

基于投影坐标的海图数据的矢量瓦片化生产方法

郭奇 冯俊 于辉 丁茜

中国电子科技集团第二十八研究所, 中国·江苏 南京 210007

摘要: 随着海洋经济的快速发展和船舶导航技术的不断进步, 海图数据的准确性和实时性要求日益提高。传统海图数据处理方法存在数据冗余、更新效率低、多图幅压盖等问题, 严重影响了船舶导航的安全性和效率。本文提出了一种基于投影坐标的海图数据的矢量瓦片化生产方法, 旨在解决传统海图数据处理中的组织、存储、加载慢问题。该方法首先基于时间和精度双重标准对海图数据进行智能选取, 保证数据的完整性和准确性; 其次采用二进制流压缩和多态投影坐标转换技术, 显著降低数据冗余; 最后通过坐标偏移反运算机制实现海图数据的快速渲染和显示。实验结果表明, 该方法能够有效提升海图数据的处理效率和显示性能, 为船舶导航和海洋信息系统提供可靠的技术支撑。

关键词: 海图数据处理; 矢量瓦片化; 数据压缩; 坐标偏移

A Vector Tile Production Method for Chart Data Based on Projected Coordinates

Guo Qi, Feng Jun, Yu Hui, Ding Qian

The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, China Jiangsu Nanjing 210007

Abstract: Against the backdrop of China's continuous marine exploration and the demand for safeguarding territorial maritime security, higher requirements have been placed on the accuracy and real-time performance of nautical chart data. Traditional nautical chart processing simply superimposes chart contents, resulting in substantial data redundancy and unresolved display overlaps across multiple chart sheets, which severely impairs maritime navigation safety. This paper proposes a vector tile generation method for nautical chart data based on projected coordinates to restructure and redesign conventional chart data, aiming to address excessive storage consumption and low display efficiency of raw data. Firstly, dual screening criteria based on time and precision are formulated for preliminary data filtering. Secondly, dynamic projection-based coordinate transformation is adopted to compress processed data into binary format and reduce redundancy. Finally, coordinate offset back-calculation technology is applied to improve chart rendering efficiency. Experimental results verify that the proposed method effectively reduces data storage volume and optimizes display performance, providing technical support for ship navigation.

Keywords: Nautical chart data processing; Vector tiling; Data compression; Coordinate offset

0 引言

在本单位的产品开发过程中, 我们发现用户提供的海量的海图数据属于不同时期测量的海图, 不同海图之间受到洋流和测量精度的影响存在极大的偏差, 对船舶的精确导航提出更大的挑战^[1]。这些问题严重制约了海图数据的准确度和可信度。一旦发生问题, 后果不堪设想。因此面临两个棘手的问题: 一是如何处理大批量的海图数据, 如何去冗余, 降低系统本身的存储压力; 二是如何快速的显示海图, 提升数据的传输效率和渲染速度, 我们注意到矢量瓦片技术^[2]。然而, 现有的矢量瓦片技术多用于陆地地图, 对不同层级的数据进行分层切片, 针对海图大批量的原始数据, 并不适用。因此我们借鉴矢量瓦片的数据处理方法, 设计一套海图数据的矢量瓦片化处理办法, 解决上述两个问题。

1 海图数据生产方法的研究现状与分析

目前, 国内外学者在海图数据处理方面进行了广泛研究。文献^[3]提出了一种基于 Web Mercator 投影的海图数据处理方法, 通过建立统一的地理坐标参考系, 实现了海图数据的标准化处理。文献^[4]采用分层组织技术对海图数据进行管理, 通过建立多级索引结构, 提高了数据的查询效率。文献研究了海图数据的压缩存储方法, 采用 LZW 算法对矢量数据进行压缩, 降低了存储空间占用。

然而, 现有研究仍存在以下不足: (1) 缺乏对多图幅数据压盖问题的有效解决方案; (2) 数据冗余问题未得到根本解决; (3) 海图数据的实时更新机制不完善。

本文针对传统海图数据处理中存在的问题, 提出了一种基于投影坐标的海图数据的矢量瓦片化处理办法。主要研究内容包括:

