引文格式：徐泽阳,林峰,程伟,等. 基于矢量瓦片的高时间精度历史态电网地理图回溯方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):13-17. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.04.003

基于矢量瓦片的高时间精度历史态电网地理图回溯方法

徐泽阳，林　峰，程　伟*，李盛盛，张子谦，何浩奇，郑浩泉
（国网电力科学研究院有限公司 南京南瑞信息通信科技有限公司，江苏 南京 211106）

摘　要：电网设备变化频繁，历史态电网地理图可在地理图上显示指定时刻的历史电网状态，是电网地理信息系统（GIS）在新型电力系统中的重要应用。传统时序断面方法以月或周为周期备份全量电网，时间精度低，数据冗余量大，成图速度慢；传统矢量瓦片切片方法无法指定瓦片时间坐标。提出一种基于矢量瓦片的高时间精度历史态电网地理图快速回溯方法，包括基于基态修正建模方法的历史态电网设备数据模型，高效存储历史电网设备数据；历史态电网矢量瓦片切片算法，可快速生成指定时间坐标的历史态电网矢量瓦片，时间精度为秒。在多家省级电网公司的实验结果表明，此方法将历史态电网地理图的时间轴精度提高到秒级，加快了71.6%的成图速度。

关键词：历史态电网地理图；历史态电网设备数据模型；历史态矢量切片算法；基态修正回溯算法
中图分类号：P283　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2026）04-0013-05

Backtracking Method of Historical Power Grid Geographical Map with High Time Accuracy Based on Vector Tiles

XU Zeyang, LIN Feng, CHENG Wei, LI Shengsheng, ZHANG Ziqian, HE Haoqi, ZHENG Haoquan
(Nanjing NARI Information & Communication Technology Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The power grid equipment changes frequently and the historical power grid geographical map can display the historical power grid state at a specified time on the geographical map, which is an important application of the power grid geographical information system (GIS) in the new power system. The traditional time series section method backs up the full power grid on a monthly or weekly basis, which has low time accuracy, large data redundancy and slow mapping speed. The traditional vector tile slicing method cannot specify tile time coordinates. In this paper, we proposed a fast backtracking method of historical power grid geographical map with high time accuracy based on vector tiles. We used the ground state modified modeling method to design the data model of historical state power grid equipment to improve the storage efficiency. Then, we designed a slicing algorithm of historical power grid vector tiles to quickly generate historical grid vector tiles with specified time coordinates, and time accuracy was second level. The experimental results of several provincial companies of the State Grid show that this method improves the accuracy of time axis of historical power grid geographical map to the second level, and speeds up the mapping speed by 71.6%.

Key words: historical power grid geographical map, historical power network equipment data model, historical vector slicing algorithm, ground state modified backtracking algorithm

电网地理信息系统（GIS）通过历史态电网地理图展示特定时刻的电网状态，包括设备空间分布、拓扑关系与属性，助力电网资源规划、管理与可视化分析[1-5]。但随着新型电力系统发展，电网设备变化频繁，历史态电网GIS数据规模迅速增长，其展示受时间精度低、数据处理效率低、渲染速度慢等问题制约[6-7]。矢量瓦片技术可高效生成、展示地理图，已广泛应用于电网等领域，但现有切片方法无法根据电网数据的时间属性生成指定时间坐标的矢量瓦片。因此本文提出基于矢量瓦片的高时间精度历史态电网地理图快速回溯方法。基于基态修正建模方法提出历史态电网设备数据模型，高效保存设备变化数据；设计电网数据回溯算法，可将设备数据精准回溯到指定时刻历史状态，时间单位为秒；设计历史态电网矢量瓦片切片算法，可指定瓦片空间坐标与时间坐标，快速生成单个历史态电网矢量瓦片，提高历史态电网地理图展示的时间精度与响应速度[8-15]。

项目来源：国家电网有限公司总部科技项目（5700-202340667A-3-3-JC）。
第一作者简介：徐泽阳（1998—），硕士研究生，从事电网模型、电网数字化工作，E-mail：2984411426@qq.com。
通信作者：程伟（1983—），硕士，高级工程师，从事电网模型、电网数字化工作，E-mail：chengwei5@sgepri.sgcc.com.cn。

1　基于矢量瓦片的历史态电网地理图回溯方法

1.1　基于矢量瓦片的电网地理图展示方法

电网设备指电力系统中，根据不同功能类型的资产与设备，其几何类型分为点型和线串型。在电网地理图中，点型设备，依据电力系统图元规范，渲染为设备对应的图元符号；线串型设备则渲染为不同样式的折线。

