

基于对抗解释结构模型方法的
沿海智慧港口竞争力研究

**Research on Competitiveness of Coastal
Smart Port Based on Adversarial
Interpretative Structural Modeling Method**

专业学位类别：工程管理

作者姓名：谢希霖

指导教师：沈江 教授

天津大学管理与经济学部

2019 年 11 月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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：谢希霖 签字日期：2019年11月28日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：谢希霖

导师签名：沈力

签字日期：2019年11月28日

签字日期：2019年11月28日

摘要

智慧型港口是第五代港口重要的发展和建设方向,中国目前对于港口综合评价的研究较多,但对于智慧港口竞争力的研究尚且不多,且存在评价指标难以量化的问题。

本文在现有港口综合竞争力的评价体系基础上,加入了智能化相关指标,构建了沿海智慧港口竞争力的评价体系,并使用对抗解释结构模型法(AISM)对这8个智慧港口的综合竞争力进行了分析评价,从19个维度的指标层逼近到8个港口相对理想解的距离,再逼近到贴适度,最终得到竞争力排序。排序结果由强到弱为:上海港>宁波舟山港>深圳港>天津港>广州港>厦门港>青岛港>大连港。

本研究的意义在于:在对前四代港口的综合竞争力研究基础上,创新性的加入了智慧化相关的3项指标,并且使用专家访谈、专家打分法确定各项的权重,用以量化各港口的智慧化程度,以期对建立健全智慧港口综合竞争力评价体系做出贡献。

采用对抗解释结构模型方法,用于智慧港口的竞争力研究。基于TOPSIS的逼近原则进行建模,通过从指标距离到样本距离,到贴适度的步步逼近计算,最终得到竞争力排序结果,并以有向拓扑层级图的可视化形式展现结果,直观明了。以四种不同的有向拓扑层级图对结果进行展示,更全面、更合理的反应样本所属层级,为港口的竞争力分析提供了一种新思路。

关键词: 智慧港口, 竞争力, TOPSIS, 对抗解释结构模型

ABSTRACT

The smart port is an important direction of development and construction of fifth-generation port. At present, there are many studies on the comprehensive evaluation of ports in China, but few studies on the competitiveness of smart ports. And the problem is that the evaluation index is difficult to quantify.

Based on the evaluation system of the existing port comprehensive competitiveness, this paper has added intelligent related indicators. The evaluation system of coastal smart port competitiveness has been constructed and used in the competitiveness of eight Chinese coastal smart ports in China. The comprehensive competitiveness of the eight smart ports was analyzed and evaluated using the Adversarial Interpretive Structural Model Method (AISM). From the indicator layer of 19 dimensions, the distance from the eight ports to the ideal solution is approached, and then close to the closeness, and finally the competitive ranking is obtained. The sorting results from strong to weak is: Shanghai Port > Ningbo Zhoushan Port > Shenzhen Port > Tianjin Port > Guangzhou Port > Xiamen Port > Qingdao Port > Dalian Port.

The significance of this research is that, based on the comprehensive competitiveness research of the first four generations of ports, the three indicators related to intelligence are added innovatively, and the weights of each item are determined by expert interviews and expert scoring methods. Quantify the degree of intelligence of each port, with a view to make contribution to the establishment of a sound smart port comprehensive competitiveness evaluation system.

The Adversarial Interpretive Structural Model Method (AISM) is used for the competitiveness research of smart ports. By modeling according to the approximation principle of TOPSIS, through the step-by-step approximation calculation from the index distance to the sample distance to the closeness, the competitive sort result is finally obtained. The results are visualized in the form of a directed topology level map, which is more straightforward. The results are presented in four different directed topology levels, with a more reasonable and accurate response to the level of the sample. The topological level diagram, through which the reasons for the competitiveness gap has been analyzed, provides a new idea for the port's competitiveness analysis.

KEY WORDS: smart port, competitiveness, TOPSIS, AISM

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究问题的提出	2
1.3 研究意义	3
1.4 研究方法和技术路线	3
1.4.1 研究方法.....	3
1.4.2 技术路线.....	4
第 2 章 相关文献回顾.....	7
2.1 港口竞争力国内外研究与发展现状	7
2.1.1 智慧港口发展现状概述.....	7
2.1.2 港口竞争力的研究现状.....	9
2.2 基于偏序的哈斯图、解释结构模型	11
2.2.1 基于偏序的哈斯图.....	11
2.2.2 解释结构模型.....	12
2.3 TOPSIS 与 GAN	14
2.3.1 逼近理想解排序法.....	14
2.3.2 生成对抗网络.....	15
2.4 本章小结	17
第 3 章 对抗解释结构模型方法.....	19
3.1 对抗解释结构模型流程图	19
3.2 归一化矩阵与正负理想点	20
3.2.1 由原始数据得到归一化矩阵.....	20
3.2.2 正负理想点.....	22
3.3 基于指标的对抗哈斯矩阵求解	22
3.4 基于偏序的拓扑层级图的计算过程	24
3.4.1 P, Q 矩阵的偏序规则	25
3.4.2 关系矩阵到骨架矩阵的简便运算.....	25
3.4.3 有向拓扑层级图的计算与绘制.....	25
3.5 基于正负理想点的距离与贴近度	26
3.6 本章小结	27

第 4 章 沿海智慧港口竞争力评价设计.....	29
4.1 沿海智慧港口竞争力评价指标体系的构建.....	29
4.1.1 评价指标体系的构建原则.....	29
4.1.2 沿海智慧港口竞争力评价指标的确定.....	29
4.2 港口竞争力评价指标的数据收集.....	33
4.2.1 港口各项评价指标的数据来源.....	33
4.2.2 智能化指标的评价过程.....	37
4.3 本章小结.....	40
第 5 章 基于 AISM 方法分析智慧港口竞争力.....	41
5.1 AISM 方法处理数据的过程.....	41
5.1.1 由指标距离求解基于偏序的骨架矩阵.....	41
5.1.2 由样本距离求解基于偏序的骨架矩阵.....	46
5.1.3 由方案贴近度求解基于偏序的骨架矩阵.....	47
5.2 沿海智慧港口竞争力评价结果.....	49
5.3 评价结果分析与建议.....	55
5.3.1 评价结果分析.....	55
5.3.2 对港口的建议.....	57
第 6 章 结论与展望.....	59
6.1 全文总结.....	59
6.2 研究展望.....	59
参考文献.....	61
附录 A 专家访谈问卷.....	65
附录 B AISM 计算过程中的矩阵.....	67
致 谢.....	71

第1章 绪论

1.1 研究背景

新世纪以来,中国港口发展得极为迅速,港口的建设规模以及设备设施已位居世界前列,吞吐量也连续多年居世界第一位。据国家统计局数据,全国沿海规模以上港口全年完成货物吞吐量 92.13 亿吨,同比增长 4.2%。港口行业属国民经济基础产业,整个行业的发展水平与宏观经济发展水平紧密相关。

在中国经济发展的新常态下,国内经济整体呈现出健康、稳定的发展态势。受益于供给侧改革、“一带一路”等多项政策所带来的经济活力,港口行业也面临更多的机遇和挑战。当前,世界经济延续复苏态势,国内需求的稳定增长有效地拉动了外贸进出口增长,即使在中美贸易摩擦影响下,2018 年中国港口生产率也仅比 2017 年有小幅回落,但整体情况仍好于 2015 年和 2016 年,货物吞吐量还较 2017 年实现了小幅增长。

东部沿海众多大型港口作为海上丝绸之路的重要节点,大连、天津、青岛、上海、宁波、深圳等港口都抢抓“一带一路”给行业带来的潜在盈利增长,使企业更加从容的应对经济形势的变化,在行业竞争中处于主动地位。“一带一路”倡议提出以来,中国港口已经和世界上二百多个国家的六百多个港口建立起互通航线,海运服务覆盖到了海上丝绸之路沿途的所有国家。港口是贸易与物流的重要引领,是海洋经济发展的强大支撑,作为腹地经济的纽带,港口为带动区域发展起到了重要作用。同时,腹地经济的发展又促进了贸易需求的增长,反向带动了港口经济,使得“港口-腹地”相互促进、协同发展。

港口在全球贸易中发挥着重要作用,其影响还将持续。全球港口竞争格局在过去的二十年里经历了几次巨变,因此港口的营运水平、战略要求和竞争格局也随之改变。全球各大港口都从粗放式扩张,向科学化、可持续化、精细化管理方向进行转变,竞争优势也不再局限于港口营运水平的提升上。迄今为止,全球港口的发展大致经历了四代,正向第五代港口转型。中国各大沿海港口若想继续保持良好的竞争力,则需要积极投身第五代港口的建设,向物联网、智能化、自动化等创新方向不断发展。

目前中国各大沿海港口在信息化建设方面已经取得了长足的进步,各种信息管理平台、网上办理业务为港口的物流效率的提升、服务的提升提供了基本的保障。在此基础上,各大港口继续投身于信息化、智能化与工业化的深度融合,在转型升级的路上不断拓展,并取得了一定的进步。如,在集装箱的装箱单、设备

交接单和提货单等核心业务单据方面,各大沿海港口已或多或少的实现了电子化、无纸化,其意义不仅限于减少了纸张的使用,低碳环保,更在于大大提高了客户办理业务效率以及降低了客户物流成本。以上海港为例,设备交接单的非纸化每年可为企业节约相关成本超过 4 亿。各大港口还在构建一站式业务受理模式、区块链技术的应用方面取得了一定的成绩。以物联网、人工智能、大数据、云计算为依托,助力港口建设成为更加高效、便捷、自动化、智能化的港口,会是港口下一轮竞争的核心。港口的设备操作的自动化、港口调度的智能化、信息数据的可视化,可极大的降低物流成本、人力成本和管理成本,全面提高港口的全局化升级。

1.2 研究问题的提出

在世界全球化经济和区域整体化的浪潮中,港口得以迅速发展。虽然中国港口的货运能力与货运量在全球处于领先地位,但是世界经济处于复杂多变的环境。逆水行舟不进则退,如何保持并加强港口的竞争力,应作为一个持续的研究课题,需要各大港口企业、地区、乃至国家不断思考并制定相应的规划。

港口作为地区贸易的重要纽带,间接反应了该地区的经济实力、政府的规划和政策支持,更是一个国家进出口贸易的前沿节点。一个港口的竞争力决定了其发展速度、运营水平、盈利能力,也反映了其服务能力,带动了其腹地的经济增长速度和人口就业率等指标。

目前,中国各大沿海港口都在“打造智慧港口”的目标上不断取得规划和进展。天津港提出全方位打造特色“智慧港口”,力争实现打造世界一流智慧港口、绿色港口、枢纽港口的宏伟蓝图。上海港全力打造智慧港口、助力智慧城市建设。青岛港的“智慧物流领域”作为首个国家重点专项,部分码头实现了无人化。宁波舟山使用智能算法优化集卡行驶路径、提高作业效率、降低物流成本。

本文以智慧化为切入点,对中国沿海 8 个港口的综合竞争力进行了研究。此 8 个港口也是国内货运量排名前 8 强,分别是:深圳港、上海港、宁波舟山港、广州港、青岛港、天津港、厦门港和大连港。鉴于人工智能、5G 技术、区块链、无人驾驶等技术属于新兴前沿科技,新技术的成熟、与工业的融合应用都需要一定的探索过程。国内外学者在此方面的研究尚且不多,且大多数对于智慧港口的竞争力研究都只停留在指标体系的建立上,没有结合真实数据对港口竞争力进行排序。或单独使用某一种排序方法对港口竞争力进行研究,模型较为陈旧,科学性不够严谨。故本研究致力于解决以下两个问题:

- (1) 加入“智能化”相关指标后,8 个沿海智慧港口的竞争力将会如何排

名。

(2) 在智慧港口的竞争力排名研究中, 对抗解释结构模型法 (AISM) 相对于传统的 TOPSIS、VIKOR 或其它评价方法, 是否具科学性、合理性。

1.3 研究意义

物联网、人工智能等技术作为新型智能产业, 已受到了全世界的广泛重视, 如何将这些前沿智能技术应用于实际的生产和服务中已成为企业的一项重要挑战。对于港口而言, 通过智能化技术与生产、物流、服务相结合, 可以提高港口的作业效率、降低其物流成本、节省人工成本、实现利益最大化。这对抢占市场份额、促进与腹地的经济协同发展都多有裨益。

目前中国在智慧港口的理论研究方面还处于探索阶段, 相关的标准规范、指导意见和评价体系还尚未建立。本文在以往对前四代港口的综合竞争力研究基础上, 创新性的加入了智慧化相关的 3 项指标, 希望能对建立健全智慧港口完整的评价体系做出一些参考和贡献。科学合理的智慧港口指标评价体系和评价标准, 是促进智慧港口落地实施、推动港口转型升级的一个重要途径。

通过查阅各大港口在“智慧港口”方面已取得的成效和未来的发展规划, 初步对“智慧化”指标进行归纳、分类和细化, 并且通过专家访谈、专家打分法确定各细项的权重, 用以量化各港口的智慧化程度。以期获得更加准确的竞争力分析结果。

本文创新性的将 GAN 中的对抗 (Adversarial) 思想融入经典解释结构模型方法, 使用改进后的对抗解释结构模型 (AISM) 方法, 对中国沿海港口的竞争力进行研究。从指标距离、样本距离、方案贴近度三个维度逐步逼近以获得稳定的样本排序结果。并绘制出评价智慧港口竞争力的递阶结构有向拓扑层级图, 以可视化的效果进行展示, 使分析变得清晰直观, 为港口的竞争力分析提供了一种新思路。基于变异系数法的 TOPSIS 排序方法, 明显提高了多目标决策分析的科学性、准确性和可操作性。

1.4 研究方法和技术路线

1.4.1 研究方法

本文采用了以下两种方法对本文的研究内容进行研究:

(1) AISM (对抗解释结构模型)

在经典的解释结构模型（ISM）基础上，融入生成对抗网络（GAN）中的对抗（Adversarial）思想，成为对抗解释结构模型（AISM）。通过对正负理想点的距离测度，不断的利用博弈对抗矩阵，并根据偏序关系得到关系矩阵，生成对抗的 ISM 有向拓扑层级图，通过逐步的逼近以求出评价对象的排序结果。

（2）拓扑层级图

对于一个问题的说明和分析，可以通过文字、符号、表格、图形图像等多种方式，其中图形图像方式最具直观性，最易快速被人理解与接受。拓扑图形与几何图形不同，它并不考虑要素本身的大小与形状，而只考虑要素间的相对拓扑位置关系。

AISM 方法展示结果时使用的有向拓扑网络层级图是以四个网络有向拓扑层级图的方式来说明，通过比较同一个关系矩阵由不同方式观测到的要素拓扑位置的异同，更能明确要素在整体体系中的变化特征。

1.4.2 技术路线

本文旨在研究中国沿海智慧港口竞争力排名，使用融入对抗思路的解释结构模型对港口的综合指标进行计算。为此，全文围绕着提出问题、分析问题和解决问题的整体思路构建框架，主要内容及章节安排具体如下：

第一章：绪论。通过分析中国沿海智慧港口竞争力的研究现状，提出了本文所要研究的内容，并阐述其研究意义，最后介绍了研究方法并给出本研究的结构安排和技术路线。

第二章：相关文献回顾。一方面对智慧港口的发展现状进行了总结，对港口竞争力的研究现状进行了文献的分类和梳理；另一方面对偏序、哈斯图、解释结构模型、TOPSIS 方法和生成式对抗网络的文献进行了梳理。为本文的研究过程奠定了理论基础。

第三章：对抗解释结构模型方法。介绍了本文对沿海智慧港口竞争力评价所使用的方法——对抗解释结构模型（AISM）的详细求解步骤。解释结构模型将评价样本的结果以层次化的有向拓扑图形式展示，本方法在此基础上，加入了基于指标距离的对抗矩阵、基于样本距离的对抗矩阵、方案贴近度的对抗矩阵来不断逼近以获得排序结果。

第四章：沿海智慧港口竞争力评价设计。阐述了各项指标如何进行选取和分类，指标相关的数值如何获得。对于可直接定量的指标，只需辨别其对结果的正向、负向属性；而对不可直接定量的指标，则使用专家打分法，结合实际实现情况，对其进行定量化处理。

第五章：基于 AISM 方法分析智慧港口竞争力。使用对抗解释结构模型

(AISM)对第四章建立的评价指标体系进行求解,得出8个沿海智慧港口竞争力的评价结论,并对结论进行分析解释,给出相关建议。

第六章:研究结论与研究展望。对本文的研究进行总结,并指出未来研究的方向,对智慧港口的建设和发展提出展望。

研究技术路线图请见图 1-1。

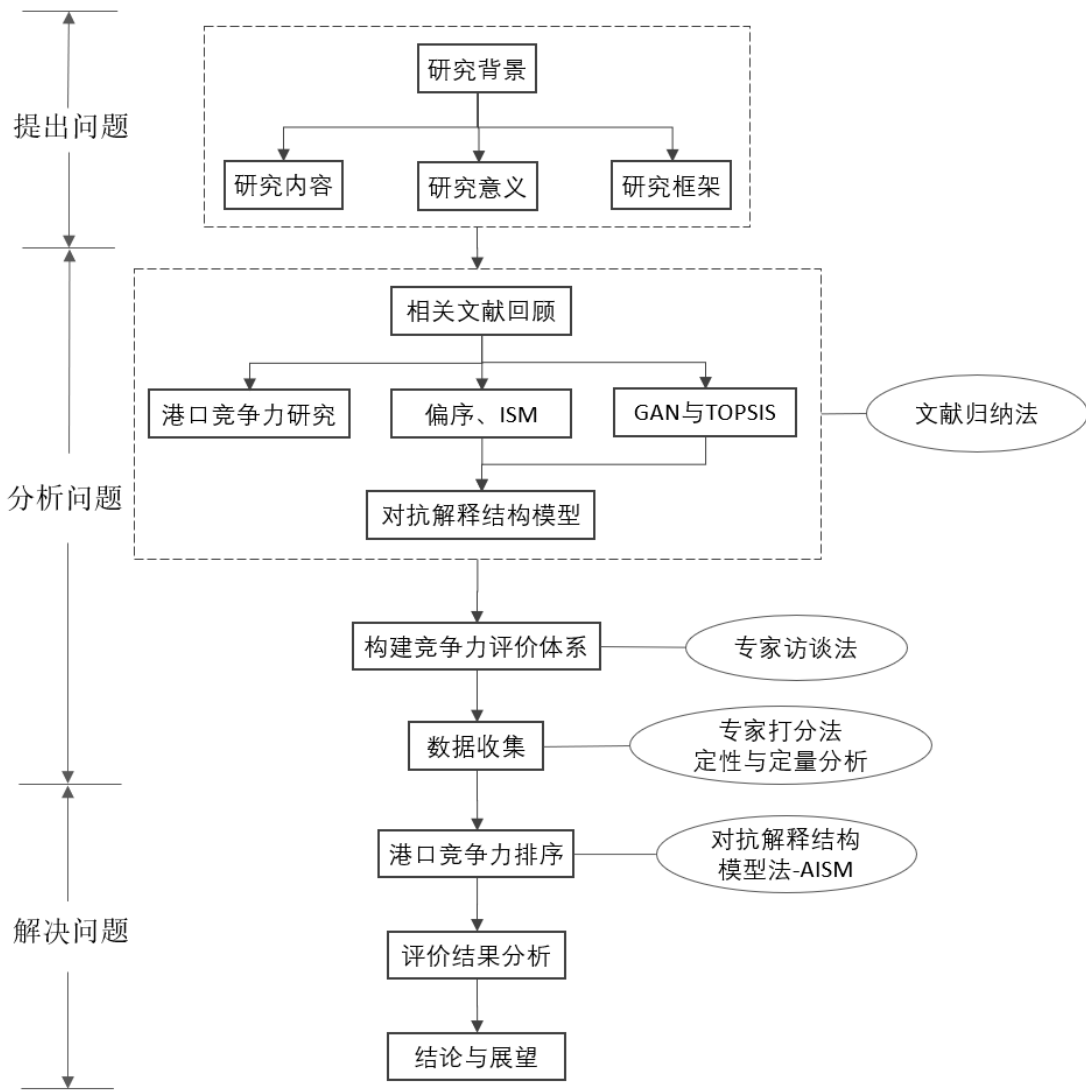


图 1-1 研究技术路线图

第2章 相关文献回顾

2.1 港口竞争力国内外研究与发展现状

“智慧港口”理论的提出源于智慧地球、智慧城市等概念，并引入到交通领域。“智慧港口”的认知与发展伴随着港口从作为海洋-内陆之间运输枢纽的第一代港口(作为提供装卸服务的第二代港口、作为贸易和物流中心的第三代港口、作为港口联盟的柔性化、信息化以及整合性物流的第四代港口)，向着低碳环保、智慧物联化的第五代港口发展。随着“云大物移智”等新技术的不断发展和成熟，智慧化理念逐渐融入港口的发展愿景之中，也提升了人们对“智慧港口”的理解和认识。

2.1.1 智慧港口发展现状概述

(1) 智慧港口概念的提出

智慧港口是指利用先进的技术手段，如人工智能、云计算、物联网、传感网、精准定位和优化决策等，为港口提供全面感知(通过北斗导航、GPS定位、RFID技术与感知终端对港口进行监控与测量)，高度共享(包含数据信息、运输工具、设备设施等信息的共享)，深度计算(通过人工智能算对路径进行分析、对资源进行调配等)，智能应用(移动终端、电子商务、自动装卸等)和广泛连接(以互联网和物联网为基础的信息融合和互通)，以把控港口运营过程中的关键信息。使得人、物、各类资源和各参与方之间实现无缝连接与协调联动。可大幅提高港口、工业园区及物流园区对信息处理和资源配置的速度，使港口向更高效、密集、便捷、环保和安全的方向发展。智慧港口的主要表现形式为智能监管、智能服务与自动装卸，为现代服务业的港口提供现代物流业高效，安全和优质的服务^[1]。

港口在供应链中拥有庞大的客户群，包含生产公司、贸易公司、运输公司、监管机构、保险公司、银行以及其他客户。伴随着信息技术的飞速发展，智慧港口必将成为未来全球港口发展的主要趋势。2016年，交通运输部印发的《交通运输“十三五”发展规划》指出，各地应因地制宜，加快区域物流信息化建设与互联，推进智慧港口、智慧物流园建设，实现货运枢纽之间的顺畅与协调连接。选取沿海重点港口建设智慧港口示范工程，实现服务全面自动化、智能化，完善港口智能感知体系，提高港口物流效率和智能化水平^[2]。

(2) 智慧港口的发展现状

中国对于智慧港口的发展建设和外国的港口有所区别：国外港口侧重于提出对未来的发展愿景，并对发展模式和理念进行战略性描述，建设前先构建完整的技术体系；中国港口则重视实际技术的应用，如“云大物智移”等新兴技术在港口生产中的应用实践。

