

武汉大学

本科毕业论文（设计）



地理多元流网络的可视化及专题图制作

姓 名： 臧 文 博  
学 号： 2020302131073  
专 业： 遥感科学与技术  
学 院： 遥感信息工程学院  
指导教师： 秦 昆

二〇二四年四月

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文（设计），是本人在指导教师的指导下，严格按照学校和学院有关规定完成的。除文中已经标明引用的内容外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已发表及撰写的研究成果。对本论文（设计）做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承诺在论文（设计）工作过程中没有伪造数据等行为。若在本论文（设计）中有侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

作者签名：  指导教师签名： 

日 期： 2024 年 5 月 10 日

## 版权使用授权书

本人完全了解武汉大学有权保留并向有关部门或机构送交本论文（设计）的复印件和电子版，允许本论文（设计）被查阅和借阅。本人授权武汉大学将本论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本论文（设计）。

作者签名：  指导教师签名： 

日 期： 2024 年 5 月 10 日

## 摘 要

在人类的活动中,有多种物质、能量以及信息的传递与地理位置相关,这些传递的过程就是地理流,大量和多种形态的地理流就形成了地理多元流网络。对于地理多元流网络的深入研究有助于为城市规划、环境保护、交通管理等领域带来新的研究角度。对于地理多元流网络的可视化方法研究有利于将地理多元流网络的结构特性以及多元流网络数据统计特征以一种直观的角度展现出来。

本文通过使用全球尺度的地理多元流数据进行地理多元流网络数据的存储和构建,提出自适应动态飞线算法来实现地理多元流网络结构的可视化,并对地理多元流网络的统计特征进行分析和可视化。最后结合 WebGIS 相关技术开发了地理多元流网络可视化原型系统,在系统中集成了关于地理多元流网络专题地图的制作和导出模块。

本文的主要研究工作如下:

### (1) 地理多元流数据收集与预处理

本文收集了三类地理多元流数据进行可视化分析,包括新闻媒体事件数据 GDELT、全球尺度人口迁移数据和国际贸易数据。数据本身的存储格式并不一致,本文对数据进行了数据清洗,国家三字码匹配、添加国家坐标等操作。除此之外,本文按不同的数据拟定算法,为数据赋予权值,作为后续可视化的参考量。

### (2) 地理多元流网络可视化

本文引入了自适应动态飞线算法来对地理多元流网络的结构进行可视化,本算法考虑了每条边的起始点和终点之间的距离与可视化边高度之间的关系,可以有效避免线段重叠问题,且可以很好的控制可视化的性能。同时,本文还对地理多元流网络统计数据进行可视化。

### (3) 可视化系统及专题地图制作

本文基于 WebGIS 前后端开发技术,将地理多元流数据库和地理多元流网络可视化的方法集成在一个完整的 Web 原型系统当中。本系统可以实现对地理多元流数据源、可视化类型、时间等参数的控制,借以实现地理多元流网络数据的可视化。同时,系统内集成了有关专题地图制作的模块,用户可以导出所期望的可视化数据。

**关键词:** 地理多元流;可视化;WebGIS;专题地图;网络的构建与分析

# ABSTRACT

In human activities, various substances, energies, and information are transmitted in relation to the geographical locations. These processes of transmission constitute geographical flows, and a multitude of diverse geographical flows form a geographic multiple flow(GMF) network. In-depth research on geographic multiple flow networks contributes to new perspectives in fields such as urban planning, environmental protection, and traffic management. Research on visualization methods for geographic multiple flow networks facilitates the intuitive representation of the structural characteristics and statistical features of multi-flow network data.

This paper utilizes global-scale data for storage and construction of geographic multiple flow network data. It proposes an adaptive dynamic flight line algorithm to visualize the structure of GMF networks and analyzes and visualizes the statistical features of GMF networks. Finally, it develops a prototype system for the visualization of GMF networks, integrating modules for the creation and export of thematic maps related to GMF networks using WebGIS technologies.

The main research contributions of this paper are as follows:

## **(1) Storage and pre-treatment of GMF data**

This paper collects three types of geographical multi-flow data for visualization and analysis, including GDELT news media event data, global-scale population migration data, and international trade data. The storage formats of the data are not consistent, so the paper conducts data cleaning, country three-letter code matching, addition of country coordinates, etc. Additionally, algorithms are devised to assign weights to the data according to different criteria, serving as reference values for subsequent visualization.

## **(2) Visualization of GMF networks**

This paper introduces an adaptive dynamic flight line algorithm to visualize the structure of GMF networks. The algorithm considers the relationship between the distance between the starting and ending points of each edge and the height of the visualization edge, effectively avoiding line overlap issues and controlling visualization performance. Additionally, the paper visualizes statistical data of GMF networks.

### **(3) Visualization system and thematic map creation**

Based on WebGIS frontend and backend development technologies, this paper integrates GMF databases and visualization methods into a complete Web prototype system. This system allows control over parameters such as GMF data sources, visualization types, and time, thereby achieving the visualization of GMF network data. Additionally, the system includes modules for creating thematic maps, enabling users to export desired visualization data.

**Keywords:** Geographic multiple flow(GMF); visualization; WebGIS; thematic map-making; Construction and Analysis of Networks

# 目录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
1 绪论 .....	1
1.1 选题的目的及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状和发展趋势 .....	1
1.2.1 时空数据可视化方法 .....	1
1.2.2 地理流数据可视化方法 .....	2
1.2.3 基于 Web 技术的地理多元流可视化系统 .....	3
1.3 主要研究内容与技术路线 .....	4
1.3.1 主要研究内容 .....	4
1.3.2 技术路线 .....	4
2 相关理论介绍 .....	7
2.1 地理多元流理论 .....	7
2.2 时空数据库 .....	7
2.2.1 时空数据 .....	7
2.2.2 时空数据的存储 .....	8
2.3 数据可视化理论 .....	9
2.3.1 数据可视化定义 .....	9
2.3.2 Web 可视化工具 .....	9
2.3.3 网络结构可视化方法 .....	11
2.4 WEBGIS 开发技术 .....	12
2.4.1 WebGIS 前后端架构 .....	12
2.4.2 前端开发原理 .....	13
2.4.3 后端开发原理 .....	14
3 地理多元流数据收集与预处理 .....	16
3.1 地理多元流数据 .....	16
3.1.1 新闻媒体事件数据 .....	16
3.1.2 全球尺度人口迁移数据 .....	17

3.1.3 国际贸易数据 .....	17
3.2 数据预处理 .....	18
3.2.1 数据清洗 .....	18
3.2.2 边的构建 .....	18
3.2.3 计算权值 .....	19
3.2.4 添加坐标信息 .....	20
3.3 数据存储 .....	20
<b>4 地理多元流网络可视化 .....</b>	<b>21</b>
4.1 飞线概述 .....	21
4.2 切割系数 $S$ .....	22
4.2.1 切割系数对飞线平滑度的影响 .....	22
4.2.2 切割系数对加载性能的影响 .....	23
4.3 微分线段求高算法 .....	23
4.3.1 飞线最高值 $H$ .....	23
4.3.2 微分线段求高递推公式 .....	24
4.4 飞线宽度算法 .....	25
4.4.1 权值归一化算法 .....	25
4.4.2 飞线宽度可视化 .....	25
4.5 网络的可视化 .....	26
4.5.1 网络结构可视化 .....	26
4.5.2 网络统计数据可视化 .....	27
<b>5 可视化系统构建及专题图制作 .....</b>	<b>28</b>
5.1 系统前后端总体设计 .....	28
5.1.1 系统设计总原则 .....	28
5.1.2 功能设计 .....	29
5.1.3 技术选型 .....	30
5.2 可视化控制面板 .....	31
5.2.1 地理多元流数据选择区 .....	31
5.2.2 地理多元流网络统计数据面板 .....	31

5.3 专题地图制作模块 .....	32
5.4 总体可视化效果 .....	33
5.4.1 系统主界面 .....	33
5.4.2 系统功能展示 .....	错误!未定义书签。
<b>6 总结与展望 .....</b>	<b>37</b>
6.1 总结 .....	37
6.2 展望 .....	37
<b>参考文献 .....</b>	<b>39</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>43</b>



# 1 绪论

## 1.1 选题的目的及意义

在全球范围内，国家之间通过物质、信息、能量等元素的移动和交换形成了多种复杂的“地理流”。这些流被纳入地理空间，形成了“地理流”网络。当不同类型的地理流同时存在时，它们共同构建了丰富多彩的“地理多元流”。这些流不仅存在于物理空间，如国家或地区之间的交通、贸易和人口流动，同时也延伸至虚拟空间和网络领域，包括新闻媒体反映的有关国际关系的正面或负面信息流<sup>[1]</sup>。

生活在一个数字化、信息爆炸的时代，大量地理流数据的产生给城市规划、环境保护、交通管理等领域带来了前所未有的机遇和挑战，同时，地理实体之间所形成的复杂关系难以被直观表现。所以，对于地理多元流网络的全面理解和精准可视化的探索成为本文研究的出发点。

在当前的研究背景下，虽然有一些先驱性的工作致力于地理数据尤其是时空数据的可视化和专题图制作，但多元流网络的可视化方法却鲜有涉猎。本文的目标是在已有的研究基础上，结合 Web 端工具实现对地理多元流的可视化与分析。

本文研究的意义在于，通过引入新的可视化手段，可以更清晰地解读多元流网络中蕴含的复杂关系，使决策者更具洞察力地制定城市规划和发展战略。通过解决现有研究方法的局限性，有望推动地理信息科学领域相关技术的发展。这包括但不限于在空间数据挖掘、网络可视化、图形学等方面的创新，为未来的研究和实际应用提供更可靠、实用的工具。

本文将从地理多元流数据本身的属性和特征出发，运用 Web 工具和地图符号学的基本方法实现地理多元流网络的可视化，并构建地理多元流网络可视化平台原型应用。同时，将可视化的结果分类整理，绘制有关地理多元流网络的专题地图。

## 1.2 国内外研究现状和发展趋势

### 1.2.1 时空数据可视化方法

地理多元流数据具备显著的空间属性、时间属性以及专题特征，是时空数据的一个子类，李德仁<sup>[6]</sup>等人在讨论时空大数据及其应用中指出，时空数据具有空间性、时间性、多维性、海量性及复杂性等 5 个特征，适应于时空数据的特征，

有关地理多元流可视化的过程才更有价值和意义<sup>[2]</sup>。

为准确适应地理多元流数据这一时空数据的可视化，大量先驱性的工作都指向了对制图学新的思考和创新。王家耀<sup>[3]</sup>在研究中指出时空大数据时代带来了地图学新的变化，深刻影响了地图学的时空观与方法论，并推动了地图哲学的发展，同时带来了多源异构时空大数据融合的问题。传统地图通常展示静态数据，然而，随着时空数据的复杂化，地图的设计和可视化面临了更大的挑战。时空数据不仅包含空间位置信息，还涉及到时间属性的变化，使得制图对象从静态数据转变为动态的时空数据。这转变要求地图设计与表达能够适应变化明显的时空数据，不再仅限于传统的固化模式。

在这种背景下，地图的设计不再按部就班，而是需要采用可自适应的动态模式。这意味着地图要能够有效地呈现时间属性的变化，使用特定符号进行动态表示。地理要素的符号化设计成为至关重要的一部分，它需要考虑如何清晰而准确地表达数据的时空特征。刘晓寒<sup>[4]</sup>等人从线状符号的特点出发，以视觉变量为符号设计导向，提出了线状要素符号多样化设计的思想。张翔<sup>[5]</sup>等则从信息承载量的角度进行分析，设计了一种可高效处理大量符号空间冲突的多尺度可视化方法来避免点要素的互相压盖。

总体而言，主要以特定地图符号的方法来展示时空数据的方法已经比较成熟，主流的技术已经可以满足大多数的时空数据可视化。但是地理多元流数据是以 OD<sup>[11]</sup>形式存储的，其可视化方法需要能够展现从起点到终点的方向特征。

### 1.2.2 地理流数据可视化方法

结合制图技术的创新，使用地理流的方式进行地理多元流的可视化成为了目前主流的方向，地理流是地理对象在不同空间位置间的流动，而地理流通常涵盖了物质、信息、资金、能量等的空间转移<sup>[8]</sup>。为表现出这种空间转移的特性，胡圣<sup>[6]</sup>等人创新性的提出利用基于流的地图制图方式更好的展示地理流网络的包括拓扑、专题特性等属性，使用多种 Web 工具加以实现。Tobler<sup>[7]</sup>为表示迁徙地图，构造了以箭头表示流向的地图来表示地理流，并利用颜色或者宽度来表示迁徙的强度。Kong<sup>[10]</sup>将热力图与地理流进行了结合，基于热力图的基本原理，在地图上根据行政区填充颜色，设置颜色梯度来衡量行政区之间的交互程度，其局限性在于只能反应一对多的行政区域交互情况。