目前多采用矢量瓦片技术实现设备图形在地理图上的展示。原理如图1所示。

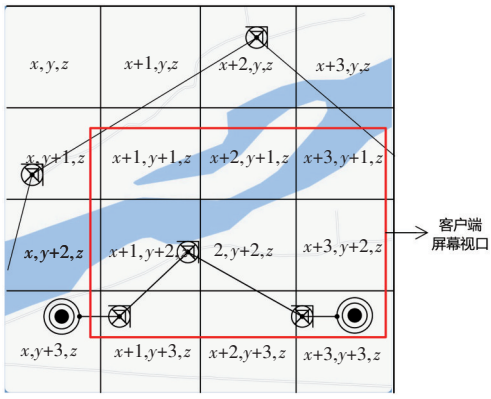


图1　基于瓦片的电网地理图客户端展示原理

瓦片由列号 x 、行号 y 、缩放层级 z 3个坐标唯一确定，对应一块矩形经纬度范围，将此空间范围内的电网设备数据封装成电网设备矢量瓦片，在客户端渲染为电网设备图形，叠加在地理底图瓦片上，可生成一块电网地理图，如图2所示。

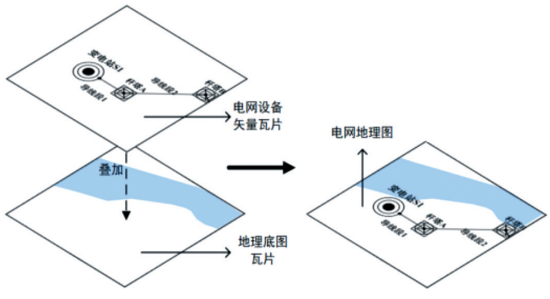


图2　电网设备矢量瓦片叠加地理地图

电网设备矢量瓦片按四叉树瓦片金字塔结构组织，分为0~24层。

客户端屏幕缩放地图，会改变 z 的大小。 z 越大，屏幕视口显示地图范围越小，地图要素越详细。每个缩放层级显示的设备图形依据电压等级与设备类型划分。

每层瓦片以地图左上角为二维坐标轴原点。行列号范围从（0,0）到（ $2z-1, 2z-1$ ）， z 表示所在级别。第0层只有一个瓦片，坐标为(0,0,0)，对应完整世界地图经纬度范围。电网设备数据中记载设备的几何类型与经纬坐标点，经纬坐标点与瓦片坐标点对应关系由公式（1）、（2）表达。

$$x=\frac{(\mathrm{lon}+180)}{360}\times z^2 \tag{1}$$

$$y=\frac{\left(\pi-\ln\left(\tan\frac{\mathrm{lat}\times\pi}{180}+\sqrt{\left(\tan\frac{\mathrm{lat}\times\pi}{180}\right)^2+1}\right)\right)\times z^2}{2\pi} \tag{2}$$

式中， x 为瓦片列坐标； y 为行坐标； z 为缩放层级；lon、lat为设备经纬坐标点的经度坐标与纬度坐标。

瓦片坐标点整数部分代表其归属瓦片，小数部分代表其在瓦片中的具体位置。对于电缆等具有多个瓦片坐标点的线串类型设备，若跨越多个瓦片，需进行要素裁剪合并，用线串与瓦片边框的交点作为分割坐标点。例如，导线段1几何类型为线串，设备经纬度坐标为：[(103.32,23.37),(103.39,23.37)]，包含2个经纬坐标点。若客户端查看的地图层级为12，此导线段瓦片坐标：[(3 223.72,1 774.86,12),(3 224.21,1 774.86,12)]，落在瓦片1：(x=3 223,y=1 774,z=12)、瓦片2：(z=12,x=3 224,y=1 774)2个瓦片上，裁剪为2个线串。瓦片1中线段1几何图形数据为：[(0.72,0.86),(1.0,0.86)]，瓦片2中线段1几何图形数据为：[(0.0,0.86),(0.21,0.86)]。设置瓦片像素大小后，如4 096×4 096，瓦片相对坐标可转换为瓦片像素坐标。

