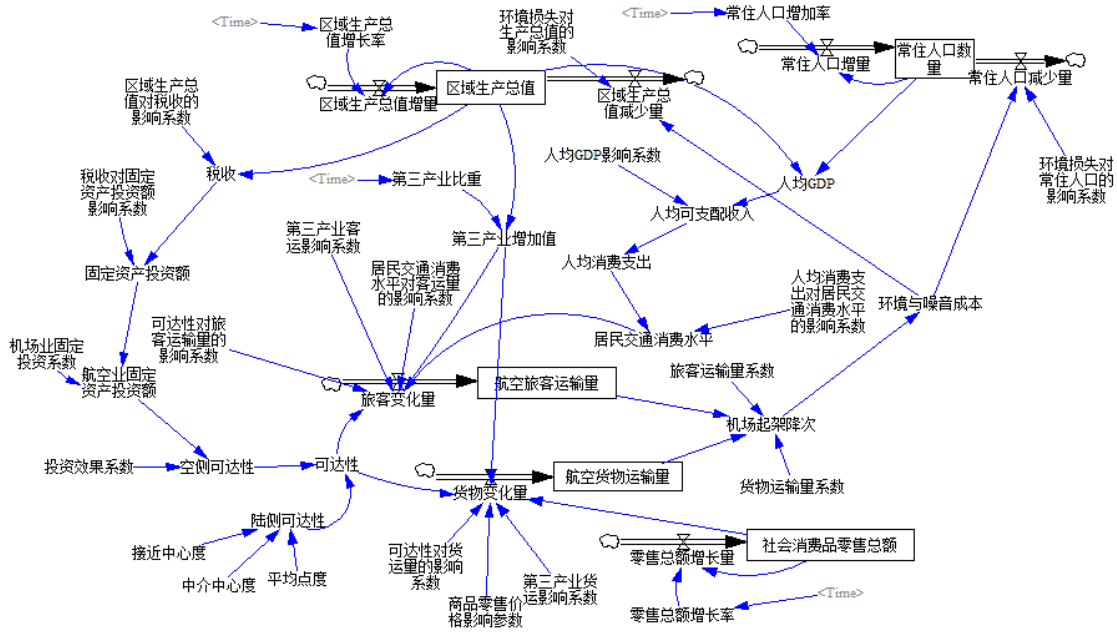


图 4.5 航空网络对节点城市影响系统流图

航空网络对节点城市经济影响的系统动力学模型包括水平变量、辅助变量、速率变量、常量四种。

(1) 水平变量（用“L”表示）主要包括区域生产总值、常住人口数量、航空旅客运输量、航空货物运输量、社会消费品零售总额。

(2) 速率变量（用“R”表示）主要包括区域生产总值增量、区域生产总值减少量、常住人口增量、常住人口减少量、旅客变化量、货物变化量、零售总额增长量。

(3) 辅助变量（用“A”表示）主要包括税收收入、固定资产投资额、航空业固定资产投资额、第三产业增加值、人均可支配收入、人均消费支出、居民交通消费水平、人均 GDP、可达性、空侧可达性、陆侧可达性、环境与噪音成本、机场起架降次。

(4) 常量（用“C”表示）主要包括区域人口增加率、环境损失对区域生产总值的影响系数、常住人口增加率、环境损失对常住人口的影响系数、区域生产总值对税收的影响系数、税收对固定资产投资额影响系数、机场业固定投资系数、投资效果系数、可达性对旅客运输量的影响系数、可达性对货运量的影响系数、商品零售价格对货运量的影响系数、第三产业货运影响系数、零售总额增长率、可达性对客运量的影响系数、居民交通消费水平对客运量的影响

系数、第三产业比重、区域生产总值增长率、人均消费支出对居民交通消费水平的影响系数、环境损失对生产总值的影响系数、环境损失对常住人口的影响系数、接近中心度、中介中心度、平均点度。

4.5 本章小结

本章运用系统动力学的方法对航空网络影响节点城市经济进行建模。首先，明确建模目的，并对系统动力学模型进行假设；其次，根据相关文献界定主要变量作为系统边界；然后，在进一步分析文献的基础上构建因果回路图；最后，以系统因果回路图为基础，引入相关方程和参数细化成系统动力学流图，为后文的定量仿真分析打下基础。

5 航空网络演化对节点城市经济的影响仿真分析

5.1 案例选取

本文以研究航空网络对节点城市经济影响为目的，在节点城市的选择上，本研究选择兰州市为典型城市进行分析，主要是因为：

(1) 节点城市通航时间是案例选取的重点

节点城市通航的时间越早，影响就会越明显。兰州国际中川机场始建于 20 世纪 60 年代，于 1970 年正式通航，2015 年完成二期扩建工程，目前三期扩建工程正在建设中，通航时间较长，预期仿真结果较好。

(2) 网络地位是案例选择的关键

表 5.1 兰州市在航空网络中的中心性变化

时间	接近中心度	排名	排名变化率 (%)	介数中心度	排名	排名变化率 (%)	度数中心度	排名	排名变化率 (%)
2010	0.101	33	—	0.000	42	—	11.213	37	—
2011	0.123	29	-12%	0.001	40	-5%	11.103	30	-19%
2012	0.009	36	24%	0.009	36	-10%	12.313	29	-3%
2013	0.098	26	-28%	0.013	33	-8%	13.679	26	-10%
2014	0.134	19	-27%	0.032	26	-21%	14.352	19	-27%
2015	0.122	21	11%	0.087	25	-4%	15.008	20	5%
2016	0.139	23	10%	0.103	27	8%	15.112	18	-10%
2017	0.136	20	-13%	0.112	20	-26%	14.789	21	17%
2018	0.129	19	-5%	0.130	19	-5%	16.703	17	-19%
2019	0.141	20	5%	0.138	21	11%	16.956	17	0%
2020	0.147	16	-20%	0.147	25	19%	17.775	15	-12%
均值	0.116	23.81	—	0.070	28.54	—	14.455	22.63	—

根据第 3 章的分析可知，航空网络中，高中心性的节点城市通常是网络中最重要的节点之一，也在航空影响中发挥重要作用。表 5.1 展示了兰州这一节点城市在网络中节点特征变化趋势，从表中可以看出兰州市的接近中心度、介数中心度、度数中心度虽有波动但是整体都呈现稳定增长趋势，在网络中的排名也越来越靠前。其中介数中心度增长较为明显，从 0.000 增长为 0.147，增长率为 14.7%。在观测年份中兰州市的排名变化率呈现负向变化，说明出兰州在全

国航空网络中的地位不断提高，较高的中心性可吸引较多的旅客，旅客的多少是吸引城市活力的关键。

（3）数据的可获得性是案例选取的基础

在系统动力学仿真过程中，数据的可获得性是非常关键的。只有具备足够的的数据，才能够准确地模拟出系统的运行情况，从而更好地进行预测和决策。兰州市作为一个省会城市，具备较为完备的数据资源，这为系统动力学仿真提供了重要的数据基础，有助于更加准确地模拟和预测兰州市的发展和变化趋势。

（4）为西部城市发展提供参考价值

虽然兰州市的航空发展不如北京、上海等一线城市，但是一方面发达地区航空研究较多而西部城市的航空研究较为欠缺，且北京、上海等地的航线较为饱和，已和绝大多数节点城市建立了联系，网络进一步扩张的幅度较小，后续研究航空网络演化对节点城市的影响结果不明显；另一方面，兰州中川机场作为甘肃省唯一的国际机场，研究航空网络对兰州市经济的影响，不仅可以对兰州市的发展提供相关建议，还对其它西部城市依托机场发展提供一定的借鉴作用。

综上所述，兰州符合上述要求，因此选择兰州作为节点城市的代表性案例。

5.2 相关参数及变量的设定

5.2.1 参数确定的方法

系统动力学模型中的参数是用来描述系统中各个因素之间的关系和相互作用的，这些参数的准确性对于模型的精度和可靠性至关重要。如果参数不准确，模型的预测结果可能会出现明显的偏差，从而导致决策的错误。系统动力学模型中的参数确定方法主要有以下 4 类：

①查询数据资料

当有大量可靠的数据资料、参数取值相对独立且参数具有历史演化规律时，适合采用查阅数据资料法，数据来源主要有政府、企业和相关数据库网站。本研究数据来源主要有：兰州市交通运输局网站、兰州中川国际机场官网、中国

民用航空局官网等；甘肃省公路航空旅游投资集团有限公司网站等；《中国统计年鉴》、《兰州市国民经济和社会发展统计公报》、《从统计看民航》等。

②数学模型法

数学模型法是通过建立数学模型，根据该模型对应的实际情况来确定参数取值的方法。数学模型法适用于已有一定的实验数据和相关知识，并且需要对参数的影响因素有一定的认识。建立数学模型后，可以通过对模型的参数进行分析和计算，从而得出系统中各个参数的取值。