例如，德国汉堡港想要在未来几年时间内打造智慧型港口，并在智慧能源和智慧物流这两方面做出战略规划。智慧物流提供了贸易流与交通流的解决方案，兼顾经济与生态。智慧能源是通过对能源的重复利用促进环保流动性，将港口对电能的依赖转换至可再生能源，进而节省成本、降低能耗^[3]。

鹿特丹港在 2011 年，就提出了于 2030 年建成智慧港口的发展愿景。并结合世界港口发展大趋势，从港口集散体系、生态环境、物流服务、区域经济与创新能力等方面进行分析，描绘出“智慧港口”技术路线图。近年来，港口使用物联网、大数据、智能计算与控制等技术，对港口的作业和运输进行优化，实现了过程的自动化控制。2015 年 4 月，耗资 40 亿美元建设的马斯莱可迪二期码头投入运营，预计到 2035 年全部建设完毕后，码头的运营效率可提升 50%以上^[4]。

新加坡港投资建设的大士新港通过多个自动化系统创造性地将智能技术用于建筑、运营和管理，如自动导引车系统、码头自动化系统、岸桥自动维护系统、智能视频分析系统等，以实现高度自动化和智能化的码头操作。

宁波港在提升港口设备设施的智慧化水平、提升港口集疏体系智慧化水平方面，不断进行探索与实施。并将智能技术应用于物流监控、集装箱智能闸口和智能堆场定位与调配等方面^[5]。目前，宁波港已成功实现在移动 5G 网络下进行迅速、精准的轮式龙门吊作业并回传视频。

大连港以物联网作为突破口，提出了智慧港口的建设目标及发展模式，即基于物联网、云计算等技术进行港口创新及代际升级。建设范围包括：物联网共享信息平台、整合各生产要素的大数据平台、供应链信息平台等，以创建一个具有思考能力的港口^[6]。

天津港早在 2015 年就以“互联网+”为背景，研究了智慧港口的建设模式，设计了多个智慧港口信息化应用系统。目前天津港已经开启了全球首台无人驾驶电动卡车的试运营，标志着无人驾驶技术在港口作业中的新突破。另有 6 家集装箱码头切换为“操作系统一体化”，实现了码头作业全过程集成化运营；采用人工智能算法，实现合理堆放集装箱，提升货运效率^[7]。深圳港实现了货物的 AI 识别，以及 RFID 技术的使用。上海港实现了移动智能终端的应用，上海港阳山四期成为了全球最大的全自动化集装箱码头。

2.1.2 港口竞争力的研究现状

竞争力是指多个参与者通过角逐或比较而体现出来的综合能力,它是一种相对指标,需要通过竞争才能表现出来。笼统地说竞争力有大有小或强或弱,但真正要准确测量出来却是比较难的。竞争力可以分为可量化的硬性指标(如资源、总量、效能、收益等)和无形的、难以测量的软性指标(如服务能力、管理能力、品牌声誉、质量等)。所有的这些可比较的指标维度,数值越高,则表示竞争力越强。

港口竞争力可以体现在如“市场份额、综合评价得分、核心技术壁垒、价格优势”等方面。其定义是会随着时代的变迁而发生变化的,正如目前港口在经历了前四个代际的发展,正在向着第五代“智慧化”港口进行转型,港口的综合竞争力评价指标中就应该加入智慧化相关的指标。

目前,关于港口竞争力的研究有很多,主要可以分为以“港口运营能力及经济指标”的硬性指标和以“服务能力、绿色低碳、智慧化”的软性指标研究。本人通过查阅文献并归纳总结,分为以下三部分进行文献的详细回顾。

(1) 运营能力与腹地经济

最初,国内外学者对于港口竞争力评价的研究主要集中于港口的硬件设施方面,包括环境位置、港口规模等。如 Hales^[8]和 Ha^[9]等的研究,主要集中于衡量港口的自然环境、地理位置、内陆运输、港口运营和作业能力等因素。而后,学者们在港口的运营能力,如吞吐量,港口作业、物流供应链等方面进行了很多研究, Fan 等^[10]分析了美国港口空间竞争,拥挤以及集装箱进口流量,构建了一种新型网络流量模型用于改善集装箱进口物流过程中的拥堵情况。Asgari 等^[11]研究了港口与航运公司之间合作与竞争的博弈论网络设计方法,并使用新加坡和香港的数据进行了验证。Ishii 等^[12]使用博弈论方法,创建了非合作博弈理论模型,研究了釜山港和神户港之间的竞争。

匡海波等^[13]构建了港口吞吐量、港口作业能力等4个方面的评价指标体系,并建立了基于熵权 TOPSIS 的港口综合竞争力评价模型,识别出影响港口竞争力的主要因素。并对大连港、上海港等7个国内沿海港口进行实证分析,给出提高港口竞争力的对策。吴慧等^[14]研究了沿海港口在客运游轮方面的竞争力,利用云模型评价法,对欧洲的巴塞罗那港、科托尔港与中国的上海港、天津港进行了竞争力评价并得出结论的建议。韩亚娟^[15]研究了港口的运输方式选择,对企业成本及整个供应链的竞争力影响,采用具有独特非线性适应性能力的 BP 神经网络算法,对选取“港口自身条件,综合运输能力,便利化程度,经营管理能力”四个一级评价指标和14个细分指标构成的模型进行验证。

随着研究的深入,学者们把目光放在了港口的竞争力与腹地经济的相互作用上。Deng 等^[16]利用结构方程模型估算了港口与地区经济相关性程度,研究结果表明港口的增值活动对区域经济的发展具有积极的影响。Bottasso 等^[17]以欧洲地区 13 个国家 621 个样本为对象,利用空间面板模型,对与港口活动相关的直接和间接(即溢出)效应进行了估算,研究了港口对地区经济发展的影响。司增绰^[18]利用灰色关联度模型,研究了港口基础设施与港口城市经济互动发展的程度。经实证研究表明:港口基础设施和港口城市经济之间存在着强关联性;港口基础设施建设较快的城市,经济发展也较快;港口经济是带动城市经济发展的纽带和载体。鲁渤等^[19]在港口竞争力模型中同时引入了港口硬件和软件指标,结合面板数据模型分析了国内 9 座港口的综合竞争力与其腹地发展的协同机制。研究表明提升港口综合竞争力应从以基础建设为核心的要素驱动转变为科技创新和服务驱动,通过整合港口与腹地的资源来优化港口竞争力结构,做到港口与腹地相互促进、协同发展。

自“一带一路”发展战略提出以来,对海上丝绸之路相关节点港口的竞争力相关研究也先后出现。徐文静^[20]以一带一路规划中的 14 个沿海城市数据为依据,对其物流竞争力进行因子分析与聚类分析,对不同物流竞争力水平的沿海港口城市,应如何根据自身情况提升物流竞争力给出相关建议。赵旭等^[21]基于 Logistics 和 Lotka-Volterra 模型,使用港口体系演化研究揭示 21 世纪海上丝绸之路沿线港口的发展规律,为丝绸之路所在节点港口如何统筹协调达到效益最大化、提升竞争力提供决策支持。

(2) 绿色、生态竞争力

Cao 等^[22]提出了基于 BIM 建设信息的绿色港口综合建设效果评价模型,运用多参数联合递归分析建模方法构建了绿色港口建设一体化建设效果评价的指标,并对绿色港口建设进行了相关评价和检测。Park 等^[23]使用模糊集方法对韩国 5 个主要港口进行了绿色评价:通过使用因子分析法识别了因素;并利用专家经验,通过模糊方法解决本质上模棱两可的复杂问题;通过对目标海港进行排名并提出评价海港绿色度的方法。

黄晗等^[24]在港口运营能力、基础建设等指标上加入了资源利用、环境友好性等指标,基于 ANP 模型对绿色港口竞争力进行了评价。韩兵^[25]等基于绿色增长理论引出港口供应链绿色运营动力因素概念模型,为港口及其服务供应链企业制定更好的绿色转型发展策略,提供了决策依据。鲁渤^[26]等构建了由政府和企业参与的演化博弈模型,提出了鼓励港口企业加快绿色建设的发展,政府应采取何种机制。

赵楠等^[27]以港口生态位理论为基础,构建出港口生态位资源整合的多目标整

数规划决策模型,再结合港口生态位重叠度理论,建立了港口资源整合模式下的事前选择决策机制。赵宇哲^[28]等从“生态文明、绿色经济”的角度,选择生态港口相关的评价指标并细化,构建了包含准则层、因素层和指标层的生态港口评价指标体系,利用R聚类-变异系数分析,定性与定量相结合地筛选了评价指标,完善了生态港口评价指标体系。

(3) 智能化、自动化竞争力

Heilig等^[29]提出信息化建设可以增强港口运营的可见性、效率、可靠性和安全性,已成为港口竞争力必不可少的组成部分。Botti^[30]根据服务科学理论,研究了智能港口服务系统中供应链的作用,并以意大利萨勒诺港口为例,将供应链重新概念化为智能港口服务系统,为加强供应链在智慧港口中的作用提供理论依据和实践指导。

杨凯等^[3]从智慧港口的特征与内涵角度,对智慧港口评价体系进行了初步建立,包含6大分类,70个细项指标。并阐述了评价体系中对各项指标的评价方法,描述了构建原则。包雄关^[31]指出智慧港口以实现港口在功能、创新和技术上的创新为体现,基于物联网等核心技术,分析了智慧港口的功能以及内涵。并提出以数据平台为核心,对以集疏运和靠离泊体系、码头装卸与堆场仓储作业体系、港口监管服务体系等为内容的智慧港口进行研究。

Chen^[32]认为智慧港口的有效建设,需要以城市信息产业为依托。他基于系统特征、边界及其要素之间的因果关系,构建了智慧港口-城市耦合的系统动力学模型,以深圳为实证研究对象。研究表明,信息技术产业的发展与港口城市息息相关,随着信息技术对港口业务潜力的深入挖掘,港口和物流业将向高附加值趋势转变。杜明军^[6]全面阐述了智慧港口、物联网及物流信息化的相互关系,建立了大连港建设第五代智慧港口发展模式,通过层次分析法和云模型构建了港口物流发展模式的系统模型,并建立了第五代物联网智慧港口发展模式的综合评价指标体系。

综上所述,目前对于港口竞争力的研究很多,但是定性研究较多,定量和实证研究文献相对较少。而且在港口竞争力评价模型中引入智能化指标的少之又少。

2.2 基于偏序的哈斯图、解释结构模型

2.2.1 基于偏序的哈斯图

哈斯图(Hasse)在离散数学中的序理论有着描述,是用来表示有限偏序集的一种数学图表,是一种拓扑图形形式的对偏序集的传递简约。对于偏序集合

(S, \preceq) , 把 S 的每个要素表示为图的顶点, 从某空间拓扑平面 $x \rightarrow y$ 偏序方向上的边, 只要 y 覆盖 x , 即只要 $x < y$ 并且没有 z 使得 $x < z < y$ 。这些弧线可以相互交叉但不能触及任何非其端点的顶点。带有标注的顶点的这种图唯一确定这个集合的偏序。

哈斯图是以德国人 Helmut Hasse 的名字命名的, 根据 Garrett Birkhoff 于 1948 年给出的解释, 人们之所以用哈斯图来称呼这种技术, 是因为 Hasse 有效地使用了它们, 但哈斯本人并不是第一个使用它们的人。根据已有的文献表明 Henri Gustav Vogt 在 1895 年就使用过这种方法, 而当时术语“哈斯图”还可以称呼作为抽象有向无环图 (DAG) 的传递简约, 独立于这个图的任何绘制形式。

哈斯图得以推动和发展, 主要得益于布吕格曼 (Brüggemann) 做出的巨大贡献, 他使用最多的方法叫 Averaged Ranks of Partial Orders (基于偏序的平均层级法, Ranks 在此处翻译成等级、层级), 他发表的诸多哈斯图方法的文章, 大部分都是使用了平均层级。他将此种方法应用于测量农药对环境的危害排序、近岸沉积物测量排序^[33]等方面的研究, 并且不断改进这种方法。除了基于偏序集的哈斯图理论与具体场景运用之外, 他还用 python 制作了能输出哈斯图的软件, 并创作了《partial order in environmental sciences and chemistry》一书, 专门对偏序进行介绍。偏序可定义部分拓扑, 不必要保证所分析的集合内所有对象的相互可比较性。

2013 年李伟^[34]在其博士论文与《基于自组织映射与哈斯图方法的地表水水质评价研究》一文中, 应用自组织结构映射 (Self-Organizing Map, SOM) 与基于偏序的哈斯图方法 (Hasse Diagram Technique, HDT) 对苕河流域的地表水水质进行了研究。他先通过 SOM 神经网络方法对该区域的水质监测数据集进行分类。由 SOM 得到的分类, 再通过 HDT 方法进行建模。并根据最终得出的哈斯图进行了解释与评估。

岳立柱^[35]等提出使用偏序集表示 TOPSIS 模型, 既可以实现对 TOPSIS 模型的排序, 还能提高排序的稳健性, 解决了当权重难以获得时, TOPSIS 模型的应用困难问题。他的外几篇研究也是对布吕格曼的基于偏序集的哈斯图技术进行了多种理论证明, 并给出了具体的计算实例^[36-37]。

上述基于偏序集的哈斯图技术, 探讨的重点主要在 $R = [r]_{m \times n} \rightarrow HS = [r]_{m \times m}$ 即原始 $m \times n$ 的矩阵 (其中 m 代表行, n 代表列), 通过各种方式转化成 $m \times m$ 哈斯矩阵的过程与步骤, 而对于由哈斯矩阵由不同的层级抽取方式得到不同形式的拓扑层级图并未涉及。

2.2.2 解释结构模型

解释结构模型方法（Interpretative Structural Modeling Method，简称ISM法或ISM），是一种运用及其广泛的系统科学方法，源于结构模型法。

ISM先把要分析的系统，梳理拆分成各种子系统（因素），然后分析因素之间的直接可达关系。再将要素及要素之间的关系组成的概念模型，映射成有向图与对应的布尔方阵。通过对布尔矩阵，进行连通域、回路、缩边、层级划分四类布尔逻辑运算。最后在不损失系统整个功能的前提下，揭示系统的结构，并给出最简的、层次化的有向拓扑图。

相较于使用表格、文字、数学公式等方式描述系统，ISM具有极大的优势，因为它是以有向拓扑层级图的方式展示结论，这种展示效果有极强的直观性，通过层级图可以一目了然地了解系统因素的因果层次、阶梯结构。

ISM方法是系统科学里的一种研究方法，是搭建在自然科学与社会科学之间桥梁的一种有效的研究方法。ISM建模需要运用布尔矩阵运算或者是相对复杂的拓扑分析，这种手法属于典型的系统科学的研究方法。但是将具体的结点、有向边释意，这些分析过程都归属于社会科学的范围。

在ISM方法的发展历程上有三个重要的节点。

(1) 1976年在 *Societal Systems: Planning, Policy, and Complexity* 中 John N. Warfield 首次运用ISM技术揭示复杂性的问题。它标志着ISM方法的诞生。

(2) 2003年，黄炜^[38]在《黑客与反黑客思维研究的方法论启示——解释结构模型新探》的硕士论文中详细阐述了六种解释结构模型，并给出了界定与命名。其论文推演的过程先从经典ISM开始，然后根据不同的情况分别界定另外五种模型，具体请见表2-1所示。

表2-1 解释结构模型汇总

方法名	特征描述
经典解释结构模型(ISM)	通过一系列的拓扑运算，最终给出一个最精简层次化有向拓扑图，结果的展示具备极强的直观性。
博弈解释结构模型(GISM)	将博弈的思想融入经典解释结构模型。
阻尼解释结构模型(DISM)	将[0,1]范围的模糊论域推广到[-1,1]的模糊论域。
虚解释结构模型(VISM)	将[-1,1]的模糊论域推广到虚数的模糊论域。
函数解释结构模型(FunISM)	一般化的定义，即是一个通式。

(3) 2011年，Murray Turoff等^[39]第一次提出了交叉影响分析-解释结构模型（CIA-ISM）方法。此方法和博弈解释结构模型、阻尼解释结构模型有相似之处。文中专门强调了场景、情境和具体环境不同时，对应的拓扑层级图会发生变化，而这种变化是博弈导致。该文将负数形式的矩阵通过一系列的转化，转化成

具有对称性的布尔矩阵，从而把复杂问题变成 ISM 的进行处理。这种处理方式与黄炜界定的 DISM 方法基本一致。

朱琳^[40]等针对解释结构模型方法在计算多层次递阶结构时可能会出现错层现象，提出了一种简便方法“ISM-阵上作业法”，并根据实例证明了该方法的正确性和有效性。

解释结构模型方法根据可达集合的要素进行抽取以生成有向拓扑层级图时，最常用的层级划分方式为结果优先抽取方法，该方法广泛应用于各领域的结构分析，如刘骏^[41]等使用此抽取方法对数字鸿沟主要影响因素的关系结构进行分析。除此之外还有“原因优先规则抽取方法、结果-原因轮流坐庄式抽取规则、原因-结果轮流坐庄式抽取规则”三种抽取方法可以进行有向拓扑层级图的绘制。

2.3 TOPSIS与GAN

2.3.1 逼近理想解排序法

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 是逼近理想点排序方法，该方法于 1981 年由 C. L. Hwang 和 K. Yoon 首次提出。是对 m 个评价对象（或方案、样本）与理想解的接近程度进行排序的一种方法，可以评估现有对象之间的相对优势和劣势。理想解 (Ideal Solution) 包含正向理想解（或称最优目标），和负向理想解（或称最劣目标）。通过该方法评价出的最佳对象应最接近最佳目标，而距最差目标则最远。

TOPSIS 法是有限方案多目标决策的综合评价法之一。该方法对原始数据进行同趋势和归一化的无量纲化处理后，消除了不同评测维度指标量纲的影响。它能充分利用原始客观数据的信息，所以更能反映各评价对象（样本，方案，要素）之间的差异、客观真实的反映实际情况。明显提高了多目标决策分析的准确性、科学性和可操作性，且其对原始数据除了真实以外，并无其它特殊要求，故自从 TOPSIS 问世以来，其应用迅速在多个领域使用。

匡海波等^[13]基于熵权 TOPSIS 方法构建了港口综合竞争力评价模型，并识别出影响港口竞争力的主要因素。并对中国 7 个沿海港口进行实证分析。

王先甲等^[42]运用马氏距离改进传统 TOPSIS 的距离计算，消除了变量间的相关性，并具有不受量纲影响的优点，并将此方法用于供应商的选择。

张芳兰等^[43]基于模糊 TOPSIS 方法，应用于解决汽车形态方案选择的复杂性与主观性问题，通过对 4 款宝马汽车形态方案的评价，论证了方法的可行性，并确立了最优形态方案。

武春友等^[44]结合 TOPSIS 与灰色关联理论, 构建了区域绿色增长系统的评价模型, 并对中国 2001 至 2012 年的绿色增长水平进行了实证分析。

孟斌等^[45]以交通运输行业为研究对象, 构建了包含 6 个一级分类、12 个二级分类、39 个指标的企业社会责任评价体系, 通过模糊 TOPSIS 法对指标赋权并构建其绩效评价模型。

TOPSIS 方法中计算距离的公式, 最常用的有欧几里得距离和曼哈顿距离, 欧式距离的公式为:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^d |P_i - Q_i|^2} \quad (2-1)$$

曼哈顿距离的计算公式为:

$$d = \sum_{i=1}^d |P_i - Q_i| \quad (2-2)$$

1998年, 前南斯拉夫教授奥普里科维奇在其论文中提出了多属性妥协解排序法 (VIKOR), 这是基于折衷优化思想而提出的一种排序方法, 他对该方法的扩展研究表明, 相对于其他多属性决策方法, 具有兼顾群体效用最大化与个体遗憾最小化的优点, 并融入了决策者的主观偏好, 有助于保证决策结果的合理性, 弥补了TOPSIS方法没有考虑到备选方案距理想方案距离与负理想方案距离之间的相对重要性^[46-47]。

目前已有多位学者对VIKOR方法进行扩展研究, 将研究应用于区间数、三角模糊数、不确定语言等各种形式的评价信息环境^[48-51]。袁宇等^[52]从理论、数值实验与敏感性分析三个维度与TOPSIS方法进行比较, 表明了所提出的基于混合信息的VIKOR方法在供应商选择决策过程中的特点和优势。

TOPSIS 方法是多目标决策分析中一种常用的有效方法, 是为解决单个决策者的多属性决策问题所提出来的一种接近于线性加权平均方法的排序法, 其基本思想是: 最终方案尽可能接近正理想解, 且尽可能远离负理想解。该方法易于理解, 计算相对简单, 能够用简单的算术形式来描述备选方案的极小值, 而且在比较过程中也可以使用客观权重。

TOPSIS 方法与 VIKOR 方法都蕴含着博弈论的思想。

2.3.2 生成对抗网络

基于博弈思想的最具有革命性的模型无疑是生成对抗网络 (Generative Adversarial Networks, 简称 GAN), 该方法由伊恩·古德费洛等^[53]于 2014 年提

出。它是一种深度学习模型，通过让两个神经网络相互博弈的方式进行学习，是近年来非监督学习领域，最具前景的方法之一。自此之后，“对抗”的概念开始贯穿于机器学习领域。

2016年，GAN 热潮席卷 AI 领域顶级会议，从 ICLR 到 NIPS，大量高质量的论文被发表和探讨。被称为“卷积网络之父”的法国裔美国计算机科学家 Yann LeCun 曾评价 GAN 是“20 年来机器学习领域最酷的想法”。

2016年3月，谷歌基于人工智能深度学习算法研发的阿尔法围棋(AlphaGo)机器人一举击败了世界围棋冠军，在全球范围内掀起了 AI 热潮。它是通过两个不同神经网络“大脑”合作来改进下棋。AlphaGo 算法中的原理属于 GAN 的改进型多层神经网络。

生成对抗网络基于博弈模型，由生成器(Generator)和判别器(Discriminator)组成。其中生成模型必须与其对手的判别模型竞争，生成对抗网。生成模型尝试了解真实数据样本的特征分布，并生成新的数据样本。判别模型是一个二分类器，判别输入的是真实数据还是生成的样本。

生成模型和判别模型均可以使用感知机或者深度学习模型。优化过程是最大最小值博弈问题 (Minimax Game)，其优化目标是达到纳什均衡^[54]，即直到判别模型无法识别生成模型生成的假样本是真是假为止。