针对地理流数据的可视化的首要任务，是理解并揭示其中的模式<sup>[8]</sup>，包括：①用于衡量流的相关性指标，如流的 Moran'sI 统计量<sup>[12]</sup>，Getis-Ord Gi 统计量<sup>[13]</sup>等，②关于流模式的识别<sup>[8]</sup>，目前的研究现状在这一模式的揭示以丛聚模式的提取为主，包括层次聚类法和基于密度的聚类方法等<sup>[14-17]</sup>。

所以，针对地理流的可视化过程要从其表象即 OD 形式出发，运用不同的可视化方法展示其的起点、终点。除此之外，为了更深刻的揭示地理流的结构和属性，还需要对地理流的模式进行精确分析和可视化。

### 1.2.3 基于 Web 技术的地理多元流可视化系统

Roger Tomlinson 的 GIS 软件开发标志着地理信息系统的发展从纸质地图到计算机二维可视化<sup>[19]</sup>，使得城市规划、交通管理和应急管理等领域能够受益于可视化辅助决策服务。至今，二维可视化平台在多个领域持续发挥着重要作用。

Web 技术的兴起影响着 GIS 领域以及数据可视化领域，尤其近年来基于 WebGL 的三维可视化框架表现出良好的交互能力，吸引着众多浏览器厂商开始支持 WebGL 标准。截至目前，全球的主流浏览器都已经支持 WebGL 标准下的 3D 技术，轻量级的展示方式及定制化的功能受到了用户的追捧<sup>[18]</sup>。基于此框架，一系列的 Web 端地理信息可视化平台出现在人们的视野中，其中的翘楚是谷歌的 Google Earth，它是谷歌在 2005 年推出的一款虚拟地球引擎，是目前知名度很高、应用广泛的三维平台。Google Earth 不仅仅集成了海量的高精度影像数据，还展示了海量的倾斜摄影测量模型及 BIM 数据<sup>[20]</sup>。

国内也拥有优秀的三维空间地理信息可视化平台，如武大的产品 GeoGlobe 以及超图公司的 SuperMap 平台，其中 GeoGlobe 是武汉大学积极响应国家测绘科技委员会提出的“国家地理信息公共服务平台”建设工程所打造的信息可视化平台，具有自己的知识产权，超图的 SuperMap 则实现了二三维一体化展示，不仅具有强大的 GIS 功能，其对数据的展示效果也是行业顶尖水平。

基于蓬勃发展的开放平台和 Web 端技术，国内外众多研究者已经推出了很多种基于 Web 的地理信息可视化系统，包括张彧<sup>[21]</sup>基于 Cesium 平台的导航卫星轨道模拟与可视化系统的搭建，高云成<sup>[22]</sup>利用 WebGIS 技术实现的三维可视化客户端技术等。

总而言之，基于 Web 技术的地理信息可视化系统已经非常成熟，地理多元

流的可视化操作可以基于已有的如 Cesium.js 等可视化库来设计，同时结合 Web 应用的交互逻辑和特点添加功能模块。

### 1.3 主要研究内容与技术路线

#### 1.3.1 主要研究内容

本文的主要研究内容包括以下四个方面：

##### (1)地理多元流数据预处理

本文收集并整理了三种类型的数据，包括全球尺度的人口移动数据、国际贸易数据和新闻媒体事件数据。所有数据统一整理为起点国家、终点国家、权值（边强度）、时间（以年计），同时，为体现多元流网络中节点本身的特性，将节点信息单独存储。

##### (2)地理多元流网络数据可视化

地理多元流数据本身的特征，包括起点国家位置、终点国家位置数据及其时间属性和专题属性数据，采用多种可视化方法绘制地理多元流网络。

##### (3)地理多元流数据网络专题地图制作

专题地图能够以更为专业化且更为完善地表示与主题相关的一种或几种要素。本文将基于地理多元流网络数据的可视化结果，绘制地理多元流网络相关专题地图，进一步探索地理多元流数据网络中存在的多种专题特征并加以分析和探讨。

##### (4)WebGIS 应用程序开发

结合关于 Web 开发的前后端技术以及 GIS 在 Web 端的各类应用，本文将可视化、专题地图制作等模块进行融合，共同构建出一个完成的 WebGIS 原型系统。

#### 1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1.1 所示。

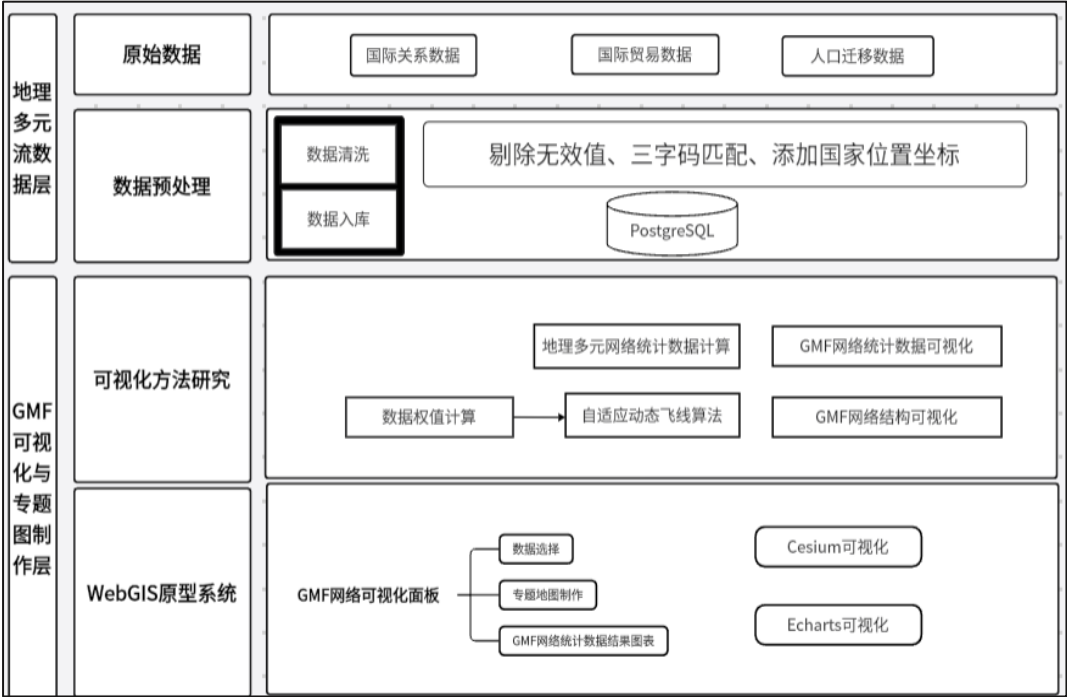


图 1.1 技术路线

图 1.1 所示的技术路线具体说明如下：

(1) 数据收集与预处理

从信息来源处获取数据，这包括：①国际关系数据，这来源于国际新闻媒体数据 GDELT，GDELT（Global Database of Events, Language, and Tone）是一个包含全球新闻事件的数据库。它从各种新闻源中提取信息，包括在线新闻、印刷媒体和广播，然后通过自然语言处理技术对这些事件进行编码。②国际贸易数据，来源于联合国国际农业贸易数据，其数据包括产生贸易往来的国家，贸易规模以及时间等。③人口迁移数据，来源于联合国 2015 年国际人口流动数据，包括人口流动的方向，流出、入国家。

(2) 数据预处理

首先检查并提出数据中错误的成分，包括错误的国家名称，不合理的贸易情况等，并按照国家位置赋予坐标信息。提取三类数据当中相同的字段，即国家名称、时间等，然后为数据按照原始的规模值赋权重，最终将三类数据的形式转换成相似的结构。

(3) 可视化方法研究

对结构化后的数据进行可视化操作，主要利用 Web 端工具，包括：①Cesium 三维地球可视化库，其提供世界范围的地图，并以三维的形式展示所可视化的国

家位置，并修改其内置的地图箭头符号来可视化每一条地理流。②Echarts 图表，用以展示对地理多元流网络的测度分析结果，包括度中心性、节点强度排序等。

#### **(4) 系统设计与实现**

采用 Web 应用的基本框架和结构来实现地理多元流可视化原型系统的构建。包括基于 Ant Design 的地理多元流可视化控制面板以及专题地图展示模组。

## 2 相关理论介绍

本文围绕地理多元流数据特点及其的可视化原理展开，相关理论部分包括地理多元流的定义，地理多元流数据的存储和地理多元流数据的可视化原理等。

### 2.1 地理多元流理论

本文的研究基于地理多元流数据的特性来开展。地理多元流理论探讨了地理实体在不同地点之间的流动现象，这种流动涉及物质、信息、资金和能量的空间转移(秦昆, 2022)。该理论对于理解地理分布及其背后的动力机制提供了新视角。在全球层面，它能够帮助分析人口迁移、国际交流等问题，通过构建基于多源数据的地理多元流网络，来研究网络的测度、结构、演化和关联性。地理多元流理论为揭示自然界和社会中的规律以及人类活动的模式提供了框架，对跨学科研究问题的理解和解决具有极大的价值。

流可以用 OD 模型进行表达，即流是从 O 点指向 D 点的向量，同时，为了表达流具有的特定属性信息，可以使用有序点对的多元组来表达流的状态。令 O, D 两点分别为流的起点和终点，则流 F 可以被表示为：

$$((X_o, Y_o, Z_o, T_o), (X_D, Y_D, Z_D, T_D), s) \quad (2.1)$$

2.1 式中， $(X_o, Y_o, Z_o, T_o)$  为 O 点的时空坐标， $(X_D, Y_D, Z_D, T_D)$  为 D 点的时空坐标。对于坐标的定义来说， $(X_i, Y_i, Z_i)$  是点的空间三维坐标， $T_i$  是流从起点开始的时间。 $s$  为流的属性，它包含着流的类型，状态等特性，也可以表达为两个地理对象之间的信息传递，物质和能量交换的属性。以这样的 OD 流作为基本元素的空间，就形成了流空间（裴韬等，2020）。

### 2.2 时空数据库

时空数据库通常是指一种计算机数据库系统，它专门用于处理与时间和空间相关的数据。这种数据库系统能够有效地存储、管理和查询具有时空属性的数据，比如地理位置数据、时间序列数据、历史记录等。时空数据库通常需要支持复杂的查询操作，例如空间范围查询、时间范围查询、时空关系查询等。

#### 2.2.1 时空数据

地球上的各类自然现象与经济活动等都有着地理空间的分布特性，而这些不同的地理分布又随时间的变化而发生改变，这样的现象或者活动就可以被记录

为时空数据，时空数据是时空变量的一次或有限次观测值(王劲峰等，2014)，时空数据总体而言有 3 个特征。

### **(1)空间与空间关系特征**

在对时空数据的定义中，每个时空数据对象都有空间属性，主要表现在其拥有空间坐标，这些坐标包含着地理对象的空间分布关系。同时，这些空间坐标等数据中记录的信息又表达了多种拓扑空间关系(龚健雅，2001)。这些空间拓扑关系使得空间查询和空间分析成为可能。

### **(2)时间特征**

时空数据除了记录了空间坐标与拓扑关系之外，还记录了地理对象的时间属性。时空数据中的时间属性对于理解和分析地理现象的动态变化至关重要。时间属性允许研究者追踪和分析对象或事件在时间维度上的变化，从而提供了深入理解过去、预测未来以及识别模式和趋势的能力。具体来说，时间属性的作用包括：  
历史分析：通过时间属性，可以回溯并分析地理对象的历史状态和变化；趋势预测：时间属性有助于识别数据中的趋势，从而预测未来可能的发展；事件关联：时间属性使得可以分析不同事件之间的时间关系和因果关系；动态模拟：时间属性是进行地理现象动态模拟和可视化的关键。

### **(3)专题属性特征**

时空数据中的专题属性特征通常指的是与地理实体相关的描述性信息，这些信息可以是定量的也可以是定性的。专题属性特征为地理实体提供了额外的语义信息，有助于理解实体的性质、功能或状态。

流数据就是时空数据的一种，所以为管理流数据，就要建立时空数据库管理系统，对地理多元流数据进行管理。

## **2.2.2 时空数据的存储**

时空数据有专门的数据库来存储，即时空数据库。时空数据库是结合了空间数据库和时间数据库的产物，除空间数据库对空间位置的存储和表达外，重要的因素在于加入对时间的存储表达(唐新明,1999)。也就是说，时空数据库的重点在于以下几个部分：