当客户端需要展示电网地理图时，根据屏幕视口需展示的地图经纬度范围，计算所需瓦片的坐标，向服务端请求瓦片。服务端接收对瓦片：（ x ， y ， z ）的请求后，在电网设备数据库中查询目标瓦片空间范围内的电网设备数据，形成瓦片设备数据集合 B ，对 B 执行要素裁剪，然后按规范封装成瓦片，生成电网设备矢量瓦片。客户端接收瓦片后可渲染生成电网地理图。

在原有电网地理图成图流程中，添加电网回溯过程，可在地理图上展示历史状态的电网设备图形。即客户端将用户指定的历史网架时间 t 随瓦片坐标一起发送给服务端。服务端接收对瓦片：（ x ， y ， z ， t ）的请求后，先按原步骤生成瓦片设备数据集合 B ，然后查询瓦片对应经纬范围内曾发生的设备变化，形成历史设备变化记录集合 A 。依据 A 对 B 执行电网回溯，将集合 B 回溯到 t 时刻历史状态，形成历史态瓦片设备数据集合 R 。回溯过程不改变设备数据的结构，可按原有矢量数据裁剪、封装方法处理 R ，生成电网设备矢量瓦片，并在前端渲染为历史状态的电网设备图形，从而生成历史态电网地理图。具体流程如

图 3 所示。

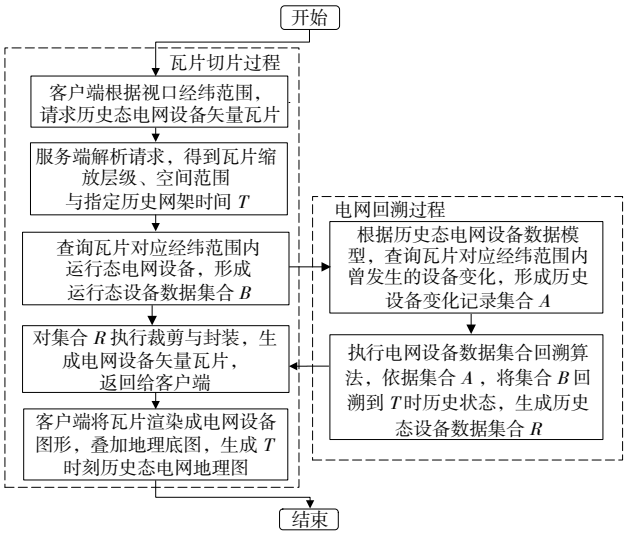


图 3　历史态电网地理图成图流程

1.2　历史态电网设备数据模型

变化设备只占完整电网一小部分，传统时序断面建模方法周期备份某一时刻全部电网设备数据的建模方式，会产生大量数据冗余，且无法记录断面间的多次设备变化，时间精度低。基于基态修正建模方法设计历史态电网设备数据模型，只存储设备变化数据，可记录海量电网设备的全部历史状态，大幅减少数据规模，提升时间精度。

历史态电网模型包含两类数据表：作为基态的运行态电网设备数据表和作为增量的历史态设备变化数据表。运行态表中存储当前在运设备状态记录，记为 D_i，每条记录存储一台在运电网设备的最新设备状态。表 1 和表 2 记录了图 1 线路中杆塔与导线段类设备的运行态设备数据。

表 1　运行态杆塔数据表字段设计与记录示例

设备 ID	设备名	运维单位	几何类型	经纬坐标
A	杆塔 A	xxx	Point	(lonA,latA)
B	杆塔 B	xxx	Point	(lonB`,latB`)
D	杆塔 D	xxx	Point	(lonD,latD)

历史态表中存储设备历史变化记录，记为 $C_{i,t}$，每条记录存储一台电网设备曾发生的一次设备变化，其中 i 为设备编号，t 为变化时间。历史态表继承运行态表全部字段，并增加 3 个变化属性字段。继承自运行态表的字段集合称为变化前设备状态断面。设备 i 在 t 时刻发生变化后，先查询运行态表中此设备的数据记录 D_i。然后新生成一条历史设备变化记录 $C_{i,t}$，用 D_i 填充变化前设备状态断面，用变化操作数据填充变化属性。最后用变化后的新设备属性更新运行态表中的 D_i。表 3、4 记录了图 1 中设备变化产生的设备变化数据。变化类型分 3 种：新增，修改，删除，对应电网设备的新投运、迁改、退役操作。

表 2　运行态导线段数据表字段设计与记录示例

设备 ID	设备名	运维单位	几何类型	经纬坐标
E	导线段 1	xxx	LineString	[(lonS1,latS1),(lonA,latA)]
F	导线段 2	xxx	LineString	[(lonB,latB),(lonD,latD)]
H	导线段 4	xxx	LineString	[(lonD,latD),(lonS2,latS2)]
I	导线段 5	xxx	LineString	[(lonA,latA),(lonB,latB)]