近 5 年来涌现了大量对 GAN 方法改进，主要的改进模型请见表 2-2。

生成对抗网络在许多领域中有着极广的运用。

(1) 图像处理。

图像处理是 GAN 运用最广的地方。如通过 GAN 来生成全新图像，其在真实度和准确度上甚至超过了人工作业。在真实工作场景中，为黑白图像上色、通过低清晰度的图片获得高清版本、复原受损图片等都可以运用它来解决。此外还可以用 GAN 生成视频。未来如果这个技术成真，电影拍摄的成本可以大大降低。

(2) 声音处理语音合成。

GAN 可以在合成和恢复语音素材中提供重大助力。例如，用 AI 合成语音、模仿一个人的语速、语气和语言心理等。

(3) 文字生成

如写稿机器人可以通过 GAN 来解决。

(4) 信息破译与信息安全

既然生成对抗网络的目的是使某物不断趋近真实，那么产生出真实的笔记、密码习惯，甚至生物密码也都是可能的。

表 2-2 GAN 的改进方法

方法名	特征描述
条件生成式对抗网络 (CGAN) [55]	对原始 GAN 的扩展,生成器和判别器都增加额外信息 y 为条件 (y 可以是任意信息,例如类别信息,或者其他模态的数据)。
深度卷积生成式对抗网络 (DCGAN) [56]	是卷积神经网络 (CNN) 与 GAN 的一种结合。其将卷积网络引入到生成式模型当中进行无监督的训练,利用卷积网络强大的特征提取能力来提高生成网络的学习效果。并对卷积神经网络的结构做了一些改变,以提高样本的质量和收敛的速度。
Wasserstein 生成式对抗网络 (WGAN) [57]	从损失函数的角度对 GAN 做了改进,使其在损失函数改进之后,在全链接层上也能得到很好的表现结果。其相比于原始的 GAN 优势在于:指示了 GAN 的训练过程,解决了生成样本的多样性的问题,且不需要重新设计新的网络结构。
最小二乘生成式对抗网络 (LSGAN)	这篇文章针对标准 GAN 生成的图片质量不高以及训练过程不稳定这两个缺陷进行改进。改进方法就是将 GAN 的目标函数,由交叉熵损失换成最小二乘损失。
边界平衡生成式对抗网络 (BEGAN)	将一个自编码器作为分类器,通过基于 Wasserstein 距离的损失来匹配自编码器的损失分布。采用神经网络结构,训练中添加额外的均衡过程来平衡生成器与分类器。该方法简单、强大,只使用标准的训练方式,不加训练技巧也能很快且稳定的收敛。

2.4 本章小结

本章通过对相关文献的梳理和总结,为本文的研究内容提供了重要思路,也为研究方法奠定了相关理论基础。

(1) 首先通过梳理港口的代际发展,引出智慧港口的概念和研究现状,分析国内外学者对于港口竞争力的研究现状、不足与趋势。得出结论,智慧港口是未来全球港口发展的主要趋势,提升港口的智能化相关竞争力是各大港口与时俱进的必然选择。本研究加入了智慧化相关指标构建港口评价模型,具有一定的研究价值。

(2) 其次, 通过对偏序和哈斯图的文献研究, 发现基于偏序的哈斯图相当于解释结构模型方法 (ISM) 的一个子集。其重要步骤概括为, 先由偏序规则获得关系矩阵, 再由关系矩阵获得哈斯矩阵, 最后由哈斯矩阵绘制拓扑图。其中关系矩阵相当于 ISM 中的原始矩阵, 且不包含回路; 哈斯矩阵相当于 ISM 中的骨架矩阵; 绘制哈斯图相当于经典 ISM 绘制最终有向拓扑层级图。

(3) 逼近与博弈的思想本质。

GAN 的理论基础来源于博弈论, TOPSIS 和 VIKOR 以及这两种方法的众多改进方式, 都是基于正负理想点距离 (相似度) 的距离公式, 而作为正负理想点的本质假设并没有做根本的改变。正负理想点即蕴含博弈对抗的本质。本文采用的两对 (四种) 对抗形式的有向拓扑层级图组, 以直观的形式展示其逼近过程, 而这种逼近得到的最后结果正是由博弈而形成的。

综上所述, 本研究选定使用基于对抗解释结构模型方法对国内 8 个沿海智慧港口的竞争力进行研究和分析。

第3章 对抗解释结构模型方法

对抗解释结构模型方法（Adversarial Interpretive Structure Modeling Method，简称 AISM），是对经典解释结构模型的改进，融入了对抗（Adversarial）的思想。通过对正负理想点的距离测度，在不同维度生成博弈对抗矩阵对，并抽取出对抗的 ISM 有向拓扑层级图。通过不断的逼近，最终得出样本（方案，对象）的排序。

3.1 对抗解释结构模型流程图

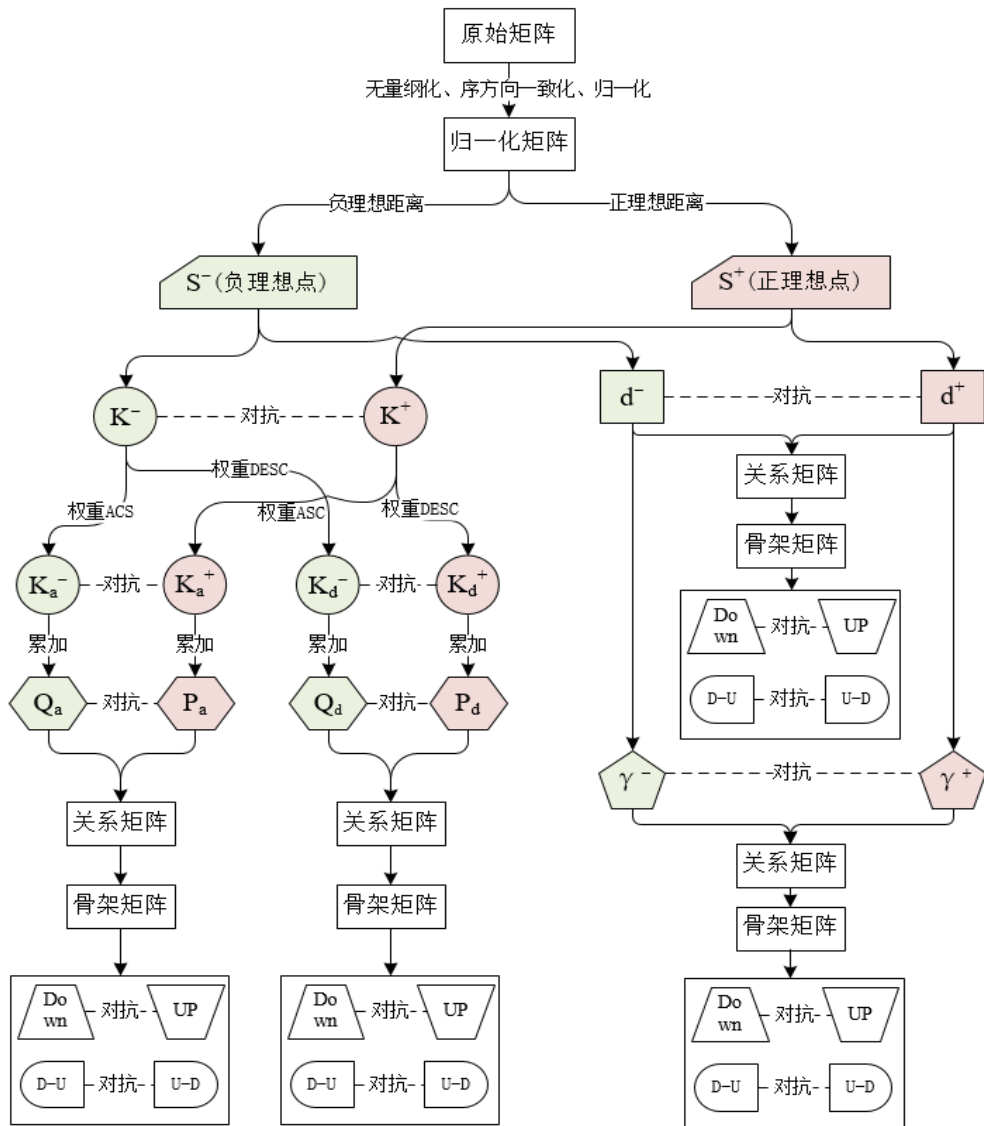


图 3-1 对抗解释结构模型（AISM）流程图

这种框架结合多种模型，以多组对抗形式的有向拓扑层级图的形式不断的逼近最终排序结果。AISM 是一个扩充性强，能兼容诸如各种改进的 TOPSIS,VIKOR, AHP,ANP 等方法，最终是以有向拓扑层级图的形式展现结果，其表现力高，是一个非常具有吸引力的决策支持工具。它不预设原始数据间是否有线性关系，也不假定数据的概率分布特征，对原始数据无特殊的要求，是一种鲁棒性较佳的决策方法。

3.2 归一化矩阵与正负理想点

3.2.1 由原始数据得到归一化矩阵

(1) 原始数据的特征

原始数据以矩阵形式呈现，记作 $O = [o]_{m \times n}$ ，其中 m 代表行， n 代表列，即一个 m 行 n 列的矩阵，见表 3-1。

表 3-1 原始矩阵

$O_{m \times n}$	1	2	...	n-1	n
1	o_{11}	o_{12}	...	$o_{1(n-1)}$	o_{1n}
2	o_{21}	o_{22}	...	$o_{2(n-1)}$	o_{2n}
3	o_{31}	o_{32}	...	$o_{3(n-1)}$	o_{3n}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
m	o_{m1}	o_{m2}	...	$o_{m(n-1)}$	o_{mn}

其中的每一列具有同一属性、同一的量纲。如果某列为非数值型的属性，则需要转化成数值型的数据进行处理。

如描述性的属性，即非正规（Non-normal）模糊数，又称为一般性模糊数（Generalized Fuzzy Numbers）可转化成五分制、十分制、百分制或者特定的数值。该数值可以通过特定的模糊运算进行转化。

每一列的数值的大小同价值取向的好坏、优劣主要有如下三大类：

- ① 正向指标：数值越大越好，数值越小越差。
- ② 负向指标：数值越大越差，数值越小越好。
- ③ 振荡区间类：数值距离某区段越小越好，距离某区段越大越差。

(2) 归一化矩阵的特征

归一化矩阵记作 $N = [n]_{m \times n}$ 其中 m 代表行， n 代表列。对于矩阵中的任意值 $n_{ij} \in [0,1]$ 。

矩阵 N 中每一列是通过无量纲化而来。无量纲化 (dimensionless) 是指通过一个合适的变量替代, 将一个涉及物理量的方程的部分或全部的单位移除, 以求简化实验或者计算的目的, 是科学研究中一种重要的处理思想。

无量纲化方法选择的标准:

① 客观性。无量纲化所选择的转化公式要能够客观地反映指标实际值与指标评价之间的对应关系。要做到客观性原则, 需要评价专家对被评价对象的历史信息做出深入彻底的分析 and 比较, 找出事物发展变化的转折点, 才能够确定合适的无量纲化方法。

② 可行性。即所选择的无量纲化方法要确保转化的可行性各种方法各有特点, 各有千秋, 应用时应当加以注意。

③ 可操作性。即要确保所选方法具有简便易用的特点, 并不是所有的非线性无量纲化方法都比线性无量纲化方法更加精确。评价不是绝对的度量, 在不影响被评价对象在评价中的影响程度的前提下, 可以使用更为简便的线性无量纲化方法代替曲线关系。

(3) 原始数据到归一化矩阵的常用方法

$$O \xrightarrow{\text{无量纲化}} O' \dots O'' \xrightarrow{\text{归一化}} N$$

由上可知, 原始数据通过一系列的无量纲化处理, 再经过归一化得到归一化矩阵 N 。矩阵 N 具有如下两个重要特征。

① 每列的序方向一致。即原来的三种指标都转化成正向指标方向、或者负向指标方向。

② 最后一步的归一化方法一致, 用以保证 N 在测度的一致性。

常用的归一化方法为极差法, 其实质就是采用闵可夫斯基距离测度家族中的曼哈顿距离。

极差法归一化公式如下:

正向指标:

$$n_{ij} = \frac{o_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})} \quad (3-1)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

负向指标:

$$n_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - o_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})} \quad (3-2)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

利用欧式距离测度进行计算，可选择如下公式：

正向指标：

$$n_{ij} = \frac{o_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n o_{ij}^2}} \quad (3-3)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

负向指标：

$$n_{ij} = 1 - \frac{o_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n o_{ij}^2}} \quad (3-4)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

3.2.2 正负理想点

正负理想点分别为集合，其值分别对应归一化矩阵中列的最大值与最小值。

正理想点记作 S^+ ；负理想点记作 S^- 。

$$S^+ = (z_1^+, z_2^+, z_3^+, \dots, z_n^+) \text{ 有: } z_j^+ = \max(n_{ij}), n_{ij} \in N, 0 \leq i \leq m$$

$$S^- = (z_1^-, z_2^-, z_3^-, \dots, z_n^-) \text{ 有: } z_j^- = \min(n_{ij}), n_{ij} \in N, 0 \leq i \leq m$$

正负理想点也可以看成为只有一行的矩阵，记作： $S^+ = [z^+]_{1 \times n}$ ， $S^- = [z^-]_{1 \times n}$ 。

3.3 基于指标的对抗哈斯矩阵求解

(1) 基于距离（相似度）测度的对抗矩阵对 K^+ 、 K^-

对抗矩阵对： $K^+ = [k^+]_{m \times n}$ 、 $K^- = [k^-]_{m \times n}$ 是性质相反的一对矩阵。这对矩阵来自于归一化矩阵 N 与正负理想点距离。即：

$$k_{ij}^+ = f(n_{ij}, z_j^+) , \quad k_{ij}^- = f(n_{ij}, z_j^-)。$$

表 3-2 K^+ 矩阵

$K_{m \times n}^+$	1	2	...	n-1	n
1	$f(n_{11}, z_1^+)$	$f(n_{12}, z_2^+)$	...	$f(n_{1(n-1)}, z_{n-1}^+)$	$f(n_{1n}, z_n^+)$
2	$f(n_{21}, z_1^+)$	$f(n_{22}, z_2^+)$	...	$f(n_{2(n-1)}, z_{n-1}^+)$	$f(n_{2n}, z_n^+)$
3	$f(n_{31}, z_1^+)$	$f(n_{32}, z_2^+)$	...	$f(n_{3(n-1)}, z_{n-1}^+)$	$f(n_{3n}, z_n^+)$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
m	$f(n_{m1}, z_1^+)$	$f(n_{m2}, z_2^+)$	...	$f(n_{m(n-1)}, z_{n-1}^+)$	$f(n_{mn}, z_n^+)$

表 3-3 K⁻矩阵

$K_{m \times n}^-$	1	2	...	n-1	n
1	$f(n_{11}, z_1^-)$	$f(n_{12}, z_2^-)$	...	$f(n_{1(n-1)}, z_{n-1}^-)$	$f(n_{1n}, z_n^-)$
2	$f(n_{21}, z_1^-)$	$f(n_{22}, z_2^-)$	...	$f(n_{2(n-1)}, z_{n-1}^-)$	$f(n_{2n}, z_n^-)$
3	$f(n_{31}, z_1^-)$	$f(n_{32}, z_2^-)$	...	$f(n_{3(n-1)}, z_{n-1}^-)$	$f(n_{3n}, z_n^-)$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
m	$f(n_{m1}, z_1^-)$	$f(n_{m2}, z_2^-)$	...	$f(n_{m(n-1)}, z_{n-1}^-)$	$f(n_{mn}, z_n^-)$

(2) 基于权重的升序、降序得到两组对抗矩阵对

由 K^+ ， K^- 根据属性列的权重大小升序与降序的顺序可以得到两组四个矩阵。由 K^+ 得到的分别记作 K_a^+ 、 K_d^+ ；由 K^- 得到的分别记作 K_a^- 、 K_d^- 。

① 权重的计算

对抗矩阵对： $K^+ = [k^+]_{m \times n}$ ， $K^- = [k^-]_{m \times n}$ 中的每一列可看成样本（方案，评价对象）的一个属性。每个属性的权重的获得与采用的具体方法有关。

目前已有的方法可以分为主观赋权法、客观赋权法和两者结合的方法。运用最广的主观方法为 AHP/ANP 法，客观方法为变异系数法和熵权法等。

其中 ANP 法是在 AHP 法的基础上发展而来，AHP 是 ANP 法的特例。ANP 法中的权重的计算可以通过（Super Decisions, SD）软件来计算。即通过极限超矩阵，可以求出各分量的权重。

变异系数是衡量评价对象的各指标变异程度的统计量，又称为标准差率。当评价指标对于评价目标而言比较模糊时，适用使用变异系数法求取权重，是常用的权重计算方法。其计算公式为：

首先计算第 j 项指标的变异系数：

$$(COV)_j = \frac{\delta_j}{\bar{x}_j} \tag{3-5}$$

其中 δ_j 为第 j 项的标准差， \bar{x}_j 为第 j 项的平均值。

然后计算第 j 项指标的权重：

$$\omega_j = \frac{(COV)_j}{\sum_{j=1}^n (COV)_j} \tag{3-6}$$

熵权法是依据信息论基本原理发展而来。若某个指标的信息熵越小，表明其变异程度越大，该指标提供的信息量越大，在综合评价中起的作用也越大，权重就越大。缺点是对于异常数据过于敏感。其计算公式为：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^d \rho_{ij} * \ln(\rho_{ij}) \tag{3-7}$$

其中 k 为大于 0 的系数, $0 < \rho_{ij} < 1$ 且 $\sum_{i=1}^d \rho_j = 1$ 。

② $K_a^+, K_a^-, K_d^+, K_d^-$ 的意义

对于由 K^+, K^- 其每一列的顺序是可以变换的。即对于 n 列的矩阵, 通过排列组合, 最多有 $n!$ 种情况。

在 $n!$ 种情况中存在两个极值状态。即每个维度按照权重大小的升序 (ASC) 进行排列; 与按照权重大小的降序 (DESC) 进行排列。

因此得到的矩阵组 $\{K_a^+, K_a^-\}$ 与 $\{K_d^+, K_d^-\}$ 构成了一组对抗。

(3) 得到线性累加矩阵

《蕴含权重的偏序集多准则决策法》一文对线性累加矩阵的性质进行了证明与概要的说明。该文采用的是权重按照从大到小的即 DESC 的方向进行累加。得到的累加矩阵相较于原矩阵具有保序性。

实际上, 按照任意排列情况, 进行线性累加得到的累加矩阵都具有保序性。其保序性的根源在于, 原矩阵的第一列与累加矩阵的第一列相等。由自反性、对称性、传递性可以得出证明。

矩阵 $K_d^+ = [k_d^+]_{m \times n}$ 通过分量的线性累加得到的矩阵 $P_d = [p_d]_{m \times n}$, 见下表 3-4。

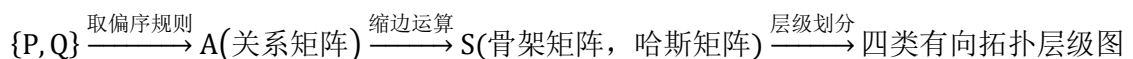
对于 P_d, P_a 两矩阵的最后一列相同; 对于 Q_d, Q_a 两矩阵的最后一列相同。

表 3-4 累加矩阵 P_d

$[P_d]_{m \times n}$	1	2	...	n-1	n
1	$[k_d^+]_{11}$	$\sum_{j=1}^2 [k_d^+]_{1j}$	...	$\sum_{j=1}^{n-1} [k_d^+]_{1j}$	$\sum_{j=1}^n [k_d^+]_{1j}$
2	$[k_d^+]_{21}$	$\sum_{j=1}^2 [k_d^+]_{2j}$	...	$\sum_{j=1}^{n-1} [k_d^+]_{2j}$	$\sum_{j=1}^n [k_d^+]_{2j}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
m	$[k_d^+]_{m1}$	$\sum_{j=1}^2 [k_d^+]_{mj}$	...	$\sum_{j=1}^{n-1} [k_d^+]_{mj}$	$\sum_{j=1}^n [k_d^+]_{mj}$

3.4 基于偏序的拓扑层级图的计算过程

由哈斯矩阵得到拓扑图的求解过程, 步骤见以下流程图:



3.4.1 P, Q 矩阵的偏序规则

偏序的核心规则为对称性:

在 $\{P, Q\}$ 矩阵对中任意两行 (样本、方案、评审对象、要素) x, y , 对于 P 矩阵有 $p_{x1} \geq p_{y1}$ 且 $p_{x2} \geq p_{y2}, \dots$ 且 $p_{xn} \geq p_{yn}$, 同时对于 Q 矩阵有 $q_{x1} \leq q_{y1}$ 且 $q_{x2} \leq q_{y2}, \dots$ 且 $q_{xn} \leq q_{yn}$, 记作: $PS_{(x \rightarrow y)}$

关系矩阵 A , 记作 $[a]_{m \times m}$

$$a_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{当 } PS_{(x \rightarrow y)} \\ 0 & \end{cases} \quad \text{或} \quad a_{xy} = \begin{cases} 0, & \text{当 } PS_{(x \rightarrow y)} \\ 1 & \end{cases} \quad (3-8)$$

上述两式只能取一种方式。

3.4.2 关系矩阵到骨架矩阵的简便运算

关系矩阵 A , 即为可达矩阵。

对于任意的布尔方阵即关系矩阵 A , 其可达矩阵的计算方法如下:

$$B = A + I \quad (3-9)$$

其中 B 为相乘矩阵, I 为单位矩阵, 即只有对角线为 1 的布尔方阵。对 B 进行连乘:

$$B^{k-1} \neq B^k = B^{k+1} = R \quad (3-10)$$

其中 R 称之为可达矩阵, 容易证得 $A=R$ 。

由于该关系不存在回路, 其骨架矩阵的求法如下:

$$S = HS = R - (R - I)^2 - I \quad (3-11)$$

其中 A 为原始矩阵, I 为单位矩阵, B 为相乘矩阵, R 为可达矩阵, S 为骨架矩阵, HS 为哈斯矩阵。

3.4.3 有向拓扑层级图的计算与绘制

对于布尔方阵, 有可达集合 R , 先行集合 Q , 共同集合 T , 其中 $T = R \cap Q$, 以关系矩阵 A 为例, 其要素 e_1 。

e_1 的可达集合记作 $R(e_1)$, 即要素对应行值为 1 的所有要素。

e_1 的先行集合记作 $Q(e_1)$, 即要素对应列值为 1 的所有要素。

e_1 的共同集合记作 $T(e_1)$, 即 $R(e_1) \cap Q(e_1)$ 。

有向拓扑层级图有四种方式, 即流程图中所描述:

