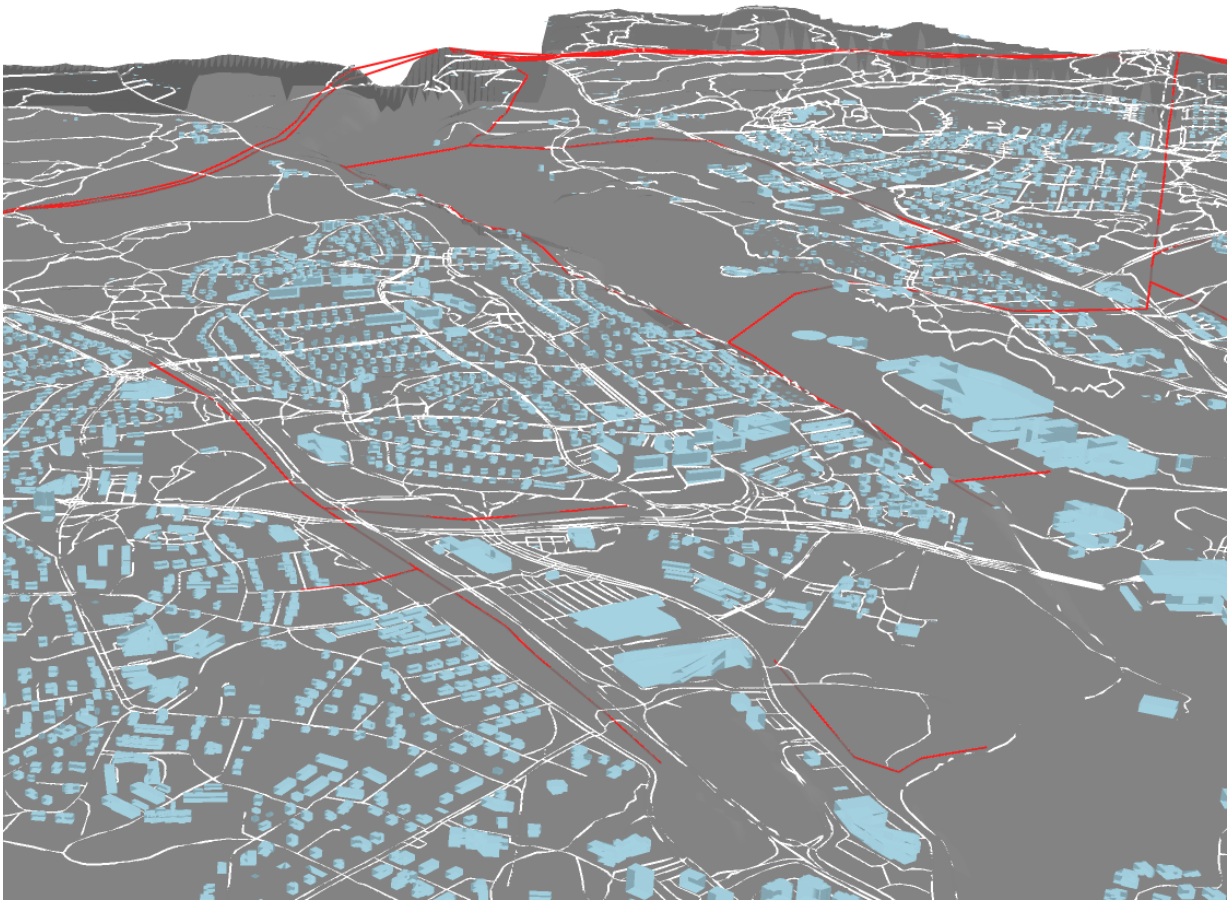
arXiv:2603.20361v1 [cs.DL] 20 Mar 2026

图文摘要

Cenergy3：用于城市能源三维建模的开源软件包

Shiliang Zhang，Sabita Maharjan



亮点

Cenergy3：用于城市能源三维建模的开源软件包

Shiliang Zhang，Sabita Maharjan

- 一种新颖的方法，可利用开源数据检索、整合并可视化城市区域内的电网及其周边环境。

- 一个已发布的开源 Python 库，可自动为任意感兴趣区域进行电网、地形和建筑物的三维建模。
- 一个免费的应用程序编程接口（API），提供基于云计算的城市能源三维建模服务。

- 基于浏览器的图形用户界面（GUI），无论最终用户的编程技能如何，也无论他们使用何种设备，都可以通过该界面访问我们的 API。

Cenergy3：用于城市能源三维建模的开源软件包

Shiliang Zhang，Sabita Maharjan

挪威奥斯陆大学，奥斯陆，*0373*，挪威

摘要

城市能源系统的高效管理与规划需要集成式三维模型，以准确表示能耗节点和配电网络。本文介绍了我们开发的方法和开放发布的软件，该方法与软件可基于开放数据自动生成数字化城市能源三维模型。我们综合利用 OpenTopography、OpenStreetMap 和 Overture Maps 的数据生成三维模型。渲染后的模型将配电电网与建成环境和交通网络结合起来进行可视化和情境化呈现。我们开发的软件包括一个开源 Python 库和一个免费 API，可为三维模型提供交互式图形。渲染后的模型对于分析基础设施布局，以及在空间上关联能源需求节点（建筑物）与能源供应（公用事业电网）至关重要。所开发的 API 采用标准 Web墨卡托坐标（EPSG:3857）和 JSON序列化，以确保在智慧城市和能源仿真平台中的互操作性。我们还提供了一个图形用户界面（GUI），终端用户无论编程技能如何，也无论使用何种设备和平台，都可以通过云服务器访问我们的 API。我们预计，我们的方法和软件能够支持现场研究人员、开发人员、终端用户和政策制定者，用于城市能源监测、供需分析和能源数字孪生等多种应用。