### **(1)时间的表示结构**

一般时间是以两种状态表达的，即离散的表达和连续的表达，事实上，大部



分的时空数据库用以表示时间的方式都是基于离散的时刻来表示的。

## (2)事件及状态

事件和状态的定义需要同时出现，定义一个空间对象在其的运动周期里有不同的状态，而事件就是两个不同状态发生改变时的过程。事件和状态之间的关系如图 2.1 表示：

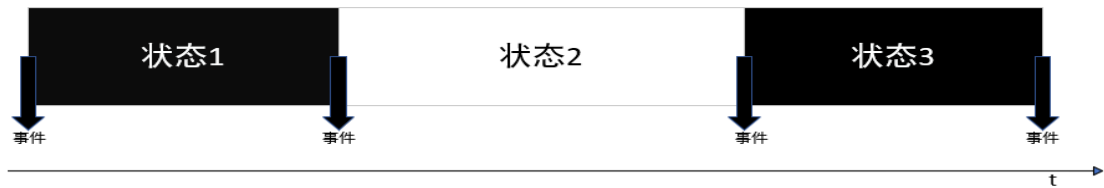


图 2.1 状态与事件之间的关系

## 2.3 数据可视化理论

本文研究地理多元流数据的可视化，而这也是地理多元流可视化平台系统建立的基础。

### 2.3.1 数据可视化定义

数据的可视化事实上就是对抽象数据利用不同的计算机表示方法进行展示，目的在于增强观察者对于数据的认识。人们对于知识的理解有其独特性(Paivio, 1986)，即同时以视觉形式和语言的形式呈现出的信息会更容易增强人们的识别和记忆。所以，对于知识的符号化表达和语言补充就成为了数据可视化的核心。数据可视化的一般包括数据映射、数据可视化手段选择和交互界面设计三个部分对于原始数据而言，在对数据进行可视化操作之前，必须要进行数据的一般处理，即数据清洗，数据合并，数据入库等操作。处理好后的数据可以视情况选择可视化的方法，现阶段可视化手段层出不穷，包括但不限于词云、动态交互式图表、交互式三维地图等。最后，将多种可视化方法集成在一起，建立数据可视化平台系统，添加对数据可视化的交互操作。

### 2.3.2 Web 可视化工具

本文基于 Web 前端的各类可视化工具进行可视化。随着互联网技术的快速发展和终端设备的日益增多，各类 Web 端可视化工具的性能强大，功能丰富，设计美观，交互优雅。本文主要用到了以下两个数据可视化平台。

## (1)Echarts 图表工具

Echarts 是一个开源的数据可视化库，最早由百度使用 JavaScript 构建，现由开源组织 Apache 维护。它拥有多样化的图表类型和强大的交互功能，用户可以轻松配置来创建多种图形，其核心依赖于 ZRender 矢量图形库。其优点主要有以下几条。

丰富的可视化类型：支持折线图、柱状图、散点图、饼图、K 线图等多种图表类型。

多种数据格式：无需转换即可直接使用，如二维表、key-value 等。

千万数据的前端展现：通过增量渲染技术，能够展现千万级的数据量。

移动端优化：针对移动端交互进行了优化，支持手指缩放、平移等操作。

多渲染方案：支持 Canvas、SVG、VML 等多种形式渲染图表。

深度的交互式数据探索：提供图例、视觉映射、数据区域缩放等交互组件。

多维数据支持：加强了对多维数据的支持，配合视觉映射组件提供丰富的视觉编码。

动态数据：由数据驱动，数据的改变会驱动图表展现的改变。

绚丽的特效：为线数据、点数据等提供吸引眼球的特效。

## (2)Cesium

Cesium 是一个开源的三维地理信息开发工具，利用 WebGL 技术实现了多种数据格式的可视化展示。作为一个兼容多平台和多浏览器的 JavaScript 库，Cesium 能够在各种浏览器和移动设备上呈现三维地球模型、地图以及其他地理信息数据。其作为三维地理可视化工具的优点也很突出，主要包括以下几点。

强大的数据可视化能力：支持多种数据格式，如影像数据、地形数据、矢量数据、三维模型和三维瓦片等。

动态数据展示：支持基于时间轴的动态流式数据展示。

丰富的工具和 API：提供三种地图模式（三维、二维、2.5D 哥伦布视图），以及多种几何图形和高亮区域的绘制能力。

高性能：利用 WebGL 进行 GPU 硬件加速图形渲染，优化性能。

开源许可：基于 Apache 2.0 许可，可用于商业和非商业用途。

社区支持：拥有活跃的社区，提供文档、教程和代码示例等资源。

### 2.3.3 网络结构可视化方法

网络是用来表示实体之间的连接关系的一种结构，实体本身会被表示为节点，实体之间的关系就形成边。网络数据的应用面非常广泛，可以帮助研究人员详细了解一个系统当中的结构、行为和动态。网络可视化方法是利用图形将网络结构表示出来，使得网络的拓扑关系、结构关系等能够直观的展现出来。在网络可视化的过程中，节点往往被表示为一个圆形、矩形或三维图形等，而边会被表示为曲线或直线。网络可视化的核心工作就是展示出网络节点、边的布局，下面介绍几个常见的展示网络布局的可视化方法。

#### (1)力导引布局

力导引布局网络可视化的基本原理是将网络整体看作一个物理系统，在这个系统当中，每个节点被视作一个小刚环，每条边被视作一个弹簧，在物理系统的作用下，系统会自发的向能量最低的方向运动，那么这个能量最低的最终状态就是这个网络的可视化结果。

需要注意的是，计算系统能量最小值的过程是非常复杂的，因为这个假想物理系统中，弹簧的弹力难以被确定，这个弹力也不一定会遵循胡克定律(孙扬等，2010)，目前比较好的关于弹簧之间斥力的算法模型是由 Fruchterman 和 Reingold 提出的 FR 算法<sup>[54]</sup>，在 FR 算法中，斥力的计算公式为：

$$f_r = \frac{k^2}{d}(2k - d) \quad (2.2)$$

2.2 式中， $k$ 表示节点周围空白空间的半径， $d$ 表示节点之间的距离， $f_r$ 就代表着斥力的大小。

#### (2)地图布局

地图布局网络结构可视化是以一副地图作为背景，跟据网络节点的实际地理坐标布局在背景图上，并在节点之间绘制连边的一种网络可视化布局方法。这种网络可视化布局方法非常符合人的直觉和思维，且应用面极广，可展示出与地理位置相关的网络结构。

#### (3)圆形布局

该方法的核心思想就是将一个节点放置在圆心位置上，一般是优先度最高的节点，将其余的各个节点排列在同心圆的圆周除，使得整个网络结构呈现放射状

的分布结构。这种布局的好处就是可以体现出节点间的层次关系，可以将强度更大的节点优先放置在接近圆心的位置上。

#### (4)相对空间布局

在进行网络结构可视化时，相对空间布局方法需要设定节点或节点的集合作为一个参照体，其余结点的可视化位置是根据与参照体之间的关系来计算的。这个参照体的选择方法可以由多种因素确定，例如节点强度排名等，也可以由用户自行确定，用户可以将自己最为感兴趣的节点作为参照体。

#### (5)聚类布局

网络结构的聚类分布考虑了节点间的属性关系，通过某些自定义的算法将网络节点进行聚类分组。聚类后的节点组合可以分布在同一个平面内，利用不同的颜色区分，也可以布置在不同的平面上，使其呈现空间分层的特征。

## 2.4 WebGIS 开发技术

本文的研究是基于一个完整的 WebGIS 应用完成的，为实现完整的数据处理、可视化和交互功能，需要借助 Web 前端和后端的开发，并将二者结合在一起。

### 2.4.1 WebGIS 前后端架构

Web 前端技术最初诞生于 1990 年代初，随着 WWW 和浏览器的出现，Web 前端技术开始萌芽；世纪之交，浏览器战争促进了 HTML、CSS 和 Javascript 标准的发展，而这成为 Web 前端 开发技术最核心的部分，直到 2005 年前后，三者的标准最终确定下来。2006 年至 2016 年 jQuery 技术的发布简化了 DOM 事件处理和操作的逻辑，前端应用也是从此刻开始开始变得丰富起来，越来越多的交互和操作成为可能，现在，前端开发迎来了一个全新的局面，Angular、Vue、React 等成熟的现代前端框架的出现，前端开发进入了组件化和声明式 UI 的全新时代，前端应用的丰富和复杂程度已经在很多领域成为应用程序的主流。

Web 后端技术是 Web 应用中在服务器上运行的部分，负责处理应用的核心业务逻辑、数据库交互和 API 管理。适应于 Web 前端的发展，Web 后端的发展也经历了从静态数据处理到动态页面技术乃至前后端大融合的全栈时代。

而 WebGIS 应用是 Web 技术的一个具体应用扩展，简而言之就是在 Web 应用里加入支持 GIS 功能的模块(黄佛辉，2017)。WebGIS 应用具备 Web 应用的基本结构，与一般的 Web 应用不同的是，WebGIS 应用一般有一个单独的 GIS 服务处理器，用来处理复杂的 GIS 任务。具体过程是 Web 前端向由后端控制的 Web 服务器发送 HTTP 请求，有关 GIS 应用的功能经过简单的逻辑处理会被打包发送给 GIS 处理服务器，这个服务器往往有自身独立的数据库系统连接，用来存储 GIS 的非结构化数据，数据被处理完后，通过响应返回在 Web 前端显示，其工作的基本架构如图 2.2 所示。

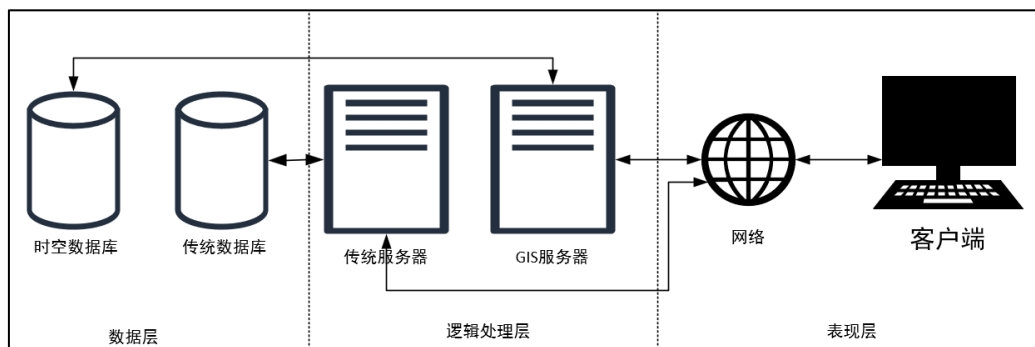


图 2.2 WebGIS 工作基本流程

#### 2.4.2 前端开发原理

前端开发通常指的是网站或 Web 应用程序的前端部分的开发工作。这包括构建用户界面(UI)和用户体验(UX)，以及与用户直接交互的所有功能和元素。前端开发的目的是创建一个直观、易于使用和具有吸引力的用户界面，同时确保应用程序在不同的设备和浏览器上都能正常运行。前端开发的原理涵盖了许多方面，目前常见的前端构架为 MVVM(Model-View-ViewModel)，其核心概念是数据绑定，它使得视图和视图模型之间的数据同步变得自动化。当模型中的数据发生变化时，视图模型会自动更新视图中的数据，反之亦然。这种数据绑定机制简化了开发过程，减少了手动处理数据同步的工作量，提高了代码的可维护性和可扩展性。在现代开发中，多种框架和库都提供了 MVVM 架构的实现，React 就是其中一种，其最早由 Facebook 开发，后于 2013 年开源。

React 的核心是组件化和声明式编程，这是对 MVVM 架构的继承和扩展。React 最为突出的特点就是其响应方式，首先，React 引入了虚拟 DOM 的渲染方式，其基本原理就是允许 React 充分调用终端设备的内存存储和计算组件的变化，同时，如果组件的状态发生改变，存储在内存中的虚拟 DOM 就会与上一次的虚

拟 DOM 进行比较，并且只更新发生改变的组件，显著提高了前端组件的更新效率，很多复杂的动画和交互得以实现。React 还引入组件生命周期的概念，这些生命周期的概念依靠多种方法实现，如 `componentDidMount`、`componentDidUpdate` 等。这些不同的方法在组件需要响应的不同时期被调用，这样开发者就可以控制更多有关渲染的特定操作。对于 React 应用来说，触发上述虚拟 DOM 渲染的方式主要有两种，一种是组件的状态(state)发生改变，一种是组件的属性(props)发生改变，具体的 React 工作流程如图 2.3 所示。

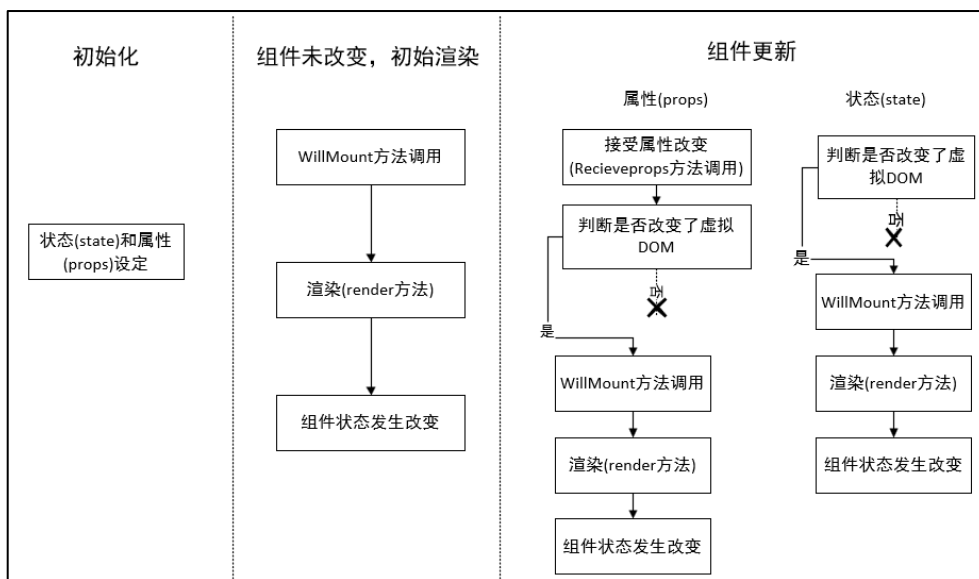


图 2.3 React 的 MVVM 式响应流程

### 2.4.3 后端开发原理

与前端侧重可视化手段不同，Web 后台开发的重点是对数据的管理，这包括对数据的存储、访问、业务处理等，这些过程往往是对用户不可见的。目前，后台开发工具和技术非常多，最常用的包括基于 Java 语言的 Spring Boot 以及基于 Python 的 Django 框架，其内置了多种功能，可以适应于快速开发过程。常用的框架还有基于 Python 的 Flask 框架，这个框架极为轻量化，它可以被用于小型项目或者是微服务当中。层出不穷的 Web 后台开发技术的核心思想比较固定，也就是 Web MVC 思想。MVC 架构的示意如图 2.4 所示。