(1) UP 型。

UP 型层级图，即结果优先的层级划分，其抽取规则为： $T(e_i) = R(e_i)$ 。

对于无回路的 DAG 图，可以用矩阵 $S + I$ 进行操作，即骨架矩阵中主对角线全部填充 1 重复可达集与共同集相同就抽取要素的方式进行。

每次抽取出来的要素放置在上方，由上往下的方式放置抽取出的要素。

(2) DOWN 型。

DOWN 型层级图，即原因优先的层级划分，其抽取规则为： $T(e_i) = Q(e_i)$ 。

每次抽取出来的要素放置在下方，由下往上的方式放置抽取出的要素。

(3) U-D 型。

U-D 型层级图，层级抽取规则为：先 $T(e_i) = R(e_i)$ ，后 $T(e_i) = Q(e_i)$ 。

每次把按照 $T(e_i) = R(e_i)$ 抽取出来的要素放置在上方，然后把按照规则 $T(e_i) = Q(e_i)$ 抽取出的要素放置在下方，依次轮流放置取出的要素。

(4) D-U 型。

D-U 型层级图，层级抽取规则为：先 $T(e_i) = Q(e_i)$ ，后 $T(e_i) = R(e_i)$ 。

每次把按照 $T(e_i) = R(e_i)$ 抽取出来的要素放置在上方，然后把按照规则 $T(e_i) = Q(e_i)$ 抽取出的要素放置在下方，依次轮流放置取出的要素。

上述四种层级抽取方式为紧凑方式，即上述四种方式的获得的有向拓扑层级图的层级总数最少。其中 UP 型与 DOWN 型属于一组对立型的画法，U-D 型与 D-U 型为一组对立型画法。当 UP 型与 DOWN 型所得结果一致，则该结构称为刚性结构。

活动要素，是指在四种有向拓扑层级图中，某个要素可以处于不同的层级，则这些要素称为活动要素。

可拓变系统，也叫活动系统或拓扑活动系统，指的是最后得到的一般性骨架矩阵中含有活动要素的系统。刚性系统，也叫拓扑刚性系统，指不含活动要素的系统。

在刚性系统中存在着一类完全刚性系统。完全刚性系统具有如下三个特性：其一，关系矩阵中的要素从小到大排序后形成上三角矩阵的满阵形式，即对角线右上方全为 1，对角线左下方全为 0；同理，关系矩阵中的要素从大到小排列后，则形成下三角矩阵的满阵形式。其二，四种有向拓扑层级图的结果是一致的，展现为直链型；其三，任意两个方案（样本，要素，评价对象）之间都有确定的比较关系（优劣，好坏，可达，大小）。

3.5 基于正负理想点的距离与贴近度

d^+ 是由归一化矩阵，根据采用的相应的距离（相似度）公式求出的某一方案（样

本, 要素, 评价对象) 与正理想点的距离。通常认为离正理想点的距离越远, 该方案(样本, 要素, 评价对象) 越劣。

d^- 是由归一化矩阵, 根据采用的相应的距离(相似度)公式求出的某一方案(样本, 要素, 评价对象) 与负理想点的距离。通常认为离负理想点的距离越远, 该方案(样本, 要素, 评价对象) 越优。

γ^+ , γ^- 是由 d^+ , d^- 所采用的贴近度计算方法得到。 γ^- 表示与正理想点的贴近程度; γ^+ 表示与负理想点的贴近程度。

不同的方法采用的计算方式不同。

3.6 本章小结

本章首先介绍了融入对抗思想的 AISM 方法的流程图, 然后详细介绍了每一步求解过程: 先根据原始矩阵得出归一化矩阵, 根据归一化矩阵算出正负理想点集合。而后基于各指标距离的对抗矩阵对 K^+ 、 K^- , 通过对权重的排序和累加逐步计算得出哈斯矩阵, 并得出 4 种直观可视化的有向拓扑层级图。再逼近到样本相当理想点距离 d^+ 、 d^- 求出哈斯矩阵并得出 4 种有向拓扑层级图, 最后逼近到方案贴近度 γ^+ , γ^- 得出 4 种有向拓扑层级图, 即最终的竞争力排序结果。

第4章 沿海智慧港口竞争力评价设计

4.1 沿海智慧港口竞争力评价指标体系的构建

本研究在阅读了国内外学者对于港口竞争力分析文献基础上,结合中国对于智慧港口发展的现状与趋势,依据科学、规范的评价指标构建原则,从42项指标中归纳和调研,最终确定了6类、19项指标作为智慧港口综合竞争力的评价的指标依据。

4.1.1 评价指标体系的构建原则

为了使评价指标体系科学、合理、规范,智慧港口评价指标体系的构建应遵循综合性原则、典型性原则、可比性原则及可操作性原则。

(1) 综合性原则。选取的评价指标应全面、完整地评价智慧化港口的发展水平与建设成果。不仅要从港口自身的运营能力、物流能力、财务指标等方面出发,也考虑港口的软性指标,如服务能力、为社会责任、智能化程度等。

(2) 典型性原则。选取的评价指标应从多个方面,选取具有典型性、代表性的指标进行考评,确保其具有一定程度的代表性。能尽量准确地反映出港口在智慧化发展过程中的综合特征,且设定的评价指标应符合中国当前港口发展的整体趋势和现状。

(3) 可比性原则。选取的评价指标首先应当真实可靠,可遵循一定的统计方法统计出数据。不同港口之间可通过对评价指标的计算结果,对智慧港口的发展程度进行比较和排序,并划分出相应的等级。

(4) 可操作性原则。选取评价指标时,尽可能选择可量化的、定义明确的评价项。对同一指标的计量单位和计算方法必须一致,应由专业人员测试、计算、统计。因评级指标值无法得到准确的数值,而由专家进行打分时,需要其具有的权威性和可操作性。

4.1.2 沿海智慧港口竞争力评价指标的确定

目前学术界对于智慧港口的评价尚未形成可量化的评价体系,但是对于前四代港口的指标已有了较为全面、科学的评价体系,如港口的自然地理环境、生产营运规模、物流与供应链能力、经营能力以及和腹地经济的相互作用、服务能力

相关指标、绿色低碳可持续等指标等。本文在结合这些指标的基础上，加入了信息化、智能化相关指标，以顺应港口行业整体的发展趋势，并探索第五代智慧港口的竞争力评价体系。

为了体现港口竞争力的市场份额，选取了吞吐量及其排名、客运量和航线数指标；为了体现港口的自然区位竞争力壁垒，选取了万吨泊位数、码头长度等指标；为了体现港口的管理能力竞争力优势，选取了营业收入、单位吞吐量设备成本、创造就业数指标；为了体现港口的成长性，选取了吞吐量增长率、腹地年人均 GDP 增长率和研发收入比指标；为了体现服务评分与价格优势，分别选取了作业效率评价和装卸费降价幅度指标；为了体现可持续发展与绿色低碳能力，选取了固体废弃物综合利用率和单位 GDP 废气排放指标；为体现技术先进性，选取了信息化水平与智能化水平指标。

表 4-1 智慧港口竞争力评价指标

类别	代码	评价项	计量单位	指标属性
生产运营规模	P1	货物吞吐量 ^[13, 15, 18, 19]	亿吨	+
	P2	吞吐量增长率 ^[13]	%	+
	P3	集装箱吞吐量 ^[13, 19]	万标箱 (TEU)	+
	P4	客运量 ^[14]	万人次	+
物流能力	T1	货运航线数 ^[13, 15, 19]	条	+
	T2	万吨泊位数 ^[13, 18, 19, 28]	个	+
	T3	码头长度 ^[18, 28]	千米	+
经营能力	F1	营业收入 ^[13, 15]	亿元	+
	F2	单位吞吐量设备成本	元/吨	-
	F3	腹地年人均 GDP 增长率 ^[20, 28]	%	+
	F4	创造就业人数 ^[18]	万	+
	F5	研发收入比 ^[13]	%	+
服务能力	S1	集装箱吞吐量世界排名 ^[13, 19]	/	-
	S2	作业效率评价 ^[15]	分	+
	S3	装卸费降价幅度 ^[15]	%	+
绿色低碳	C1	固体废弃物综合利用率 ^[28]	%	+
	C2	单位 GDP 废气排放 ^[24]	吨/亿元	-
智慧化建设	A1	信息化水平	分	+
	A2	智能化水平	分	+

注：指标属性包含正向指标和负向指标，正向指标的值越大，评价结果越好，负向相反。

通过对各文献中港口竞争力指标的分析、比较和筛选,本文形成了以生产营运规模、物流能力、经营能力为主的港口综合硬实力指标,和以服务能力、绿色低碳、智慧化建设为主的港口综合软实力指标,详细指标请见表4-1。

(1) 生产营运规模

P1 货物吞吐量。是代表一个港口生产能力大小的重要指标,是港口行业的重要统计指标,货物吞吐量越大,就说明港口承运货物能力越强。按物流流向分为出口吞吐量和进口吞吐量;按照货物交流性质分为国内贸易吞吐量和外贸货物吞吐量。它也是衡量港口所在腹地,城市建设及发展的可量化参考依据。

P2 吞吐量增长率。比上年吞吐量的增长速度,可以反映港口发展速度。加入该指标,减少了由于不同规模港口之间,由于规模差距带来的对竞争力分析的影响。

P3 集装箱吞吐量。集装箱运输相对于散装,有便于机械化装卸、减少船只停泊时间、降低运输费用、增加运输量等优势。区别于港口吞吐量,集装箱吞吐量的计量单位通常以标准箱(TEU)为准,是指一段时间内港口集装箱的进出口总额,一般可以用来计量港口所在城市国际贸易市场需求量的大小,也是国内外客户在运输市场中选择港口的一个重要影响条件。

P4 客运量。客运业务也是港口主营业务的一项重要组成部分,客运量的多少,不但反映了港口的承运能力和服务能力,也反映了其所在区域的经济活力。

(2) 物流能力

T1 货运航线数。港口的航线数决定了与货运量的多少,航线多则说明与港口进行贸易往来的船舶数量也多,进而影响着港口的生产营运能力。

T2 万吨泊位数。指可以停泊万吨级以上船舶的泊位数量,并能够对其提供装卸服务,是反映港口规模和承运能力的一个重要指标,也是贸易伙伴选择合作港口的一个重要依据。

T3 码头长度。码头长度决定了可停靠的船舶数量,是港口规模的重要指标,说明了可同时停靠码头作业的船舶数量。同时一定程度上决定了港口的泊位数量。

(3) 经营能力

F1 营业收入。是指港口从事的主营业务或其他业务所取得的收入。是一家企业的主要经营成果、获得利润的重要保障。是港口企业运作、发展、扩大再生产的重要经济来源。

F2 单位吞吐量设备成本。指港口每装卸1吨货物时设备运行所消耗的成本,是港口在进行生产服务时所付出的运行成本。可作为对港口能源使用量的评价,也是港口的一项重要竞争力的体现。

F3 腹地年人均GDP增长率。反映了港口所在地区的经济发展水平,区域的

经济发展与港口经济之间相互积极作用,港口的发展可以为地区创造直接或间接就业岗位,地区的发展可以反过来带动港口的业务需求。故此,腹地人均 GDP 的增长可作为港口综合竞争力的一项评价指标。

F4 创造就业人数。此处选用港口创造的直接就业人数,即港口企业的全部员工数量。这既是港口创造利润以及为客户提供服务的基本保证,又是港口作为地区重要产业所承担的社会责任。

F5 研发收入比。研发费用与营业收入的比值。研发费用指港口企业为提高生产技术或生产效率,提升科技创新能力和综合竞争力,所投入的研发费用。营业收入参见 F1 指标。

(4) 服务能力

S1 集装箱吞吐量世界排名。指港口的集装箱吞吐量在全世界港口中的排名,显示了该港口在世界上的竞争能力,也可作为国内外贸易伙伴选择合作港口伙伴的参考依据。

S2 作业效率评价。指港口在集装箱作业方面的效率评价,从进港时间和停靠时间两方面进行评价。是大型港口在其重要业务——集装箱作业时,对作业效率的评价,显示了其生产效率和服务能力。

S3 装卸费降价幅度。指港口装卸费与上年装卸费相比的降价幅度。装卸费用的降低,提升了在其他条件相同情况下的港口的竞争力。

(5) 绿色低碳

C1 固体废弃物综合利用率。指对生产过程中产生的废渣、粉尘或其他费用再次利用。反映港口在生产经营活动中对能源的利用程度,是企业绿色、低碳、环保的一项重要评定指标。

C2 单位 GDP 废气排放。每万元 GDP 所排放的二氧化硫和氮氧化物数量,单位为万吨/万元,反应了港口在污染排放方面的控制能力。

(6) 智能化建设

A1 信息化水平。指使用计算机、互联网等技术强大的便携性和互联互通特点,辅助港口的运营和发展,实现办事效率的高效化、信息的透明化、减少由于沟通不畅或信息不对等带来的摩擦成本及损耗,以提升港口竞争力。

A2 智能化水平。使用 5G、人工智能、大数据、区块链、无人驾驶等先进的技术,与工业生产相融合,以提高生产力、节约人力资源,实现港口各项作业的自动化、智能化。

综上所述,前 5 类指标属于前 4 代港口综合竞争力的相关指标,而最后一类“智能化建设”则是体现了港口在智慧港口发展方面是否具备竞争力。本文最终梳理出来的指标评价体系,在以往港口综合竞争力评价指标的基础上,重点加入

了智慧化建设这一类别，反映出本文智慧港口竞争力研究的内容与方向。

4.2 港口竞争力评价指标的数据收集

本文选取了国内8个大型沿海港口，以2018年全年的数据为依据进行研究，即大连港、青岛港、天津港、上海港、宁波舟山港、深圳港、广州港、厦门港。这8个港口在国内货运量排名前8强，具有较强的可比性与研究意义。

本研究查阅了各权威机构的数据，对各项指标的数据进行收集，其中的17项指标都有客观、可靠的真实数据为来源，对个别缺失的数据，进行了仿真。另有两项智能化建设相关指标，由于无法获取客观数据，则通过专家访谈、专家打分法并结合事实依据，进行综合评定，以保证本研究的可行性和有效性。本小节将对这些数据进行详细说明。

4.2.1 港口各项评价指标的数据来源

(1) P1 货物吞吐量（亿吨）

货物吞吐量数据全部来源于各港口对应的上市公司2018年年报。其中深圳港具有特殊性，来源为深圳港口协会和深圳市交通运输局，这两处数据一致。

深圳港的特殊性在于，它包含：蛇口、赤湾、妈湾、盐田、大铲湾、沙鱼冲、下洞、东角头、福永和内河十个港区。并不是所有的港区都有对应的上市公司，所以无法从年报中获取数据。

(2) P2 吞吐量增长率（%）

使用2018年的货运吞吐量和2017年货运吞吐量进行计算后得出。

表4-2 8个港口运营规模数据

港口	P1（亿吨）	P2（%）	P3（万TEU）	P4（万人次）
大连港	4.67	0.80	965.3	392.03
青岛港	4.86	6.00	1932	169.25
天津港	4.28	9.56	1601	75.73
上海港	5.61	0.10	4201	315.04
宁波舟山港	7.76	7.80	2794	164.12
深圳港	2.51	4.10	2574	697.5
广州港	6.15	6.50	2187	95.2
厦门港	2.17	2.86	1070	789

(3) P3 集装箱吞吐量 (万 TEU)

集装箱吞吐量数据全部来源于各港口对应的上市公司 2018 年年报。其国际通用计量单位为标准箱 (TEU)，以长 20 英尺的集装箱为标准。

(4) P4 客运量 (万人次)

客运量数据全部来源于中国港口“2018 年 12 月份全国沿海主要港口企业客货吞吐量统计”，其中青岛数据缺失，用另外 7 个港口的标准差进行仿真。

(5) T1 货运航线数 (条)

8 个港口航线数量并无统一来源。大连港的航线数量来自中国新闻网 2017 年初数据 108 条，根据 2017 年及 2018 年年报得知两年分别新增航线 12 条和 9 条，共计 129 条；青岛港数据来自百度；天津港数据来自企业官网的港口介绍；上海港数据来源于联合国贸发会议发布的《2019 年世界最佳连接港口排名》；宁波舟山港数据来源于宁波市人民政府；深圳港数据来自深圳市交通运输局，2018 年底统计；广州港数据来源于新浪财经；厦门港数据厦门港口管理局。

(6) T2 万吨泊位数 (个)

万吨泊位数，全部来源于中国港口年鉴，与其他数据库来源信息一致。

(7) T3 码头长度 (km)

码头长度数据，全部来源于中国港口年鉴，与其他数据库来源信息一致。

表 4-3 8 个港口物流能力数据

港口	T1 (条)	T2 (个)	T3 (km)
大连港	129	104	44.98
青岛港	162	84	29.94
天津港	120	122	37.63
上海港	260	181	106.08
宁波舟山港	247	171	94.45
深圳港	239	73	32.8
广州港	209	76	54.51
厦门港	146	76	30.68

注：T2、T3 数据来源于 2018 年《中国港口年鉴》。

(8) F1 营业收入 (亿元)

全部来源于 2018 年度港口所属企业年度报告的“营业收入”数据。

其中深圳港略有特殊，本研究中财务数量以“蛇口、盐田、赤湾、妈湾”的公司年度财务为准。其余 6 港区由于运力有限，且财务数据无可靠来源，暂不统

计，故财务相关指标会略低于实际值。

(9) F2 单位吞吐量设备成本（元/吨）

单位吞吐量设备成本计算方式为，港口生产使用的各种设备成本和港口货物吞吐量的比值。其中设备成本数据来源于港口所属企业 2018 年度报告中，固定资产情况表中的累计折旧值，去掉房屋及建筑物折旧。数据见表 4-4。

表 4-4 8 个港口单位吞吐量设备成本

2018 年	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波舟山港
期末	8,579,507,242	6,994,141,987	9,198,668,951	24,442,979,043	12,809,669,000
期初	7,613,629,057	6,336,157,458	8,630,240,105	22,048,838,270	11,033,346,000
房屋建筑折旧	35,786,531	21,296,386	25,035,933	318,782,398	221,233,000
设备成本	930,091,654	636,688,143	543,392,913	2,075,358,375	1,555,090,000
吞吐量	467,000,000	486,000,000	428,000,000	561,000,000	776,000,000
单位吞吐量设备成本	1.991630951	1.310057907	1.26960961	3.699391043	2.003981959
2018 年	深圳-赤湾港	深圳-盐田港	深圳-蛇口港	广州	厦门
期末	3,828,421,112	245,029,067	1,130,887,348	9,704,548,043	1,231,038,863
期初	3,696,270,297	206,362,699	1,049,866,872	8,574,932,052	1,065,439,705
房屋建筑折旧	15,564,491	28,682,399	0	251,795,312	24,017,992
设备成本	116,586,324	9,983,969	81,020,476	877,820,679	141,581,166
吞吐量	251,000,000			615,000,000	217,000,000
单位吞吐量设备成本	0.827054857			1.427350698	0.65244777

注：设备成本=期初-期末-房屋建筑折旧，单位吞吐量设备成本=设备成本/吞吐量。

(10) F3 腹地年人均 GDP 增长率（%）

腹地年人均 GDP 增长率数据全部来源于国家统计局 2018 地区生产总值指数，以港口腹地对应省市为依据。

(11) F4 创造就业人数（万）

包含直接和间接创造就业人数，由于间接创造就业人数难以准确测算和界定，这里取直接创造就业人数，即各港口企业员工数量，数据全部来源于企业年报。

(12) F5 研发收入比（%）。

研发投入费用、营业收入全部来源于港口所属企业 2018 年年度报告。其中厦门港该项费用为空，无法统计。深圳港的研发费用只含赤湾港，盐田港该项为空，蛇口港的年报中未细分出该项，故深圳港的研发费用可能略于实际数值。

表 4-5 8 个港口经营能力数据

港口	F1 (亿元)	F2 (元/吨)	F3 (%)	F4 (万)	F5 (%)
大连港	67.54	1.99	5.70	6819	0.174
青岛港	117.41	1.31	6.40	8611	0.338
天津港	130.6	1.27	3.60	7919	0.887
上海港	380.42	3.7	6.60	16366	0.136
宁波舟山港	218.8	2	7.10	16229	0.128
深圳港	22.24	0.83	6.80	12775	0.76
广州港	86.43	1.43	6.80	9240	0.211
厦门港	133.41	0.65	8.30	4971	0

(13) S1 集装箱吞吐量世界排名。

排名来自业界权威分析机构 Alphaliner 发布的 2018 年度全球港口集装箱吞吐量 120 强榜单。

(14) S2 作业效率评价 (分)。

作业效率评价得分数据来源于上海国际航运研究中心发布的“沿海部分集装箱港口服务评价指数”，主要评价对象为集装箱船只。其团队对统计方式进行了优化，集装箱按照不同船舶大小来统计在港时间和在泊位装卸作业时间，通过在港装卸作业效率时间和非泊位作业效率时间的综合比较，得出综合服务效率水平。

(15) S3 装卸费降价幅度 (%)。

装卸费降价幅度数据来源于国家发改委公布的装卸费价格为依据，使用 2018 年标准箱调整前、调整后的装卸费进行计算。

表 4-6 8 个港口服务能力数据

港口	S1 (名次)	S2 (分)	S3 (%)
大连港	16	86.6	20.50
青岛港	8	78	16.50
天津港	9	77	11.30
上海港	1	81	19.40
宁波舟山港	3	76.1	21.00
深圳港	4	88.2	32.00
广州港	5	78.3	27.00
厦门港	14	80.2	22.00

(16) C1 固体废弃物综合利用率 (%)。

数据全部来源于中国城市统计年鉴 2-7 工业烟(粉)尘排放量和工业固体废物综合利用率(全市),以港口所在城市数据为依据。其中广州数据缺失,取广东省的数据作为替代。

(17) C2 单位 GDP 废气排放(吨/亿元)。

数据全部来源于中国城市统计年鉴 2-9 地区生产总值、2.6 工业废水排放量和二氧化硫及氮氧化物排放量(全市),以港口所在城市数据为依据。使用后者与前者的比值计算得出。

表 4-7 8 个港口绿色低碳数据

港口	C1 (%)	C2 (吨/亿元)
大连港	95.00	15.535
青岛港	91.88	2.2396
天津港	98.87	6.2306
上海港	94.00	1.6644
宁波舟山港	95.55	10.171
深圳港	74.72	0.3542
广州港	81.66	1.403
厦门港	91.02	1.1887

注:数据来源于 2018 年《中国城市统计年鉴》。

4.2.2 智能化指标的评价过程

为将不可量化的智能化相关指标转换为相对可评价,本文对智慧港口的建设现状及发展趋势进行了研究和总结,分别挑选了信息化建设、智能化建设的十余项具体应用作为衡量依据。与 5 名学术界和实业界专家进行访谈,以确保评测项的可行性、合理性,并且易于被人理解。根据专家意见汇总后,将一些细项指标的描述进行了修正以及合并,最终选定了“信息化、智能化”两方面的 14 个细项作为评价指标。