关键词：城市能源、可视化、开源软件包、Python 库、API、图形用户界面。

1. 引言

现代城市景观正经历数字化转型，能源系统相关地理空间数据集迅速积累 [1]。这些数据涵盖广泛的变量，例如能耗指标、能源生产、能源价格和物理基础设施配置，等等 [2, 3]。分析这些数据集对于提取见解、构建知识，从而实现国际可持续发展目标至关重要 [4]。尤其是，地理空间方法有助于规划能源基础设施、在可再生能源并网过程中增强电网韧性，以及优化潮流

优化 [5, 6]。此外，此类分析还能支持供需评估，包括预测建模和长期城市发展预测 [7, 8]。

然而，利用高分辨率能源信息（如细粒度智能电表数据）会引发重大的隐私和伦理问题 [9]。尽管这些数据集提供了有关能源使用的全面详细信息，但其本质上具有敏感性 [10]。具体而言，高频能源数据可能会无意中泄露家庭居住情况、生活方式偏好和日常习惯，从而损害个人隐私 [11]。这种脆弱性常常导致公用事业提供商和学者不愿共享数据，进而限制了城市能源管理领域的创新。

开源地理空间数据可作为大规模能源建模和城市规划中符合隐私要求的替代方案 [12, 13]。OpenStreetMap等平台 [14] 可为能源相关特征提供高保真、匿名化的代理信息。其中包括建筑几何形状、交通可达性以及实体资产的空间布局 [15, 16], ，所有这些信息均可在不泄露敏感个人信息的情况下获取。通过利用这些开放资源，研究人员能够在遵守数据伦理并确保匿名性的同时开展严谨分析。

然而，将零散且数据密集型的分析转化为直观洞见、实现可视化 [17]，仍面临一项重大挑战。尽管拥有大量原始数据，但目前明显缺乏能够在复杂的城市肌理空间语境中对能源基础设施进行可视化的稳健开放工具 [18]。传统的静态报告和二维制图技术往往无法呈现地形、城市密度与配电网络实体布线之间的相互作用 [19, 20]。这种缺乏语境的可视化可能会在城市规划师、工程师和政策制定者之间造成沟通鸿沟；在缺少统一空间参照的情况下，他们可能会对相同数据作出不同解读。

为弥补这一不足，本文介绍了一套开源软件套件，旨在将公共数据转化为具有沉浸感且具备地理空间感知能力的三维城市环境。该软件包由一个 Python 库和一个托管在云服务器上的 API 组成，二者均免费向公众提供。该软件通过整合来自 OpenTopography 的地形数据 [21], 、来自 Overture Maps 的详细建筑语义 [22], 以及来自 OpenStreetMap 的基础设施拓扑（道路和电网），自动生成三维模型。图文摘要展示了该工具生成的一个代表性三维模型。通过将电网基础设施置于建成环境和交通网络之中，该软件为能源数据与实体城市结构之间的空间关联提供了关键工具，为城市能源研究和规划带来了创新进展。本文的贡献总结如下。

- 我们开发了一种开放数据驱动方法，可同时可视化电网、建成环境和交通网络，从而促进对城市能源纽带的整体理解。

- 我们开发了一个开放式软件包 Cenergy3，其中包含一个 Python 库和一个云端 API，可自动合成地形数据、建筑语义，

道路网络和能源基础设施拓扑。

- 我们展示了已发布的库和 API 的实用性，并提供可直接使用本软件包的编程示例。我们还开发了基于浏览器的图形用户界面（GUI），让缺乏编程经验的终端用户也能便捷地访问和使用本软件包。这也降低了资源受限环境中的利益相关者使用本软件包的门槛。

本文其余部分安排如下：第 2 节介绍我们开发的方法，包括如何利用开放数据源合成数据并可视化三维模型。第 3 节介绍开发的 Python 库和云端 API。第 4 节通过 Python 和 MATLAB 编程示例展示如何使用我们的库，并介绍如何通过我们开发的基于浏览器的图形用户界面使用 API。第 5 节阐述我们的库和 API 的互操作性，最后在第 6 节总结全文。

2. 已开发软件包背后的方法

已开发的软件包 Cenergy3 完全基于公共开放数据存储库构建。客户端应用程序可以通过专用的 Python 库或向我们托管的 API 发送标准 HTTP 请求，生成三维模型。该软件的计算流程分为四个阶段：地理编码、地形处理、矢量数据贴覆和建筑物拉伸，具体如下。

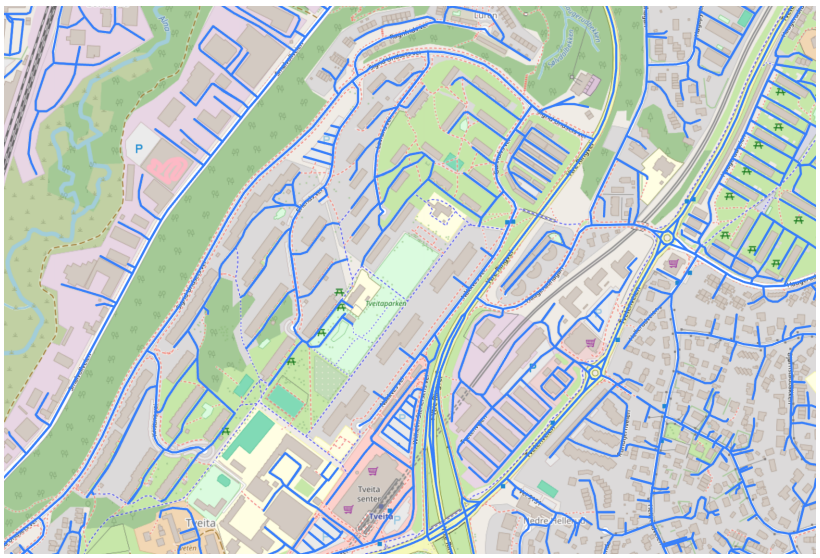


图形 1：挪威奥斯陆阿尔纳地区地形可视化示例。

2.1. 地理编码

收到用户请求后，Cenergy3 使用 OSMnx [23] 工具包将目标地点名称转换为来自 OpenStreetMap [24]的地理配准多边形边界。随后从该多边形推导出精确的边界框，用以界定