海图数据智能选取机制：基于时间和精度双重标准的数据选取策略，解决多图幅数据压盖问题，通过建立数据选取表实现区域数据的唯一性选择，确保数据的时效性和准确性。

(1) 基于投影坐标的转换与偏移计算，并引入坐标偏移量化技术，将浮点坐标转换为整型偏移存储，显著减少数据存储空间。(2) 矢量数据二进制流压缩：采用优化的数据结构，将海图数据按要素类别重新组织，属性字段统一存储在表头，几何数据转换为二进制流后采用高效压缩算法处理，大幅降低数据冗余。(3) 快速检索与实时渲染机制：建立多层次空间索引结构，支持基于地理范围的高速数据查询；通过坐标偏移反运算，实现海图数据的快速渲染和显示。

2 关键技术方法

2.1 整体框架设计

本文提出基于投影坐标的海图数据的矢量瓦片化处理方法，构建了一个系统化的技术框架，旨在从数据源处理到最终可视化展示的完整流程中，解决海图数据面临的多图幅压盖、存储冗余、投影适配及渲染效率等核心问题。该框架由四大核心模块组成，形成了从数据输入到图形输出的闭环处理链路。数据读取与预处理模块负责原始海图数据的规范化提取与元信息登记；数据智能选取模块基于时空与精度多维度评价机制，动态解决多源数据覆盖冲突，生成最优数据选取表；投影转换与坐标偏移模块支持墨卡托、兰伯特等多投影体系的坐标变换，并通过整型量化偏移技术压缩存储空间；数据压缩与存储模块采用二进制流重组与字典编码技术，大幅降低数据冗余；数据检索与渲染模块使用空间索引计算，实现海图数据的快速调度与高效绘制。各模块通过标准化接口衔接，形成了一条高效、稳定、可扩展的海图数据处理流水线，显著提升了海图数据在复杂环境下的应用效能，见图 1。

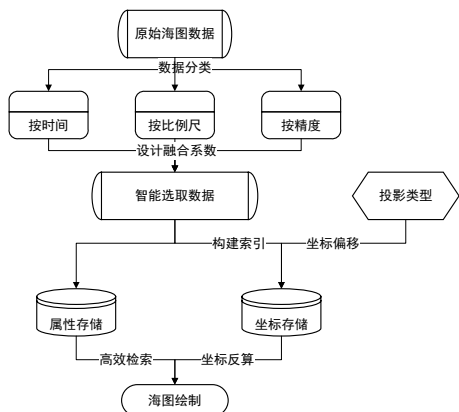


图1 海图数据生产流程

2.2 数据智能选取机制

针对海图数据长期积累导致的多图幅重叠、时空不一致及精度差异等问题，本文设计了一套基于时间、比例尺和精度三个维度的智能数据选取机制。

该方法首先对所有输入的海图图幅进行元信息提取与空间索引构建，获取每幅图的采集时间、显示比例尺、数据精度及其地理覆盖范围。在此基础上，将整个海域区域划分为规则的地理网格单元，作为数据选取的基本单位。对于每一个网格单元，系统通过空间索引快速检索所有覆盖该单元的候选图幅集合。随后，系统引入一个综合优先级评价模型，该模型通过加权函数将图幅的生产时间、细节层次（比例尺）和可信度（精度）转化为一个可比较的优先级分数。

这一机制从根本上杜绝了传统方式中因多图幅数据同时显示导致的要素压盖、信息冲突问题，确保了在任何显示区域内海图数据的唯一性和最优性，同时保留了数据选择的透明性与可追溯性。

2.3 投影转换与坐标偏移计算

为适应海洋信息系统在不同场景下对地图投影的多样化需求，本方法构建了一个灵活的投影转换与坐标压缩体系。系统内置了包括墨卡托投影、兰伯特投影在内的多种常用投影模型及其转换参数库，能够根据用户设定或应用上下文自动选择并执行最适宜的投影变换。

系统以每幅海图数据范围的左上角为基准点，计算图幅内所有几何点相对于该基准点的偏移量。这些原本为浮点型的偏移值随后被乘以一个精心选择的量化因子，并四舍五入为整型数值进行存储。这一过程在保证导航精度的前提下，将坐标数据的存储空间减少了约 50%。同时，整型数据更有利于后续的压缩算法处理和数据块的边界对齐。

在数据渲染阶段，通过简单的反量化与基准点坐标叠加运算，即可快速、精确地恢复原始坐标位置。此方法不仅有效解决了多投影适配的复杂性问题，还通过数据层面的优化为海图大数据的高效存储与实时传输提供了关键技术支撑。