表 3　杆塔变化数据表字段设计与变化记录示例

设备 ID	设备名	运维单位	几何类型	经纬坐标	变化类型	变化时间	变化后新经纬坐标
A	杆塔 A	xxx	Null	Null	新增	$T1$	(lonA,latA)
B	杆塔 B	xxx	Point	(lonB,latB)	修改	$T2$	(lonB`,latB`)
C	杆塔 C	xxx	Point	(lonC,latC)	删除	$T3$	Null

表 4　电缆段变化数据表字段设计与变化记录示例

设备 ID	设备名	运维单位	几何类型	经纬坐标	变化类型	变化时间	变化后新经纬坐标
E	导线段 1	xxx	LineString	[(lonS1,latS1),(lonB,latB)]	修改	$T1$	[(lonS1,latS1),(lonA,latA)]
I	导线段 5	xxx	Null	Null	新增	$T1$	[(lonS1,latS1),(lonA,latA)]
I	导线段 5	xxx	LineString	[(lonA,latA),(lonB,latB)]	修改	$T2$	[(lonA,latA),(lonB`,latB`)]
F	导线段 2	xxx	LineString	[(lonB,latB),(lonC,latC)]	修改	$T2$	[(lonB`,latB`),(lonC,latC)]
F	导线段 2	xxx	LineString	[(lonB`,latB`),(lonC,latC)]	修改	$T3$	[(lonB`,latB`),(lonD,latD)]
G	导线段 3	xxx	LineString	[(lonB,latB),(lonC,latC)]	删除	$T3$	Null

1.3　历史态电网设备数据回溯算法

由于只记录变化量，历史态电网设备数据模型并不能直接查询 T 时刻电网包含的设备数据。服务端收到对瓦片：（x，y，z，t）的请求后，先计算瓦片对应经纬范围 BBox（Bounding Box），依据 BBox 对运行态电网设备数据表中的设备经纬坐标字段进行空间范围查询，可生成瓦片运行态设备数据集合 B。在获取 BBox 内设备变化记录集合 A 后，可依据 A 对 B 执行电网回溯，将瓦片范围内的每一台设备回溯到 T 时刻历史状态，从而将集合 B 由运行态回溯到 T 时刻历史状态。

1.3.1 单设备数据回溯算法

电网设备 i（编号）的生命周期以“新增”类型设备变化为起始，中间可能发生多次“修改”类型设备变化，以“删除”类型设备变化为结束。若设备 i（编号）目前仍然在运行，则运行库中存在1条运行态设备数据 D_i；若设备i已被“删除”，则 D_i 不存在。

设备变化记录 $C_{i,t}$ 中的变化前设备状态断面部分存储了设备变化前的设备数据，若要查询设备i在 T 时刻时的历史设备数据，只需找到 T 后的第一条设备变化记录 $C`_{i,T}$，其中的变化前设备状态断面就是设备i在 $T$ 时刻时的历史设备数据 $D_{i,T}$。若 $C`_{i,T}$ 设备变化类型为“新增”，由于其变化前设备数据不存在，因此 $D_{i,T}$=NULL。若 $C`_{i,T}$ 设备变化类型为“修改”或“删除”，取其中存储的变化前设备状态断面数据作为 $D_{i,T}$。图4展示了在运设备A的时间线。

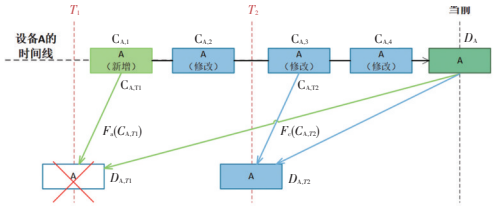


图4 在运设备A历史状态回溯

图5退役设备B的时间线上存在3条设备历史变化记录：“修改”类型的 $C_{B,1}$、$C_{B,2}$，“删除”类型的 $C_{B,3}$。由于设备已退役，不存在当前设备状态记录。

若要将B回溯到 $T2$ 时历史状态，即查询 $D_{B,T2}$。首先查询 $C`_{B,T2}=C_{B,3}$，由于变化类型为“删除”，$D_{B,T2}=C_{B,3}$ 中的变化前设备状态断面。