研究区域的空间范围。此基于坐标的边界框作为后续数据采集的主要参考，确保所有图层之间实现严格的空间同步。



图形 2：从挪威奥斯陆阿尔纳地区的 OSM 获取的道路网络。蓝色线条表示城市中的道路网络。

2.2. 地形处理

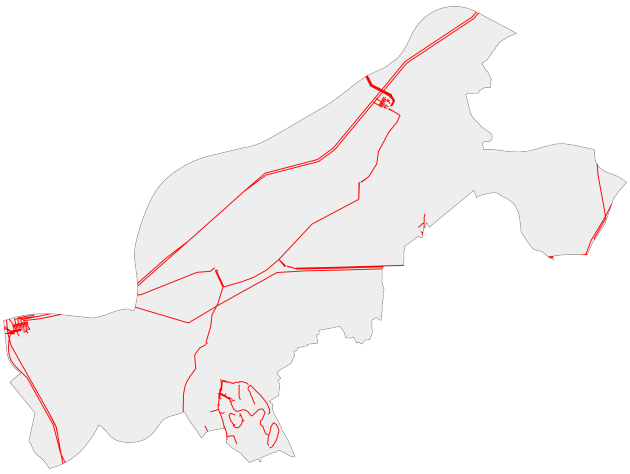
数字高程模型（DEM） [25] 是三维环境重建的结构基础。我们通过 OpenTopography 接口获取全球哥白尼30米（COP30）数字高程模型中的高程数据。使用此服务需要 API 密钥，可在 OpenTopography 平台免费获取。为确保三维可视化中的度量精度，我们将 COP30 数字高程模型数据从其原始坐标参考系 [26] （EPSG:4326）重投影至 Web墨卡托投影 [27] （EPSG:3857）。

随后，将重投影后的高程数据转换为三角网格，以表示局部地形。图 1 展示了处理后地形的示例。具体而言，该算法会为 COP30 数据集中的每个有效像素生成几何顶点。然后，通过对相邻像素的中心进行三角剖分来构建地形面，从而在最终渲染前统一高程几何形状。

2.3. 矢量数据贴覆

将道路网络和配电线路等二维矢量信息与三维地形表面整合，在垂直对齐方面面临着重大挑战。为解决这一问题，Cenergy3 软件包采用了一种专用的贴覆机制。

该流程首先从 OpenStreetMap (OSM) 中提取目标区域的道路网络几何，如图 2 所示。随后对道路边缘进行离散化，并根据下方的 COP30数字高程模型，为每个点插值计算高程值。因此，道路会被渲染为贴合地形等高线的三维路径。我们的



图形3：从OSM获取的挪威奥斯陆阿尔纳地区输电线路。红线表示城市中的电力电缆。

软件对从 OSM 获取的电力线矢量数据采用相同的工作流程（见图 3）。通过将这些矢量数据叠加到数字地形上，我们的软件能够有效地将能源廊道与实际地貌直接关联起来。



图形4：从OSM获取的挪威奥斯陆阿尔纳地区建筑物轮廓。蓝线多边形表示城市中的建筑物。

2.4. 建筑物拉伸

OSM 数据集的一个常见局限是缺乏全面的建筑物高度信息。Cenergy3 通过整合来自 Overture Maps[1] 的高保真数据解决了这一问题。

[1]https://overturemaps.org，访问日期：2026年3月4日。

该流程首先从 OSM 中提取建筑物轮廓，如图4所示。随后，将这些建筑物轮廓与 Overture Maps 进行交叉比对，以获取相应的建筑物高度属性。

对于每栋建筑，我们的软件都会在局部地形高程处生成一个底面多边形，并根据该建筑的特定高度调整相应的屋顶多边形。随后，我们通过连接底面和屋顶多边形所在的水平面，构建建筑物的垂直表面，从而为每栋建筑生成完整的三维网格。图5展示了此类拉伸式城市建筑的一个典型示例。