(1) A1 信息化水平(分)。

信息化水平选取了“装箱单电子化和无纸化、设备交接单电子化和无纸化、提货单电子化和无纸化、统一信息化平台建设与一站式服务、互联网+信息平台、收费透明规范(网上公示)、区块链技术的运用”7 项指标,以下对其中部分指标进行说明。

①装箱单电子化和无纸化：装箱单线上办理，实现电子化和无纸化，提升效率，绿色低碳。

②设备交接单电子化和无纸化：设备交接单线上办理，实现电子化和无纸化，提升效率，绿色低碳。

③提货单电子化和无纸化：提货单线上办理，实现电子化和无纸化，提升效率，绿色低碳。

④统一信息化平台建设、一站式服务：打造统一平台，接口标准化推进，网上业务一站式受理，提升效率。

⑤互联网+信息平台：指各种互联网信息管理平台、物流供应链平台。包括但不限于“生产决策平台、设备管理平台、综合物流平台、供应链金融信息平台、物联网信息平台、客户服务平台、云平台和大数据方案。

⑥区块链：区块链的加密安全技术可以避免遭受到网络攻击，可用于供应链金融业务和流程的网络安全性、高效性和可视性。

(2) A2 智能化水平（分）。

智能化水平选取了“5G 网络下自动岸桥吊车、AI 识别与计算、无人驾驶电动卡车、自动化码头和集装箱智能理货、移动智能终端应用(APP)、物联网技术(如RFID 等)、TIR 运输组织公约”7 项指标，以下对其中部分指标进行说明。

①物联网技术：指通过信息传感设备，将任何物体与网络相连接，以实现智能化识别、定位、跟踪、监管等功能。典型的应用有：RFID、传感网等。

②TIR 是一套适用于全球范围的国际海关过境与担保系统。利用该运输组织公约，海关仅需核对 TIR 证信息，无需开箱检查，可提升效率、降低成本。

表 4-8 8 个港口信息化建设实现与评分

港口	装箱单无纸化	设备交接单无纸化	提货单无纸化	统一信息平台与接口、一站式服务	互联网+信息平台	收费透明规范	区块链技术的应用	评分（分）
大连港	1			1	1		1	0.566
青岛港	1		1	1	1			0.64
天津港	1	1		1		1		0.61
上海港	1	1	1	1	1			0.801
宁波港	1	1	1	1	1			0.801
深圳港	1			1	1			0.485
广州港	1	1			1	1		0.603
厦门港	1	1		1	1			0.647
权重	0.169	0.1618	0.1544	0.1618	0.1544	0.1176	0.081	1

注：标识为 1，代表该港口实现了该细项中的内容。

表 4-9 8 个港口智能化自动化建设实现与评分

港口	5G 自 动岸桥 吊车	AI 识 别与计 算	无人驾 驶电动 卡车	自动化码 头、集装箱 智能理货	移动智 能终端 应用	物联网 技术(如 RFID)	TIR 运输 组织公 约	评分 (分)
大连港							1	0.106
青岛港	1	1		1	1			0.611
天津港		1	1					0.257
上海港				1	1			0.327
宁波港	1			1	1			0.451
深圳港		1		1		1		0.504
广州港				1				0.159
厦门港		1		1				0.319
权重	0.1239	0.1593	0.0974	0.1593	0.1681	0.1858	0.1062	1

注：标识为 1，代表该港口实现了该细项中的内容。

对于选定的 14 项评价指标，针对 8 个港口的建设情况，本文查阅各港口企业的年报、介绍、以及国内权威网站的新闻，对其建设情况予以判定。为确定各细项的权重，依据李克特量表法设计了专家投票问卷。而后，对 8 名在港口行业从事多年工作或具有管理经验的专家进行了访谈和投票，根据专家打分计算出“信息化、智能化”两项指标中各细项的权重值，并对权重值进行了归一化。最后，根据各港口对于细项的实现情况进行加权计算，得出各港口“信息化、智能化”两项指标的评分，详见表 4-8、表 4-9。

8 个港口的智能化建设数据，最终评价结果请见表 4-10。

表 4-10 8 个港口智能化建设数据

港口	A1 (分)	A2 (分)
大连港	0.566	0.106
青岛港	0.64	0.611
天津港	0.61	0.257
上海港	0.801	0.327
宁波舟山港	0.801	0.451
深圳港	0.485	0.504
广州港	0.603	0.159
厦门港	0.647	0.319

4.3 本章小结

本章首先介绍了沿海智慧港口竞争力评价指标体系的构建思路、及其选取原则，然后根据国内外对港口竞争力的指标进行分析整理，选定了本研究所需的指标并进行分类整理，形成 6 类 19 项指标构成了智慧港口的评价体系。

然后选取了国内 8 个大型沿海港口，以 2018 年全年的数据为依据进行研究，并详细介绍了这 19 项指标的数量来源：其中 17 项数据可以获取到真实数据或根据计算得出，另有两项“智能化建设”相关指标没有准确、客观的数据来源，本文给出了评价过程。

第5章 基于AISM方法分析智慧港口竞争力

在前文第三章和第四章中,描述了 AISM 方法的求解步骤,构建了智慧港口竞争力的评价体系,并收集了相关指标的数据。本章将使用 AISM 方法对 8 个港口的 19 项指标数据进行计算,得出智慧港口的竞争力排序结果。

5.1 AISM方法处理数据的过程

5.1.1 由指标距离求解基于偏序的骨架矩阵

(1) 将原始矩阵转化为归一化矩阵

由上一章得到的原始数据,构成原始矩阵 $O_{m \times n}$ 矩阵,见表 5-1。使用极差法(即曼哈顿距离)得到归一化矩阵 $N_{m \times n}$ (见表 5-2),其计算公式如下。

正向指标:

$$n_{ij} = \frac{o_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})} \quad (5-1)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

负向指标:

$$n_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - o_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m}(o_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m}(o_{ij})} \quad (5-2)$$

其中 $o_{ij} \in O, n_{ij} \in N$ 。

(2) 使用变异系数法计算权重

对于归一化矩阵 $N_{8 \times 19}$,使用变异系数法计算每列的权重。

首先,计算第 j 项指标的变异系数:

$$(\text{COV})_j = \frac{\delta_j}{\bar{x}_j} \quad (5-3)$$

然后,计算第 j 项指标的权重,得到的权重排序结果见表 5-3。

$$\omega_j = \frac{(\text{COV})_j}{\sum_{j=1}^n (\text{COV})_j} \quad (5-4)$$

表 5-1 原始矩阵 $O_{8 \times 19}$ 数据

$O_{8 \times 19}$	+P1	+P2	+P3	+P4	+T1	+T2	+T3	+F1	-F2	+F3	+F4	+F5	-S1	+S2	+S3	+C1	-C2	+A1	+A2
大连港	4.67	0.8	965.3	392.03	129	104	44.98	67.54	1.99	5.7	6819	0.174	16	86.6	20.5	95	15.535	0.566	0.106
青岛港	4.86	6	1932	169.25	162	84	29.94	117.41	1.31	6.4	8611	0.338	8	78	16.5	91.88	2.2396	0.64	0.611
天津港	4.28	9.56	1601	75.73	120	122	37.63	130.6	1.27	3.6	7919	0.887	9	77	11.3	98.87	6.2306	0.61	0.257
上海港	5.61	0.1	4201	315.04	260	181	106.08	380.42	3.7	6.6	16366	0.136	1	81	19.4	94	1.6644	0.801	0.327
宁波港	7.76	7.8	2794	164.12	247	171	94.45	218.8	2	7.1	16229	0.128	3	76.1	21	95.55	10.171	0.801	0.451
深圳港	2.51	4.1	2574	697.5	239	73	32.8	22.24	0.83	6.8	12775	0.76	4	88.2	32	74.72	0.3542	0.485	0.504
广州港	6.15	6.5	2187	95.2	209	76	54.51	86.43	1.43	6.8	9240	0.211	5	78.3	27	81.66	1.403	0.603	0.159
厦门港	2.17	2.86	1070	789	146	76	30.68	133.41	0.65	8.3	4971	0	14	80.2	22	91.02	1.1887	0.647	0.319

表 5-2 归一化矩阵 $N_{8 \times 19}$ 数据

$N_{8 \times 19}$	+P1	+P2	+P3	+P4	+T1	+T2	+T3	+F1	-F2	+F3	+F4	+F5	-S1	+S2	+S3	+C1	-C2	+A1	+A2
大连港	0.447	0.074	0	0.443	0.064	0.287	0.198	0.126	0.561	0.447	0.162	0.196	0	0.868	0.444	0.84	0	0.256	0
青岛港	0.481	0.624	0.299	0.132	0.3	0.102	0	0.266	0.784	0.596	0.319	0.381	0.533	0.157	0.251	0.711	0.876	0.491	1
天津港	0.377	1	0.196	0	0	0.454	0.101	0.303	0.797	0	0.259	1	0.467	0.074	0	1	0.613	0.396	0.299
上海港	0.615	0	1	0.336	1	1	1	1	0	0.638	1	0.153	1	0.405	0.391	0.798	0.914	1	0.438
宁波港	1	0.814	0.565	0.124	0.907	0.907	0.847	0.549	0.557	0.745	0.988	0.144	0.867	0	0.469	0.863	0.353	1	0.683
深圳港	0.061	0.423	0.497	0.872	0.85	0	0.038	0	0.941	0.681	0.685	0.857	0.8	1	1	0	1	0	0.788
广州港	0.712	0.677	0.378	0.027	0.636	0.028	0.323	0.179	0.744	0.681	0.375	0.238	0.733	0.182	0.758	0.287	0.931	0.373	0.105
厦门港	0	0.292	0.032	1	0.186	0.028	0.01	0.31	1	1	0	0	0.133	0.339	0.517	0.675	0.945	0.513	0.422

表 5-4 K⁺矩阵数据

K ⁺ _{8×19}	+P1	+P2	+P3	+P4	+T1	+T2	+T3	+F1	-F2	+F3	+F4	+F5	-S1	+S2	+S3	+C1	-C2	+A1	+A2
大连港	0.026	0.045	0.059	0.039	0.051	0.055	0.067	0.053	0.014	0.018	0.045	0.053	0.042	0.009	0.024	0.006	0.034	0.034	0.049
青岛港	0.025	0.018	0.041	0.061	0.038	0.069	0.084	0.045	0.007	0.013	0.036	0.041	0.02	0.055	0.032	0.01	0.004	0.024	0
天津港	0.03	0	0.047	0.07	0.055	0.042	0.076	0.043	0.006	0.032	0.04	0	0.022	0.061	0.042	0	0.013	0.028	0.034
上海港	0.018	0.049	0	0.047	0	0	0	0	0.031	0.012	0	0.055	0	0.039	0.026	0.007	0.003	0	0.028
宁波港	0	0.009	0.026	0.062	0.005	0.007	0.013	0.028	0.014	0.008	0.001	0.056	0.006	0.066	0.023	0.005	0.022	0	0.016
深圳港	0.045	0.028	0.03	0.009	0.008	0.077	0.081	0.061	0.002	0.01	0.017	0.009	0.008	0	0	0.035	0	0.046	0.01
广州港	0.014	0.016	0.037	0.068	0.02	0.075	0.057	0.05	0.008	0.01	0.033	0.05	0.011	0.054	0.01	0.025	0.002	0.029	0.044
厦门港	0.048	0.035	0.057	0	0.045	0.075	0.083	0.042	0	0	0.053	0.066	0.036	0.043	0.021	0.011	0.002	0.022	0.028

表 5-5 K⁻矩阵数据

K ⁻ _{8×19}	+P1	+P2	+P3	+P4	+T1	+T2	+T3	+F1	-F2	+F3	+F4	+F5	-S1	+S2	+S3	+C1	-C2	+A1	+A2
大连港	0.021	0.004	0	0.031	0.004	0.022	0.017	0.008	0.018	0.014	0.009	0.013	0	0.057	0.019	0.029	0	0.012	0
青岛港	0.023	0.03	0.018	0.009	0.016	0.008	0	0.016	0.025	0.019	0.017	0.025	0.022	0.01	0.011	0.025	0.03	0.023	0.049
天津港	0.018	0.049	0.012	0	0	0.035	0.008	0.018	0.025	0	0.014	0.066	0.02	0.005	0	0.035	0.021	0.018	0.015
上海港	0.029	0	0.059	0.024	0.055	0.077	0.084	0.061	0	0.021	0.053	0.01	0.042	0.027	0.017	0.028	0.031	0.046	0.021
宁波港	0.048	0.04	0.033	0.009	0.05	0.07	0.071	0.034	0.017	0.024	0.053	0.009	0.036	0	0.02	0.03	0.012	0.046	0.034
深圳港	0.003	0.021	0.029	0.061	0.047	0	0.003	0	0.03	0.022	0.037	0.056	0.034	0.066	0.042	0	0.034	0	0.039
广州港	0.034	0.033	0.022	0.002	0.035	0.002	0.027	0.011	0.023	0.022	0.02	0.016	0.031	0.012	0.032	0.01	0.032	0.017	0.005
厦门港	0	0.014	0.002	0.07	0.01	0.002	0.001	0.019	0.031	0.032	0	0	0.006	0.022	0.022	0.023	0.032	0.024	0.021

表 5-3 各列权重计算并排序

$M_{2 \times 19}$	+P1	+P2	+P3	+P4	+T1	+T2	+T3	+F1	-F2	+F3
权重	0.0479	0.0487	0.0588	0.0702	0.0549	0.0774	0.084	0.0611	0.0314	0.0323
排序	12	11	7	3	8	2	1	6	19	18
$M_{2 \times 19}$	+F4	+F5	-S1	+S2	+S3	+C1	-C2	+A2	+A3	
权重	0.0533	0.0655	0.0421	0.0656	0.0425	0.0348	0.0342	0.0462	0.0491	
排序	9	5	15	4	14	16	17	13	10	

这里只关注权重大小的顺序，对于指标权重的排序主要目的是避免 19! 种排列组合的巨大算量，取最具代表性的最大值和最小值进行累加后，求出关系矩阵，以对样本的优劣进行排序。

(3) 正负理想点集合、基于距离的正负对抗矩阵 K^+ 、 K^-

由归一化矩阵 N 获得正负理想点集合，由于使用极差法得到归一化矩阵，所以正理想点集合中的值全部为 1，负理想点集合中的值全部为 0。

$$S^+ = (1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)$$

$$S^- = (0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$$

由归一化矩阵 N 与正负理想点距离，得到一组对抗矩阵对 K^+ 和 K^- ，请见表 5-4 和表 5-5。这里采用的是欧式距离公式：

$$d = \omega \sqrt{\sum_{i=1}^n |P - Q|^2} \tag{5-5}$$

矩阵 $K^+ = (k_{ij}^+)_{m \times n}$ ，矩阵中各元素计算公式如下：

$$k_{ij}^+ = \omega_j |z_j^+ - n_{ij}| \tag{5-6}$$

其中 ω_j 为第 j 列的权重， $n_{ij} \in N$ ， $z_j^+ \in S^+$ 。

矩阵 $K^- = (k_{ij}^-)_{m \times n}$ ，矩阵中各元素计算公式如下：

$$k_{ij}^- = \omega_j |z_j^- - n_{ij}| \tag{5-7}$$

其中 ω_j 为第 j 列的权重， $n_{ij} \in N$ ， $z_j^- \in S^-$ 。

(4) 按权重排序得到的 K_d^+ 和 K_d^- 、 K_a^+ 和 K_a^- 矩阵

根据 K^+ 和 K^- 矩阵得到两组对抗矩阵：按照权重由大到小的顺序得到 K_d^+ 和 K_d^- ，下标 d 指 Desc，表示权重减少，降序排序；按照权重由小到大的顺序得到 K_a^+ 和 K_a^- ，下标 a 指 Asc，表示权重增加，升序排序。这 4 个矩阵请详见附录 B 的表 B-1 至表 B-4。

(5) 累加得到 P_d 和 Q_d 、 P_a 和 Q_a 矩阵

K_d^+ 和 K_d^- ， K_a^+ 和 K_a^- 分别按照各列从左到右的顺序进行累加（即对于每行而言，第一列的值不变，第二列的值为前两列的和，……最后一列的值为 19 列的总和），得到两对（即 4 个）新的累加矩阵： K_d^+ 累加得到 P_d ， K_d^- 累加得到 Q_d ， P_d 和 Q_d 形成一组对抗矩阵； K_a^+ 累加得到 P_a ， K_a^- 累加得到 Q_a ， P_a 和 Q_a 形成一组对抗矩阵。这 4 个矩阵可见附录 B 的表 B-5 至表 B-8。

(6) 以下是根据矩阵 P_a 和 Q_a ，基于偏序求出的关系矩阵：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港	
A =	大连港	1	1	0	0	0	1	1	1
	青岛港	0	1	0	0	0	0	0	0
	天津港	0	0	1	0	0	0	0	0
	上海港	0	0	0	1	0	0	0	0
	宁波港	0	0	0	0	1	0	0	0
	深圳港	0	0	0	0	0	1	0	0
	广州港	0	0	0	0	0	0	1	0
	厦门港	0	0	0	0	0	0	0	1

根据公式 3-11，由关系矩阵算出骨架矩阵（即哈斯矩阵）：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港	
HS =	大连港	0	1	0	0	0	1	1	1
	青岛港	0	0	0	0	0	0	0	0
	天津港	0	0	0	0	0	0	0	0
	上海港	0	0	0	0	0	0	0	0
	宁波港	0	0	0	0	0	0	0	0
	深圳港	0	0	0	0	0	0	0	0
	广州港	0	0	0	0	0	0	0	0
	厦门港	0	0	0	0	0	0	0	0

(7) 以下是根据矩阵 P_d 和 Q_d ，基于偏序求出的关系矩阵：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港	
A =	大连港	1	0	0	1	1	0	0	0
	青岛港	0	1	0	1	1	0	0	0
	天津港	0	0	1	1	1	0	0	0
	上海港	0	0	0	1	0	0	0	0
	宁波港	0	0	0	1	1	0	0	0
	深圳港	0	0	0	1	0	1	0	0
	广州港	0	0	0	1	1	0	1	0
	厦门港	0	0	0	1	1	0	0	1

根据公式 3-11，由关系矩阵算出骨架矩阵（即哈斯矩阵）：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港
大连港	0	0	0	0	1	0	0	0
青岛港	0	0	0	0	1	0	0	0
天津港	0	0	0	0	1	0	0	0
HS = 上海港	0	0	0	0	0	0	0	0
宁波港	0	0	0	1	0	0	0	0
深圳港	0	0	0	1	0	0	0	0
广州港	0	0	0	0	1	0	0	0
厦门港	0	0	0	0	1	0	0	0

5.1.2 由样本距离求解基于偏序的骨架矩阵

(1) 计算各港口到正、负理想解的距离 d^+ 和 d^- ，通常用欧式距离：

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 (n_{ij} - z_j^+)^2} \quad (5-8)$$

其中 ω_j 为第 j 项指标的权重， $n_{ij} \in N$ ， $z_j^+ \in S^+$ ；

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 (n_{ij} - z_j^-)^2} \quad (5-9)$$

其中 ω_j 为第 j 项指标的权重， $n_{ij} \in N$ ， $z_j^- \in S^-$ 。

计算结果表 5-6 所示：

表 5-6 样本与正负理想解的距离

$M_{8 \times 2}$	d^+	d^-
大连港	0.1824	0.0873
青岛港	0.1734	0.0974
天津港	0.1765	0.1104
上海港	0.11	0.1875
宁波舟山港	0.1205	0.1686
深圳港	0.1552	0.1516
广州港	0.1689	0.1003
厦门港	0.1879	0.1059

如折线图 5-1 所示，距离正理想点越近，即 d^+ 的值越小，方案越好；距离负理想点越远，即 d^- 的值越大，方案越好。

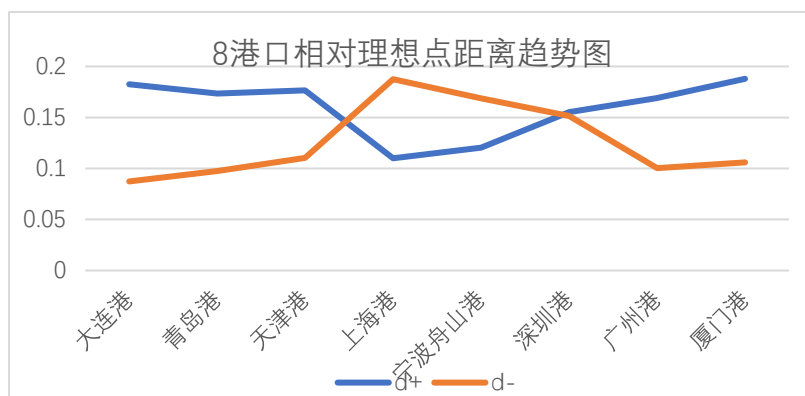


图 5-1 样本理想点距离趋势图

(2) 以下是根据 d^+ 和 d^- ，基于偏序关系求出的关系矩阵：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港
A = 大连港	1	1	1	1	1	1	1	0
青岛港	0	1	0	1	1	1	1	0
天津港	0	0	1	1	1	1	0	0
上海港	0	0	0	1	0	0	0	0
宁波港	0	0	0	1	1	0	0	0
深圳港	0	0	0	1	1	1	0	0
广州港	0	0	0	1	1	1	1	0
厦门港	0	0	1	1	1	1	0	1

根据公式 3-11，由关系矩阵算出骨架矩阵（即哈斯矩阵）：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港
HS = 大连港	0	1	1	0	0	0	0	0
青岛港	0	0	0	0	0	0	1	0
天津港	0	0	0	0	0	1	0	0
上海港	0	0	0	0	0	0	0	0
宁波港	0	0	0	1	0	0	0	0
深圳港	0	0	0	0	1	0	0	0
广州港	0	0	0	0	0	1	0	0
厦门港	0	0	1	0	0	0	0	0

5.1.3 由方案贴近度求解基于偏序的骨架矩阵

(1) 由 d^+ ， d^- 采取的贴近度计算方法得到 γ^+ ， γ^- ，计算公式如下。 γ^- 表示与正理想点的贴近程度； γ^+ 表示与负理想点的贴近程度：

$$\gamma_i^- = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (5-10)$$

$$\gamma_i^+ = \frac{d_i^+}{d_i^- + d_i^+} \quad (5-11)$$

计算结果见表 5-7:

表 5-7 8 个方案与正负理想解的贴近度

$M_{8 \times 2}$	γ^-	γ^+
大连港	0.6763	0.3237
青岛港	0.6402	0.3598
天津港	0.6151	0.3849
上海港	0.3698	0.6302
宁波舟山港	0.4168	0.5832
深圳港	0.506	0.494
广州港	0.6273	0.3727
厦门港	0.6394	0.3606