③借鉴已有研究成果

借鉴已有成果法是一种参考已有研究成果和经验确定模型参数取值的方法。这种方法的优点在于能够节省建模时间和成本，并且可以避免重复研究，本研究在考虑兰州市实际发展情况的基础上，借鉴已有的研究成果确定参数取值。

④全局调试确定法

全局调试法是一种通过不断调整模型参数取值，使模型输出结果最接近实际情况的方法。这种方法的优点在于能够找到模型最优的参数组合，并且可以适应模型参数难以确定或难以量化的情况。

5.2.2 初始值的确定

本文构建的航空网络对节点城市影响的系统动力学模型模拟的时间段是2010-2025年，因此，根据2011年《兰州市统计年鉴》和2010年兰州市统计公报上的数据，模型中水平变量的初始值设定如表5.2所示。

表 5.2 模型水平变量初始值

变量	初始值	单位
常住人口数量	361.91	万人
区域生产总值	11295900	万元
航空旅客运输量	199.49	万人次
航空货物运输量	1.14	万吨
社会消费品零售总额	5451100	万元

5.2.3 辅助变量参数确定

(1) 区域生产总值增长率

兰州市经济形势一路向好，区域生产总值也得到提升，然而区域生产总值的增长速度也并非固定的，会根据当年经济情况有所波动，系统动力学程序中的表函数可以描述这种非线性关系和动态行为。因此，为使所建模型更接近真实情况，本研究使用表函数来表示区域生产总值的非线性增长。区域生产总值 2010—2019 年的区域生产总值和增长系数见表 5.3。

表 5.3 兰州市区域生产总值自增长系数

年份	地区生产总值（万元）	地区生产总值增长率（%）
2010	11295900	19.5
2011	13916600	23.2
2012	16131600	15.9
2013	18102400	12.2
2014	19777700	9.3
2015	21022500	6.3
2016	22074200	5.0
2017	24450800	10.8
2018	26601900	8.8
2019	28525100	7.2

同理可根据历史数据进行推算计算出第三产业比重、常住人口增长率、零售总额增长率的表函数。

（2）人均 GDP 影响系数

对于人均 GDP 对人均可支配收入的影响系数，我们假定人均 GDP 和人均可支配收入有关。因此，利用计量经济学模型方法处理两者关系。经过数据收集与整理，得到 2010-2019 年兰州市人均 GDP 和人均可支配收入的数据表如表 5.4 所示。运用 SPSS 软件分析两者关系，最终确定本文的人均 GDP 影响系数。

表 5.4 2010-2019 年兰州市常住人口和就业人口数据表

年份	人均 GDP（万亿元）	居民人均可支配收入万元
2010	3.68	1.24
2011	3.81	1.41
2012	4.33	1.63
2013	4.76	1.84
2014	5.11	2.05
2015	5.33	2.41
2016	5.49	2.63
2017	5.96	2.87
2018	6.37	3.11
2019	6.71	3.39

根据表 5.4 的数据, 运用 SPSS 软件进一步确定两者之间的关系, 相关性分析结果如表 5.5 所示。

表 5.5 相关性

		社会从业人员万人	常住人口万人
皮尔逊相关性	人均可支配收入万元	1.000	0.991
	人均 GDP 万元	0.991	1.000
显著性 (单尾)	人均可支配收入万元	—	0.000
	人均 GDP 万元	0.000	—

我们可以得到两变量之间的皮尔逊相关系数值为 0.991, 此外检验概率为 $0.000 < 0.05$, 因此, 认为在 0.05 显著水平下, 人均 GDP 和人均可支配收入存在显著的线性正相关关系, 建立一元线性回归模型, 如公式 5.1 所示:

$$Y = a + bX \quad (5.1)$$

其中 Y 表示人均可支配收入, X 表示兰州市人均 GDP, 运用 SPSS 进行线性回归, 回归系数表如表 5.6 所示。

表 5.6 回归系数

模型	未标准化系数		标准化系数	t	Sig	
	B	标准错误	Beta			
1	(常量)	-1.408	0.177	—	-7.964	0.000
	常住人口万人	0.711	0.034	0.991	21.103	0.000

从表 5.6 可以得出, 无论是自变量 X 还是常数项系数, 其 t 检验所对应的 p 值为 0.000, 均小于 0.05, 都通过了 t 检验, 因此, 认为区域常住人口对社会从业人员的影响系数为 0.711, 因此, 一元回归模型为 $Y = 0.711X - 1.408$ 。

同理, 可计算出区域生产总值对税收的影响系数、税收对固定资产的影响系数、人均消费支出对居民消费水平的影响系数等相关系数的值。

(3) 旅客运输系数、货物运输系数

本文的系统动力学模型假定机场起降架次受航空旅客运输量和航空货物运输量的影响, 2010-2019 年兰州市机场起降架次、航空旅客运输量和航空货物运输量的数据表如表 5.7 所示, 其中航空旅客运输量和航空货物运输量单位不一致, 因此根据宋函^[65]的研究成果将每旅客按照 90 千克进行折算。

表 5.7 2010-2019 年兰州市机场相关数据表

年份	航空旅客运输量 (万人次)	折算后旅客运输量 (万吨)	航空货运运输量 (万吨)	起降架次 (次)
2010	199.49	17.95	1.14	33700
2011	380.90	34.28	2.68	34510
2012	458.30	41.25	3.60	43146
2013	564.96	50.85	4.18	51799
2014	700.00	63.00	4.70	57481
2015	809.00	72.81	5.00	67835
2016	1089.00	98.01	5.94	91091
2017	1281.64	115.35	6.09	103690
2018	1385.82	124.72	6.15	109902
2019	1530.30	137.73	7.20	119183

根据表 5.7 的数据，建立二元线性回归方程，如公式 (5.2) 所示：

$$Y = a + bX_1 + cX_2 \quad (5.2)$$

其中 Y 表示机场起降架次， X_1 表示折算后航空旅客运输量， X_2 表示航空货物运输量。最终得到回归方程如公式 (5.3) 所示：

$$Y = 17896.654 + 931.703X_1 - 3662.108X_2 \quad (5.3)$$

(4) 介数中心度

第 3 章展示了兰州这一城市节点网络节点指标变化。其中，2010-2019 年介数中心度的变化幅度较小，且后续章节会对不同的介数值进行模拟，为便于方程式设定和模拟，本研究采用 2010-2019 介数中心度的平均值作为模拟的初始值，即 $BD=0.070$ 。

(5) 接近中心度

根据介数中心度的设置方法，同样采用 2010-2019 年接近中心度的平均值作为初始值，即 $CD=0.116$ 。

(6) 平均点度

同理，可得平均点度的初始值， $AD=16.628$ 。

(7) 环境与噪音损失成本

根据《2020 年兰州市统计年鉴》和《2019 年兰州市统计公报》中的数据，环境与噪音的损失成本参考学者陈林的研究，陈林利用 HPM 法和 ICAO 发动机排放数据库构建机场外部环境成本计量模型，估算出主要机场的噪声成本和尾气

排放成本，并按照起降架次为单位进行计算，最终估算出每起架降次的环境与噪音损失成本为 307.5 元^[73]。

本文模型中的其它参数是利用查阅资料、回归分析、借鉴已有成果、全局调试等方法得到的，由于篇幅有限，其它参数在此就不一一赘述。

5.2.4 模型主要系统方程

为简化模型达到研究目的，设计变量之间的方程，部分方程式如下：

$$(01) \text{中介中心度} = 0.070$$

$$(02) \text{人均 GDP} = \text{区域生产总值} / \text{常住人口数量}$$

$$(03) \text{人均可支配收入} = 0.711 * \text{人均 GDP} - 14084.8$$

$$(04) \text{人均消费支出} = 0.76 * \text{人均可支配收入} + 0.335$$

$$(05) \text{零售总额增长量} = \text{零售总额增长率} * \text{社会消费品零售总额}$$

$$(06) \text{常住人口增加率} = \text{WITH LOOKUP}(\text{Time},$$

$$[(0,0)(3000,10)],(2010,0.0172),(2011,0.0188),(2012,0.0227),(2013,0.0167),(2014,0.0186),(2015,0.0188),(2016,0.0195),(2017,0.0213),(2018,0.0174),(2019,0.0169)))$$

$$(07) \text{常住人口增量} = \text{常住人口增加率} * \text{常住人口数量}$$

$$(08) \text{常住人口数量} = \text{INTEG}(\text{常住人口增量}, 361.91)$$

$$(09) \text{区域生产总值} = \text{INTEG}(\text{区域生产总值增量} - \text{区域生产总值减少量}, 11295900)$$

$$(10) \text{区域生产总值减少量} = \ln(\text{环境与噪音成本}) * \text{环境损失对生产总值的影响系数}$$

$$(11) \text{区域生产总值增量} = \text{区域生产总值} * \text{区域生产总值增长率}$$

$$(12) \text{区域生产总值增长率} = \text{WITH LOOKUP}(\text{Time}, [(2010,0)-(2025,10)],(2010,0.195),(2011,0.232),(2012,0.159),(2013,0.122),(2014,0.093),(2015,0.063),(2016,0.05),(2017,0.108),(2018,0.088),(2019,0.072)))$$

$$(13) \text{可达性} = \text{空侧可达性} + \text{陆侧可达性}$$

$$(14) \text{固定资产投资额} = \text{税收} * \text{税收对固定资产投资额影响系数}$$

$$(15) \text{居民交通消费水平} = \text{人均消费支出} * \text{人均消费支出对居民交通消费水平的影响系数} + 0.083$$

(16)常住人口减少量= \ln (环境与噪音成本)*环境损失对常住人口的影响系数

(17)平均点度=16.628

(18)接近中心度=0.116

(19)旅客变化量=可达性*可达性对旅客运输量的影响系数+居民交通消费水平*居民交通消费水平对客运量的影响系数+第三产业增加值*第三产业客运影响系数

(20)机场起架降次=旅客运输量系数*航空旅客运输量+航空货物运输量*货物运输量系数

(21)常住人口增量=常住人口增加率*常住人口数量

(22)环境与噪音成本=307.5*机场起架降次

(23)环境损失对 GDP 的影响系数=0.487

(24)社会消费品零售总额=INTEG (零售总额增长量,545.11)