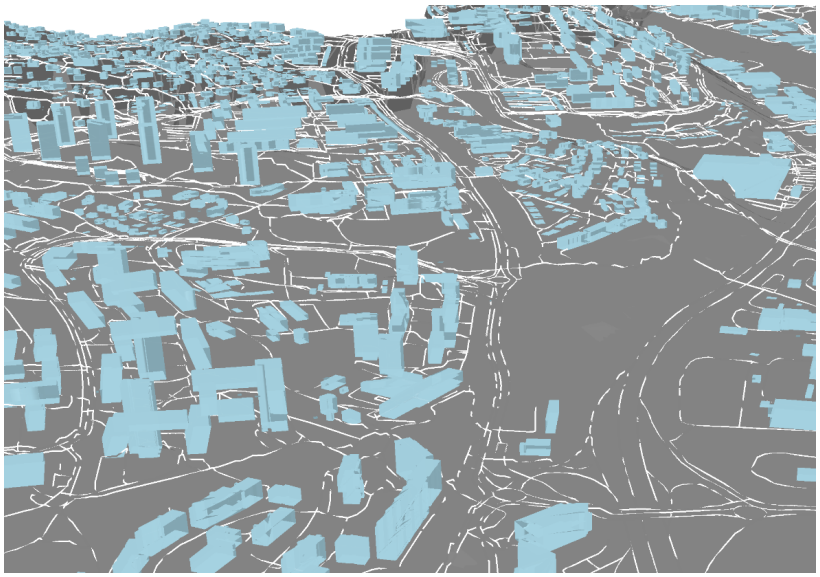


图5：挪威奥斯陆阿尔纳地区拉伸式建筑的示例。

3. Cenergy3：公开发布的 Python 库、免费 API 和公众可访问的图形用户界面

3.1. Python 库

我们已公开发布用于可视化城市能源三维模型的代码。我们使用 Python 开发代码，并通过 PyPI.org 将其作为开放的 Python 库发布。支撑该库的代码可通过我们的 GitHub 网页访问[2]，，已发布的库也有 PyPI.org 文档[3]。我们将代码开源，以便开发者和研究人员在我们的工作基础上开展定制开发与研究。

3.2. 应用程序编程接口（*API*）

我们基于自己的 Python 库开发了一个云端 API，旨在突破终端用户本地环境的计算能力限制。此外，API 也是

[2]https://github.com/slzhang-git/cenergy/，访问日期：2026-03-11年。

[3]https://pypi.org/project/cenergy/，访问日期：2026-03-11年

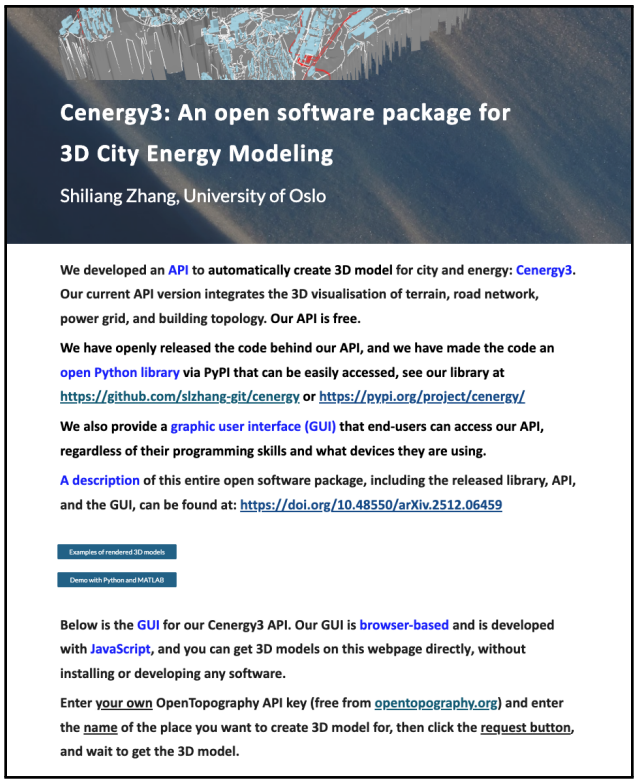


图6：我们开发的用于访问 API 的基于浏览器的图形用户界面。这是一个可通过 https://sites.google.com/view/cenergy3/home 公开访问的基于浏览器的图形用户界面

开发图形用户界面（GUI）的前提，这种界面可以让终端用户彻底摆脱对编程技能以及本地环境和设备的依赖。

我们将 API 部署在 DigitalOcean 提供的云服务器上[4]。我们使用 FastAPI [28]构建并部署 RESTful API [29]，在云服务器上提供标准的 Web应用服务。我们为部署的 API 配备了 4G 随机存取存储器[5] 和一个中央处理器，这对于城市中街区级别的三维模型生成应该足够了。

3.3. 图形用户界面（*GUI*）

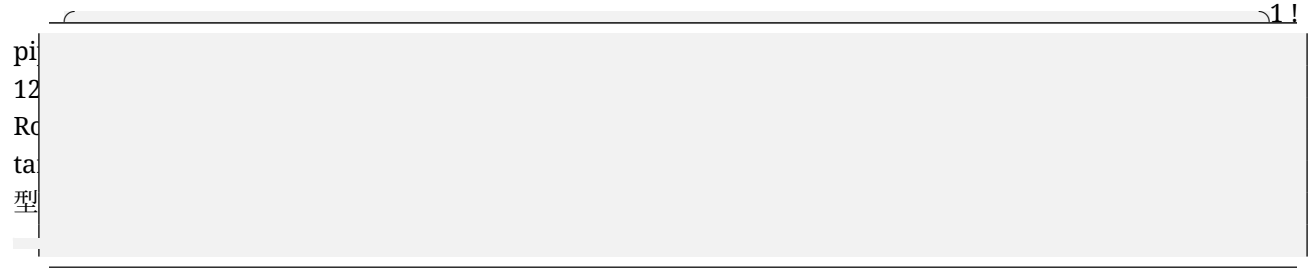
我们为 API 开发了图形用户界面，使终端用户无论编程技能如何，也不受其本地计算环境限制，都能够访问三维城市能源模型。借助我们的图形用户界面，终端用户无需安装任何软件，也无需进行编码。

我们的图形用户界面基于浏览器构建，使用 JavaScript 开发，并通过 Google Sites[6]部署。图 6 展示了部署后的图形用户界面，终端用户只需输入免费的

[4]https://www.digitalocean.com，访问日期：2026-03-11。[5]此随机存取存储器的配置可能会根据我们的资源情况随时间变化。自 2026-01 起，我们使用 4G 随机存取存储器。[6]https://sites.google.com/，访问日期：2026-03-11。