2.4 数据压缩与存储结构优化

为应对海图数据体量庞大、结构复杂带来的存储与 IO 压力，本文提出了一套深度优化的数据压缩与存储结构方案。

系统将一幅海图内的数据按要素语义（如水深、海岸线、碍航物、导航设施等）划分为不同的大类。对于每个大类的几何数据，将其从原始的矢量格式序列化为紧凑的

二进制字节流。与此同时,所有要素的属性信息被剥离出来集中处理:系统通过扫描全局数据,构建属性字段字典和属性值字典,将重复出现的文本型字段名和属性值映射为简短的整型索引,从而消除文本冗余。最终,优化后的存储文件由三部分组成:一个定长的文件头;一个数据索引区;一个压缩数据区。

这种存储结构使得前端渲染引擎能够仅通过一次磁盘 IO 和一次解压操作,即可高效获取指定空间范围内所有必需的几何与属性信息。

3 实验与分析

3.1 实验环境与数据

实验评估旨在验证本文提出的多态投影下海图数据矢量瓦片化处理方法的有效性、性能与可靠性。实验在专业的海图数据处理工作站上进行,核心硬件配置为: Intel Core i7-10700K 处理器(8 核 16 线程, 3.8GHz), 32GB DDR4 内存, NVIDIA GeForce RTX 3080 显卡(10GB GDDR6X 显存), 操作系统为 64 位 Windows 10 专业版。数据处理与渲染引擎采用 C++ 结合 Qt 框架开发。

实验数据选取中国东海及南海部分复杂水域作为研究区域,共涉及 500 幅不同时期、不同来源、不同比例尺的海图图幅。数据采集时间从 1970 年至 2020 年,比例尺范围从 1:5,000 到 1:500,000,共计 14 个不同等级。

3.2 实验结果

我们对数据处理前后的存储空间占用进行了评估。原始数据总容量为 35.2GB,包括所有图幅的源文件及元数据。应用本文方法后,压缩存储总容量降至 8.7GB,压缩率为 75.3%。传统方法未进行特殊压缩处理,存储占用相同。压缩效果主要源于以下三个方面:

(1) 坐标偏移整型量化技术将双精度浮点坐标转换为整型存储,减小几何数据体积约 60%;

(2) 属性数据的字典编码消除重复文本描述,减少属性数据体积约 80%;

(3) 最终采用 LZ4 算法压缩二进制流,取得约 40% 的压缩比。

(4) 这种分层、分类型的压缩策略,在保证数据解压和访问效率的同时,最大限度地节约了存储成本,适合海

量海图数据的云端存储与移动端部署。

我们通过模拟不同数据规模下的空间范围查询,测试了方法的检索效率。设计了三种场景:处理 100 幅图幅的局部区域、处理 300 幅图幅的较大范围以及处理全部 500 幅图幅的完整区域。在相同硬件环境下,传统方法基于文件系统和数据库的检索机制,查询响应时间随数据量增长近乎线性增加,分别为 125.3 毫秒、378.9 毫秒和 625.4 毫秒。相比之下,本文方法依托预生成的空间索引(R-Tree)和优化的数据块组织方式,检索效率显著提升,响应时间分别为 32.6 毫秒、76.8 毫秒和 123.5 毫秒,平均提升比例达 78%。特别地,随着数据总量增加,本文方法性能优势更加明显,满足人机交互的实时性要求。

实验数据表明,本文方法在压缩率、检索速度、渲染帧率等量化指标上显著优于传统处理方式,体现出“以空间换时间”“以预处理换实时性”“以结构化换高效率”的设计哲学的有效性,为构建新一代高性能、高可用的海洋地理信息系统提供了坚实的技术路径。

4 结论与展望

本文提出了一种基于投影坐标的海图数据的矢量瓦片化生产方法,通过智能数据选取、投影转换与偏移计算、数据压缩存储等技术手段,有效解决了传统海图数据处理中存在的多图幅压盖、数据冗余、更新效率低等问题。实验结果表明,该方法能够显著提升海图数据的处理效率和显示性能,具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] 张明, 李华. 海洋地理信息系统研究进展[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 12-18.

[2] 王强, 刘洋. 矢量瓦片技术在电子地图中的应用研究[J]. 地理信息世界, 2020, 27(3): 45-51.

[3] 陈伟, 周涛. 基于 Web Mercator 的海图数据标准化处理方法[J]. 海洋测绘, 2018, 38(2): 23-28.

[4] 赵磊, 孙静. 海图数据分层组织与多级索引技术研究[J]. 测绘工程, 2019, 28(4): 56-61.

作者简介: 郭奇(1994.11-), 男, 汉族, 山东省莱阳人, 工程师, 硕士, 研究方向: 从事地理信息显示方面的研究。