如折线图 5-2 所示, 贴近度 γ^+ 的值越大, 方案越好; 贴近度 γ^- 的值越小, 方案越好。

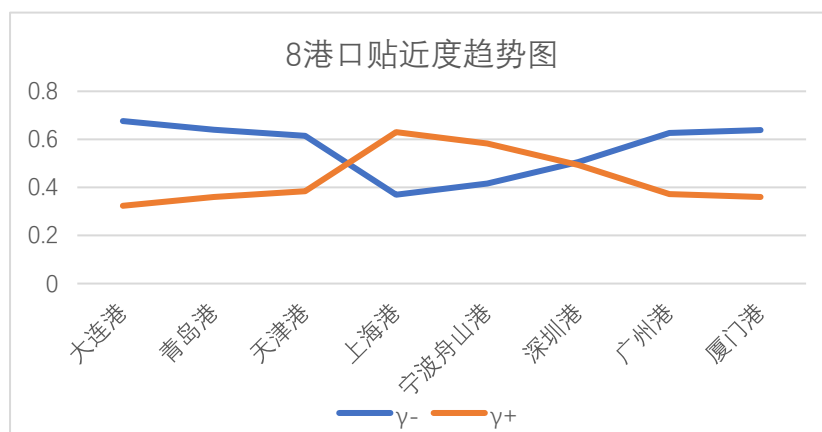


图 5-2 方案贴近度趋势图

(2) 以下是根据 γ^+ 和 γ^- , 基于偏序关系求出的关系矩阵:

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港
大连港	1	1	1	1	1	1	1	1
青岛港	0	1	1	1	1	1	1	1
天津港	0	0	1	1	1	1	0	0
上海港	0	0	0	1	0	0	0	0
宁波港	0	0	0	1	1	0	0	0
深圳港	0	0	0	1	1	1	0	0
广州港	0	0	1	1	1	1	1	0
厦门港	0	0	1	1	1	1	1	1

根据公式 3-11，由关系矩阵算出骨架矩阵（即哈斯矩阵）：

	大连港	青岛港	天津港	上海港	宁波港	深圳港	广州港	厦门港
大连港	0	1	0	0	0	0	0	0
青岛港	0	0	0	0	0	0	0	1
天津港	0	0	0	0	0	1	0	0
上海港	0	0	0	0	0	0	0	0
宁波港	0	0	0	1	0	0	0	0
深圳港	0	0	0	0	1	0	0	0
广州港	0	0	1	0	0	0	0	0
厦门港	0	0	0	0	0	0	1	0

5.2 沿海智慧港口竞争力评价结果

通过结果优先、原因优先、结果-原因轮换、原因-结果轮换这四种不同的层级抽取规则可以得到要素所处的层级，再把骨架矩阵的有向边迭代回去，即可以绘制出有向拓扑层级图。

本文通过 4 种不同的抽取方式得出两组对抗有向拓扑层级图，可以更全面、更合理的反应样本所属层级。尤其是可以反映出当前的系统有多少个活动要素，当前的系统属于活动系统还是刚性系统。

由图 5-3 所示的流程可以看出，本研究采用的 AISM 方法是基于不同层次的对抗有向拓扑层级图组逐步呈现出被评测样本的竞争力排序。下面基于此逼近过程，来逐步进行分析。

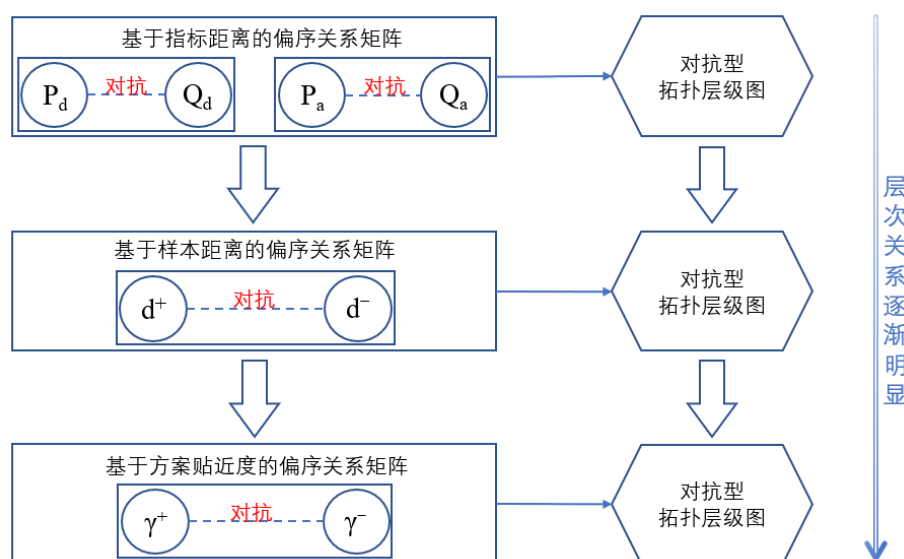


图 5-3 对抗型拓扑层级图的逐步逼近过程

(1) 根据 P_a 与 Q_a 求出的骨架矩阵, 基于四种不同的抽取方式, 得到以下 4 类 (两组对抗) 有向拓扑层级图 5-4:

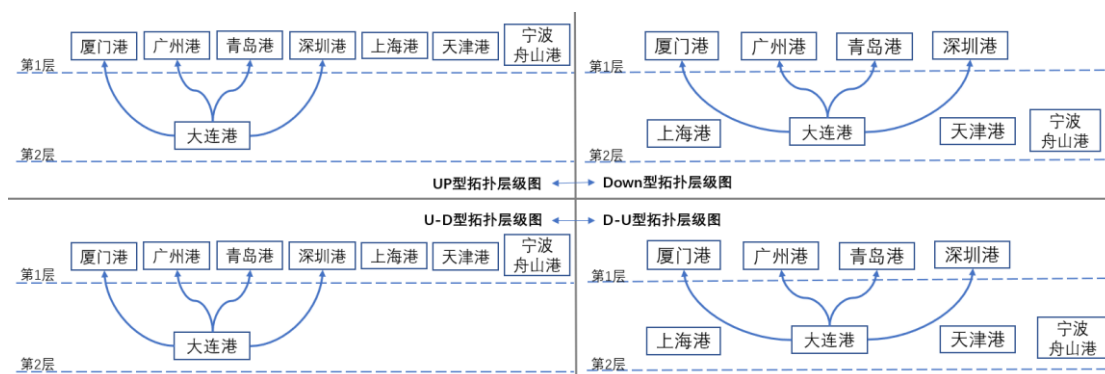


图 5-4 由 P_a 和 Q_a 得到的骨架矩阵抽取的有向拓扑层级图

由 Up 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为: {厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港, 上海港, 天津港, 宁波舟山港} > {大连港}。

由 Down 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为: {厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港} > {大连港, 天津港, 上海港, 宁波舟山港}。

U-D 型有向拓扑层级图结果与 Up 型相同, D-U 型有向拓扑层级图结果与 Down 型相同。形成表 5-8。

表 5-8 基于指标升序得到的有向拓扑层级样本结果

层级序号	Up 型样本结果	Down 型样本结果	U-D 型样本结果	D-U 型样本结果	共有样本	活动样本
1	厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港, 上海港, 天津港, 宁波舟山港	厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港	厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港, 上海港, 天津港, 宁波舟山港	厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港	厦门港, 广州港, 青岛港, 深圳港	宁波舟山港, 上海港, 天津港
2	大连港	大连港, 天津港, 宁波舟山港, 上海港	大连港	大连港, 天津港, 宁波舟山港, 上海港	大连港	宁波舟山港, 上海港, 天津港

由此步骤得到的排序结果可得出, 部分港口之间竞争力从强到弱的排序为: {广州港, 厦门港, 青岛港, 深圳港} > {大连港}。

即① “广州港、厦门港、青岛港、深圳港” 4 个港口排序在大连港之前; ②

“广州港、厦门港、青岛港、深圳港” 4 个港口之间的顺序尚未可知；③天津港、上海港和宁波舟山港属于活动样本，3 者之间的排序尚未可知，且与其他 5 个港口的排序也不可不知。

至此，8 个港口之间的竞争力大小排序尚不能完全确定。

(2) 根据 P_d 与 Q_d 求出的骨架矩阵，基于四种不同的抽取方式，得到以下 4 类（两组对抗）有向拓扑层级图 5-5：

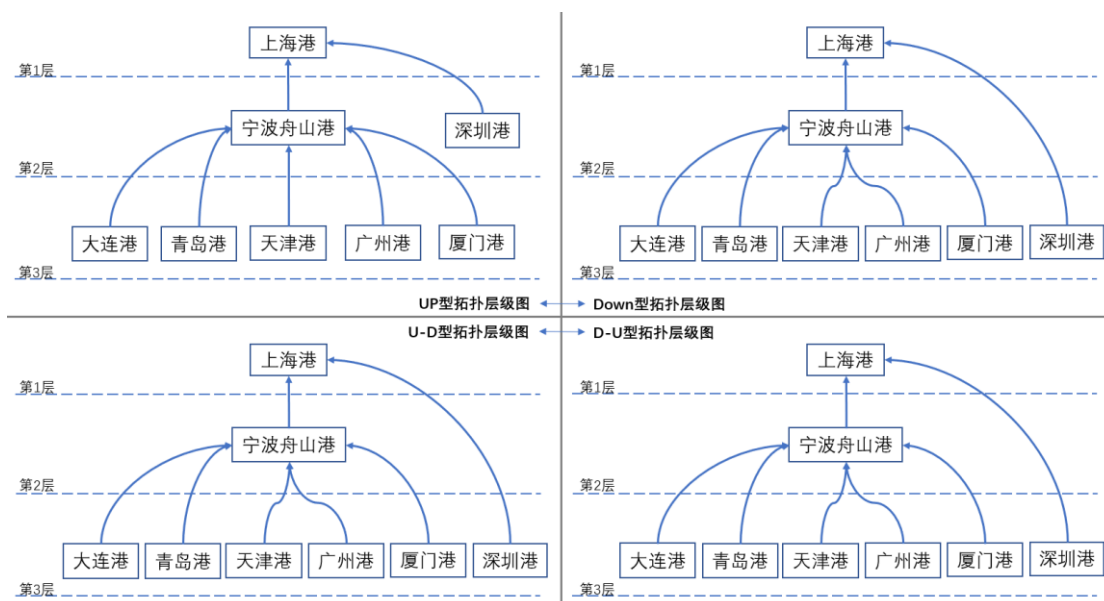


图 5-5 由 P_d 和 Q_d 得到的骨架矩阵抽取的有向拓扑层级图

由 Up 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为： $\{上海港\} > \{宁波舟山港, 深圳港\} > \{大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港\}$ 。

由 Down 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为： $\{上海港\} > \{宁波舟山港\} > \{大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港, 深圳港\}$ 。

U-D 型和 D-U 型有向拓扑层级图结果与 Down 型相同。形成下表 5-9。

由此步骤得到的排序结果可得出，部分港口之间竞争力从强到弱的排序为： $\{上海港\} > \{宁波舟山港\} > \{大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港\}$ ，且 $\{上海港\} > \{深圳港\}$ 。

即①上海港排在第一位；②宁波港排在上海之后；③深圳港属于活动样本，排在上海之后；④宁波港与深圳港之间排序尚不可知；⑤“大连港，青岛港，天津港，广州港，厦门港” 5 个港口之间的排序尚不可知；⑥“大连港，青岛港，天津港，广州港，厦门港” 5 个港口与深圳港之间的关系尚不可知。

至此，8 个港口之间的竞争力大小排序尚不能完全确定。

表 5-9 基于指标降序得到的有向拓扑层级样本结果

层级序号	Up 型样本结果	Down 型样本结果	U-D 型样本结果	D-U 型样本结果	共有样本	活动样本
1	上海港	上海港	上海港	上海港	上海港	
2	宁波舟山港, 深圳港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	深圳港
3	大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港	大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港, 深圳港	大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港, 深圳港	大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港, 深圳港	大连港, 青岛港, 天津港, 广州港, 厦门港	深圳港

(3) 根据方案理想点距离 d 和 d^+ 求出的骨架矩阵, 基于四种不同的抽取方式, 得到以下 4 类 (两组对抗) 有向拓扑层级图 5-6:

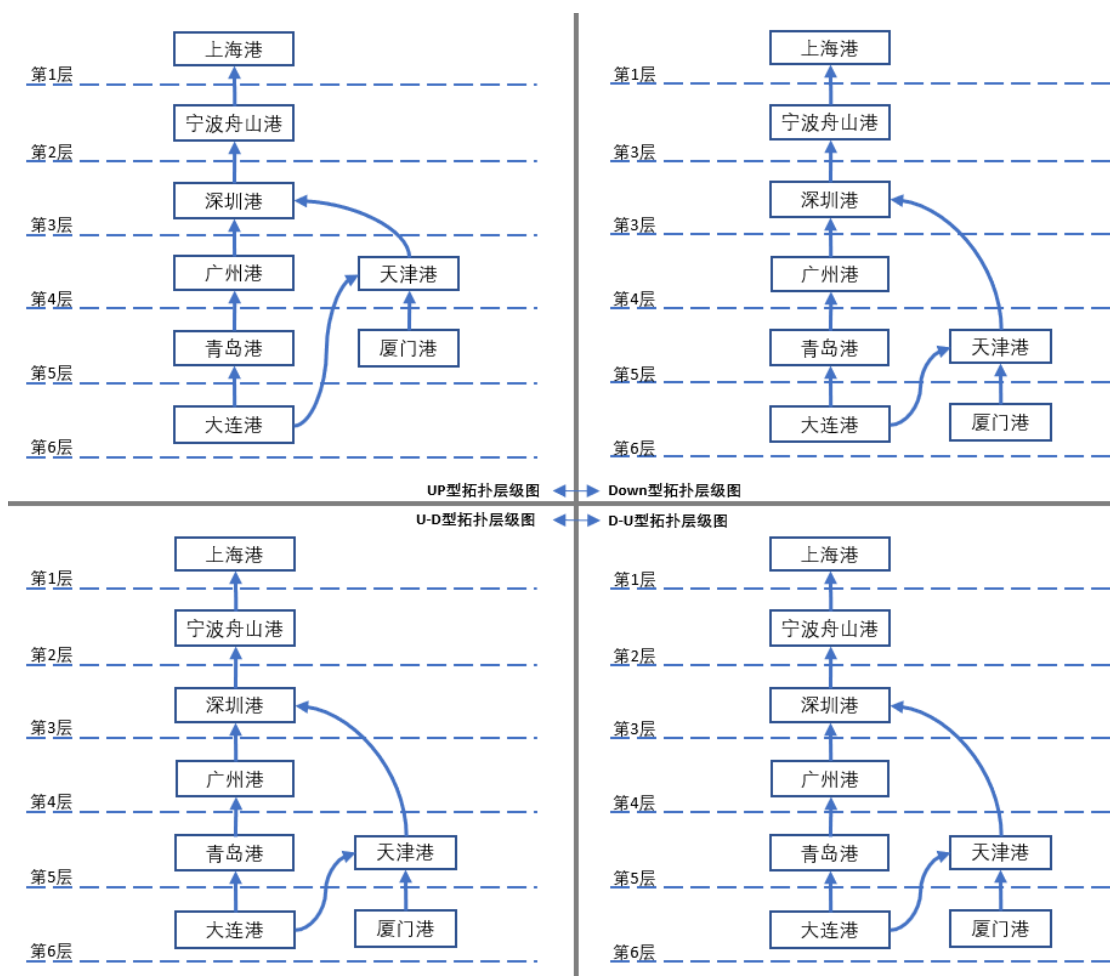


图 5-6 由样本距离骨架矩阵抽取的有向拓扑层级图

由 Up 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为：{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{天津港, 广州港}>{青岛港, 厦门港}>{大连港}。

由 Down 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为：{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{广州港}>{青岛港, 天津港}>{大连港, 厦门港}。

U-D 型和 D-U 型有向拓扑层级图结果与 Down 型相同，形成表 5-10。

表 5-10 基于方案理想点距离比较得到的有向拓扑层级样本结果

层级序号	Up 型样本结果	Down 型样本结果	U-D 型样本结果	D-U 型样本结果	共有样本	活动样本
1	上海港	上海港	上海港	上海港	上海港	
2	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	
3	深圳港	深圳港	深圳港	深圳港	深圳港	
4	广州港, 天津港	广州港	广州港	广州港	广州港	天津港
5	青岛港, 厦门港	青岛港, 天津港	青岛港, 天津港	青岛港, 天津港	青岛港	天津港, 厦门港
6	大连港	大连港, 厦门港	大连港, 厦门港	大连港, 厦门港	大连港	厦门港

由此步骤得到的排序结果可得出，部分港口之间竞争力从强到弱的排序为：{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{广州港}>{青岛港}>{大连港}，且{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{天津港}>{厦门港, 大连港}。

即①上海港排在第一位；②宁波港排在第二位；③深圳港排在第三位；④广州港排在深圳港之后，青岛港和大连港之前，可能的排名为第 4-6 名；⑤天津港排在深圳之后，大连港和厦门港之前，可能的排名为第 4-6 名；⑥青岛港排在广州港之后，大连港之前，可能的排名为第 5-7 名；⑦厦门港排在天津港之后，可能的排名为第 5-8 名；⑧大连港排在青岛港之后，可能的排名为第 7-8 名。

至此，8 个港口之间的竞争力大小排序尚不能完全确定。

(4) 根据方案贴近度 γ^- 和 γ^+ 求出的骨架矩阵，基于四种不同的抽取方式，得到以下 4 类（两组对抗）有向拓扑层级图，见图 5-7。

由 Up 型有向拓扑层级图可知竞争力由强到弱的排序为：{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{天津港}>{广州港}>{厦门港}>{青岛港}>{大连港}。

Down 型、U-D 型和 D-U 型有向拓扑层级图结果与 Up 型相同，形成刚性结构，即直链型，见表格 5-11：

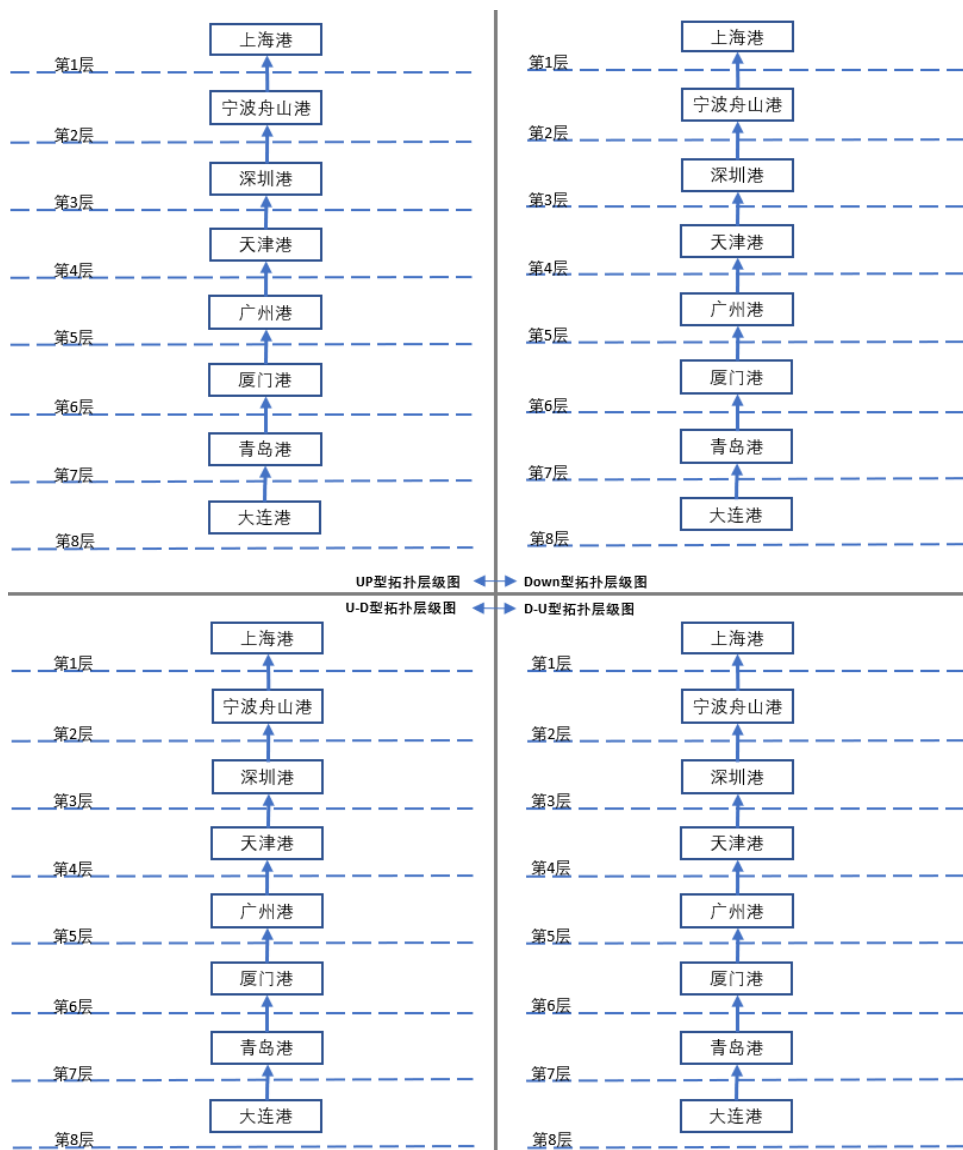


图 5-7 由方案贴适度骨架矩阵抽取的有向拓扑层级图

表 5-11 基于方案贴适度比较得到的有向拓扑层级样本结果

层级序号	Up 型样本结果	Down 型样本结果	U-D 型样本结果	D-U 型样本结果	共有样本	活动样本
1	上海港	上海港	上海港	上海港	上海港	
2	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	宁波舟山港	
3	深圳港	深圳港	深圳港	深圳港	深圳港	
4	天津港	天津港	天津港	天津港	天津港	
5	广州港	广州港	广州港	广州港	广州港	
6	厦门港	厦门港	厦门港	厦门港	厦门港	
7	青岛港	青岛港	青岛港	青岛港	青岛港	
8	大连港	大连港	大连港	大连港	大连港	

由此步骤得到的排序结果可得出，部分港口之间竞争力从强到弱的排序为：{上海港}>{宁波舟山港}>{深圳港}>{天津港}>{广州港}>{厦门港}>{青岛港}>{大连港}。