API密钥以及他们想要请求三维模型的地点名称。我们还在图形用户界面网页中提供了一些请求所得模型的示例。

图7：访问和使用我们发布的 Python 库的编程示例

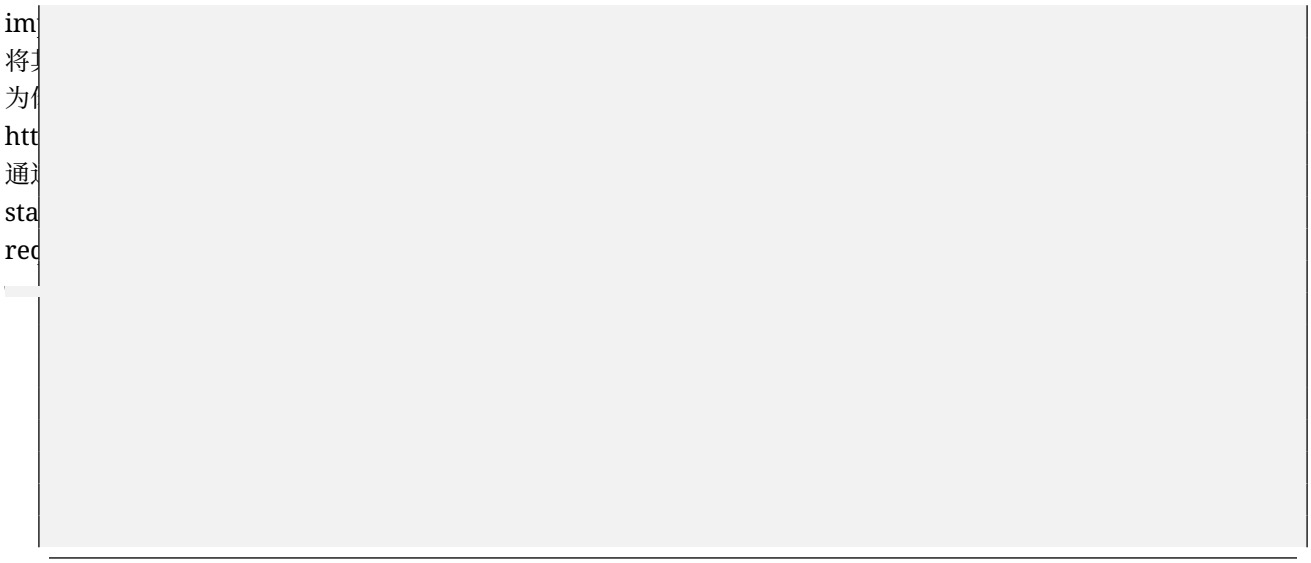


4. 如何使用我们的 Python 库和 API 的演示

4.1. 我们的 *Python* 库演示

我们发布的 Python 库使用起来直观易懂，下面是在 Google Colab 环境中的编程示例：

图形 8：构建请求以调用我们的 API 的 Python 示例，目标地点为苏格兰奥克尼群岛的 Rousay。



在图7的代码中，我们输入*OpenTopography* API密钥和目标区域的名称，然后生成、可视化并保存目标区域的三维模型。请注意，这个额外的API密钥是免费的，可以从*OpenTopography* 平台获取[7]。目标区域采用特定的、适用于 URL 的格式（例如，Rousay-Orkney Islands-Scotland）来定义精确的感兴趣区域。

[7]https://opentopography.org，访问日期：2025年11月27日。

图 9：使用 MATLAB 构造 API 请求的示例。

```
API_密钥 = '111222333444555666777888999'; % 替换它
目标_位置 = '阿瓦隆， 洛杉矶县, 美国';

BASE_URL = " https :// cenergy3 - qjbps . ondigitalocean . 应用 ";
API_端点_网址 =sprintf('%s/%s/%s', BASE_URL, api_密钥,
    目标_位置）;
disp(['正在获取 数据来自: ' api_端点_网址 ]);

% 从 API 获取数据
try
    选项 = 网页选项（' 请求方法 ', '获取', '
        内容类型 ', '文本 ', '超时 ', 3000);
    响应_文本 =webread ( API_端点_URL, 选项）;
    图形_结构体 =JSON 解码 ( 响应_文本）;
    显示（' '）;
    显示（' 成功 获取并解码了 JSON
        结构 .'）;
捕获 我% 捕获错误
    显示（' '）;
    显示（['错误 期间 数据获取 or 处理: ' ME.
        消息 ]）;
end
```

通过图7中的代码，您可以将我们的库安装到本地环境中。随后，所有计算工作，包括从开放数据源收集和整合数据、对数据进行格式化和可视化，以及对可视化结果进行后处理和保存，都将利用本地环境的计算资源完成。这样，您可以避免通过我们发布的API从云服务器访问三维模型时产生的延迟，具体内容详见第4.2节。请注意，使用我们的库在本地环境中运行时，响应时间取决于您的本地计算能力。

4.2. 使用 *Python* 和 *MATLAB* 编程访问我们的 *API* 演示本节展示如何通过标准 HTTP 请求使用我们的 API，并提供 Python 和 MATLAB 示例。客户端交互分为两个步骤：构造请求 URL 并获取数据，然后渲染生成的三维模型。

API 接受直接包含在 URL路径中的参数。如图8中的 Python 示例和图9中的 MATLAB 示例所示，请求通过将基础 URL 与必要参数拼接而成：*OpenTopography* API密钥和目标区域名称。系统依靠标准的 Python requests库来处理 HTTP GET事务。响应正文包含三维模型，并将其序列化为一个完整的 JSON对象，用于描述三维表示。

最后一步是将获取的 JSON 转换回交互式可视化对象。如 Python 中的图10和 MATLAB 中的图12所示，客户端代码使用

不同的方法对 JSON对象进行反序列化。具体而言，在 Python 示例中，我们使用 plotly.graph_objects.Figure 对 JSON 进行反序列化；而在 MATLAB 示例中，我们使用 Ploty，并将可视化结果保存为 HTML 文件。此反序列化过程会立即重建三维场景。使用 Plotly 可确保输出内容立即具备交互性，用户可以旋转、缩放并查看能源基础设施与环境之间的上下文关系。