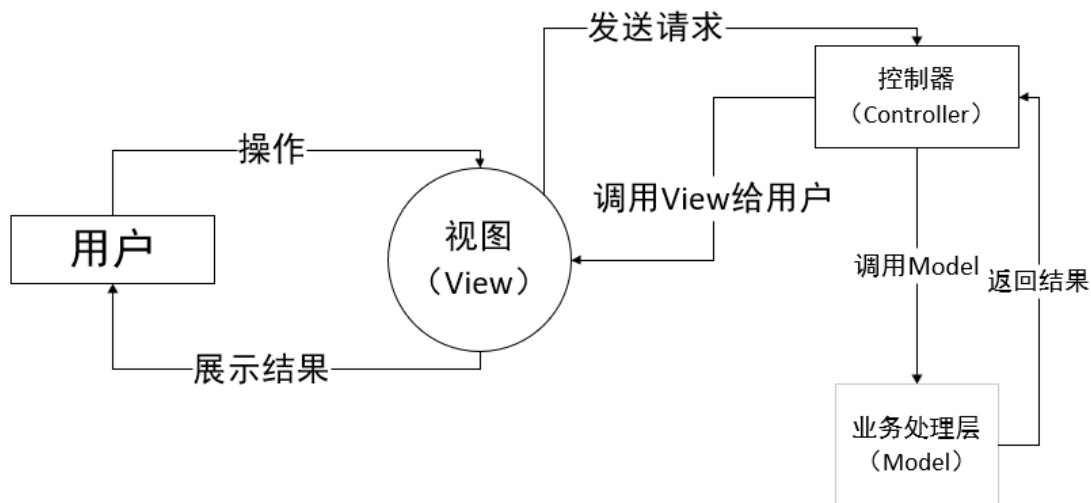


图 2.4 MVC 架构示意

所谓 MVC 架构，即是模型（Model）、视图（View）、控制器（Controller）三者相互协作，以期实现业务逻辑，界面显示过程和数据本身的相互分离。

Web 后台开发的架构也经历了一个过程，每个阶段都有其特点和技术挑战。其发展过程主要可以总结为以下三个阶段。

单体结构阶段：所有功能集中在一个项目中，适用于小型网站和管理系统。其优点是部署简单，易于使用，缺点也显而易见，所有的功能完全集中固定性能扩展困难，协同开发和升级维护具有挑战。

面向服务的分布式结构（SOA）阶段：服务动态注册和发现，并使用统一的服务调度和管理中心，其优点在于服务的管理非常集中，且方便进行维护、修改或二次开发。

微服务架构阶段：可以看作对 SOA 的深化，即将服务粒度进一步细化，在项目内部几乎做到每个功能对应一个专门的项目。其缺点在于大量的服务会造成建立通信的过程较为繁杂。

这些阶段反映了后台架构为了适应不断增长的用户需求、业务复杂性和技术创新而进行的演变。从最初的单一应用架构到现代的微服务架构，每一步都是为了更好地解决特定时期的技术和业务问题。随着云计算和容器技术的兴起，后台架构的发展仍在继续，以支持更加动态和可扩展的 Web 应用程序

### 3 地理多元流数据收集与预处理

本文选用三类地理多元流数据进行可视化分析，包括新闻媒体事件数据 GDELT、全球尺度人口迁移数据和国际贸易数据。为实现可视化，本文将这三类数据进行数据清洗、整理和入库的操作。

#### 3.1 地理多元流数据

##### 3.1.1 新闻媒体事件数据

新闻事件数据来自全球事件、语言、语调数据库 GDELT (Global Database of Event, Language, Tone)，该项目由谷歌支持，时刻搜集世界各国超过 100 种语言的广播、刊印和网络新闻报道。GDELT 收集和记录全球各种事件的数据，这些事件可以涵盖政治、社会、经济、冲突等多个领域。每个事件都有详细的事件编码、时间戳、地点、参与方等信息，以便研究人员进行分析。GDELT 还提供了有关事件中涉及的各种实体（如人物、组织、地点等）的信息。

GDELT 数据库存储样式如表 3.1 所示：

表 3.1 GDELT 新闻媒体数据

属性	说明
Actor1CountryCode	新闻事件国家 1（三字码）
Actor2CountryCode	新闻事件国家 2（三字码）
QuadClass	事件性质的分类
GoldsteinScale	事件的影响力数据，取值在-10 至 +10 之间，用来表述事件对事件主体的影响
NumMentions	事件在全部数据里被提及的次数
NumSources	事件的新闻来源数量
NumArticles	事件的新闻数量
AvgTone	表明数据是消极的还是积极的，取值分为在-100（非常消极）至 +100（非常积极）



### 3.1.2 全球尺度人口迁移数据

全球尺度的人口移动数据来自 Abel 等于 2019 年发表在一篇发表在 Nature Scientific Data 上的文章，数据是根据世界各国移民存量的计算和估计所得。覆盖 200 个国家，从 1990 年开始，每五年计算为这些国家两两之间估算一个移民流量。作者将所有的计算结果数据共享在了互联网上，共后续学者研究使用。

数据详细记录了九个字段的值，如表 3.2 所示：

表 3.2 全球尺度人口迁移数据

字段	说明
year0	5 年时段的头年
orig	出发国三字码
dest	到达国三字码
sd_drop_neg	值差异，降低负值
sd_rev_neg	值差异，反向负值逆流
mig_rate	迁移率
da_min_open	人口数量统计开放核算体系）
da_min_closed	人口数量统计(封闭核算体系）
da_pb_closed	人口统计的贝叶斯平均值（封闭的核算体系）

### 3.1.3 国际贸易数据

国际贸易数据来自联合国商品贸易统计数据库<sup>[53]</sup>，其是由联合国统计署创建的全球最大、最权威的国际商品/服务贸易数据库，超过 200 个国家和地区向联合国统计署提供其官方年度贸易数据。该数据库涵盖全球 99% 的商品交易，收集超过 6000 种商品的数据，并且数据回溯至 1962 年。各国上报的数据均转换成统一格式，这些数据真实反映了国际商品流动趋势。

由于该数据库具有非常大的自由筛选性，从数据获取之初本文就对数据进行了筛选，本次实验使用从 2015 年到 2019 年的国际农业贸易进出口数据。

主要的字段如表 3.3 所示：

表 3.3 国际进出口贸易数据

字段	说明
reporterISO	出口国三字码
partnerISO	进口国三字码
fobvalue	离岸价（美元计）

## 3.2 数据预处理

由于上述获取的数据所提供的信息非常丰富，而很多数据在可视化过程中并不是必要的，而同时还可能需要对数据添加一些必要的属性，故需要对原始获取的数据进行预处理。

### 3.2.1 数据清洗

获取的信息中，有个别国家的三字码或者国名不对应，而有些三字码本身又不被国际所认可，为解决这些问题，需要借助一个世界标准三字码国名对照表进行矫正。该表包含 `code2`、`code3`、`en_name`、`ch_name` 四个字段。`code2` 是国际标准二字码，`code3` 是国际标准三字码，`en_name` 代表该国家的英文名称，`ch_name` 代表该国家的中文名称。按照对照表当中的数据，利用 `pandas` 库编写程序进行修改，剔除不被联合国认可的国家，并按照国际标准将国家与其正确的三字码对应起来。

### 3.2.2 边的构建

本次实验使用的三类原始数据以不同的方式存储，如果需要建立地理多元流网络，则需要按照原始数据所包括的信息建立连边，不同的数据建立连边的方法如下所示。

#### (1)GDELT 国际新闻媒体数据

本数据的内容主要是两个国家之间发生的新闻事件情况，当数据中出现任意两国之间的信息，就认为这二者之间存在连边，在数据库当中记录这一条数据的信息。

#### (2)全球尺度人口迁移数据

本数据介绍了人口迁移的情况，如果两个国家之间的人口迁移率为 0，那么就不认为两国之间存在连边，反之就在数据库当中记录这一条数据。

### (3)国际贸易数据

本数据的内容是国际贸易额数据，由于数据源的特殊性，即下载数据时不会将贸易额为 0 的数据获取到，则该数据当中的所有内容均可被记录在数据库中。

#### 3.2.3 计算权值

本实验所用的数据可以准确的反应信息或物质流动的数值，这在统计分析中非常重要，可以从微观的角度分析其蕴含的原理。但是从宏观的角度看待这些数据，数据之间的极差非常大，比如大国之间的贸易额惊人，有时可以达到千亿美元的水平，但是小国之间的贸易在很多层面上甚至是 0，而同类型的数据可能会有多个属性用来表现一件事物的不同侧面，例如在人口迁徙数据当中，一个国家的迁移率可以用来反应这个国家的移民情况，而人口数量统计也可以反应这个国家的移民情况，二者之间的区别就是前者考虑了总人口，而后者没有。所以，本文引入一个自己计算或确定的权值作为度量这个地理流强弱的唯一参数，下面介绍每一组数据关于权值的计算或确定方法。

#### (1)GDELT 国际新闻媒体数据

本数据权值计算的基本思想是两国之间积极新闻的数量。本数据的每一条目都包含两个国家，即每一条新闻事件就有两个国家参与，本文筛选出所有数据当中，新闻事件国家相同的数据，并判断其 AvgTone 字段的值，如果此值大于 50，则认为这一条数据是积极的，将该边的权值加一，最后统计出这两个国家之间产生的新闻事件流的权值。基本计算过程如图 3.1 所示。

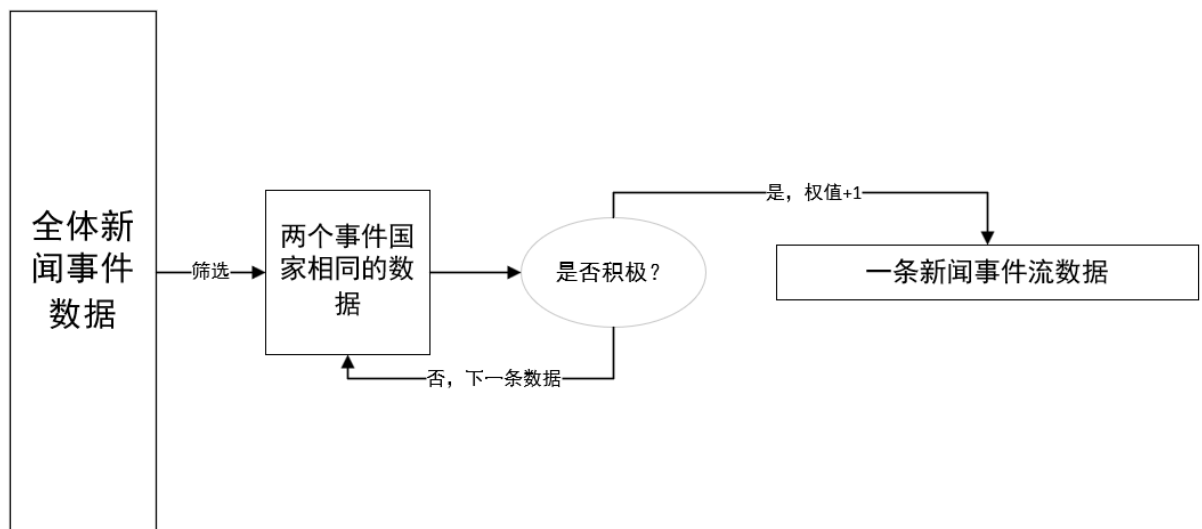


图 3.1 新闻事件数据权值计算流程

## (2)全球尺度人口迁移数据

本数据直接指定迁出率这一字段作为权值。

## (3)国际贸易数据

本数据直接指定以美元计的离岸价格作为权值。

### 3.2.4 添加坐标信息

本次实验使用的数据均不包含空间属性，需要按照国家为其赋予所在国地理坐标，本文查询了所有国家的首都坐标，按照经纬度坐标添加原始数据当中。本文所使用的数据均是两个国家之间发生的信息或物质流动的记录，例如贸易数据，包含出口国家和进口国家，为数据添加空间属性的具体做法就是在每条原始数据之后新开四个字段，包括出口国家的经、纬度坐标以及进口国家的经纬度坐标。这些坐标数据存储在上文提到的国际标准国家三字码对照表中，并按照三字码匹配国家。