(25)税收=区域生产总值*区域生产总值对税收的影响系数

(26)常住人口数量=INTEG (常住人口增量-常住人口减少量,361.91)

(27)第三产业增加值=区域生产总值*第三产业比重

(28)第三产业比重 = WITH LOOKUP (Time,

([(0,0)(3000,10)],(2010,0.5),(2011,0.497),(2012,0.508),(2013,0.541),(2014,0.557),(2015,0.587),(2016,0.624),(2017,0.621),(2018,0.628),(2019,0.651)))

(29)航空旅客运输量=INTEG (旅客变化量,199.49)

(30)航空货物运输量=INTEG (货物变化量,1.14)

(31)航空运输业固定资产投资额=固定资产投资额*机场运输业固定投资系数

(32)货物变化量=可达性*可达性对货运量的影响系数+商品零售价格影响参数*社会消费品零售总额+第三产业增加值*第三产业货运影响系数

(33)零售总额增长率 = WITH LOOKUP (Time,

([(0,0)(3000,10)],(2010,0.169),(2011,0.174),(2012,0.171),(2013,0.126),(2014,0.252),(2015,0.09),(2016,0.097),(2017,0.075),(2018,0.069),(2019,0.151)))

5.3 模型的有效性检验

对系统动力学模型进行有效性检验可以确认模型结构的合理性、确定模型预测的准确性、提高模型可信度。通过检验的模型可以用于进一步的仿真模拟，未通过检验的模型则应对参数进行修正。

(1) 结构评价检验

在系统动力学建模中，结构性评价是一种分析建模过程中模型结构和变量之间相互关系的方法。可以帮助检查模型的合理性、一致性和逻辑正确性，以及识别模型中可能存在的错误或缺陷，这种评价方法通常包括模型的因果关系、反馈环路、参数范围、模型的动态稳定性等方面的分析。本研究采用系统动力学软件 Vensim 进行模型构建，使用软件自带的工具（Check Model）检验模型成功与否，结果显示“Model is OK”，表示模型构建合理，构建成功。

(2) 历史检验

历史性检验就是将系统动力学模型仿真出来的数值与同一时期时间的实际数据进行对比，如果仿真值和真实值的差异小于 10%则认为模型是有效的，否则就会认为模型有一定的偏差需要进行修正。本研究选取 2010-2019 年的兰州市区域生产总值和常住人口数量这两个变量作为历史检验的指标，主要仿真结果如表 5.8 所示。

表 5.8 主要变量仿真结果与实际值的比较

年份	区域生产总值（亿元）			常住人口数量（万人）		
	实际值	仿真值	偏差率	实际值	仿真值	偏差率
2010	1129.59	1200.09	6.24%	361.91	369.03	1.97%
2011	1391.66	1453.56	4.45%	368.73	381.03	3.34%
2012	1613.16	1698.54	5.29%	377.11	394.9	4.72%
2013	1810.24	1730.03	-4.43%	383.41	397.51	3.68%
2014	1977.77	2000.38	1.14%	390.56	399.04	2.17%
2015	2102.25	2203.75	4.83%	397.89	410.31	3.12%
2016	2207.42	2300.90	4.23%	405.66	419.09	3.31%
2017	2445.08	2701.98	10.51%	414.31	424.34	2.42%
2018	2660.19	2900.08	9.02%	421.53	428.23	1.59%
2019	2852.51	3001.01	5.21%	428.67	435.31	1.55%
MAPE			4.65%			2.79%

从表 5.8 中可以看出，2010-2019 年兰州市区域生产总值和常住人口的仿真值与真实值的偏差率基本处于 $\pm 10\%$ 这一区间，平均绝对百分误差 (MAPE) 均小于 5%，可以说明模型构建合理，可以反映航空网络对节点城市经济的影响，可以进行后续仿真工作。

5.4 仿真结果分析

本节主要通过系统动力学软件 Vensim 进行模型仿真，由于该系统涉及的变量达 50 多个，不能一一进行仿真，因此本研究选取主要变量进行仿真分析，模型仿真从 2010 年开始，2025 年为终点，共计 15 年，具体如图 5.1-5.3 所示。

(1) 区域生产总值模拟结果

从图 5.1 的模拟结果来看，兰州市的区域生产总值在仿真时间内发展形势较好，预计 2025 年超过 4800 亿元，和基期 2010 年相比提高了 3 倍，因此可以认为航空运输与区域经济之间呈现相互促进关系。《兰州市十三五规划纲要》中提到了 2017 年生产总值比 2010 年翻一番的任务，仿真结果中兰州市 2010 年的区域生产总值为 1129 亿元，2017 年的仿真结果为 2400 亿元左右，略大于 2010 年区域生产总值的两倍，这说明该系统动力学模型符合实际情况，能较为合理的反映航空网络对节点城市的影响情况。

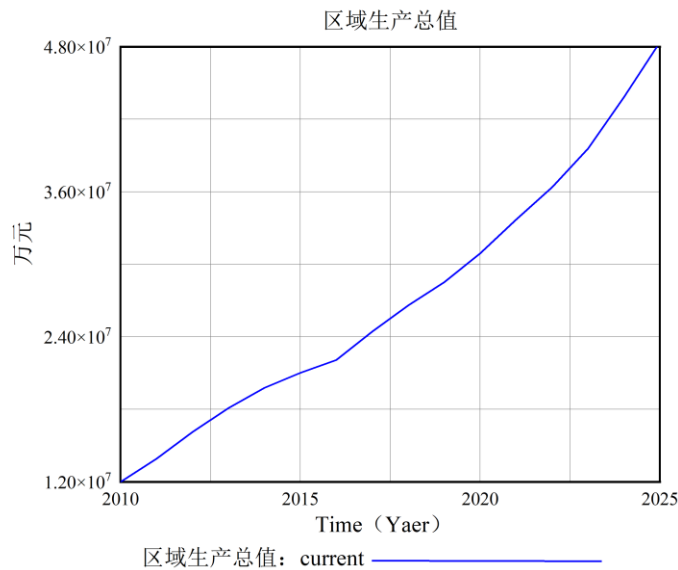


图 5.1 区域生产总值变化

（2）航空旅客运输量模拟结果

目前航空网络运输主要以客机运输为主，截止 2021 年，兰州中川机场的累计通航城市达到 107 个，其中客运航线条数为 196 条，而货运航线仅仅有 7 条，因此研究航空旅客运输量这一指标对研究航空网络对节点城市的影响至关重要。

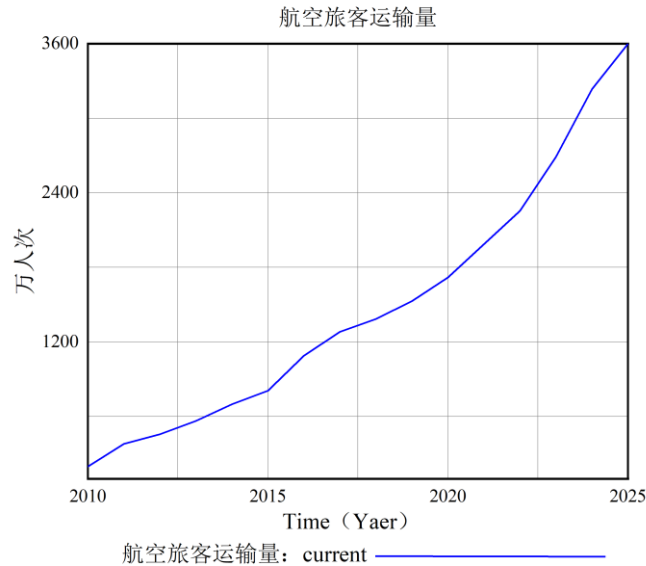


图 5.2 航空旅客运输量变化

从图 5.2 可以看出，航空旅客运输量这一指标变化明显，从 2010 年的 199 万人次，增长到 2025 年的 3900 万人次，从图中还可以看到，航空旅客运输量的增长速度在 2016 年左右增长速度较为明显。这是因为机场所在的兰州市永登县中川镇周边被大量田地包围，相关基础设施建设不完善，路面等级不高，与市内其他区域交通设施联系较为薄弱，后又由于兰州中川城际铁路的开通使得市区和机场的联系更加便捷，吸引更多的旅客使用中川机场，所以，航空旅客运输量不断增加。