图 10：使用 Python 可视化从我们的 API 请求的数据的示例

```
导入plotly.graph_objects as go

try:
    fig = go.Figure(图形_dict)
    fig.show() # 显示三维模型的交互式图形
除了 异常作为 e:
    打印(f"\n显示请求的数据时出错：{e}")
```

图 11 展示了使用 Python 编程调用我们的 API 时，苏格兰奥克尼群岛 Rousay 地区三维模型的可视化效果。从图中可以看出，该地区地势平坦，建筑物、道路和输电线路分布在其边界周围。

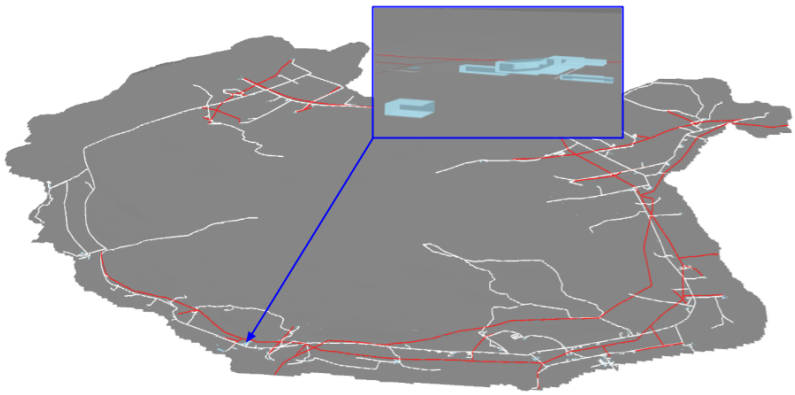


图 11：苏格兰奥克尼群岛 Rousay 地区三维模型的可视化效果。根据我们的 API 日志，该区域采集了 129,652 条高程记录、988 条道路路段、36 条输电线路以及 716 栋带高度建筑物。所有采集的数据均来自开放数据源。

图 13 展示了使用 MATLAB 调用我们的 API 时，美国洛杉矶县阿瓦隆地区三维模型的可视化效果。从图中可以看出，阿瓦隆是一个山区，其建筑物和道路主要分布在三个区域。最大的区域位于山谷底部，而道路则延伸至山上。虽然可以看到有输电线路从阿瓦隆右侧连接至中部，但图中连接左侧的输电线路缺失。这表明开放数据源中的电网信息——更具体地说，在我们的案例中是来自 OpenStreetMap 的信息——并不完整。这也说明，同一地点生成的三维模型可能会随着这些开放数据源中的信息更新而发生变化。

图12：一个使用 MATLAB 可视化从我们的 API 请求的数据的示例

```
% 在浏览器中读取 JSON 文件
输出 HTML  =完整文件('3D_可视化.html');
HTML 模板  = [...
'<!doctype html>\n' ...
'<html>\n' ...
'<标题>\n'...
'  <元字符集="utf-8">\n'...
'  <标题>Plotly JSON 查看器</标题>\n'...
'  <!-- 加载 Plotly from CDN -->\n' ...
'  <script src="https://cdn.plot.ly/plotly-2.29.1.min.js
   "></脚本>\n'...
'  <style>body{margin:0;font-family:Arial,Helvetica,sans-
   serif}#plot{width:100vw;height:100vh;}</style>\n' ...
'</head>\n' ...
'<body>\n'...
'  <div 标识="图"></div>\n'...
'  <脚本>\n'...
'    // 下方插入了 JSON 图形对象。 它应该
    是一个包含“数据”的对象 以及可选的 "布局" 和"
   帧".\n'...
'    var fig = '];
HTML 尾部  = [...
';\n' ...
'    // 如果 fig 是一个数组 其中包含多个
   trace, 转换为 {data: fig
   }\n' ...
'    if (Array.isArray(fig)) {\n' ...
'      Plotly.newPlot("plot", 图, {});\n' ...
'    } 否则如果（图 && 图.数据){\n'...
'      var 布局 =图.布局 ||{};\n'...
'      变量配置 =fig.config ||{};\n<style id="4">'...
'      Plotly.newPlot("plot", fig.数据, 布局, config);\n'
    ...
'    } else {\n' ...
'      // 如果结构不符合预期, try 将其打印出来
   并尝试绘制\n'...
'      console.warn("加载的 JSON 无法识别为 Plotly
   图形。 尝试绘制（如果 可能。");\n'...
'      try {Plotly.newPlot("plot", fig, {}); } 捕获(e){
   document.getElementById("plot").innerText ="无法
   将 JSON 渲染为 Plotly 图形。 详情请参阅控制台。";
    控制台.error(e); }\n' ...
'    }\n' ...
'  </script>\n' ...
'</body>\n' ...
'</html>\n'];
% 合并并写入 HTML
fid = fopen(outHtml, 'w', 'n', 'UTF-8');
如果fid == -1, 错误('无法 创建输出 HTML 文件：%s',
   outHtml); 结束
fprintf(fid, HTML 模板);
fprintf(fid, '%s', 图形_struct);
fprintf(fid, HTML 尾部);
关闭(fid);
% 在系统浏览器中打开
fprintf('已写入 HTML 已写入：%s\n', outHtml);
网页（outHtml, '-浏览器'）;
```