## 3.3 数据存储

对所有三类数据进行预处理之后，就得到了本次实验直接可用的地理多元流数据。在进行预处理之后，三类数据主要包含的字段如表 3.4 所示。

表 3.4 地理多元流数据存储字段

字段	说明
data_id	字段索引值（主码）
actor1_en	事件国家 1 三字码
actor1_ch	事件国家 1 中文名
actor1_lng	事件国家 1 经度
actor1_lat	事件国家 1 纬度
actor2_en	事件国家 2 三字码
actor2_ch	事件国家 2 中文名
actor2_lng	事件国家 2 经度
actor2_lat	事件国家 2 纬度
value	权值
year	事件年份

## 4 地理多元流网络可视化

地理多元流数据可视化可以被视作网络的可视化过程，即这样的可视化应该存在端点和连边，同时每个边也有权值，本文对于地理多元流可视化就是基于此展开的。另外，为实现更高级的可视化效果，本文引入了自适应动态飞线算法来对这样的网络视图进行可视化，本算法可以有效避免线段重叠问题，且可以很好的控制可视化的性能。自适应动态飞线算法考虑了每条边的起始点和终点之间的距离与可视化边高度之间的关系。

### 4.1 飞线概述

本文基于 Cesium 来实现地理多元流的可视化，Cesium 本身提供非常丰富的工具库，可以实现在三维地图上添加三维实体，这个实体本身可以进行自定义。本文的可视化就是基于 Cesium 自带的直线实体进行的，如果确定了直线起点和终点的三维位置，就可以在地图上将它显示出来。同时，直线也可以拥有宽度，如果其宽度不为 0，则在三维的地图视图界面上就可以显示为一个矩形或三维直线。在 Cesium 中的三维直线如图 4.1 所示。

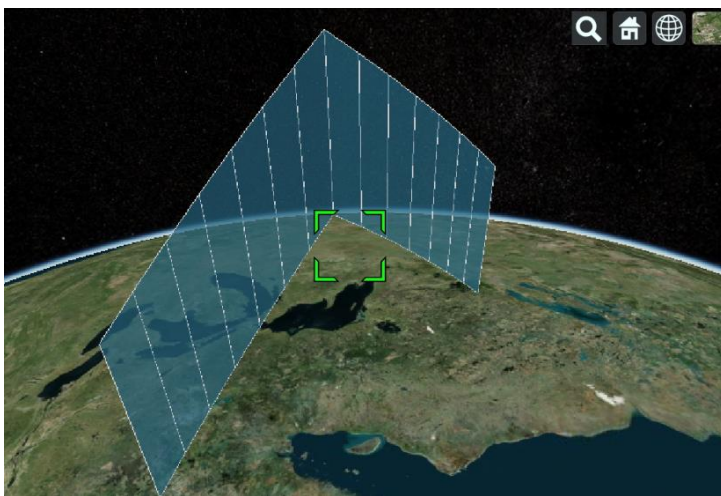


图 4.1 Cesium 绘制矩形（三维直线）

借助微积分的思想，当三维直线足够短时，就可以看作是一个曲线的一小部分，将很多个这样足够短的三维直线积分在一起，从微观上讲会形成一个折线段，但是如果放在宏观的尺度下，就会成为一条曲线。

本文旨在可视化从一个起点国家到终点国家的地理流，基本思想是找到一组优雅的曲线，将起点和终点连接起来，并保证每一条曲线不会重叠又在线的形态上有所区别。所以，本文实现地理多元流可视化的基本思想就是绘制这样一条曲

线，即飞线。基本思想就是通过绘制大量小型的直线段并拼接起来。

## 4.2 切割系数 $S$

上文提到，本实验绘制曲线的本质是大量小直线段的积分，那么这里引入一个值——切割系数  $S$ ，它代表着飞线被分为的段数。将飞线切割并积分的好处主要在于可以平衡飞线的平滑度与可视化平台的性能瓶颈。如果增大  $S$  的值，也就是将曲线微分的更为细致，这样就会在很高的缩放级别下仍看不到曲线的锯齿，保证了飞线的平滑度，如果减小  $S$  的值，就可以绘制更少的直线段，减轻可视化平台的内存、处理器、显卡和网络带宽的负担，提高运行效率。

### 4.2.1 切割系数对飞线平滑度的影响

图 4.2 和 4.3 对比了  $S$  的不同取值下飞线平滑效果。

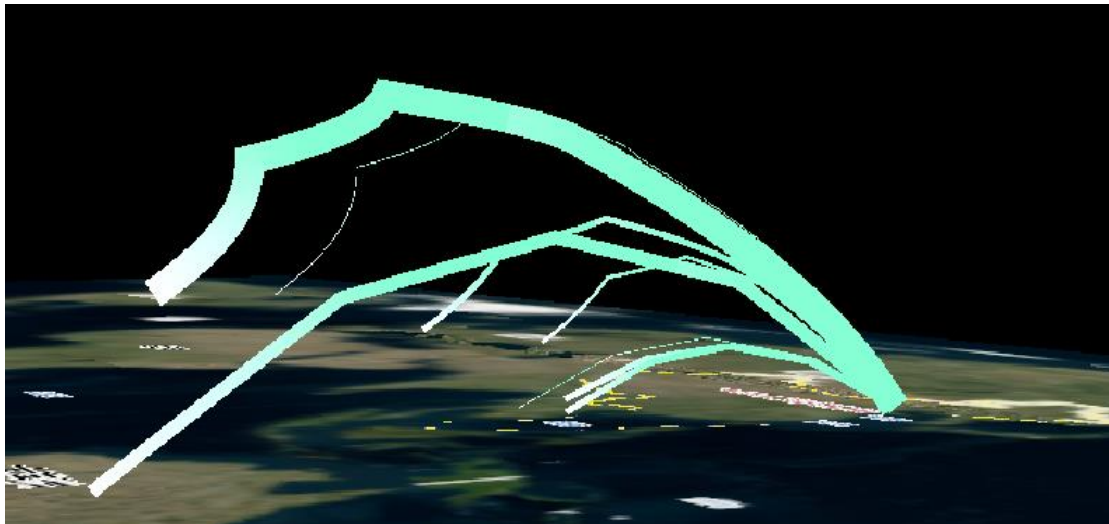


图 4.2 当  $S$  取 4 时的可视化曲线

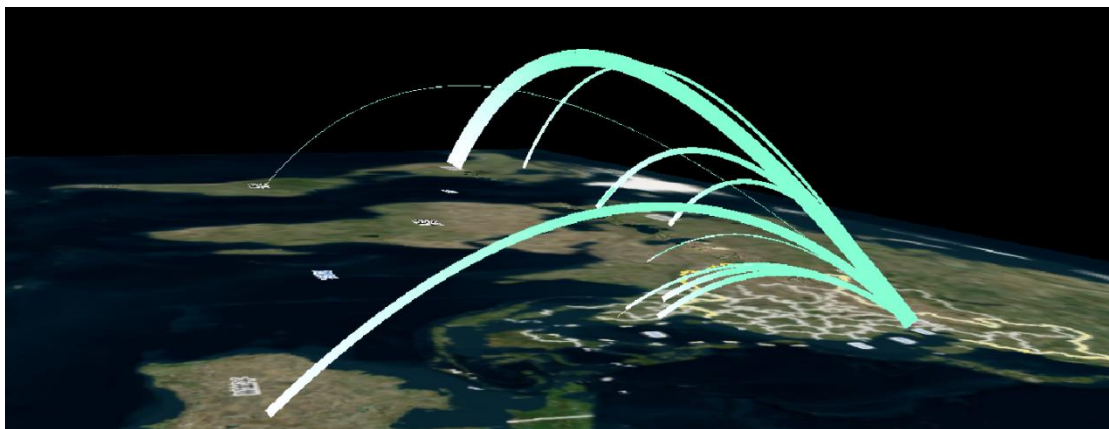


图 4.3 当  $S$  取 40 时的可视化曲线

通过反复实验发现，当切割系数  $S$  的取值大于等于 30 时，在一般的浏览器当中的可视化效果就已经非常平滑了，很难看出曲线的锯齿。

#### 4.2.2 切割系数对加载性能的影响

本文还对比了不同  $S$  的取值下对性能的影响。本讨论基于不同  $S$  的值在相同环境下渲染时间的差异，表 4.1 表示了本实验的运行环境。

表 4.1 运行环境

系统	Windows11 23H2
CPU	Intel i5-10300H
GPU	GTX 1650Ti
内存	16GB
Cesium 版本	1.105.2
飞线数量	100

表 4.2 是在上述运行环境下，分别渲染 100 条相同的飞线所用时间的统计表。

表 4.2 渲染时间对比表

$S$	渲染时间（秒）
2	0.05
4	0.07
9	0.14
20	0.19
40	0.22
60	0.35

### 4.3 微分线段求高算法

#### 4.3.1 飞线最高值 $H$

在进行可视化的过程中，当飞线数量增多，则有可能导致数条相同方向的飞线发生重叠，影响可视化效果。本文对此问题的解决方法是依据飞线的起点和终点的距离来确定本条飞线的最高点的高度值，也就是说，飞线最高值  $H$  与飞线起点终点之间距离的比是一个确定的常数  $K$ 。定义飞线起点和终点之间的距离为  $D$ ，那么就有：

$$\frac{H}{D} = K (K \neq 0) \quad (4.1)$$

下面对  $K$  的取值进行讨论，分别取  $K=0.1$ ， $K=0.2$ ， $K=0.5$  的时候进行可视化操作，观察其对可视化效果的影响。图 4.4、4.5、4.6 是不同  $K$  取值下的可视化

效果。

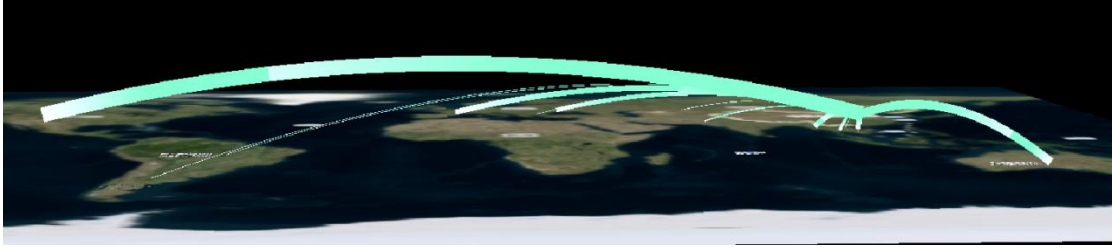


图 4.4  $K=0.1$  时的可视化效果

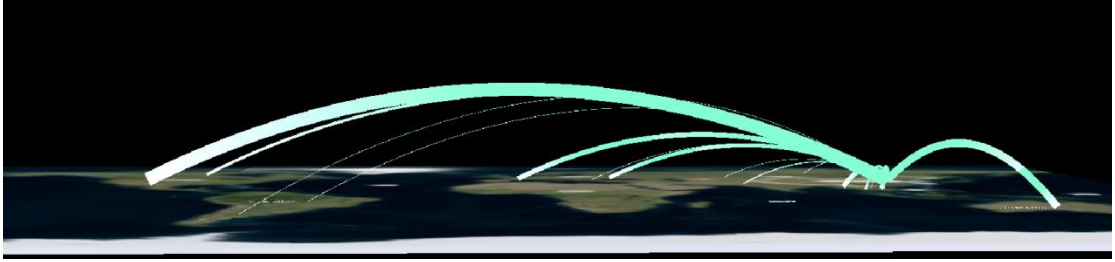


图 4.5  $K=0.2$  时的可视化效果

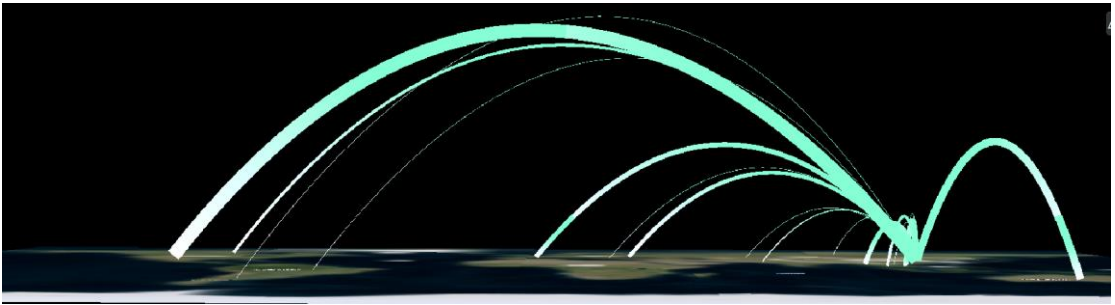


图 4.6  $K=0.5$  时的可视化效果

可以看到，当  $K$  的取值越来越大时，飞线的高度也越来越大，为达到显示效果的美观和协调，本文的可视化取  $K=0.205$ 。

#### 4.3.2 微分线段求高递推公式

根据 4.1 式确定了曲线的最高点值之后，也就确定了微分线段的最高值，还需要一个递推公式计算出在最高值点和最低值点之间线段的高度。显然，线段最低点为 0，最高点为  $H$ 。那么递推公式就有：

$$h_{min}^i = h_{max}^{i-1} \quad (4.2)$$

$$h_{max}^i = |H - \frac{H}{S} \sqrt{(i-S)^2}| \quad (4.3)$$

4.2 式中， $i$  代表本条微分线段是所有微分线段当中的第  $i$  个，且  $i \geq 1$ ，4.3 式中， $h_{max}$  代表这条微分线段的最高点， $h_{min}$  代表这条微分线段的最低点， $S$  代表上文提到的切割系数。