此排序即为本研究最终得出的 8 个沿海智慧港口竞争力评价研究的结论。

可以看出：①由各指标距离求解得到的两组有向拓扑层级图，能确定的各样本间的关系较少，拓扑层级也较少。 P_a 和 Q_a 只有两层， P_d 和 Q_d 只有三层。拓扑层级少，导致了很多样本之间没有排序关系（由于无回路，同级之间的样本之间都没有排序关系），无法确定竞争力的大小顺序。最终只能确定上海排在第一位。②由样本距离求解得到的一组有向拓扑层级图，能确定各样本间的关系也变多了，拓扑层级也增加到了六层。但由于还有两个活动样本，导致排序无法确定，只能确定排名前三分别是上海港、宁波舟山港和深圳港。③最后，由方案贴近度求解得到的一组有向拓扑层级图，属于刚性结构，任意两个样本之间都可以确定排序先后，共有 8 个层级，故可以得出港口竞争力的排序结论。

5.3 评价结果分析与建议

5.3.1 评价结果分析

本文通过运用 AISM 方法得出 8 个沿海智慧港口竞争力由强到弱的排序为：上海港>宁波舟山港>深圳港>天津港>广州港>厦门港>青岛港>大连港。

这个排序结果兼具科学性与客观性：

(1) 从科学性来说。在对抗层级拓扑图逼近的过程中可能会有逆序的现象出现。如图 5-4 中显示上海港所在拓扑图层级比“厦门港、青岛港、广州港”还低，这种逆序的过程是由于距离矩阵 (P_a, Q_a 和 P_d, Q_d) 在维度分量的投影到 d^+, d^- 中逼近过程后形成层级上的逆序。

而使用 AISM 方法，可以使得原本无法获知优劣排序的评价对象，通过不断的逼近，最终得到稳定的排序。如图 5-4 中“上海港、宁波舟山港、天津港”都属于一个孤立系统，无法获知这三个港口在竞争力方面的优劣顺序。但是通过逼近得到 d^+, d^- 的有向拓扑层级图，再由 d^+, d^- 逼近到 γ^+, γ^- 的有向拓扑层级图可以看出，上海港的排序明显稳定在第一的位置。

(2) 从客观性来说。本文虽然通过 AISM 方法对 8 个港口进行分析后得出其竞争力强弱的排序，但是如何客观的进行竞争力大小的量化评价仍是一个难点。由于竞争力概念难以量化，而且在港口竞争力大小方面缺乏一种客观的、公认的标准进行评分。因此这里只能利用对抗性的正负理想点为标准，对各港口的竞争

力进行解释。根据距离正理想点的值，给出如下对应关系，见表 5-12：

表 5-12 竞争力评价表

贴近度 γ^-	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]
竞争力评价	竞争力很强	竞争力较强	竞争力一般	竞争力较弱	竞争力很弱

将 8 个港口的正理想点贴近度 γ^- 代入，越贴近正理想点越近竞争力越强（即 γ^- 越小），排序可见图 5-8：

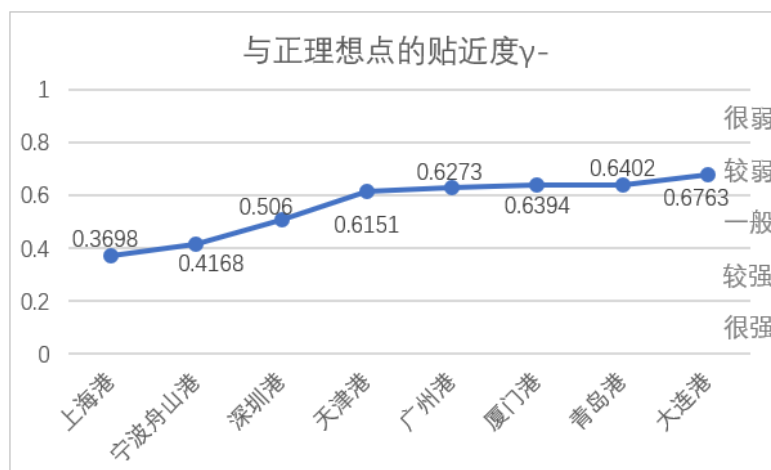


图 5-8 港口贴近度客观评价排序

最终可以得出 8 个沿海智慧港口的竞争力大小的相对客观性评价，见表 5-13：

表 5-13 8 个沿海智慧港口竞争力客观评价

港口	竞争力评价
上海港	较强
宁波舟山港，深圳港	一般
天津港，广州港，厦门港，大连港，青岛港	较弱

由图 5-8 港口贴近度排序可以看出，排名在第 4-7 位的天津港、广州港、厦门港、青岛港之间的竞争力差距非常小。排在第 7 位的青岛港与排在第 1 位的上海港，贴近度差距为 $(0.6402-0.3698)/0.3698=73.12\%$ ；而青岛港与排在第 4 位的天津港，贴近度差距仅为 $(0.6402-0.6151)/0.6151=4.08\%$ 。

即，本文根据收集到的数据得到的港口竞争力的结果中，可以确定：上海港稳稳的位居第一名；宁波舟山港也以较大的优势位居第二；深圳港以较大的优势领先于排名第四的天津港，位居第三；大连港和第七名尚有一定的差距，位居最后一名。而处于第 4-7 名的四个港口（天津港、广州港、厦门港、青岛港）之间

的竞争力差距非常小,它们之间的排序极有可能受到评价体系的指标数据偏差或者各步骤选用不同计算公式的影响。

5.3.2 对港口的建议

在8个沿海智慧港口的竞争力排序中,排名第一的是上海港。上海港不但在运营能力、物流能力、经验能力这些硬性指标上独占鳌头,而且在服务能力、环保能力和智慧化建设这些软性指标上也遥遥领先。在“集装箱吞吐量、航线数、万吨泊位数、码头长度、营业收入、创造就业人数、集装箱吞吐量世界排名、信息化程度”这9项指标都位列第一。这既体现了上海作为珠三角区域,在经济发展上的重要性地位,更说明了港口企业对于自身发展的明确规划和建设成效。建议上海港在智慧化的三项指标上加强投入和研发力度,尤其对于较大体量的港口而言,新建一两个码头无法对其竞争力的提升起到较大的作用,而信息化和智能化建设则可以快速全面的提升港口的作业效率,节约人力物力成本等,给港口的竞争力提升做出较大贡献。

在本文评价结果中,大连港排在了最后一名,究其原因,是其在硬性和软性指标方面的实力排名都比较靠后。在“集装箱吞吐量、单位GDP废气排放、集装箱吞吐量世界排名、智能化程度”4个方面都处于倒数第一。此外,大连港还受限于腹地经济增速缓慢,货运物资以煤炭石油为主导导致污染较为严重的影响,且港口智能化发展落后,导致综合竞争力排名落后。建议循序渐进,以信息化、智能化建设为切入点,积极转型,构建低碳环保、信息化自动化港口,以提高生产效率,降低运营成本,实现可持续发展。逐步从发展本港区经济,带动腹地经济,形成正反馈,给港口的竞争力带来质的飞跃。

宁波舟山港和深圳港在本文的竞争力排序中位列第二名和第三名,它们在各项指标中都有各自的优势,宁波港在“货物吞吐量和信息化程度”2项指标都排名第一,还有很多指标名列前茅;深圳港在“作业效率评价、装卸费降价幅度、单位GDP废气排放”3项指标上都位列第一。建议这两个港口补齐短板,宁波舟山港可以从降低单位吞吐量设备成本和提高研发投入这两方面入手;深圳港可以从提高固体废弃物综合利用率和加强信息化建设两方面入手,以提高自身的竞争力。

其余的四个港口(天津港、广州港、厦门港、青岛港)排名在第4-7位,但是相互之间的竞争力差距很小,因为这些港口都有各自的优势和劣势。天津港在“吞吐量增长率、固体废弃物综合利用率和研发收入比”3项指标上位列第一。厦门港在“客运量、单位吞吐量设备成本和腹地年人均GDP增长率”3项指标上位列第一。广州港在19项指标中虽无位列第一的指标,但是位列第二的指标

有3项。青岛港在“客运量、码头长度”2方面处于倒数第一，在运营能力（如集装箱吞吐量、客运量）、港口的自然环境（如万吨泊位数、码头长度）、服务能力等方面都较为落后，虽然在智能化建设方面较为领先，也未能扭转综合竞争力靠后的结果。建议这四个港口多向国内外先进的港口学习，取长补短，以提高竞争力。

港口的发展与所处的地理位置、自然环境、政策支持力度、腹地经济发展实力都息息相关，但这些因素并不是靠港口企业本身所能决定的。对于港口企业而言，更重要的是对自身的发展规划、构建蓝图，在硬性标准不断稳健发展的前提下，绿色低碳和智能化自动化建设是未来港口快速发展拉开差距的重要方向。各港口可在“加强服务能力、绿色可持续发展、加强智能化建设”这几方面进行改进，以提升港口的综合竞争力。

尤其在智能化建设方面，目前各大港口都处于探索、拓展的发展阶段，各港口的起步差距并不大，而其带来的投资收益回报率较为可观。港口物流服务电子化、无纸化可为企业降低运营成本、提高工作效率；人工智能算法可优化运输路径，也可以提高工作效率、节约运营成本。所有的智能化建设都是为了提升作业效率、降低运营成本、减少工作人员的劳动负担、降低失误率。企业有了这方面的优势，自然就可提升港口的综合竞争力。

建设智慧化港口可逐步推进、合理规划，技术之间虽无优劣之分，但一些技术的实现需要以其他的技术作为前提条件。

将云计算和大数据运用于港口智能化建设，建立大数据中心，并利用国家统一共享数据交换平台^[2]，加速实现公共数据资源的开放与共享，建设综合信息服务平台，为智能物流提供数据基础。通过大数据分析云计算，可将港口运营数据进行统计分析并以可视化图形进行展现，可动态监控并预测生产及物流作业流程，统筹高效利用港口资源，降低运输成本，可通过监控和智能预测进行预警。

将物联网技术应用于港口智能化建设，则需要建立完善的基础设施、运营网络以及运输装备的智能化（如RFID），港口各生产要素实现全面的智能感知，自动智能识别、定位、跟踪和监管，才能实现与云计算和大数据的深度融合。

5G以其高带宽、低延时的特性，可极大的助力港口的自动化建设，如远程操控、自动装卸与自动驾驶等领域。移动终端可将港口生产建设的各参与者从固定终端中解放出来，提高生产与服务效率。另有，AI识别与计算、区块链等技术可用于港口的物流建设中，各港口可依据自身发展程度进行评估、研发与应用。

各港口可根据以上建议，逐步实现智慧港口装卸自动化、监控可视化、服务便捷化、管理高效化目标，从目前机器“帮人做事”的阶段，逐步发展到机器“思考与决策”的阶段^[7]，以实现向智慧港口的全面迈进。

第6章 结论与展望

6.1 全文总结

随着大数据、物联网、5G、人工智能等前沿技术的不断创新与成熟，它们越来越多的应用于各行各业的生产活动之中。在港口的运营、生产和服务过程中，信息化与智能化建设也在不断地优化工作流程、提高工作效率，智慧港口的建设逐步探索、加深与完善。以物联网、智能化建设为主的第五代智慧化港口是未来港口发展竞争的必然趋势。

本文首先对智慧化港口的发展现状、港口竞争力的研究现状进行了描述，对基于偏序的哈斯图、解释结构模型（ISM）、TOPSIS 和生成对抗网络（GAN）理论等进行了阐述。进而提出了本文的理论方法——对抗解释结构模型（AISM），该方法适用于本研究对于多样本，多属性的综合排序评价研究，通过多组对抗矩阵，逐步逼近得出结论，并具有结果显示清晰直观、鲁棒性强、兼容性强等优点。

然后，在构建智慧港口竞争力指标体系时，先确定了指标体系的设计和筛选原则。通过对现有港口综合竞争力指标的总结和归纳，加入了智慧化相关指标，并结合专家访谈对指标进行了修正，最终形成了6类19项指标评价体系。通过查阅2018年港口相关年鉴、各港口企业的年报、权威机构排名等，得到其中17项评价指标的真实数据，又通过实际情况结合专家打分的方法得到最后两项智能化建设相关指标的数据。建立了较为科学全面的智慧港口竞争力评价体系。

最后，使用AISM方法对8个智慧港口的竞争力进行比较评价。先将原始数据8个港口的19项数据作为原始矩阵，通过无量纲化、序方向一致化和归一化得到归一化矩阵，通过极差法（即曼哈顿距离）得到正负理想点集合。然后通过各指标到正负理想点的距离形成的一组对抗矩阵进行偏序排序与累加计算等，得到两组对抗矩阵，进而求出关系矩阵、骨架矩阵和一组有向拓扑层级图。再分别通过欧式距离算出各样本（港口）到正负理想解的距离，通过各样本与理想点的贴近度，得到两组关系矩阵、骨架矩阵和两组有向拓扑层级图，进而得到8个智慧港口竞争力的排序结论：上海港>宁波舟山港>深圳港>天津港>广州港>厦门港>青岛港>大连港。对得出的结论进行评价与分析，提出相关的建议。

6.2 研究展望

本文通过建立智慧港口竞争力评价体系，尝试性的加入智慧化指标，使用对

抗解决结构模型方法对沿海 8 个港口的竞争力进行了分析比较,为以后对智慧港口竞争力评价的进一步研究提供了一定的参考意义。但限于本人自身知识水平有限、精力有限、数据资源获取途径有限,未来对于智慧港口竞争力研究可以从以下几方面进行发展和完善:

第一,由于数据来源的渠道有限,本文抛弃了许多绿色低碳、生态、可持续发展相关指标,如单位吞吐量综合耗能、单位吞吐量 CO₂ 排放量等。限于个人资源与精力有限,无法考察各大港口的信息化程度、自动化水平,只能根据公司介绍、年报等数据作为依据,无法保证其公司介绍中是否存在夸大的成分。建议在未来的研究中,通过大量的调研以获得更加准确的数据,并对智能化指标进行更多的探索和完善。

第二,5G、人工智能等技术在港口领域的应用实现尚处于探索阶段,各技术之间无优劣之分,每项新技术的应用,对现有的工作流程的改进和提升程度难以准确量化,本文采取了专家访谈、专家打分的方法来确定各智能化指标的权重,具有一定程度的主观性。随着这些前沿技术的发展与成熟,以后对于各智能化细项的权重会有更加客观的评价机制。

第三,由于研究时间有限,本文在各计算步骤中采取的计算方法有限:①归一化方式采用的是极差法,数据的规范化可以有很多种,未来可以采用标准差,欧式距离、三角函数等归一化计算方法进行尝试。②求权重顺序采用的是变异系数法,该方法属于客观评价法,仅仅根据数据得出的权重,并未考虑到专业人士的意见。采用主客观相结合的方式对权重进行计算,是下一步研究的方向。③求距离公式为最常使用的欧氏距离公式,在计算距离的公式未来有多种选择,如马氏距离公式, K 发散, KL 散度等。④排序整体采用的是严格的 TOPSIS 方法,如果稍微改动一下贴近度公式,如采用余弦来表示相似关系,则该方法就趋向于 VIKOR 等方法。这些也可以作为未来港口竞争力排序的研究方向。

目前,中国对于智慧港口的建设还处于初阶段,部分建设较快的港口已经取得了一定的成效,在企业自身提高了作业效率的同时,其客户也体验到了更智能化、人性化、便捷化的服务。而另一些建设较慢的港口则还处于港口智慧化发展的愿景构建阶段。

本文对中国智慧港口评价指标体系进行了初步研究,在智能化指标的设计和评价过程中也进行了探索和创新。但在具体指标的评价标准、智慧港口等级划分、指标打分,以及评价实践操作等方面,还要进行更深入的研究。建议在评价体系研究的基础上,还要在全国范围内展开智慧港口等级评价实践工作,以指导中国港口自动化、智能化建设,促进先进技术在港口的实践应用,提高港口综合竞争能力,实现港口的发展愿景^[3]。

参考文献

- [1] 张国伍. “一带一路”的多式联运服务体系研究——“交通7+1论坛”第四十四次会议纪实[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(05): 1-13+241.
- [2] 交通运输部. 交通运输“十三五”发展规划[R]. 北京: 交通运输部, 2016.
- [3] 杨凯, 胡亚杰, 马瑞鑫. 我国智慧港口评价指标体系初步研究[J]. 水道港口, 2017, 38(6): 647-652.
- [4] 罗本成. 鹿特丹智慧港口建设发展模式与经验借鉴[J]. 中国港口, 2019(1): 20-23.
- [5] 郑静, 陆路. 宁波智慧港口发展现状及对策研究[J]. 物流工程与管理, 2012, 34(11): 40-41+36.
- [6] 杜明军. 大连港建设第五代物联网智慧港口发展模式研究[D]. 大连海事大学, 2014.
- [7] 张驰. “互联网+”背景下天津港建设智慧港口发展模式研究[J]. 天津科技, 2015, 42(10): 105-106.
- [8] Hales D, Lam J S L, Chang Y T. The Balanced theory of port competitiveness[J]. Transportation Journal, 2016, 55(2):168-189.
- [9] Ha M H, Yang Z, Notteboom T, et al. Revisiting port performance measurement: A hybrid multi-stakeholder framework for the modelling of port performance indicators[J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 2017, 103:1-16.
- [10] Fan L, Wilson W W, Dahl B. Congestion, Port Expansion and Spatial Competition for US container Imports[J]. Transportation Research Part E, 2012(48):1121-1136.
- [11] Asgari N, Farahani R Z, Goh M. Network Design Approach for Hub Ports-Shipping Companies Competition and Cooperation[J]. Transportation Research Part A, 2013(48):1-18.
- [12] Ishii M, Lee P T, Tezuka K, et al. A Game Theoretical Analysis of Port Competition[J]. Transportation Research Part E, 2013(49):92-106.
- [13] 匡海波, 陈树文. 基于熵权TOPSIS的港口综合竞争力评价模型研究与实证[J]. 科学学与科学技术管理, 2007(10): 157-162.
- [14] 吴慧, 王道平, 张茜, 等. 基于云模型的国际邮轮港口竞争力评价与比较研究[J]. 中国软科学, 2015(02): 166-174.
- [15] 韩亚娟. 基于港口选择的运输方式优化模型研究[J]. 工业工程与管理, 2015(06): 114-121.

- [16] Deng P, Lu S Q, Xiao H B. Evaluation of the Relevance Measure between Ports and Regional Economy Using Structural Equation Modeling[J]. *Transport Policy*, 2013(27):123-133.
- [17] Bottasso A, Conti M, Ferrari C, et al. Ports and Regional development: A Spatial Analysis on A Panel of European Regions[J]. *Transportation Research Part A*, 2014(65):44-45.
- [18] 司增焯. 港口基础设施与港口城市经济互动发展[J]. *管理评论*, 2015, 27(11): 33-43.
- [19] 鲁渤, 邢戩, 王乾, 等. 港口竞争力与腹地经济协同机制面板数据分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(4): 1079-1090.
- [20] 徐文静. 沿海港口城市物流竞争力评价与聚类分析[J]. *商业经济研究*, 2017(24): 85-88.
- [21] 赵旭, 高苏红, 周巧琳, 等. 21世纪海上丝绸之路沿线港口体系演化研究——基于Logistics、Lotka-Volterra模型[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(8): 172-181.
- [22] Cao M Y, Duan X B, Zhao X. Construction of Integrated Evaluation System for Green Port Construction Based on BIM Technology[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019(93):1073-1079.
- [23] Park J Y, Yeo G T. An Evaluation of Greenness of major Korean ports: A Fuzzy Set Approach[J]. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2012, 28(1):67-82.
- [24] 黄晗, 莫东序, 程婉静. 基于ANP模型的绿色港口竞争力评价[J]. *技术经济*, 2017, 36(2): 117-122.
- [25] 韩兵, 康娟娟, 匡海波. 港口服务供应链绿色运营动力因素及关联效应研究[J]. *工业工程与管理*, 2019(07).
- [26] 鲁渤, 王辉坡. 基于演化博弈的政府推动绿色港口建设对策[J]. *华东经济管理*, 2017(08): 153-159.
- [27] 赵楠, 真虹. 基于多目标整数规划的港口生态位资源整合决策机制[J]. *系统工程*, 2016, 34(01): 122-126.
- [28] 赵宇, 哲刘芳. 生态港口评价指标体系的构建——基于R聚类、变异系数与专家经验的分析[J]. *科研管理*, 2015, 36(2): 124-132.
- [29] Heilig L, Voss S. Information systems in seaports: a categorization and overview[J]. *Information Technology and Management*, 2017, 18(3):179-201.
- [30] Botti A, Monda A, Pellicano M, et al. The Re-Conceptualization of the Port Supply Chain as a Smart Port Service System: The Case of the Port of Salerno[J]. *SYSTEMS*, 2017, 5(2):35.
- [31] 包雄关. 智慧港口的内涵及系统结构[J]. *中国航海*, 2013, 36(02): 120-123.
- [32] Chen Zhen. Empirical Research on the Wisdom Port-City Coupling System[J]. *Journal of Computational and Theoretical*, 2016, 13(3):2014-2020.

- [33] Bruggemann R, Halfon E, Welzl G, et al. Applying the Concept of Partially Ordered Sets on the Ranking of Near-Shore Sediments by a Battery of Tests[J]. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 2001, 41:918-925.
- [34] 李伟. 苕溪流域地表水水质综合评价与非点源污染模拟研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [35] 岳立柱. 应用偏序集表示权重难以获知的TOPSIS模型[J]. *模糊系统与数学*, 2017, 8(31): 167-174.
- [36] 岳立柱. 蕴含权重的偏序集多准则决策法[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(2): 26-31.
- [37] 岳立柱. 基于在线信息的群评价模型及其偏序集求解方法[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(3): 111-117.
- [38] 黄炜. 黑客与反黑客思维研究的方法论启示——解释结构模型新探[D]. 华南师范大学, 2003.
- [39] Miguel Ramirez de la Huerga, Victor A. Bañuls Silvera, Murray Turoff. A CIA-ISM scenario approach for analyzing complex cascading effects in Operational Risk Management[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2015, 07:289-302.
- [40] 朱琳, 吕本富. 解释结构模型的简便方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2004(12): 1815-1817+1891.
- [41] 薛伟贤, 刘骏. 数字鸿沟主要影响因素的关系结构分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2008(05): 85-91.
- [42] 王先甲, 汪磊. 基于马氏距离的改进型TOPSIS在供应商选择中的应用[J]. *控制与决策*, 2012, 27(10): 1566-1570.
- [43] 张芳兰, 杨明朗, 刘卫东. 基于模糊TOPSIS方法的汽车形态设计方案评价[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(2): 276-283.
- [44] 武春友, 郭玲玲, 于惊涛. 基于TOPSIS-灰色关联分析的区域绿色增长系统评价模型及实证[J]. *管理评论*, 2017, 29(1): 228-239.
- [45] 孟斌, 沈思祎, 匡海波, 等. 基于模糊-Topsis的企业社会责任评价模型——以交通运输行业为例[J]. *管理评论*, 2019, 31(05): 191-202.
- [46] Opricovic S, Tzeng G H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(2):445-455.
- [47] Opricovic S, Tzeng G H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(2):514-529.
- [48] Mohammad K S, Majeed H, Kamran S. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 33(5):2257-2262.