（3）常住人口数量模拟结果

图 5.3 所示的仿真显示兰州市常住人口数量变化明显，从 2010 年 360 万人左右，增加到 2025 年的 480 万人左右，增长率为 33% 左右，但现实情况是近些年特别是 2021 年后以兰州、西安为代表的西部城市常住人口数量呈现递减趋势，本研究认为造成这种偏差最重要的原因是新冠疫情的爆发导致旅游、餐饮等行

业不景气，吸纳就业的能力不如从前，人口吸引力出现断崖式下滑，但是本研究系统动力学模型的构建未考虑新冠疫情这种突发情况，且本研究着重研究航空网络的演化对节点城市经济的影响，并不是对相关指标进行预测，综合以上原因本研究认为这种偏差并不影响后续研究航空网络演化对节点城市的影响。

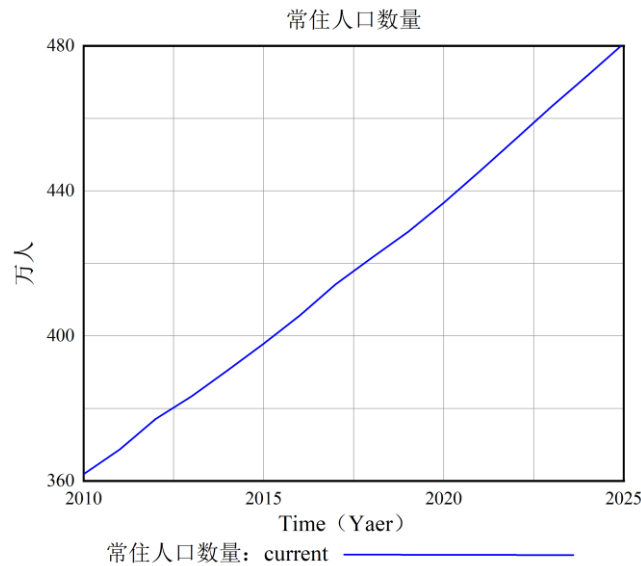


图 5.3 常住人口数量变化

5.5 航空网络演化对节点城市经济影响的对比分析

前面分析了航空网络对节点城市经济影响的相关指标变化，本节将着重分析航空网络相关指标的演化对节点城市经济的影响差异。因为篇幅有限，本节选取航空旅客运输量、常住人口数量以及区域生产总值作为代表性指标，分别模拟航空网络演化时各指标的影响差异。

5.5.1 对比分析—网络结构演化

从表 5.1 可知航空网络的不断扩张会导致平均点度的增加或降低，因此，本研究以平均点度的初始模拟值作为基础，分别增加平均点度为 20 和减少平均点度为 5，观察平均点度对节点城市经济的影响差异，仿真结果如图 5.4-5.6 所示。

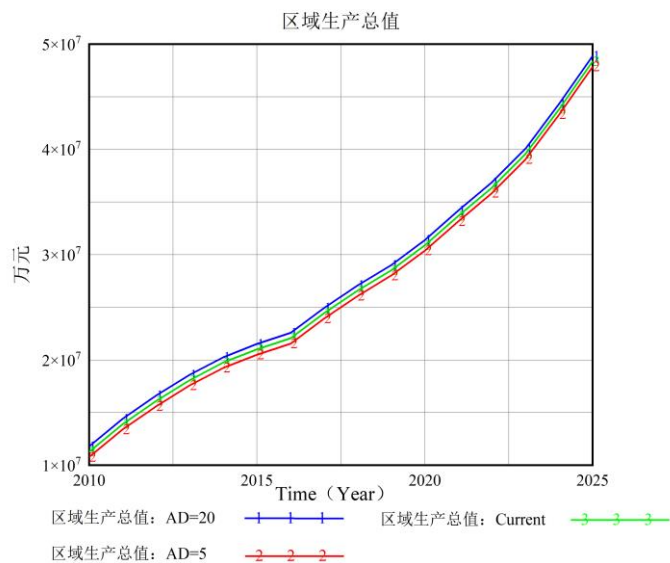


图 5.4 网络平均点度演化对区域生产总值的影响

注：AD=20 表示平均点度=20，AD=5 表示平均点度=5，Current 表示初始平均点度 16.628，下同。

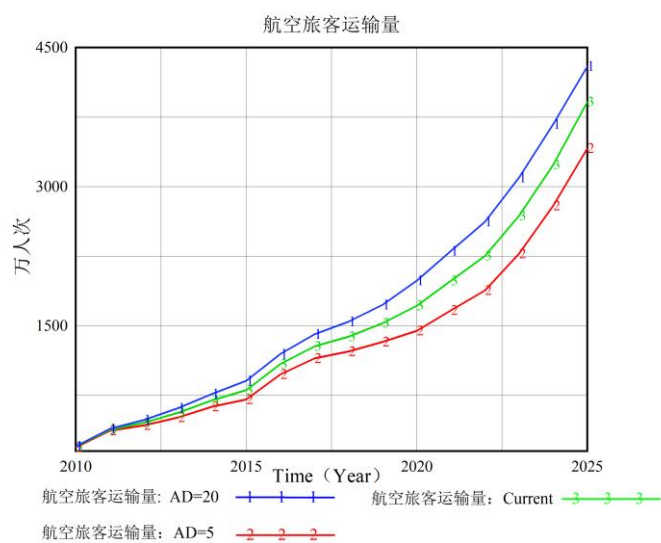


图 5.5 网络平均点度演化对航空旅客运输量的影响

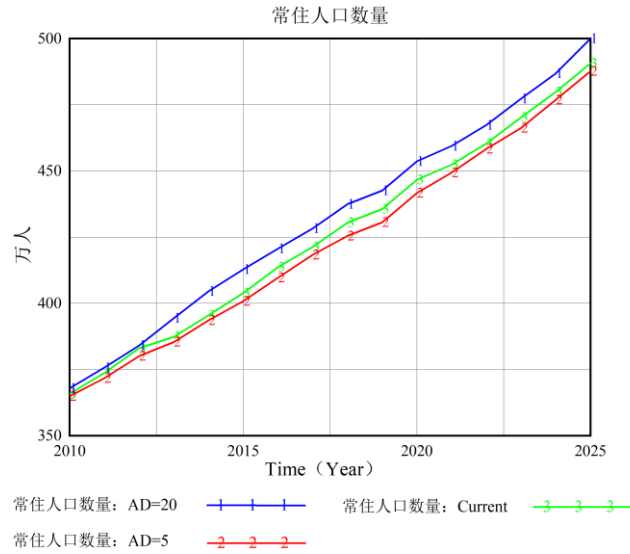


图 5.6 网络平均点度演化对常住人口的影响

图 5.4-5.6 展示了平均点度变化对节点城市经济相关指标变化的几种情景。可以看出，平均点度变化，对航空旅客运输量的影响较为明显，而常住人口数量和区域生产总值的值虽然在增加，但是变化不明显，且随着时间推移，这种影响差异会变大，同时，图中也能看出，平均点度越大，影响的结果值也越大，这种结果说明平均点度的增加可以促进航空旅客运输量、常住人口数量和区域生产总值的发展。

平均点度变化对节点城市区域生产总值及常住人口数量变化不明显主要是因为平均点度测量的是整个航空网络的指标，其值可通过开通局部地区间的航线进而增加该指标的数值。然而，新增航线不一定会对某一具体城市产生影响。例如，增加北京至兰州的航线，会增加网络关系，提高航空网络的整体网络点度，但是这条航线对敦煌这一城市无联系，并不会对敦煌的经济社会发展产生显著的影响。

对航空旅客运输量而言，新增航线可能会不同的结果，比如北京至兰州航线的开通虽不会对敦煌经济社会产生显著影响，但是旅客可通过中转兰州到达敦煌的方式，变为敦煌的潜在客流，因此可能会增加敦煌这一城市的旅客运输量，但是这种影响并不会特别大，结果依然不会对节点城市的区域生产总值及常住人口数量产生显著影响。

虽然平均点度对节点城市的发展影响并不显著，但是对整个航空网络的联通度等航空系统的发展却有十分有意义。

5.5.2 对比分析—网络节点演化

从第 3 章分析和第 4 章系统边界的确定可知，本研究采用接近中心度和度数中心度来衡量节点城市的网络地位。本章节通过改变接近中心度、度数中心度的大小，对比分析航空网络节点演化对节点城市经济的影响差异。模拟结果如图 5.7-5.12 所示。