本递推公式说明，每一条微分线段是首尾相连的，上一条的终点，就是本条的起点，而当本条线段是位于最中间的线段时，这条线段的最高点值就取  $H$ ，同时就是本条飞线的最高点位置。

#### 4.4 飞线宽度算法

第三章关于地理多元流数据的存储中提到，本文计算了三个多元流数据当中的权值，这个权值可以作为可视化的一个重要参数。每一条地理多元流的权值并不一致，且差距较为悬殊，这一现象在贸易数据当中更为明显，热点国家之间的贸易额可以高达数亿美元，而非热点国家之间的贸易额常常较少，甚至为 0。所以，每一条流之间的权值存在较大的差异，在本文的可视化方法中，介绍了一种飞线宽度算法作为区别这样流权值差异的方式。算法主要思想就是由权值控制可视化飞线的宽度，权值越大则宽度越大。

##### 4.4.1 权值归一化算法

然而如果直接将权值作为线的宽度进行可视化，那么权值极差很大的地理多元流数据就会出现宽度差距非常大的情况，严重影响可视化效果，甚至导致程序崩溃。所以，需要对这些差距较为悬殊的权值进行归一化处理，将权值的变化范围控制在  $[0,1]$  之间，在展示不同权值流的可视化效果的同时不至于导致流的宽度差距过于悬殊。归一化公式如下所示。

$$V' = \frac{V - Min}{Max - Min} \quad (4.4)$$

式 4.4 中， $V'$  代表归一化后的权值， $V$  代表归一化前的权值， $Min$  为数据中所有权值的最小值， $Max$  是数据中所有权值的最大值。

##### 4.4.2 飞线宽度可视化

按归一化后的权值作为飞线的宽度乘 18 直接作为宽度值，就可以实现按照地理流权值大小控制地理流可视化飞线宽度大小。可视化效果如图 4.7 所示。



图 4.7 按权值确定飞线宽度结果

## 4.5 网络的可视化

地理多元流数据的可视化本质上就是考虑了地理特性的网络可视化过程(胡圣, 2021)。本文关于地理多元流数据的可视化考虑了地理多元流数据的网络属性,即权值和端点,并在以 Cesium 为载体的地理空间上进行网络结构的可视化。同时,网络也具有统计特征,如节点强度等,本文也借助图表对网络统计特征进行计算和可视化。

### 4.5.1 网络结构可视化

本文将大量的地理多元流数据进行可视化,可以形成多种网络的布局,以下是本文关于几种网络结构的可视化。图 4.8 展示了单一起点的网络结构可视化效果,起点为中国的北京,图 4.9 展示了多起点的网络结构。

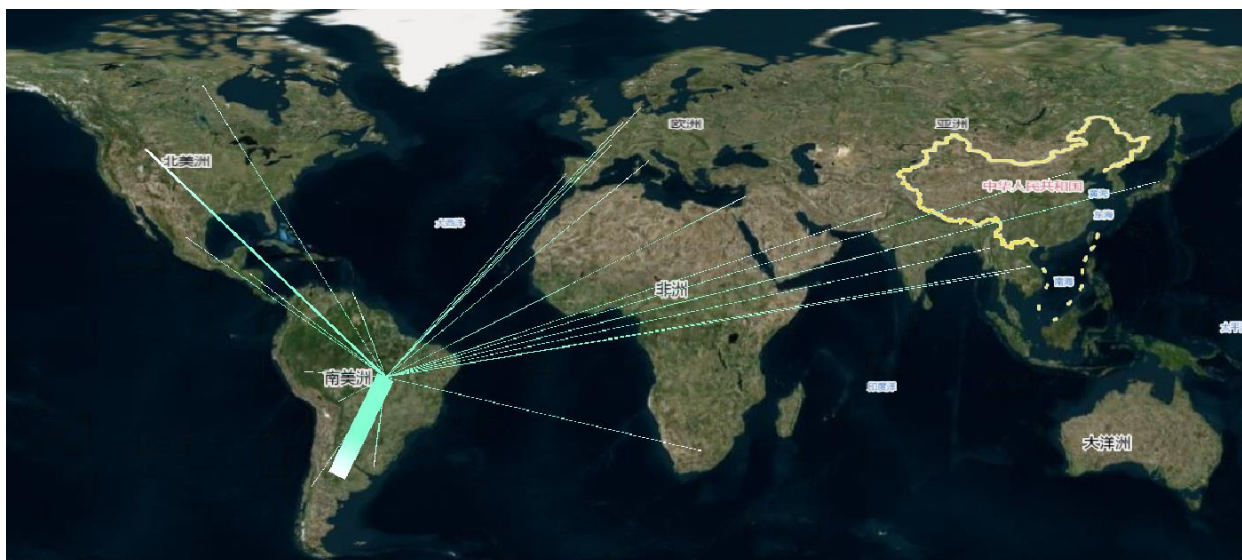


图 4.8 单一起点网络结构



图 4.9 非单一起点网络结构

4.5.2 网络统计数据可视化

本文所使用的数据包含的权值在网络中，就是边强度，本文将边强度排名制成了柱状统计图进行这一数据的可视化，图 4.10 为可视化结果。其中的横坐标为边的序号，纵坐标代表着边强度值，均无单位。



图 4.10 边强度统计图

## 5 可视化系统构建及专题图制作

本文在前面的章节里介绍了有关 WebGIS 前后端开发技术并介绍了本文关于地理多元流网络的可视化方法。在本章节，将从原型系统的角度介绍将上面几个部分集成在一个可视化系统并添加关于专题地图制作的模块。

### 5.1 系统前后端总体设计

#### 5.1.1 系统设计总原则

借助自适应动态飞线算法，本原型系统具备卓越的通用性，不仅能够轻松处理全球范围内的地理流数据，更能灵活适配各种规模的数据需求，只需要控制切割系数即可。适应于现在大部分 WebGIS 应用的特性，本系统的系统设计原则采用 B/S 开发架构，即由展示层，服务层，数据层组成，系统的总体架构如图 5.1 所示。

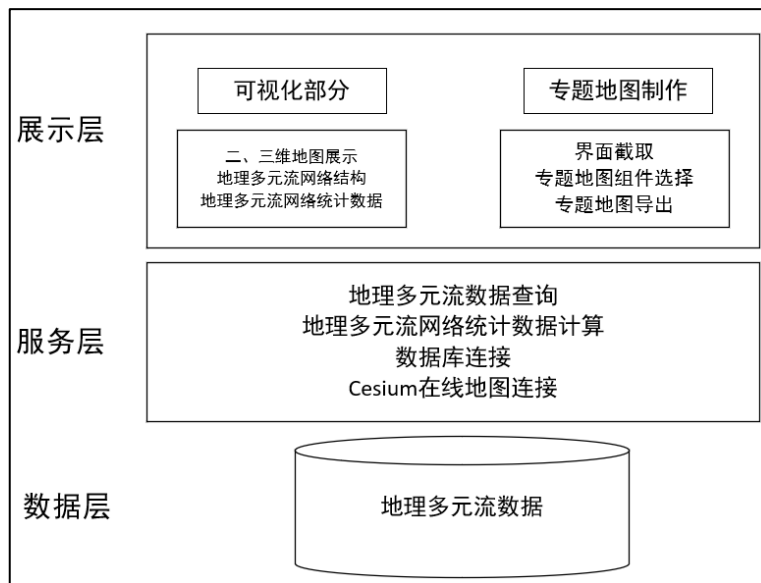


图 5.1 系统总体架构

#### (1)展示层

本系统的展示层主要集中两个部分的展示，第一是二、三维地图地图以及多元流数据可视化部分，可视化是基于以 Cesium 为底图的专题二、三维地图的；第二是专题地图制作模块，即一个交互式专题地图编辑模块和专题地图预览界面。

#### (2)服务层

服务层主要是基于由 Django 框架控制的后台服务器，它涵盖了对于数据的管理、存储、计算、发布等功能，并且提供接口与前端展示层和数据层进行通信。

### (3)数据层

数据层利用 PostgreSQL 存储了地理多元流数据。

#### 5.1.2 功能设计

本原型系统的设计主要是基于可视化而开展的，关于功能的设计也是适应于数据的可视化操作。图 5.2 是本原型系统的功能介绍。

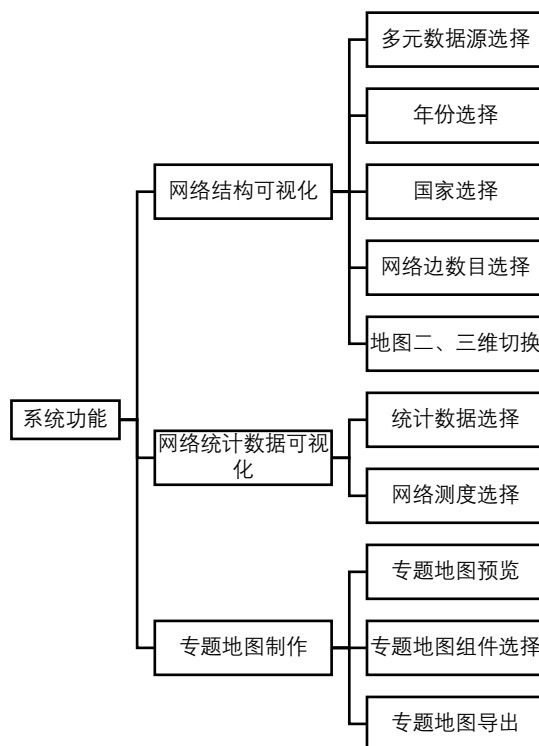


图 5.2 系统功能设计

#### (1)网络结构可视化与数据控制

本实验是对地理多元流数据网络的可视化，所以在功能层面上设计了对多元数据集的选择和控制，这包括对数据本身的选择，对显示年份的选择以及对事件国家的选择，任意选择组合，在可视化系统中就可以展示出来选择的数据形成的地理多元流网络结构。同时，可以根据需要选择地图视图，包括三维立体视图、二维平面视图与 2.5D 哥伦布视图。

#### (2)网络统计数据可视化

网络统计数据可视化是与网络结构可视化联动的，当选择了需要可视化的多元数据时，界面上就会展示相应的地理多元流数据的网络统计结果，使用 Echarts 图表进行展示，图表可交互并导出。

### (3)专题地图制作

专题地图制作是基于可视化后的状态进行的，当用户确定自己想要进行可视化的地理多元数据之后，就可以基于这个底图进行专题地图的制作和导出，用户可以选择专题地图的比例尺、数据源、飞线颜色、数据类型、事件国家和年份等信息。

#### 5.1.3 技术选型

本原型系统采用常见的 WebGIS 前后端分离的架构，前后端的技术栈如下所示。

##### (1)系统后端技术

本系统后端服务器通过 Django 搭建，Django 对各种数据库提供了很好的支持，包括：PostgreSQL、MySQL、SQLite、Oracle 等等，Django 为这些数据库提供了统一的调用 API。本实验使用 Django 提供的方法实现后端服务器与数据库的连接，包括通过数据库信息配置、模型层编码和生成数据库模式定义语言并执行三步完成。

##### (2)系统前端技术

本系统基于 React 框架搭建了原型系统的前端。由于 React 关于组件值之间的刷新和传递存在异步更新的特点，可以实现响应式的组件刷新，这有助于动态展示地理多元流网络的结构。依靠组件类中的 state 数组，系统可以在触发响应时，更改 state 数组当中的值，并完成对所有相关值的统一更新。前端还使用 Cesium 作为三维和二维地图载体，采用 Ant-design 作为前端样式设计库。

##### (3)前后端通信

为实现前端与前端的通信，本系统采用 Django 框架的方法。后端预留了接口模块，前端编辑接口 URL 结构，后端以 URL 的形式获取前端的数据获取意图并直接通过 SQL 语句操控数据库，将返回的数据库中数据构造为 JSON 文件发送给前端。数据通信示意图如图 5.3 所示。