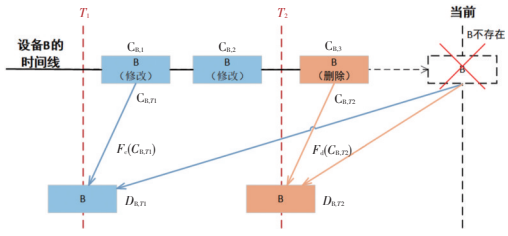


图5 退役设备B历史状态回溯

图5退役设备B的时间线上存在3条设备历史变化记录：“修改”类型的 $C_{B,1}$、$C_{B,2}$，“删除”类型的 $C_{B,3}$。由于设备已退役，不存在当前设备状态记录。

若要将B回溯到 $T2$ 时历史状态，即查询 $D_{B,T2}$。首先查询 $C`_{B,T2}=C_{B,3}$，由于变化类型为“删除”，$D_{B,T2}=C_{B,3}$ 中的变化前设备状态断面。

1.3.2 瓦片空间范围内历史设备变化记录查询

部分设备变化会改变设备经纬坐标，设备可能迁入或迁出BBox范围。集合 A 需包含BBox范围内所有曾发生的设备变化，不论此设备当前是否还在BBox内或是否在运行。

设备变化记录中有2个字段记录了设备坐标：设备经纬度坐标字段，存储设备变化前经纬度坐标；变化后新坐标字段，存储设备变化后经纬度坐标。

1.3.3 电网设备瓦片数据集合回溯算法

若要生成 T 时刻电网设备瓦片，需先获取瓦片经纬范围内运行态设备数据集合 B。然后通过双坐标查询获取瓦片范围内曾发生过的所有设备变化，取每个设备在 T 时刻后的第一次变化记录，作为集合 A。根据 A 中变化记录将 B 中每一台设备的数据回溯到 T 时刻；若设备i已迁出瓦片范围或已退役，则将 A 中记载的设备i在 T 时刻时的数据加入集合 B。对瓦片内曾存在过的所有设备均完成数据回溯后，集合 B 即为 T 时刻瓦片范围内的电网设备数据集合 R。

以示例线路中的杆塔类设备为例，模拟局部电网回溯过程，设此线路在同一瓦片范围内。1号时电网中有B、C、D三台设备。2号时新增设备A，3号修改设备B，4号删除设备C，6号修改设备A，7号再次修改设备B。对应设备变化记录 $C_{A,2}$、$C_{B,3}$、$C_{C,4}$、$C_{A,6}$ 与 $C_{B,7}$。当前运行电网中有A、B、D三台在运设备，其运行态设备数据记录为：D_A，D_B 与 D_D。

若要获取1号时此瓦片范围内的电网数据集合 R，首先查询瓦片范围内运行态设备数据集合 B，$B=\{D_A, D_B, D_D\}$，并生成设备变化记录集合 A，$A=\{C_{A,2}, C_{B,3}, C_{C,4}\}$。然后基于 A，对瓦片中曾存在过的所有设备均进行单设备状态回溯。设备A变化类型为“新增”，用 $C_{A,2}$ 中原始属性Null替代 B 中 D_A，即删除B中 D_A；设备B变化类型为“修改”，用 $C_{B,3}$ 中原始属性 V_{B1} 创建 $D_{B,1}$，替代B中 D_B；设备C变化类型为“删除”，用 $C_{C,4}$ 中的 V_{C1} 创建 $D_{C,1}$，加入B；设备D未发生变化，保留B中 D_D。此时 $B=\{D_{B,1}, D_{C,1}, D_D\}$，已回溯到了1号时历史状态，即为历史态设备数据集合 R。

2 验证分析

基于本文方法开发的历史态电网地理图示，设置电网时间为2025年1月1日，为展示瓦片效果，以红线显示瓦片边框，并在瓦片左上角显示坐标与数据大小。

在系统中切换电网时间，可展示不同时间的电网地理图，高亮显示的设备为当天变化设备。

基于测试数据集对本文历史态数据模型与时序断面数据模型进行存储效率对比，测试数据集模拟了一个市级电力公司的电网GIS数据，共有 3.34×10^7 条各类电网设备数据记录，数据集大小为17.4 GB，以存储3个月的电网状态作为测试条件，以周为备份周期的时序断面数据模型产生86.2 GB历史电网断面数据。本文历史态数据模型产生18.7 GB历史态电网设备变化数据，将历史态电网时间精度提高到秒级的同时，减少了78.2%的数据存储量。