(1) 接近中心度演化

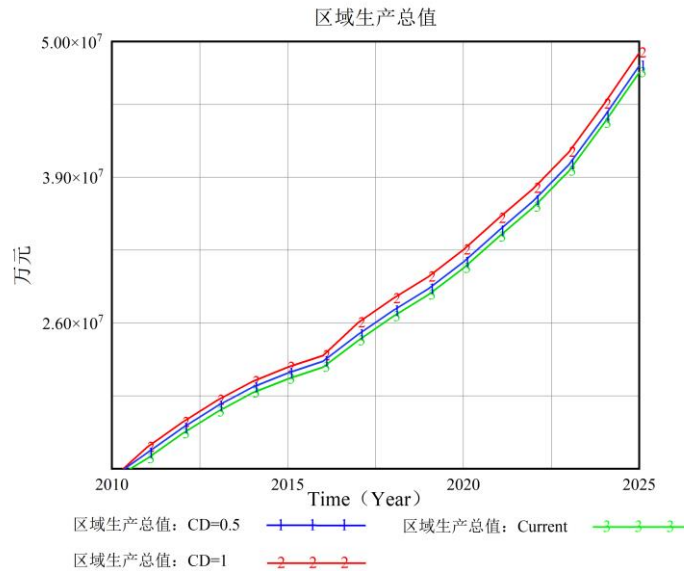


图 5.7 接近中心度演化对区域生产总值的影响

注：CD=1 表示接近中心度=1，CD=0.5 表示接近中心度=0.5，Current 表示初始接近中心度=0.116，下同

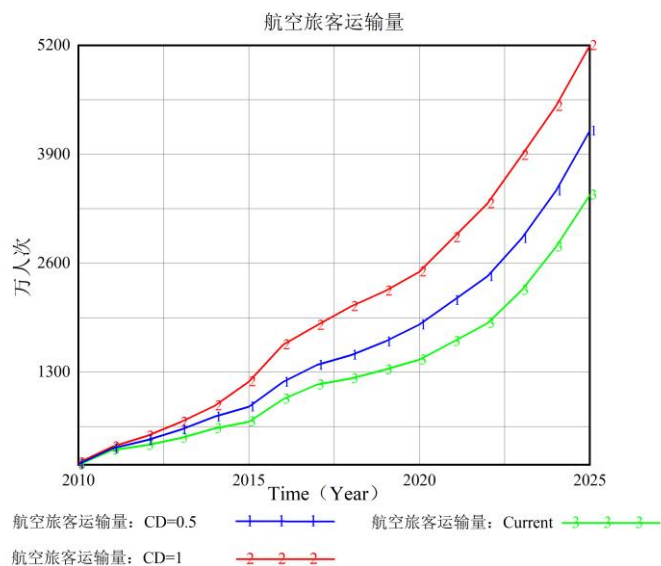


图 5.8 接近中心度演化对航空旅客运输量的影响

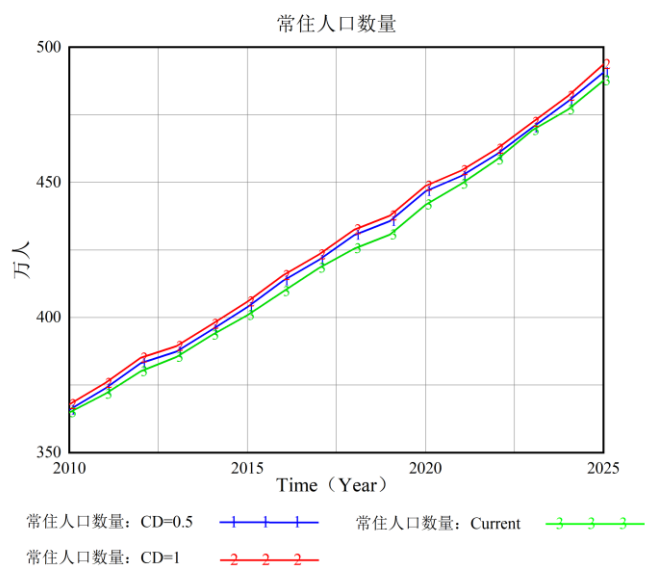


图 5.9 接近中心度演化对常住人口的影响

从图 5.7-5.9 可以发现，接近中心度变化对航空旅客运输量的影响较大，对常住人口以及区域生产总值的影响不明显，而且这种变化的情景在前期不明显。

(2) 介数中心度演化

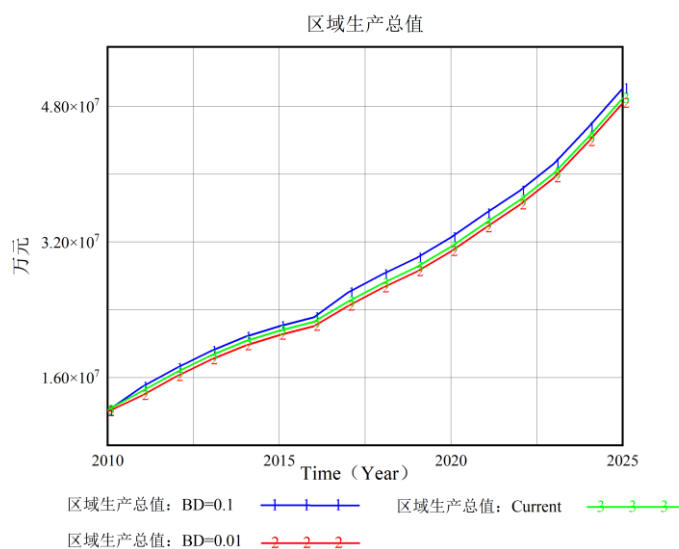


图 5.10 介数中心度演化对区域生产总值的影响

注：其中 BD=0.1 表示介数中心度=0.1，BD=0.01 表示介数中心度=0.01，Current 表示初始介数中心度=0.07，下同。

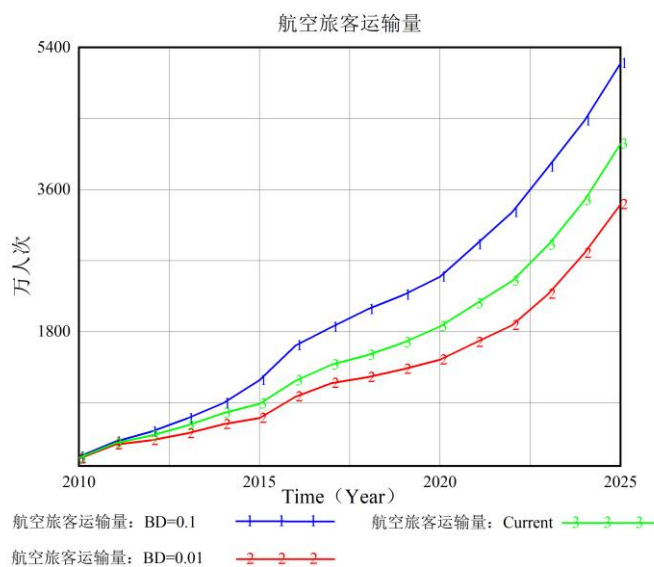


图 5.11 介数中心度演化对航空旅客运输量的影响

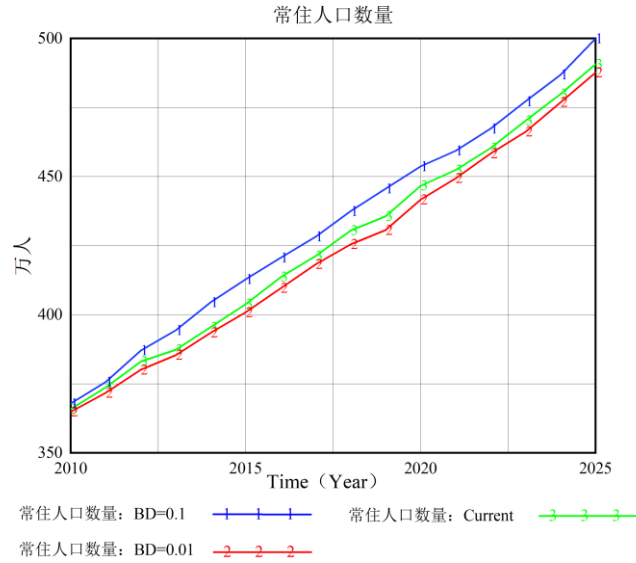


图 5.12 介数中心度演化对常住人口数量的影响

从图 5.10-5.12 可以看出，中介中心度变化对航空旅客运输量、常住人口数量以及区域生产总值的影响差异与接近中心度变化的影响趋势基本相同。中介中心度变化也表现出对航空旅客运输量有较大影响差异，然而对常住人口以及区域生产总值的影响在 2015 年之前差异不大。

5.5.3 对比分析—网络综合演化

为综合模拟接近中心度、中介中心度以及网络平均点度这三个指标同时变化带来的影响差异，本研究通过随机改变这三个指标的数值，对航空网络指标综合变化带来的影响进行情景模拟，结果如图 5.13-5.15 所示。