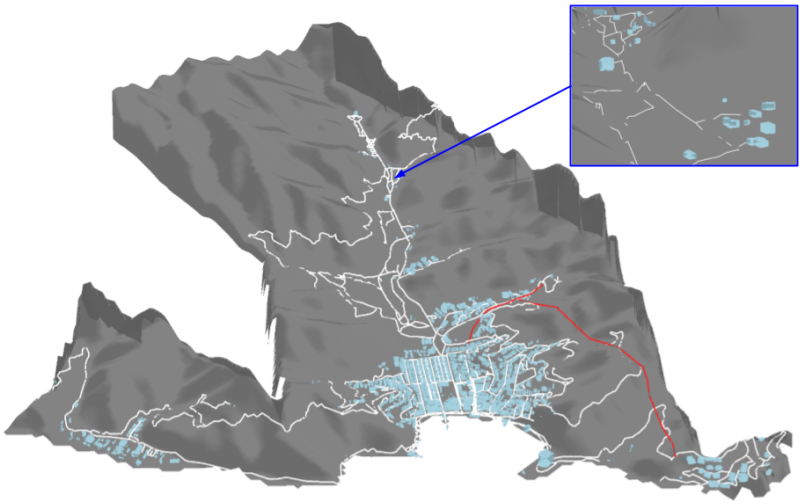


图13：美国洛杉矶县阿瓦隆地区的三维模型可视化结果。根据 API 日志，我们在该区域采集了 9,494 条高程记录、929 条道路路段、4 条输电线路，以及 1,285 个带高度建筑物。所有采集的数据均来自开放数据源。

5. 与其他库的互操作性

在所开发软件套件的背景下，互操作性是指不同系统能够无缝通信和交换数据的能力。Cenergy3 Python库及其配套 API 通过采用以下技术标准的架构，实现了高度兼容性。

5.1. 标准化坐标系

Python 库和已部署的 API 将 Web墨卡托（EPSG:3857）坐标参考系作为所有三维模型生成的通用标准。作为现代网络制图平台（包括 Google地图和 OpenStreetMap）的主流投影方式，这一选择确保生成的三维坐标能够与大多数基于网络的可视化框架和地理空间平台直接兼容。因此，用户可以将输出集成到现有工作流中，无需进行额外计算或重新投影。

5.2. 开放数据格式

通过将处理流程建立在开放数据源之上，并在中间数据状态中采用标准文件格式，该库和 API 确保其内部逻辑保持透明且可验证。选择 Overture Maps 和 OpenStreetMap 作为主要数据提供商，充分利用了非专有、由社区驱动的数据生态系统。这种方法确保底层数据持续接受同行审查，并且无需受限性许可即可供广大研究社区访问。

5.3. API 输出与系统集成

该库和 API 的主要输出均为经 JSON 序列化的 Plotly 图形对象。由于 JSON 是基于 Web 的数据交换标准协议，生成的模型具有很强的通用性，可用于以下环境：(i) Web 前端。借助 Plotly.js，可将模型嵌入基于 JavaScript 的 Web 应用程序中，直接在浏览器内提供交互式三维可视化。(ii) 数据科学环境。JSON 输出可在 Jupyter Notebooks 等 Python 环境中即时反序列化和操作，便于进一步进行统计分析或机器学习任务；以及 (iii) 云服务。该 API 基于 FastAPI 框架构建，可简化其在容器化平台或无服务器平台上的部署。由此形成 RESTful API，并可通过标准 HTTP 请求触发三维模型生成流程。这些设计考量确保 Cenergy3 套件能够作为模块化的“即插即用”组件，应用于任何需要按需生成具备地理空间感知能力的三维模型的建筑系统。

6. 结论

我们介绍了一款用于城市能源三维建模的开源软件包。该软件可从开放数据源获取、汇编和整合数据，并提供数字化城市能源三维模型的可视化结果。生成的模型包含感兴趣区域的地形、建筑语义与高度、道路网络和电网。我们以 Python 库和免费云端 API 的形式公开发布了该软件包。我们还为 API 开发了图形用户界面。这样，无论用户的编程技能如何，也无论其编码环境的计算能力如何，都可以使用我们的软件访问三维模型。我们强调，软件收集并呈现的所有信息和数据均来自开放数据源。这确保了软件生成的结果建立在经过广泛社区审视的基础之上；同时，我们也通过这一开源软件包为开源生态系统作出了贡献。软件源代码可通过我们的 GitHub 页面公开获取，我们期待针对特定用途开展更多定制化开发例如电网管理与监测、供需分析以及详细的配电网拓扑识别。

参考文献

[1] Uznir Ujang 和 Ram Narayan Yadava。《智慧城市发展、生态协同与城市复兴地理空间创新导论》。载于地理空间创新：点燃智慧城市、生态协同与城市复兴：智慧城市地理空间技术，第 3–15 页。Springer，2025年。

[2]Hans Hersbach、Bill Bell、Paul Berrisford、Gionata Biavati、Andás Horányi、J Muñoz Sabater、Julien Nicolas、Carole Peubey、Raluca Radu、Iryna Rozum 等。自1979年起至今的 ERA5 单层逐小时数据。哥白尼气候变化服务 *(C3S)* 气候数据存储库 *(CDS)*，2019年。