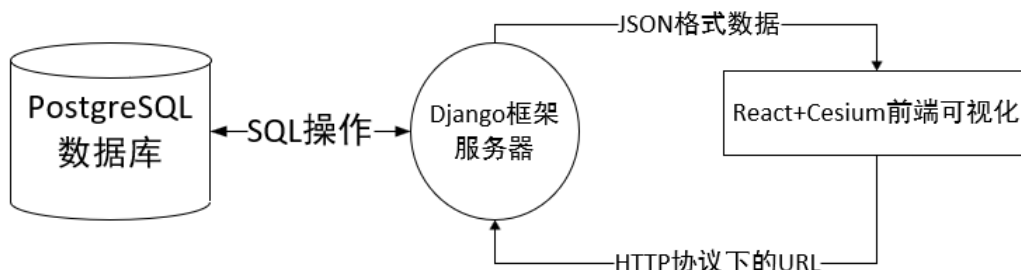


图 5.3 前后端通信原理

## 5.2 可视化控制面板

为实现对多元流数据可视化的更精确控制，本文设计了多元流网络可视化控制面板，可以实现对数据集、事件国家、事件年份和可视化网络边数量进行精确控制，同时实现与多元流网络统计数据可视化的联动，当用户选择了特定多元流数据集时，就可以显示出所选的地理多元流网络统计图表。

### 5.2.1 地理多元流数据选择区

当用户按照下面的选项选择数据后，主界面就会实时渲染地理多元流网络结构。图 5.4 展示了地理多元流网络结构可视化控制区，包括数据集选择按钮、国家选择器、年份选择器和节点数量数据选择条。

**选择数据集**

☐ 人口迁移数据    ☐ 贸易数据    ☐ 国际关系数据

**选择相关国家**

选择一个国家

**选择年份**

所有年份

**选择节点数量**

图 5.4 地理多元流网络结构控制功能区

### 5.2.2 地理多元流网络统计数据面板

当选择了数据集之后，后台就会对所选数据集的网络特征进行计算，并导入 Echarts 表格当中，当用户点击“展开可视化结果”按钮后，就会弹出可视化结果。图 5.5 展示了“展开可视化结果”按钮，图 5.6 展示了点击后的弹出框结果。

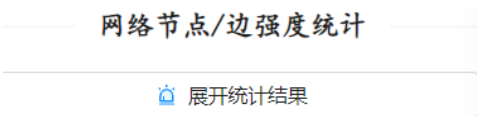


图 5.5 网络统计数据可视化按钮

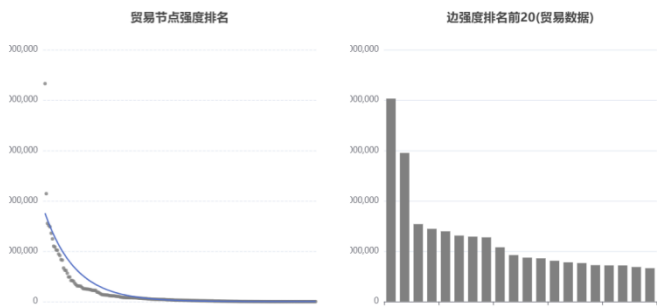


图 5.6 网络统计可视化结果

5.3 专题地图制作模块

本系统支持用户导出所需的专题地图，且提供一系列功能辅助用户来完成专题地图的制作和导出。

专题地图制作面板上集成了多种功能，这些功能与地理多元流网络结构可视化相适应且互相联动，用户所选择可视化的数据搭配会成为专题地图制作的默认选项，用户也可以对这样的结果进行修改，而修改的结果也会直接反应在地图预览界面和地理多元流网络结构可视化界面上。图 5.7 展示了地理多元流数据专题地图制作面板。

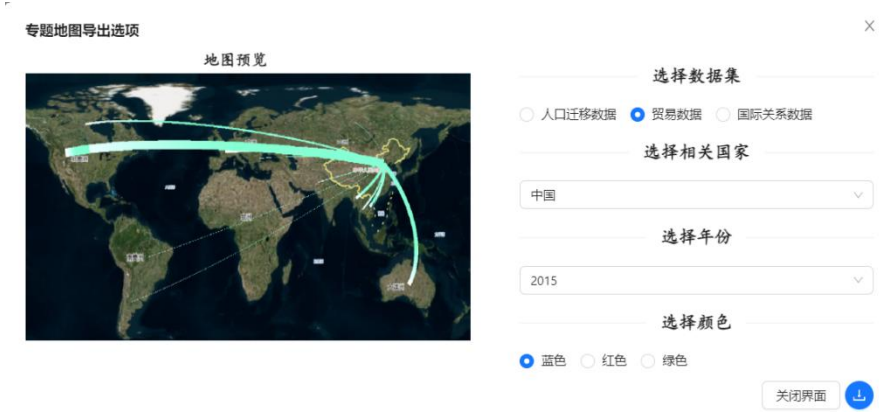


图 5.7 专题地图制作与导出面板

当用户确认专题地图后，可以点击右下角下载按钮，将专题地图下载到本地。



## 5.4 总体可视化效果

### 5.4.1 系统主界面

当系统启动后，就会进入系统主界面，如图 5.8 所示。



图 5.8 系统主界面

在进入主界面时，右侧主要区域上的 Cesium 地球就会进行旋转和视角缩放，以一种平滑的方式展示出我国地图在地球上的位置和国家轮廓线，功能面板停靠在界面的左边，它包含了对于可视化的所有操作，并可以呼出专题地图制作界面。主界面的右上角的统计符号按钮可交互，由于左边界面集成度较高，没有空余的区域对网络数据的统计特征进行详细说明，点击统计符号按钮可以查看详细的网络数据的统计特征说明以及分类可视化结果。右上角靠下位置的按钮是切换维度按钮，用户可以自由的选择以三维、二维或 2.5D 哥伦布视角来查看地理多元流网络结构可视化效果。

### 5.4.2 系统功能展示

#### (1) 地理多元流网络结构可视化

在左侧控制面板选择希望展示的数据信息，这里选择 2018 年中国与世界的贸易数据，选择 100 个网络边节点，则此地理多元流网络的结构如图 5.9 的三维视图、图 5.10 的二维视角和图 5.11 的 2.5D 哥伦布视角所展示。

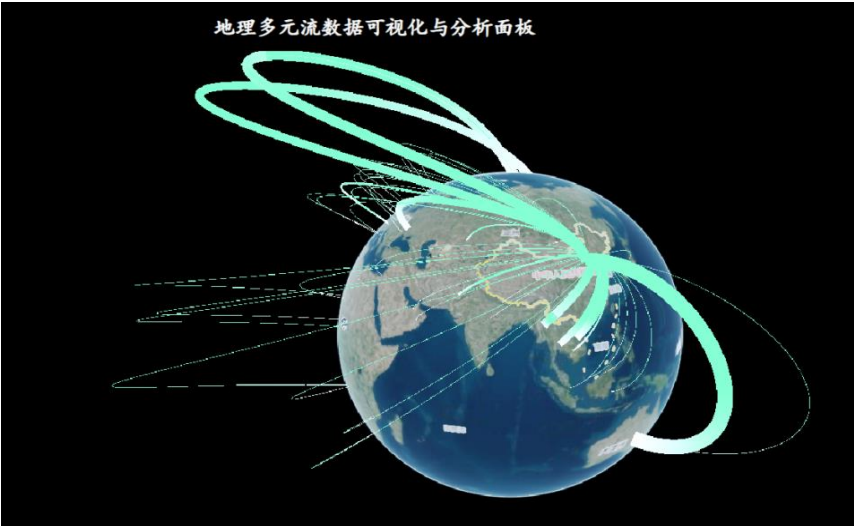


图 5.9 三维视图



图 5.10 二维视图

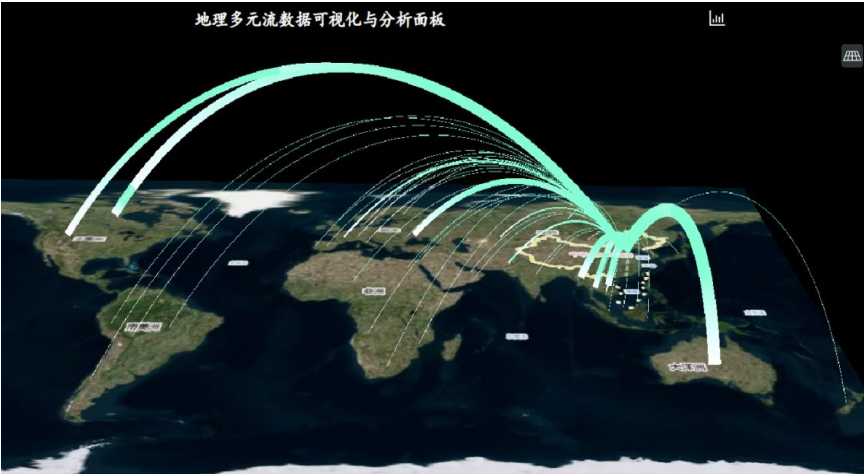


图 5.11 2.5D 哥伦布视图

需要说明的是，地理多元流数据当中的贸易数据是国际农业贸易数据。可以从数据中看出，中国与美国、加拿大、澳大利亚、乌克兰等农业贸易大国的飞线很粗，这代表着这些边的归一化强度较高，符合实际情况。

## (2)地理多元流网络统计数据可视化

当选择了进行可视化的数据之后，点击左侧“展开统计结果”按钮，就可以展开响应的地理多元流数据网络统计结果图，且可以通过鼠标交互的方式查看数据的详细信息。当选择“贸易数据”时，左侧展示的地理多元流数据网络统计图如图 5.12 所示。

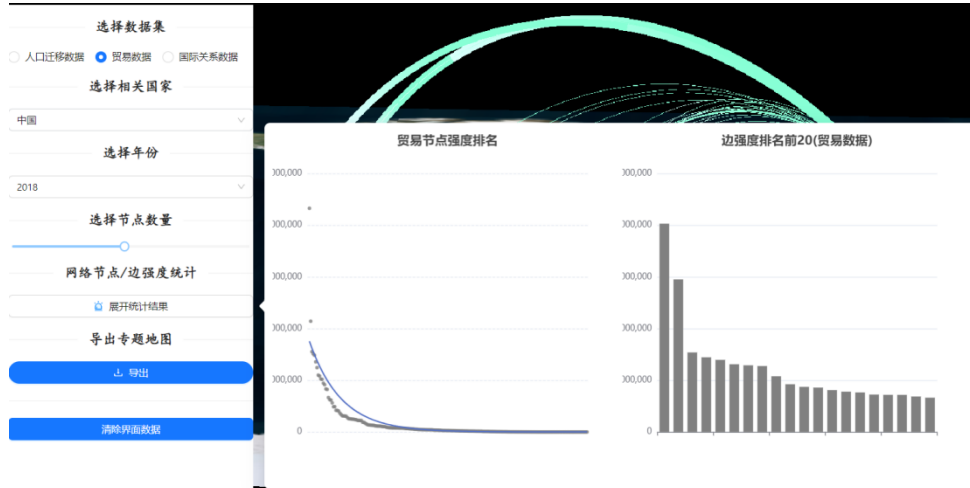


图 5.12 地理多元流网络统计数据可视化面板

点击右上角的统计图标志，可以进入数据详细说明面板，包括数据更进一步的结果以及对结果的展示，打开后图 5.13 所示。

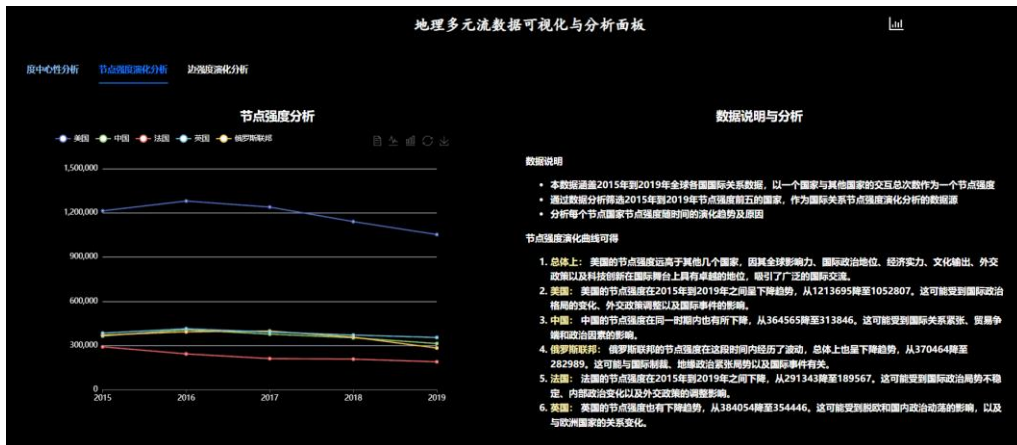


图 5.13 地理多元流网络统计数据详细说明面板

### (3)专题地图制作模块

点击左侧“导出”按钮，即可呼出专题地图制作面板，面板左侧区域展示了当前专题地图绘制的基本状况，右侧则是用户希望绘制的专题地图数据选项。如果用户已经选择了数据进行网络结构的可视化，则已经选择的数据就会作为绘制专题地图的默认参数，如用户选择了“人口迁徙数据”+“俄罗斯联邦”+“不指定年份”的组合，则打开右侧面板时，也会以这个数据组合作为默认参数，当然，用户也可以在此修改这个数据组合，则地理多元流网络结构的可视化面板以及地理多元流网络统计数据可视化面板也会随之改变可视化的数据结果，实现整体的联动。最后，用户可以点击右下角的导出按钮，将制作好的专题地图保存在本地，专题图制作功能面板如图 5.14 所示。