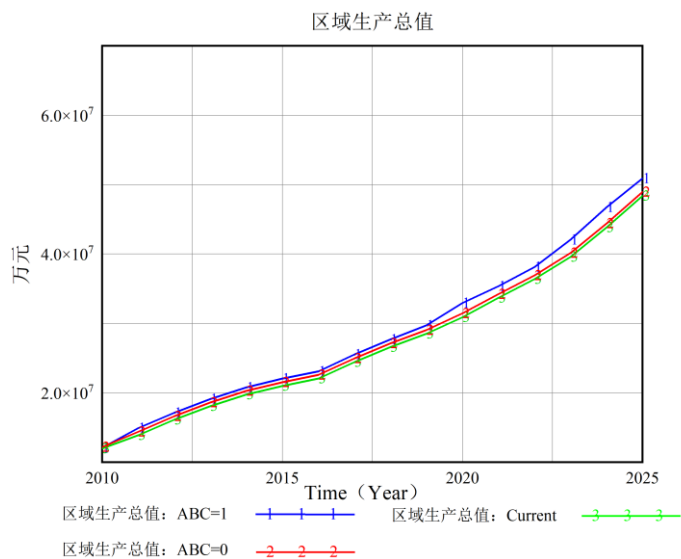


图 5.13 网络综合演化对区域生产总值的影响

注：ABC=0 线为接近中心度=0.3，中介中心度=0.05，平均点度=20；

ABC=1 线为接近中心度=0.5，中介中心度=0.05，平均点度=30；

Current 线表示初始接近中心度=0.116，中介中心度=0.07，平均点度=16.628，下同。

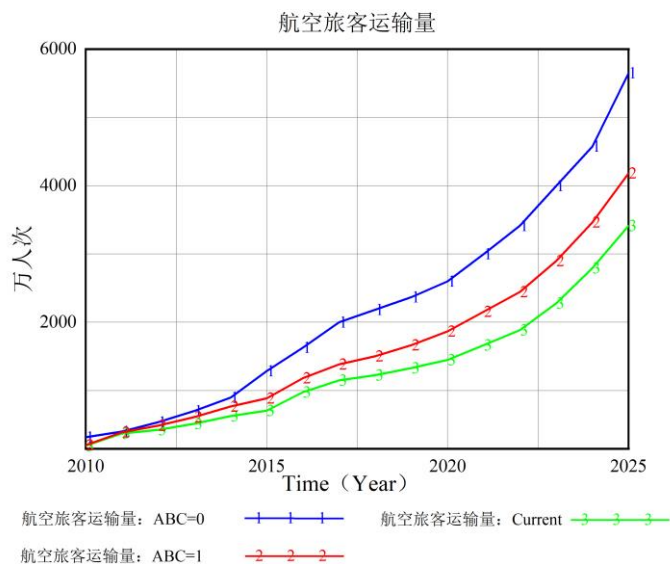


图 5.14 网络综合演化对航空旅客运输量的影响

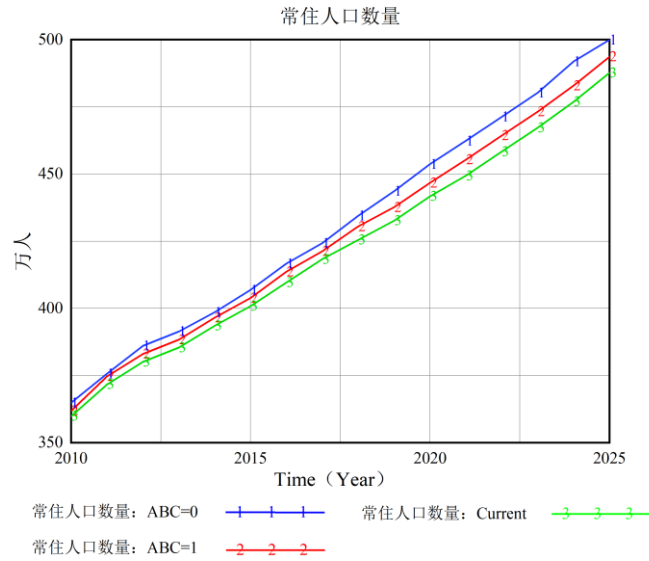


图 5.15 网络综合演化对常住人口数量的演化

从图 5.13-5.15 可以看出，网络指标综合演化可以引起节点城市发展的差异。但是这种影响除了对航空旅客运输量带来的变化比较大以外，对常住人口以及区域生产总值的影响并不显著。这是因为对兰州中川机场而言，其巨大的航空旅客运输量为节点城市的发展提供了市场潜力，而对于节点城市是否可以发展或者怎么发展，需要地方政府做相应的配套工作。因此，对于兰州中川机场的发展而言，在今后发展过程中，随着航空网络的进一步扩张，兰州中川机场将承接更多的旅客运输量，此时需要当地政府的引导，努力将旅客运输量作为开发相关项目的抓手。

基于以上研究结果，航空网络变化对航空旅客运输量的影响较大，对常住人口以及区域生产总值的影响相对较弱。这说明了航空网络的变化直接影响航空旅客运输量，因为航班航线和机场的变化可能会改变旅客的旅行选择和出行模式，对航空旅客运输量的影响较为显著；相比之下，航空网络变化对常住人口和区域生产总值的影响可能会相对较小，因为它们受到更广泛的因素影响，例如政策、市场、就业等因素。此外，这些因素还可能在更长的时间尺度上发挥作用，而航空旅客运输量的变化通常更快。

5.6 本章小结

本章以兰州市为具体案例，研究航空网络演化对节点城市经济的影响。首先，阐释选择兰州市为具体案例的理由；其次，根据收集的兰州市实际数据对系统动力学流图中的方程进行确定并估计相关参数；再次，验证模型的有效性，对航空网络演化影响节点城市经济的系统动力学模型的主要变量进行分析；最后，动态模拟航空网络相关指标变化对节点城市经济影响的差异。研究表明：（1）本研究建立的航空网络对节点城市经济影响的系统动力学模型是有效的；（2）航空网络扩张影响节点城市经济发展，但短期内影响不明显；（3）航空网络演化对航空旅客运输量的影响较大，对常住人口以及区域生产总值的影响相对较弱。

6 结论与对策建议

6.1 主要研究结论

本研究以航空网络及节点城市为研究对象，研究航空网络演化对节点城市的影响，根据研究目的，抽象出以下研究问题：（1）什么是航空网络？（2）航空网络的演化特征是什么？（3）航空网络演化对节点城市经济的发展有怎样的影响？为回答以上问题，本研究主要做了如下工作：（1）收集航空相关数据，构建2010-2019年国内航空网络，从复杂网络视角认识航空网络；从网络结构和网络节点层面分析近十年我国航空网络的演化特征；（2）识别航空网络对节点城市经济的影响表现及影响要素内部关系，构建动态机理影响模型，并以兰州市为具体案例进行动态模拟，改变航空网络的网络指标和节点指标，对比分析航空网络演化对节点城市的影响差异。得到以下主要结论：

（1）我国航空网络符合“高聚类、低平均”的小世界网络特征；纵向比较下，我国航空网络规模日益扩大，航线结构不断优化，但网络整体上仍存在较为明显的等级差异；航空网络结构更加稳定，网络结构逐渐从北京、上海、广州三中心结构，向北京、上海、广州、成都四中心演化；节点城市间的航空联系呈现递增态势，早期各节点城市之间联系相对稀松，仅仅是建立联系，节点间的运输量较少，后来航空联系逐渐西部地区扩散，节点城市联系有了大幅提升；东部领先、西部崛起、中部相对滞后的区域格局基本形成。

（2）航空网络演化影响节点城市经济发展，但这种影响在短期内变化不明显；航空网络结构指标（平均点度）和网络节点指标（接近中心度和介数中心度）演化对节点城市对航空旅客运输量的影响较大，对常住人口以及区域生产总值的影响相对较弱。这说明了航空网络的演化直接影响航空旅客运输量，而常住人口和区域生产总值受到政策、市场等其它因素的影响，这些因素在更长的时间尺度上发挥作用，而航空旅客运输量的变化通常更快。

6.2 对策建议

根据以上内容得到的研究结论，针对我国航空网络以及节点城市可持续发展提出以下建议：

(1) 加快西部航空网络建设，提高网络均衡性。通过对近十年我国航空网络的网络结构和网络节点进行分析可以看出，我国航空网络整体结构存在一定的等级差距，整个航空网络被北京、上海、广州、深圳等少数关键节点所控制，而一旦这些关键节点遇到故障或遭到攻击，整个航空网络将被分割为多个子网络，限值要素在网络中的流动，违背了航空网络建设的初衷。因此，需要加强关键节点与周边节点的联系，使周边节点从关键节点中获得更多资源和支持，从而缩小节点之间的差距；同时，也需要提高其他节点的网络地位，使得它们能够在网络中发挥更大的作用。因此，随着成都、重庆、昆明等城市的迅速发展，这些城市需要相互联系，建立共同市场以扩大联系范围，并与周边城市加强联系，发挥中心城市的带动和辐射作用，增强其发展潜力。