- [49] 苏志欣, 王理, 夏国平. 区间数动态多属性决策的VIKOR扩展方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(6): 836-840.
- [50] 索玮岚. 基于扩展VIKOR的不确定语言多属性群决策方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1431-1435+1440.
- [51] Sanayei A, Mousavi S F, Yazdankhah A. Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 24-30.
- [52] 袁宇, 关涛, 闫相斌. 基于混合VIKOR方法的供应商选择决策模型[J]. 控制与决策, 2014, 29(03): 551-560.
- [53] Goodfellow I J, Pouget A J, Mirza M, et al. Generative Adversarial Networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 3:2672-2680.
- [54] Ratliff L J, Burden S A, Sastry S S. Characterization and computation of local Nash equilibria in continuous games[C]. Proceedings of the 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing(Allerton). Monticello, IL, USA:IEEE, 2013:917-924.
- [55] Mirza M, Simon O. Conditional generative adversarial nets[EB/OL]. arXiv preprint arXiv, 1411.1784 (2014).
- [56] Radford A, Metz L, Chintla S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks[EB/OL]. 2016(01). <https://arxiv.org/pdf/1511.06434.pdf>.
- [57] Arjovsky M, Chintala S, Bottou, Léon. Wasserstein GAN[J]. 2017(01). <https://arxiv.org/abs/1701.07875>.

附录A 专家访谈问卷

专家投票调查表

尊敬的：

您好！非常感谢您在百忙之中参与本次问卷调查。

此问卷是为了评价“智慧港口竞争力”的学术研究，通过问卷了解确定沿海智慧港口竞争力评价指标体系中“信息化水平评价细项、智能化水平评价细项”的相对重要性指标。请您仔细阅读此调查问卷，依据当前智慧港口竞争力发展现状和未来发展趋势，对沿海智慧港口智能化评价指标的重要性进行打分，我们将及时向您通报研究成果。

请您认真阅读以下内容，参照指标说明，对每项指标的重要程度进行打分，分值为5分制（1分为最不重要，5分为最重要），并将分数填入以下各表的相应位置中。

序号	指标	指标细项描述	智慧化港口竞争力指标评分				
			1分	2分	3分	4分	5分
1	信息化水平	装箱单无纸化和电子化					
2		设备交接单无纸化和电子化					
3		提货单无纸化和电子化					
4		统一信息化平台与接口、一站式服务					
5		互联网+信息平台（含大数据）					
6		收费透明规范（网上公示）					
7		区块链技术的运用					
8	智能化自动化水平	5G网络下自动岸桥吊车					
9		AI识别与计算					
10		无人驾驶电动卡车					
11		自动化码头、集装箱智能理货					
12		移动智能终端应用					
13		物联网技术(如RFID的识别等)					
14		实行TIR运输组织公约					
注：							
[1]RFID指电子标签、无限射频识别技术，可快速准确的识别多个高速移动物体上的标签，便于追溯。							
[2]TIR是一套适用于全球范围的国际海关过境与担保系统。利用该运输组织公约，海关仅需核对TIR证信息，无需开箱检查，可提升效率、降低成本。							

附录B AISM计算过程中的矩阵

表 B-1 K_d^+ 矩阵数据

$K_d^+_{19 \times 8}$	+T3	+T2	+P4	+S2	+F5	+F1	+P3	+T1	+F4	+A2	+P2	+P1	+A1	+S2	-S1	+C1	-C2	+F3	-F2
大连港	0.0674	0.0552	0.0391	0.0087	0.0527	0.0533	0.0588	0.0514	0.0447	0.0491	0.0451	0.0265	0.0343	0.0236	0.0421	0.0056	0.0342	0.0179	0.0138
青岛港	0.084	0.0695	0.0609	0.0553	0.0406	0.0448	0.0413	0.0385	0.0363	0	0.0183	0.0249	0.0235	0.0318	0.0196	0.0101	0.0042	0.0131	0.0068
天津港	0.0756	0.0423	0.0702	0.0607	0	0.0426	0.0473	0.0549	0.0395	0.0344	0	0.0298	0.0279	0.0425	0.0224	0	0.0132	0.0323	0.0064
上海港	0	0	0.0467	0.039	0.0555	0	0	0	0	0.0276	0.0487	0.0184	0	0.0259	0	0.007	0.003	0.0117	0.0314
宁波港	0.0128	0.0072	0.0615	0.0656	0.0561	0.0276	0.0256	0.0051	0.0006	0.0156	0.0091	0	0	0.0226	0.0056	0.0048	0.0221	0.0082	0.0139
深圳港	0.0809	0.0774	0.009	0	0.0094	0.0611	0.0296	0.0082	0.0168	0.0104	0.0281	0.045	0.0462	0	0.0084	0.0348	0	0.0103	0.0019
广州港	0.0569	0.0752	0.0683	0.0536	0.0499	0.0501	0.0366	0.02	0.0334	0.044	0.0158	0.0138	0.0289	0.0103	0.0112	0.0248	0.0024	0.0103	0.008
厦门港	0.0832	0.0752	0	0.0433	0.0655	0.0421	0.0569	0.0447	0.0533	0.0284	0.0345	0.0479	0.0225	0.0205	0.0365	0.0113	0.0019	0	0

表 B-2 K_d^- 矩阵数据

$K_d^-_{19 \times 8}$	+T3	+T2	+P4	+S2	+F5	+F1	+P3	+T1	+F4	+A2	+P2	+P1	+A1	+S2	-S1	+C1	-C2	+F3	-F2
大连港	0.0166	0.0222	0.0311	0.0569	0.0129	0.0077	0	0.0035	0.0086	0	0.0036	0.0214	0.0118	0.0189	0	0.0292	0	0.0144	0.0176
青岛港	0	0.0079	0.0093	0.0103	0.025	0.0162	0.0176	0.0165	0.017	0.0491	0.0304	0.0231	0.0226	0.0107	0.0224	0.0247	0.03	0.0192	0.0246
天津港	0.0085	0.0351	0	0.0049	0.0655	0.0185	0.0116	0	0.0138	0.0147	0.0487	0.0181	0.0183	0	0.0196	0.0348	0.021	0	0.025
上海港	0.084	0.0774	0.0236	0.0265	0.01	0.0611	0.0588	0.0549	0.0533	0.0215	0	0.0295	0.0462	0.0166	0.0421	0.0278	0.0312	0.0206	0
宁波港	0.0712	0.0702	0.0087	0	0.0095	0.0335	0.0332	0.0498	0.0527	0.0336	0.0397	0.0479	0.0462	0.0199	0.0365	0.03	0.0121	0.0241	0.0175
深圳港	0.0032	0	0.0612	0.0656	0.0562	0	0.0292	0.0467	0.0365	0.0387	0.0206	0.0029	0	0.0425	0.0337	0	0.0342	0.022	0.0295
广州港	0.0271	0.0021	0.0019	0.0119	0.0156	0.0109	0.0222	0.0349	0.02	0.0052	0.033	0.0341	0.0172	0.0322	0.0309	0.01	0.0318	0.022	0.0234
厦门港	0.0008	0.0021	0.0702	0.0222	0	0.019	0.0019	0.0102	0	0.0207	0.0142	0	0.0237	0.022	0.0056	0.0235	0.0323	0.0323	0.0314

表 B-3 K_a^+ 矩阵数据

$K_a^+_{19 \times 8}$	-F2	+F3	-C2	+C1	-S1	+S3	+A1	+P1	+P2	+A2	+F4	+T1	+P3	+F1	+F5	+S2	+P4	+T2	+T3
大连港	0.0138	0.0179	0.0342	0.0056	0.0421	0.0236	0.0343	0.0265	0.0451	0.0491	0.0447	0.0514	0.0588	0.0533	0.0527	0.0087	0.0391	0.0552	0.0674
青岛港	0.0068	0.0131	0.0042	0.0101	0.0196	0.0318	0.0235	0.0249	0.0183	0	0.0363	0.0385	0.0413	0.0448	0.0406	0.0553	0.0609	0.0695	0.084
天津港	0.0064	0.0323	0.0132	0	0.0224	0.0425	0.0279	0.0298	0	0.0344	0.0395	0.0549	0.0473	0.0426	0	0.0607	0.0702	0.0423	0.0756
上海港	0.0314	0.0117	0.003	0.007	0	0.0259	0	0.0184	0.0487	0.0276	0	0	0	0	0.0555	0.039	0.0467	0	0
宁波港	0.0139	0.0082	0.0221	0.0048	0.0056	0.0226	0	0	0.0091	0.0156	0.0006	0.0051	0.0256	0.0276	0.0561	0.0656	0.0615	0.0072	0.0128
深圳港	0.0019	0.0103	0	0.0348	0.0084	0	0.0462	0.045	0.0281	0.0104	0.0168	0.0082	0.0296	0.0611	0.0094	0	0.009	0.0774	0.0809
广州港	0.008	0.0103	0.0024	0.0248	0.0112	0.0103	0.0289	0.0138	0.0158	0.044	0.0334	0.02	0.0366	0.0501	0.0499	0.0536	0.0683	0.0752	0.0569
厦门港	0	0	0.0019	0.0113	0.0365	0.0205	0.0225	0.0479	0.0345	0.0284	0.0533	0.0447	0.0569	0.0421	0.0655	0.0433	0	0.0752	0.0832

表 B-4 K_a^- 矩阵数据

$K_a^-_{19 \times 8}$	-F2	+F3	-C2	+C1	-S1	+S3	+A1	+P1	+P2	+A2	+F4	+T1	+P3	+F1	+F5	+S2	+P4	+T2	+T3
大连港	0.0176	0.0144	0	0.0292	0	0.0189	0.0118	0.0214	0.0036	0	0.0086	0.0035	0	0.0077	0.0129	0.0569	0.0311	0.0222	0.0166
青岛港	0.0246	0.0192	0.03	0.0247	0.0224	0.0107	0.0226	0.0231	0.0304	0.0491	0.017	0.0165	0.0176	0.0162	0.025	0.0103	0.0093	0.0079	0
天津港	0.025	0	0.021	0.0348	0.0196	0	0.0183	0.0181	0.0487	0.0147	0.0138	0	0.0116	0.0185	0.0655	0.0049	0	0.0351	0.0085
上海港	0	0.0206	0.0312	0.0278	0.0421	0.0166	0.0462	0.0295	0	0.0215	0.0533	0.0549	0.0588	0.0611	0.01	0.0265	0.0236	0.0774	0.084
宁波港	0.0175	0.0241	0.0121	0.03	0.0365	0.0199	0.0462	0.0479	0.0397	0.0336	0.0527	0.0498	0.0332	0.0335	0.0095	0	0.0087	0.0702	0.0712
深圳港	0.0295	0.022	0.0342	0	0.0337	0.0425	0	0.0029	0.0206	0.0387	0.0365	0.0467	0.0292	0	0.0562	0.0656	0.0612	0	0.0032
广州港	0.0234	0.022	0.0318	0.01	0.0309	0.0322	0.0172	0.0341	0.033	0.0052	0.02	0.0349	0.0222	0.0109	0.0156	0.0119	0.0019	0.0021	0.0271
厦门港	0.0314	0.0323	0.0323	0.0235	0.0056	0.022	0.0237	0	0.0142	0.0207	0	0.0102	0.0019	0.019	0	0.0222	0.0702	0.0021	0.0008

表 B-5 P_d 矩阵数据

$P_{d19 \times 8}$	P_{d1}	P_{d2}	P_{d3}	P_{d4}	P_{d5}	P_{d6}	P_{d7}	P_{d8}	P_{d9}	P_{d10}	P_{d11}	P_{d12}	P_{d13}	P_{d14}	P_{d15}	P_{d16}	P_{d17}	P_{d18}	P_{d19}
大连港	0.0674	0.1226	0.1617	0.1703	0.223	0.2764	0.3352	0.3866	0.4313	0.4804	0.5255	0.552	0.5863	0.6099	0.652	0.6576	0.6918	0.7096	0.7234
青岛港	0.084	0.1535	0.2144	0.2697	0.3103	0.3551	0.3964	0.4348	0.4711	0.4711	0.4894	0.5143	0.5378	0.5696	0.5893	0.5993	0.6036	0.6167	0.6234
天津港	0.0756	0.1178	0.188	0.2487	0.2487	0.2913	0.3386	0.3935	0.433	0.4675	0.4675	0.4973	0.5252	0.5677	0.5901	0.5901	0.6034	0.6357	0.642
上海港	0	0	0.0467	0.0857	0.1412	0.1412	0.1412	0.1412	0.1412	0.1688	0.2175	0.2359	0.2359	0.2618	0.2618	0.2688	0.2718	0.2834	0.3148
宁波港	0.0128	0.02	0.0815	0.1471	0.2031	0.2307	0.2563	0.2614	0.262	0.2776	0.2866	0.2866	0.2866	0.3092	0.3148	0.3196	0.3417	0.35	0.3639
深圳港	0.0809	0.1582	0.1672	0.1672	0.1766	0.2377	0.2673	0.2755	0.2923	0.3027	0.3309	0.3758	0.422	0.422	0.4304	0.4652	0.4652	0.4755	0.4774
广州港	0.0569	0.1321	0.2004	0.2541	0.304	0.3541	0.3907	0.4108	0.4441	0.4881	0.5038	0.5176	0.5465	0.5568	0.568	0.5928	0.5952	0.6055	0.6135
厦门港	0.0832	0.1584	0.1584	0.2018	0.2673	0.3094	0.3664	0.4111	0.4644	0.4928	0.5273	0.5752	0.5977	0.6182	0.6547	0.666	0.6679	0.6679	0.6679

表 B-6 Q_d 矩阵数据

$Q_{d19 \times 8}$	Q_{d1}	Q_{d2}	Q_{d3}	Q_{d4}	Q_{d5}	Q_{d6}	Q_{d7}	Q_{d8}	Q_{d9}	Q_{d10}	Q_{d11}	Q_{d12}	Q_{d13}	Q_{d14}	Q_{d15}	Q_{d16}	Q_{d17}	Q_{d18}	Q_{d19}
大连港	0.0166	0.0388	0.0699	0.1268	0.1397	0.1474	0.1474	0.1509	0.1596	0.1596	0.1632	0.1846	0.1964	0.2153	0.2153	0.2446	0.2446	0.259	0.2766
青岛港	0	0.0079	0.0172	0.0275	0.0524	0.0687	0.0862	0.1027	0.1197	0.1689	0.1992	0.2223	0.2449	0.2556	0.2781	0.3028	0.3327	0.352	0.3766
天津港	0.0085	0.0436	0.0436	0.0485	0.114	0.1325	0.144	0.144	0.1578	0.1725	0.2212	0.2393	0.2576	0.2576	0.2772	0.312	0.333	0.333	0.358
上海港	0.084	0.1614	0.185	0.2115	0.2216	0.2826	0.3414	0.3964	0.4497	0.4712	0.4712	0.5007	0.5468	0.5635	0.6055	0.6333	0.6646	0.6852	0.6852
宁波港	0.0712	0.1414	0.1501	0.1501	0.1596	0.1931	0.2263	0.2761	0.3288	0.3624	0.402	0.4499	0.4961	0.516	0.5525	0.5825	0.5946	0.6186	0.6361
深圳港	0.0032	0.0032	0.0644	0.1299	0.1861	0.1861	0.2153	0.262	0.2985	0.3372	0.3578	0.3608	0.3608	0.4033	0.4369	0.4369	0.4711	0.4931	0.5226
广州港	0.0271	0.0293	0.0312	0.0431	0.0587	0.0696	0.0919	0.1268	0.1468	0.1519	0.1849	0.219	0.2362	0.2684	0.2993	0.3093	0.3411	0.3631	0.3865
厦门港	0.0008	0.003	0.0732	0.0954	0.0954	0.1143	0.1162	0.1264	0.1264	0.1472	0.1614	0.1614	0.185	0.207	0.2126	0.2361	0.2684	0.3007	0.3321

表 B-7 P_a 矩阵数据

$P_{a8 \times 19}$	P_{a1}	P_{a2}	P_{a3}	P_{a4}	P_{a5}	P_{a6}	P_{a7}	P_{a8}	P_{a9}	P_{a10}	P_{a11}	P_{a12}	P_{a13}	P_{a14}	P_{a15}	P_{a16}	P_{a17}	P_{a18}	P_{a19}
大连港	0.0138	0.0317	0.0659	0.0714	0.1135	0.1371	0.1714	0.1979	0.243	0.2921	0.3368	0.3882	0.4471	0.5004	0.5531	0.5618	0.6008	0.656	0.7234
青岛港	0.0068	0.0199	0.0241	0.0342	0.0538	0.0856	0.1091	0.134	0.1523	0.1523	0.1886	0.2271	0.2683	0.3132	0.3537	0.409	0.4699	0.5394	0.6234
天津港	0.0064	0.0387	0.0519	0.0519	0.0744	0.1169	0.1448	0.1746	0.1746	0.209	0.2485	0.3035	0.3507	0.3933	0.3933	0.454	0.5242	0.5665	0.642
上海港	0.0314	0.0431	0.046	0.053	0.053	0.0789	0.0789	0.0973	0.146	0.1737	0.1737	0.1737	0.1737	0.1737	0.2292	0.2682	0.3148	0.3148	0.3148
宁波港	0.0139	0.0221	0.0443	0.049	0.0546	0.0772	0.0772	0.0772	0.0863	0.1019	0.1025	0.1076	0.1332	0.1607	0.2168	0.2824	0.3439	0.351	0.3639
深圳港	0.0019	0.0122	0.0122	0.047	0.0554	0.0554	0.1015	0.1465	0.1746	0.185	0.2018	0.2101	0.2397	0.3007	0.3101	0.3101	0.3191	0.3965	0.4774
广州港	0.008	0.0183	0.0207	0.0455	0.0567	0.067	0.0959	0.1097	0.1255	0.1694	0.2028	0.2228	0.2594	0.3095	0.3595	0.4131	0.4814	0.5566	0.6135
厦门港	0	0	0.0019	0.0132	0.0496	0.0702	0.0927	0.1406	0.1751	0.2035	0.2568	0.3015	0.3585	0.4006	0.4661	0.5095	0.5095	0.5847	0.6679

表 B-8 Q_a 矩阵数据

$Q_{a8 \times 19}$	Q_{a1}	Q_{a2}	Q_{a3}	Q_{a4}	Q_{a5}	Q_{a6}	Q_{a7}	Q_{a8}	Q_{a9}	Q_{a10}	Q_{a11}	Q_{a12}	Q_{a13}	Q_{a14}	Q_{a15}	Q_{a16}	Q_{a17}	Q_{a18}	Q_{a19}
大连港	0.0176	0.032	0.032	0.0612	0.0612	0.0801	0.092	0.1134	0.117	0.117	0.1256	0.1292	0.1292	0.1369	0.1498	0.2066	0.2378	0.26	0.2766
青岛港	0.0246	0.0438	0.0738	0.0985	0.1209	0.1316	0.1543	0.1773	0.2077	0.2568	0.2739	0.2903	0.3079	0.3241	0.3491	0.3594	0.3687	0.3766	0.3766
天津港	0.025	0.025	0.046	0.0808	0.1004	0.1004	0.1186	0.1367	0.1854	0.2001	0.2139	0.2139	0.2255	0.244	0.3095	0.3144	0.3144	0.3495	0.358
上海港	0	0.0206	0.0519	0.0796	0.1217	0.1383	0.1845	0.214	0.214	0.2355	0.2888	0.3437	0.4026	0.4636	0.4737	0.5002	0.5238	0.6011	0.6852
宁波港	0.0175	0.0416	0.0536	0.0836	0.1201	0.14	0.1862	0.2341	0.2737	0.3073	0.36	0.4098	0.4431	0.4766	0.486	0.486	0.4947	0.5649	0.6361
深圳港	0.0295	0.0515	0.0857	0.0857	0.1194	0.1619	0.1619	0.1648	0.1854	0.2241	0.2606	0.3073	0.3366	0.3366	0.3927	0.4583	0.5195	0.5195	0.5226
广州港	0.0234	0.0454	0.0772	0.0872	0.118	0.1503	0.1675	0.2016	0.2346	0.2397	0.2597	0.2946	0.3168	0.3278	0.3434	0.3553	0.3572	0.3594	0.3865
厦门港	0.0314	0.0637	0.096	0.1195	0.1251	0.1471	0.1707	0.1707	0.1849	0.2057	0.2057	0.2159	0.2178	0.2367	0.2367	0.2589	0.3291	0.3313	0.3321

致 谢

三年的时间转瞬即逝，我的硕士生涯已经接近尾声。校园的生活使我收获良多，其中的酸甜苦辣都沉淀成了记忆里最美的滋味。感谢陪我一起度过这段珍贵岁月的每一位敬爱的老师和亲爱的同学们，在你们的指引和激励下，我吸收到了更多知识的养分，是你们的陪伴和鼓励使我克服困难、勇往直前，是你们给我树立了信心和榜样，让我能够遇见更优秀的自己。能在最后这一年时间里，能够顺利完成论文，我要感谢的人有很多。

首先，我要特别感谢我的恩师沈江教授，在他的谆谆教诲和悉心指导之下，我的论文完成了选题、框架的修改、初稿的成型以及多次的修改。期间少走了很多弯路，这点点滴滴的进步都融入了恩师的教诲和汗水。沈教授在学识方面具备开阔的视野、渊博的学识、严谨的治学理念；在对待学生方面，有精益求精的工作作风、和蔼可亲的态度、高尚的师德情操，这些都深深地感染并激励着我，使我受益终身。

其次，我要感谢在论文写作过程中给予我帮助的同学和朋友们。感谢我的同门给予我的关心、支持和鼓励，我们一起查找资料、探讨思路、分享经验和教训，克服了许多困难和疑惑，最终完成了各自的论文。还要特别感谢黄炜学长，他在我的论文理论方面提供了重要的指导，并且在我论文的最后阶段计算过程中提供了强有力的支持。

然后，我要感谢部门的同事，在读研的这三年时间里，他们给予了我很多支持，领导对我的请假表示理解，同事在我论文写作的关键阶段帮我分担了更多的工作，感谢他们的支持和关照。

最后，我要感谢我的家人，读研期间尤其是论文写作期间，家里人无条件的支持我、包容我、照顾我，做我坚强的后盾，让我能够无所顾虑的追求自己的梦想。

在天津大学这三年的学习经历，是我人生最宝贵的财富，我不止收获了知识，更收获的友谊，感谢每一位参与我论文评审和答辩的老师，祝你们身体健康，工作顺利！