图 5.14 专题地图制作与联动效果

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

地理多元流数据就是由不同主题的单元流组成的，这些单元流之间存在很多的相似性，其可视化方法过程就是多个从起点到终点之间的连接曲线。本文着重分析了可视化的一种优化算法即自适应动态飞线算法，并通过开发一个完整的 WebGIS 应用来实现对可视化效果的呈现和管理。主要的内容包括：

#### (1)地理多元流数据的存储和表达

本文使用了三种地理多元流数据作为研究对象，包括 GDELT 新闻媒体数据、全球贸易数据和人口迁徙数据。在对这三类数据进行数据清洗之后，按照数据中的某个特性为数据赋予一个计算后的权值，作为后续对其可视化的一个重要参数。最后，利用 PostgreSQL 作为后台数据库系统将整理好的数据存储起来，并由服务器直接操作。

#### (2)地理多元流网络数据可视化

本文关于地理多元流网络可视化提出了自适应动态飞线算法，本算法根据流数据本身的特性动态确定可视化网络连接线的开口大小，线的高度等，这样就可以避免网络结构可视化结果之间的遮盖。同时，本文还设计了归一化算法将地理多元流数据的权值控制在一个合理的区间，作为可视化线的宽度参数。关于地理多元流网络统计数据的可视化也是可视化的重要一环，本文通过边强度，节点强度等统计数据的可视化，反映了地理多元流网络数据的其他侧面。

#### (3)系统开发与专题地图制作模块

本文利用前后端分离的开发模式，将地理多元流可视化的结果集成在一个 WebGIS 原型系统当中，结合 React、Cesium、Django 等前后端开发技术实现。另外，本文在可视化原型系统中提供了专题地图制作模块，用户可以实现将可视化的结果导出到本地，并且可以对导出的内容进行选择和编辑。

### 6.2 展望

本文存在的不足之处尚有很多，需要进一步研究和打磨，本文可以在以下几个部分进行改进。

### **(1)可视化效果仍需要改进**

本文在进行地理多元流网络结构可视化时，无法对可视化的效果进行进一步控制，只能对可视化数据集进行选择和更改，但是在实际的研究和利用中，需要针对不同的数据进一步细化对可视化效果的自定义。

### **(2)专题地图制作需进一步优化**

本文关于专题地图制作的模块是基于预设参数的，用户可以进行定制化的程度并不大，只能修改少量的几个参数。一方面这是因为专题地图本身对于格式有严格的要求，包括图名、比例尺、图例等基本参数，另一方面是本文在实现过程中并没有给用户预留太多的选择空间，后续可以实现允许用户对可视化符号、效果等因素进行修改和管理。

## 参考文献

- [1] 胡圣,秦昆,喻雪松,张灵焱,张凯. 全球地理多元流网络数据存储与可视化系统的设计与实现[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(5): 155-158.
- [2] 吕景旭. 城市交通时空数据管理与可视化研究[D]. 东南大学,2022.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2022.002484.
- [3] 王家耀. 时空大数据时代的地图学[J].测绘学报,2017,46(10):1226-1237.
- [4] 刘晓寒,陈毓芬,钱凌韬等. 线状地图符号的多样化设计与验证[J].测绘与空间地理信息, 2016, 39(05): 30-34
- [5] 张翔,王少东,王玉霞. 基于偏移四叉树投票的“大尺寸”点状符号多尺度无遮盖可视化[J].测绘学报,2016,45(08):983-991.
- [6] 李德仁,马军,邵振峰. 论时空大数据及其应用[J].卫星应用, 2015(09): 7-11
- [7] Tobler W R. Experiments in migration mapping by computer. The American Cartographer, 1987, 14(2): 155-163.
- [8] 裴韬,舒华,郭思慧等. 地理流的空间模式: 概念与分类[J].地球信息科学学报,2020,22(01):30-40.
- [9] 龚晓岚,于孝美. 实时交通大数据分析和可视化地理信息平台研究[J].贵州警察学院学报,2023,35(04):77-83.DOI:10.13310/j.cnki.gzjy.2023.04.0010.
- [10] Kong X, Liu Y, Wang Y, et al. Investigating public facility characteristics from a spatial interaction perspective: A case study of Beijing hospitals using taxi data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(2): 38.
- [11] Fotheringham A S. Spatial flows and spatial patterns[J]. Environment and planning A, 1984,16(4):529-543.
- [12] Liu Y, Tong D, Liu X.Measuring spatial autocorrelation of vectors[J]. Geographical Analysis, 2015,47(3):300-319.
- [13] Berglund S, Karlström A. Identifying local spatial association in flow data[J]. Journal of Geographical Systems, 1999,1(3):219-236.
- [14] Zhu X, Guo D. Mapping large spatial flow data with hierarchical clustering[J]. Transactions in GIS, 2014,18(3): 421-435.
- [15] Tao R, Thill J C. A density-based spatial flow cluster detection

- method[C]//International Conference on GI Science Short Paper Proceedings, 2016.
- [16] Tao R, Thill J C, Depken II C, et al. flow HDBSCAN: A hierarchical and density-based spatial flow clustering method[C]//Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL workshop on smart cities and urban analytics, ACM, 2017:11.
- [17] Gao Y, Li T, Wang S, et al. A multidimensional spatial scan statistics approach to movement pattern comparison [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018,32(7):1304-1325.
- [18] 牛艺博. 基于 WebGL 的地理信息三维可视化技术研究[D].兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [19] 李安福, 曾政祥, 吴晓明. 浅析国内倾斜摄影技术的发展[J].测绘与空间地理信息, 2014, 37(9): 57-59.
- [20] 韩昕熠. 基于 Cesium 的多维动态可视化技术研究[D].西安科技大学, 2020.
- [21] 张戢. 基于 Cesium 平台的导航卫星轨道模拟与可视化[D].上海: 华东师范大学, 2017.
- [22] 张政, 江南, 张俊, 等. 空间位置耦合的地理社交网络可视化布局算法.计算机辅助设计与图形学学报, 2020. 32(06): 865-873.
- [23] 秦昆, 喻雪松, 周扬, 张凯, 刘东海, 王其新, 贾涛, 肖锐, 卢宾宾, 许刚, 余洋, 孟庆祥. 全球尺度地理多元流的网络化挖掘及关联分析研究[J].地球信息科学学报, 2022, 24(10): 1911-1924.
- [24] 杨敏, 艾廷华, 卢威, 等. 自发地理信息兴趣点数据在线综合与多尺度可视化方法[J]. 测绘学报, 2015. 44(02): 228-234.
- [25] L Jiang. The underlying causal network from global dyadic events: allies and rivals in international relations[C]. 2020 IEEE International Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking. IEEE, 2020:1029- 1036.
- [26] M Sarzynska, E A Leicht, G Chowell, M A Porter. Null models for community detection in spatially embedded, temporal networks[J]. Journal of Complex Networks, 2016, 4(3): 363-406.



- [27] P J Mucha, T Richardson, K Macon, M A Porter, J P Onnela. ,Community Structure in Time-Dependent, Multiscale, and Multiplex Networks [J]. Science, 2010, 328:876-878.
- [28] Qixin WANG, Kun QIN, Donghai LIU, Gang Xu, Yanqing Xu, Yang Zhou, Rui Xiao. Spatial Interaction Network Analysis of Crude Oil Trade Relations between Countries along the Belt and Road[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022,5(2): 60-74.
- [29] 池志培,侯娜. 大数据与双边关系的量化研究:以 GDELT 与中美关系为例[J]. 国际政治科学, 2019,4(2):67-88.
- [30] 李金磊,慈谕瑶,郑坤,等. 面向地理信息大数据的时空事件关系可视化分析框架[J].测绘通报, 2019(12):4.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0395.
- [31] 潘峰华,赖志勇,葛岳静. 社会网络分析方法在地缘政治领域的应用[J].经济地理, 2013,33(7):15-21.
- [32] 王妮满,秦昆,罗俊,陈昆,胡圣. 2020. 历史名人轨迹的空间可视化与分析[J]. 地球信息科学学报, 22(5): 978-988.
- [33] 秦昆,喻雪松,周扬,张凯,刘东海,王其新,贾涛,肖锐,卢宾宾,许刚,余洋,孟庆祥. 全球尺度地理多元流的网络化挖掘及关联分析研究[J].地球信息科学学报, 2022,24(10):1911-1924.
- [34] 原继东,王志海. 时间序列的表示与分类算法综述[J]. 计算机科学, 2015,42(03):1-7.
- [35] 朱炤瑗,秦昆,关庆锋,罗萍,姚博睿,漆林,周扬. COVID-19 期间国家关系交互网络时空分析研究[J].地理与地理信息科学, 2022, 38(1): 15-22.
- [36] Paivio,A.(1986). Mental Representations, New York: Oxford University Press.
- [37] 张凤军. 基于 Neo4j 图数据库的社交网络数据的研究与应用[D].湖南大学, 2016.
- [38] 姚博睿,秦昆,罗萍,等. 特殊事件中国际关系网络时序演化分析[J].地球信息科学学报,2021,23(4):632-645.
- [39] 崔蓬. ECharts 在数据可视化中的应用[J].软件工程, 2019,22(06):42-46.
- [40] 秦昆,周劬,徐源泉,等. 城市交通热点区域的空间交互网络分析[J].地理科学

- 进展, 2017, 36(9): 1149-1157.
- [41] 杨振, 万为清. 图数据库的研究和应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2020, No.426(12):93-95.
- [42] 秦昆, 罗萍, 姚博睿. GDELT 数据网络化挖掘与国际关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(1):14-24.
- [43] 陆化普, 李瑞敏. 城市智能交通系统的发展现状与趋势[J]. 工程研究, 2014, 6(1): 6-19
- [44] Viqueira J R R, Lorentzos N A. SQL extension for spatio-temporal data[J]. The VLDB Journal, 2007, 16(2): 179-200
- [45] 胡达天, 胡庆武. 基于开源系统的跨平台地图客户端开发[J]. 测绘科学, 2015, 40(7):142-145.
- [46] Ellingwood, Justin. How To Use NPM to Manage Node.js Packages on a Linux Server. DigitalOcean. 2016-10-22/2016-12-20.
- [47] 张瑞, 刘学锋, 徐威杰, 等. 基于 Openlayers 和 GeoJSON 的三维 GIS 中热区的显示[J]. 测绘与空间地理信息, 2016(9):36-39
- [48] 杨志波. 基于 Ajax 技术的 WEBGIS 研究及实现[D]. 中国科学院研究生院（广州地球化学研究所）, 2006.
- [49] 吴磊, 张福庆. 基于 HTML canvas 的 WebGIS 客户端技术研究[J]. 地理信息世界, 2009, 7(3):78-82.
- [50] 王晓. 基于 HTML5 的矢量地图发布关键技术研究[D]. 南京师范大学, 2011.
- [51] 马洪成. 基于 Cesium 的三维电网 WebGIS 开发与实现 [D]. 辽宁工程技术大学, 2017
- [52] 牛艺博. 基于 WebGL 的地理信息三维可视化技术研究[D]. 兰州交通大学, 2015.
- [53] United Nations. UN Comtrade Database. United Nations Statistics Division. [2023-11-25]. <https://comtrade.un.org/>.

## 致 谢

当我终于即将走完人生中灿烂的四年，我心中充满了感激。回望四年，快乐有之，感动有之，遗憾亦有之。

我要衷心感谢我的导师秦昆教授。他的严谨治学态度、深厚的学术造诣和敏锐的洞察力，对我影响深远。从论文选题、框架构建到文字表达，导师都给予了我悉心的指导和耐心的解答。在我迷茫时，他为我指明方向；在我遇到挫折时，他鼓励我勇敢面对。他的教诲不仅让我在学术上取得了进步，更教会了我如何做人、如何做事。我会永久保留秦昆教授赠送的《地理信息系统概论》书籍，这本书凝结了他的智慧，也凝练着我的四年的大学时光。

我要感谢我的家人。他们一直是我坚强的后盾，给予我无限的爱与支持。我也曾在大学期间四处游历，当穿梭于祖国的大好河山时，总会不经意间望向家的方向，是那里一盏温柔的灯为我长久守候，支持着我一往无前。

此外，我还要感谢我的同学们和朋友们。我们一同度过了这段难忘的时光，相互学习、相互鼓励。在论文写作过程中，我们共同探讨问题、分享经验，相互帮助解决难题。他们的陪伴与支持，让我在求学的道路上不再孤单。

我要感谢我的母校，武汉大学美丽的风景和优雅的氛围哺育着我，我在这里得以全面发展。我将永远记住那年春日傍晚的音乐厅，海燕合唱团那一首《彩虹》给予我莫大的精神鼓舞。

最后，我要感谢我的女友遥遥同学。我们相识已有7年，我们一起学习，一起经历，一起哭，一起笑，我们是最好的朋友。在今后的日子里，我们将会互相鼓励，一起坚定的走向未来更多未知的旅程。

行文此处，悲欣交集，深感时光之匆匆与岁月之悠悠。畅想未来，豁然开朗，顿觉世界就在我的面前。