对本文历史态矢量切片算法进行性能测试。使用JMeter模拟100个历史态地理图客户端持续对单台主机（16核、2.0 GHz）请求L10~L22缩放层级、多个视窗区域、多个历史日期的历史态电网地理图，进行不间断压力测试，测试数据如表5所示。主机CPU平均占用率为68%，所有层级切片时间均小于100 ms，瓦片平均数据量为2.519 MB，可满足客户端响应速度要求。

表5　历史态矢量切片测试结果

层级	平均数据量/KB	瓦片平均数据量/KB	平均耗时/ms
L10	8 761	7 074	12.6
L11	6 781	5 227	7.8
L12	8 936	3 499	8.0
L13	46 056	9 472	36.5
L14	18 775	3 218	8.7
L15	16 408	1 920	8.5
L16	6 844	793	5.8
L17	5 863	471	6.3
L18	2 769	373	56.0
L19	1 140	246	15.7
L20	528	213	42.0
L21	385	162	36.0
L22	214	87	47.0

基于历史态矢量瓦片方法与矢量图形方法渲染电网地理图的速度表明，历史态矢量图形方法根据视窗经纬度范围，将所需数据从后端加载到前端并渲染，历史态矢量图形方法的平均渲染时间为750 ms，历史态矢量瓦片方法的平均渲染时间为213 ms。相比矢量图形，历史态矢量瓦片渲染速度提升了71.6%。

3　结　语

本文提出基于矢量瓦片的高时间精度历史态电网地理图快速回溯方法，主要创新点包括：①基态修正建模方法构建历史态电网设备数据模型，减少了数据冗余，提升了数据存储效率；②研发历史态电网设备数据回溯算法，可将运行态数据回溯到指定历史状态，时间精度达秒级；③提出历史态电网矢量瓦片切片算法，新增瓦片时间坐标，提高渲染速度。该方法在提升时间精度和成图速度上取得进展，但仍有优化空间，未来可进一步优化数据存储结构和回溯算法，精准展示更多的历史电网运行数据。

参考文献

[1] 袁智勇，肖泽坤，于力，等. 智能电网大数据研究综述[J]. 广东电力，2021，34(1)：1-12

[2] 余涛，王梓耀，孙立明，等. 支撑新型配电网数字化规划的图形-模型-数据融合关键技术[J]. 电力系统自动化，2024，48(6)：139-153

[3] 何燕兰，司亚君. 基于开源WebGIS的用电信息采集终端全景展示[J]. 地理空间信息，2018，16(3)：87-89

[4] 张兵，唐斌，张勇，等. 基于GIS的农电网络智能化系统[J]. 地理空间信息，2016，14(1)：34-36

[5] 范志成，朱俊澎，袁越，等. 基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J]. 电网技术，2019，43(2)：504-513

[6] 曲朝阳，张振明，曲楠，等. 考虑时空完整性的新型电力系统运行断面图生成与特征提取[J]. 电力系统自动化，2024，48(12)：156-164

[7] 程伟，钱蔚，庞宇，等. Web端海量电网资源GIS数据动态调度与渲染方法[J]. 计算机系统应用，2018，27(2)：138-143

[8] 周云成，许童羽，朴在林. 基于CIM的配电网GIS数据模型存储与维护方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(15)：104-109

[9] 杨沂婷，吕舒清，颜康，等. 电网GIS平台内存数据库优化技术应用研究[J]. 山东电力技术，2015，42(12)：58-60

[10] 赵越，李培，王震，等. 电网图形数据管理MongoDB数据库的应用[J]. 计算机系统应用，2017，26(3)：239-243

[11] 买合布拜·肖开提，薛高倩，雪拉提·司马义，等. 基于人工智能的海量电网GIS数据动态调度方法[J]. 电子设计工程，2024，32(5)：146-149

[12] 熊雄，黄晓莉. 基于GIS的数字电网平台设计与应用[J]. 电力信息与通信技术，2020，18(10)：28-33

[13] 王雪影，王英杰，刘文斌，等. 基于矢量瓦片的铁路GIS空间分层表达技术[J]. 铁道建筑，2022，62(10)：156-160

[14] 靳磊，朱涛. 基于矢量瓦片技术实现铁路路网数据可视化[J]. 铁路计算机应用，2020，29(4)：55-59

[15] 范梦琪，宋伟东，郑人维，等. 基于矢量瓦片技术的Web电子海图优化方法[J]. 海洋科学，2021，45(2)：68-75