[3] Jann M Weinand、Russell McKenna 和 Kai Mainzer。用于市政能源系统分析的高空间分辨率社会经济与能源数据。*Scientific Data*，6(1):243，2019年。[4] Balasubbareddy Mallala、Azka Ihtesham Uddin Ahmed、Sastry V Pamidi、Md Omar Faruque 和 Rajasekhar Reddy。利用随机森林算法，根据可再生能源预测全球可持续能源。*Results in Engineering*，25:103789，2025年。[5] LaRico Andres、Van-Hai Bui、Antonios M Koumpias 和 Wencong Su。热点分析：一种用于可视化脆弱社区停电情况的有效地理信息系统方法和能源正义工具。载于*2025*年 *IEEE*电力与能源学会年度大会 *(PESGM)*，第1–5页。IEEE，2025年。[6] Razzaqul Ahshan、Md Shadman Abid 和 Mohammed Al-Abri。大规模电网的地理空间制图：一种基于残差图卷积网络并采用注意力机制的方法。*Energy and AI*，20:100486，2025年。[7] Ruipeng Xu、Cuo Zhang、Daming Zhang、Zhao Yang Dong 和 Christine Yip。通过协调配电网重构与移动储能实现自适应鲁棒负荷恢复。*IEEE Transactions on Smart Grid*，15(6):5485–5499，2024年。[8] Oskar Våle、Shiliang Zhang、Sabita Maharjan 和 Gro Klæboe。探索能源平衡市场预测模型的可解释性。*Artificial IntelligenceScience and Engineering*，2025年。[9] Shiliang Zhang、Sabita Maharjan、Lee Andrew Bygrave 和 Shui Yu。能源行业的数据共享、隐私与安全考量：从技术现状到监管规范的综述。*arXiv* 预印本 *arXiv:2503.03539*，2025年。[10] Imane Cheikh、Sébastien Roy、Essaid Sabir 和 Rachid Aouami。大规模物联网中的能源、可扩展性、数据与安全：现状与未来方向。*IEEE Internetof Things Journal*，2026年。[11] Vinden Wylde、Nisha Rawindaran、John Lawrence、Rushil Balasubramanian、Edmond Prakash、Ambikesh Jayal、Imtiaz Khan、Chaminda Hewage 和 Jon Platts。网络安全、数据隐私与区块链：综述。*SN Computer Science*，3(2):127，2022年。[12] Graziano Salvalai、Yunxi Zhu 和 Marta Maria Sesana。从建筑能耗建模到城市建筑能耗建模：近期研究趋势与仿真工具综述。*Energy and Buildings*，319:114500，2024年。[13] Rasha F El-Agamy、Hanaa A Sayed、Arwa M AL Akhatatneh、Mansourah Aljohani 和 Mostafa Elhosseini。智慧城市数字孪生综合分析：一项涵盖4200篇论文的文献计量学研究。*Artificial Intelligence Review*，57(6):154，2024年。[14] John E. Vargas-Munoz、Shivangi Srivastava、Devis Tuia 和 Alexandre X. Falcão。OpenStreetMap：机器学习与遥感领域的挑战和机遇。*IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*，9(1):184–199，2021年。

[15] Cassiano Bastos Moroz 和 Annegret H Thieken。将城市形态作为住房与基础设施不平等的替代指标：一种利用开放建筑物轮廓数据的机器学习方法。《计算机、环境与城市系统》，126:102402，2026年。[16] Prashidha Khatiwada、Massoud Sofi、Zhiyuan Zhou 和 Elisa Lumantarna。利用遥感、人工智能和无损检测，对现有建筑安装绿色屋顶进行城市尺度的可行性评估。《可持续城市与社会：进展》，第100033页，2026年。[17] Juan Carlos Quiñones-Gómez、Enric Mor 和 Jonathan Chacón。设计过程中的数据驱动设计：关于挑战与机遇的系统性文献综述。《国际人机交互杂志》，41(4):2227–2252，2025年。[18] Shiliang Zhang、Sabita Maharjan、Kai Strunz 和 Jan Christian Bryne。数据描述：地理数据集中的挪威电力（noregeo）。《*IEEE*数据描述》，3:82–92，2026年。[19] Yunfeng Yan、Yadong Han、Donglian Qi、Jiajun Lin、Zhi Yang 和 Lingfeng Jin。基于多尺度动态图卷积网络的电力设备巡检多标签图像识别。《能源报告》，9:1928–1937，2023年。[20] Sean Kapp、Jun-Ki Choi 和 Taehoon Hong。利用物理系统参数指导的统计模型和机器学习模型预测工业建筑能耗。《可再生与可持续能源评论》，172:113045，2023年。[21] Sriram Krishnan、Christopher Crosby、Viswanath Nandigam、Minh Phan、Charles Cowart、Chaitanya Baru 和 Ramon Arrowsmith。OpenTopography：一种面向服务的架构，旨在促进社区访问激光雷达地形数据。载于第二届地理空间研究与应用计算国际会议论文集，第1–8页，2011年。[22] Mitchell Shiell、Rosi Bajari、Dusan Andric、Jon Eubank、Brandon F Chan、Anders J Richardsson、Azher Ali、Bashar Allabadi、Yelizar Alturmessov、Jared Baker 等。Overture：一个开源基因组学数据平台。《巨量科学》，14:giaf038，2025年。[23] Geoff Boeing。使用OSMnx对城市网络和城市便利设施进行建模与分析。《地理分析》，57(4):567–577，2025年。[24] Jonathan Bennett。*Open Street Map*。Packt Publishing Ltd，2010年。[25]Sandip Mukherjee、Pawan Kumar Joshi、Samadrita Mukherjee、Aniruddha Ghosh、RD Garg 和 Anirban Mukhopadhyay。开源数字高程模型（DEM）垂直精度评估。《国际应用地球观测与地理信息杂志》，21:205–217，2013年。

[26] Manish Kumar、RB Singh、Anju Singh、Ram Pravesh、Syed Irtiza Majid 和 Akash Tiwari。地理信息系统中的参考与坐标系。载于城市规划与管理中的地理信息系统，第25–46页。Springer，2023年。[27] Emmanuel Stefanakis。Web墨卡托与栅格瓦片地图：在线地图服务提供商的两大基石。*Geomatica*，71(2):100–109，2017年。[28] Malhar Lathkar。使用FastAPI构建高性能Web应用。加利福尼亚州：*Apress Berkeley*，2023年。[29] Matthias Biehl。*RESTful API*设计，第3卷。API-University Press，2016。