(2) 基于航空流循序渐进地进行节点城市的建设和开发。根据研究结论可知短时间内，航空网络对节点城市经济的影响不明显，且航空网络相关指标演化对节点城市经济影响差异不显著，但是对节点城市的航空旅客运输量的影响较为显著。因此，当地政府要把握住巨大的客流优势，分析客流量的来源和规模，优化配套交通网络，建设多功能商业区，促进文化旅游业的发展，加强城市形象的宣传。在相关项目开发过程中，首先要了解市场前景，确定项目可行性，设置阶段性开发目标，预留未来开发土地，以便在需要扩展和升级时，可以进行顺畅开发，而非全部进行某一类型项目的一次开发。

(3) 项目开发过程中，注意影响的多样性，积极促进正面影响的扩散和转化。节点城市的发展受到多方面因素的影响，例如交通、人口、产业等等，而且这些因素之间存在相互影响的关系，仅从单一视角出发，例如只关注经济效益，来建设节点城市是不够全面的。因此，地方政府应该注重发展节点城市内部交通网络，提升城市间和城市内部的互联互通，同时积极推进城市经济、社会功能的多重培育。此外，政府还应该制定相关政策和措施，以促进城市经济和社会功能的发展，并加速交通功能向城市功能的转化，进一步提升城市的综合竞争力和吸引力。

6.3 研究不足

本研究在梳理最新国内外相关文献的基础上，将理论与实证相结合研究航空网络对节点城市经济的影响机理，但鉴于，由于数据和篇幅的限制，论文仍然存在一些问题需要进一步探讨：

由于数据的可获得性，对我国航空网络的研究仅研究了近十年，此外，由于2019年12月新冠肺炎的爆发，对我国交通、经济、人口都产生了巨大影响，但是研究的时间仅仅到2019年，2020年后的真实航空网络会与理论研究有一定的偏差。

在建立系统动力学模型时，主要以文献参考方式进行影响因素的获取，但是会存在认识不足导致一些影响因素未被识别的情况，此外，在采用真实数据进行仿真时，对部分参数进行假设，与真实情况相比仍存在一定的偏差。

参考文献

- [1] 韩瑞玲,李玲玲,姚海芳.中国客运航空网络节点结构及其外部性因素的空间异质性研究[J].世界地理研究,2022,31(05):967-977.
- [2] 牛彩澄,刘承良,殷美元.长江经济带多元客流城市网络的空间格局及影响因素[J].经济地理,2022,42(11):45-53.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2022.11.006.
- [3] 刘旭颖.低尾气污染排放的经济运输路径航空网络布局优化研究[J].环境科学与管理,2020,45(06):36-40.
- [4] 关伟,吴建军,高自友.交通运输网络系统工程[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(06):9-21.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.06.002.
- [5] Guo L, Cai X U. Degree and weighted properties of the directed China railway network[J]. International Journal of Modern Physics C, 2008,19(12).
- [6] Lin J, Ban Y. Complex Network Topology of Transportation Systems[J]. Transport Reviews, 2013,33(6): 658-685.
- [7] 吴宜耽,孙宏,张培文等.全球国际航空网络结构的复杂性及其社团特征[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),2022,61(05):22-30. DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2021d048.
- [8] 胡军,王雨桐,何欣蔚等.基于复杂网络的全球航空网络结构分析与应用[J].计算机科学,2021,48(S1):321-325.
- [9] 杜方叶,王姣娥,谢家昊等.“一带一路”背景下中国国际航空网络的空间格局及演变[J].地理科学进展,2019,38(07):963-972.
- [10] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(12): 2972-2980.
- [11] Guida M, Maria F. Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure? [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2007, 31(3): 527-536.
- [12] Guo J K, Wang S B, Wang D D, et al. Spatial structural pattern and vulnerability of China- Japan- Korea shipping network [J]. Chinese Geographical Science, 2017,27(5): 697-708.

- [13] 党亚茹,彭丽娜.基于复杂网络中心度的航空货运网络层级结构[J].交通运输系统工程与信息,2012,12(03):109-114.
- [14] 曾小舟. 基于复杂网络理论的中国航空网络结构实证研究与分析[D].南京航空航天大学,2012.
- [15] 杨丽,苟晓冬.中国航空货运网络结构分析[J].西北师范大学学报(自然科学版),2019,55(04):30-36.DOI:10.16783/j.cnki.nwnuz.2019.04.006.
- [16] 李红启,袁俊丽,赵文聪,张禄.我国民航货运网络的统计特性分析[J].北京交通大学学报(社会科学版),2017,16(02):112-119.DOI:10.16797/j.cnki.11-5224/c.20170331.014.
- [17] 莫辉辉,金凤君,刘毅,王姣娥.机场体系中心性的网络分析方法与实证[J].地理科学,2010,30(02):204-212.DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2010.02.009.
- [18] 曾小舟,江可申,程凯.我国航空网络枢纽机场中心化水平比较分析[J].系统工程,2010,28(09):39-45.
- [19] 冯霞,贾宏璨.考虑节点失效和边失效的航空网络鲁棒性[J].北京交通大学学报,2021,45(05):84-92.
- [20] He Hang, Zhao Zhenhan, Luo Weiwei, Zhang Jinghui. Community Detection in Aviation Network Based on K-means and Complex Network[J]. COMPUTER SYSTEMS SCIENCE AND ENGINEERING,2021,39(2).
- [21] 褚艳玲,宫之光,杨忠振.21 世纪以来中国航空货运空间变化研究[J].地理科学,2016,36(03):335-341.DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2016.03.003.
- [22] 陈欣,袁建,戴靓.基于空间计量模型的机场网络溢出效应研究[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(04):211-217.
- [23] Sugishita Kashin,Masuda Naoki. Recurrence in the evolution of air transport networks[J]. Scientific Reports,2021,11(1).
- [24] Hye Min Chung, Oh Kyoung Kwon, Ok Soon Han, Hwa-Joong Kim. Evolving network characteristics of the asian international aviation market: A weighted network approach[J]. Transport Policy,2020,99.
- [25] Li Hongchang, Li Junru, Zhao Xiaojun, Kuang Xujuan. The morphological structure and influence factors analysis of China's domestic civil aviation freight transport network[J]. Transport Policy,2022,125.

- [26] 戢晓峰,刘传颖,李杰梅.旅游业驱动的区域航空网络时空演化特征[J].经济地理,2017,37(11):205-212.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2017.11.025.
- [27] 张培文,杜福民,王雪,汪瑜,李璐.近十年中国客运航空网络空间结构演化及分析研究[J].世界地理研究,2021,30(06):1253-1264.
- [28] 马学广,鹿宇.基于航空客运流的中国城市空间格局与空间联系[J].经济地理,2018,38(08):47-57.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2018.08.007.
- [29] 张婷婷,陈瑛,王孟林.基于航空联系的中国城市网络格局演变分析[J].世界地理研究,2022,31(01):166-176.
- [30] 李恩康,陆玉麒,杨星,陈娱.全球城市网络联系强度的时空演化研究——基于2014~2018年航空客运数据[J].地理科学,2020,40(01):32-39.
- [31] 张凡,杨传开,宁越敏,魏也华.基于航空客流的中国城市对外联系网络结构与演化[J].世界地理研究,2016,25(03):1-11.
- [32] 蒲亚琼.中国民用货运航空网络演化分析[D].沈阳航空航天大学,2019.DOI:10.27324/d.cnki.gshkc.2019.000253.
- [33] 王波,雷雅钦,张琪.环南海区域跨境航空网络空间结构演化[J].人文地理,2022,37(01):164-170.DOI:10.13959/j.issn.1003-2398.2022.01.018.
- [34] 王姣娥,王涵,焦敬娟.“一带一路”与中国对外航空运输联系[J].地理科学进展,2015,34(05):554-562.
- [35] Matsumoto H. International air network structures and air traffic density of world cities[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, 43(3): 269-282.
- [36] 丁金学,金凤君,王姣娥,刘东.高铁与民航的竞争博弈及其空间效应——以京沪高铁为例 [J].经济地理,2013,33(05):104-110. DOI: 10.15957/j. cnki.jjdl. 2013.05.017.
- [37] 张杨茗媛,白杨.江苏省机场与区域经济发展的关联性分析[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2018,34(05):611-618.
- [38] 水静远. 中心城市航空运输业与区域经济互动研究[D].西华大学,2021.DOI:10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000359.
- [39] 王天宇. 我国省域民航旅客吞吐量影响因素研究[D].中国民航大学,2020.DOI:10.27627/d.cnki.gzmhy.2020.000095.

- [40] 徐鹏杰,王鹤.基于机场生产能力的民航运输业与区域经济发展的关系研究[J].湖南财政经济学院学报,2016,32(06):139-146.
- [41] 苗志阳,郑稀元,范敏霞等.基于改进断裂点理论的机场吸引范围界定[J].科学技术与工程,2023,23(02):845-856.
- [42] Volodymyr B. Are airports engines of economic development? A dynamic panel data approach [J]. *Urban Studies*,2015, 52(9): 1577-1593.
- [43] Kim Jung Min, Yang Dong Heon, Bang Sun Yi. Research of sustainable Social-Economy Business Model Development utilizing Internal Resource -Case study of Incheon International Airport Corporation-[J]. *Journal of Digital Convergence* , 2015,13(12).
- [44] Nigel Halpern, Svein Brathen. Impact of airports on regional accessibility and social development[J]. *Journal of Transport Geography*,2011,19(6).
- [45] II Aun. Airport development and socio-economic development of Nigeria[J]. *Journal of Research in National Development*,2013,11(1).
- [46] 邢大伟,田勇,万莉莉,王倩.降低噪声影响的进场航线路径优化[J].科学技术与工程,2019,19(13):287-294.
- [47] 赵悦,张凯月.离场飞机噪声环境影响预测分析及优化[J/OL].安全与环境学报:1-7.DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2022.0252.
- [48] WIJNEN R A A, VISSER H G. Optimal departure trajectories with respect to sleep disturbance[J].*Aerospace Science &Technology*,2003,7:81-91.
- [49] JANSSEN S A, CENTEN M R, VOS H, et al. The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality[J]. *Applied Acoustics*,2014,84(1):9-16.
- [50] 樊重俊,袁光辉,杨云鹏.机场可持续发展分析评估指标体系与方法[M].上海:立信会计出版,2015.
- [51] 汪亚男,孙乃秀,冯建红,吴琳,马根慧,彭剑飞,边向征,毛洪钧.北京大兴国际机场排放及其环境影响与预测[J/OL].环境科学学报:1-2022.0426.
- [52] 曹惠玲,晏嘉伟,匡家骏,李玉铭.飞机排放对机场周边环境的影响研究[J/OL].航空动力学报:1-15.DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20210673.

- [53] Aisling Reynolds-Feighan, Peter McLay. Accessibility and attractiveness of European airports: A simple small community perspective[J]. *Journal of Air Transport Management*,2006,12(6).
- [54] Agrawal Gaurav, Dumka Ankur, Singh Mayank. Usability and accessibility-based quality evaluation of Indian airline websites: An MCDM approach.[J]. *Universal access in the information society*,2022.
- [55] Amaya Vega, Aisling Reynolds-Feighan. The impact of the great recession on Irish air travel: An intermodal accessibility analysis[J]. *Journal of Air Transport Management*,2016,51.
- [56] 黄洁,石雯茜,陈娱.居民出行视角下的北京市双枢纽机场可达性研究[J].*地球信息科学学报*,2022,24(05):914-924.
- [57] 汪瑞琪,陈建均.基于潜能模型的粤港澳大湾区民用机场公路交通网络可达性研究[J].*公路*,2020,65(04):225-231.
- [58] 潘竟虎,从忆波. 中国民用机场可达性与服务范围测度[J].*经济地理*, 2015, 35(02):46-53.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2015.02.007.
- [59] Oesingmann K. Extension of Collective Agreements in Europe[J]. *CESifo DICE Report*, 2016, 14(2): 59-64.
- [60] 程谦,朱晓宁,卢万胜.中长运距城际旅客出行方式选择行为模型——以高铁、民航为例[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2021,40(07):39-45.
- [61] 贾鹏,刘瑞菊,杨忠振.基于陆域和空域运输系统的空港可达性评价方法研究[J].*经济地理*,2013,33(06):91-97.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2013.06.028.
- [62] 王喆冰. 杭州萧山国际机场陆侧交通管理与疏堵对策研究[D].*浙江大学*,2022.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.000117.
- [63] 熊娜,郑军,汪发元.长三角区域交通高质量一体化发展水平评估[J].*改革*,2019(07):141-149.
- [64] 朱桃杏,吴殿廷,马继刚等.京津冀区域铁路交通网络结构评价[J].*经济地理*,2011,(4): 561-565+572.
- [65] 赵国钦,万方.世界贸易网络演化及其解释——基于网络分析方法[J].*宏观经济研究*,2016, (4): 151-159.

- [66] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.
- [67] 刘军. 整体网分析: UCINET 软件实用指南 (第二版) [M]. 上海: 格致出版社: 上海人民出版社, 2014.
- [68] 尚丽维. 在线医疗社区信息交互关系网络关键节点影响力研究[D]. 吉林大学, 2020. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006768.
- [69] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖等. 系统动力学 (第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2011
- [70] 宋函. 基于系统动力学的机场可持续发展研究[D]. 中国民用航空飞行学院, 2022. DOI:10.27722/d.cnki.gzgmh.2022.000161.
- [71] Mishra S, Welch T F, Jha M K. Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(7): 1066-1085.
- [72] Ye K, Liu G, Shan Y. Networked or Un-Networked? A Preliminary Study on KIBS-Based Sustainable Urban Development: The Case of China[J]. Sustainability, 2016, 8(6): 509.
- [73] 陈林. 我国机场环境外部成本计量及内部化研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2012, 11(01): 12-17. DOI:10.16797/j.cnki.11-5224/c.2012.01.003.

攻读硕士学位期间发表论文及科研情况

参与课题:

- [1] 甘肃省科技厅自科项目：基于复杂网络的区域物流效率研究（20JR5RA205）；
- [2] 甘肃省科技厅软科学课题：丝绸之路背景下甘肃物流集散能力研究（20CX4ZA059）；
- [3] 甘肃省电子商务技术与应用重点实验室，甘肃特色农产品跨境电商物流问题研究（2018GSDZSW63A12）。

发表论文:

- [1] Huiping Peng, Jiao Ma, Kehong Zhang. Analysis of the Evolution of Structural Features of China's Air Cargo Transport Network[C]//2022 13th International Conference on E-business, Management and Economics. 2022: 240-247.
- [2] 曹晓军, 季训霞, 马娇, 彭会萍. 西部陆海新通道的物流网络研究[J].商学研究, 2022,29(03):85-95.
- [3] 我国航空货运网络空间结构演化分析（《商学研究》已录用，第二作者）
- [4] 参与撰写《中国智慧物流》，出版时间，2022.3，出版社：中国财政经济出版社.

致谢

行文至此，学生生涯即将落下帷幕。这一段时光始于 2020 年早秋，终于 2023 年初夏，在这段时光里，遇到了可爱的人、难忘的事和拥有值得回味一生的故事。

首先，要向我的导师彭会萍教授表示衷心的感谢，感谢她在论文写作过程中给予的指导和帮助；感谢她在生活学习过程中给予的关心和呵护；感谢她在我迷茫困顿时一直鼓励我、肯定我，告诉我人生的路有多条，只要脚踏实地，一定能在自己的领域闪闪发光。正是彭老师的言传身教让我深刻领悟到了做人处事的道理，让我在今后的人生道路上更加从容自信；其次，还要感谢我们实验室的曹晓军老师，曹老师治学严谨、专业素养深厚，无论谁去请教他都会不厌其烦的进行耐心指导，曹老师对待学术问题很“轴”，会细抠每一个字，每一个词，每一句话，这种对待问题严谨的态度对我来说受益匪浅。同时，还要感谢我们实验室的张克宏老师、张明军老师、王国兴老师，每周的组会都能从各位老师身上学到很多的知识，感谢各位老师提供的学习平台，真心的祝愿各位老师身体健康、科研顺利，祝愿我们实验室今后发展越来越好。

感谢我的同门季训霞，她是我来兰州最最最大的幸运！三年来，每天晚上我们相伴从信工楼走向宿舍楼，等电梯时她经常会给我一个拥抱然后对我说“马娇今天辛苦了”，“马娇你是最棒的”，“马娇你好厉害”！为论文抓耳挠腮的时候、孤独想家的时候、困顿迷茫的时候、火车晚点十个小时的时候、第一次坐飞机的时候……每个开心的还是不开心的时刻，都有她的陪伴与鼓励。她热情、开朗、大方、体贴……，从她身上我学到了太多太多，祝她今后万事顺遂！感谢我的室友李冰、秦精俏、马亚楠，我们来自不同的城市，有着不同的生活习惯，但是我们总是相互包容、相互理解；还要感谢实验室的师兄、师姐、师弟、师妹，正是有了他们的鼓励与帮助，才让我的研究生生活更多丰富多彩，祝愿他们科研顺利，生活顺遂。

感谢我的男朋友小刘，从大学到研究生，从同校到异地一千多公里，七年来你我并肩走了太长的路，感谢在我困难低沉之时给予我陪伴、开解与鼓励，祝你，祝我，也祝我们奔赴更美好的未来。感谢我的父母在我求学道路上的支持，他们始终认为读书是改变命运的唯一途径，在我每一个需要做出选择的时

刻，他们总是笃定的说“做你自己想做的，多读点书总是没错”。于是我呀，站在父母的肩上看到了更大更好的世界。

最后，感谢一直平凡，一直坚持、一直努力的自己！