DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0111-05

基于多视图深度采样的数字化发电厂三维交互场景重建

欧旭剑, 王敬光, 范鹏成, 闫承翰, 高 磊

(广东粤电滨海湾能源有限公司,广东 东莞 523932)

摘 要:数字化电厂的构建关乎企业生存与发展,在数字化电厂的构建中,三维场景重建的效果影响着数字化电厂的整体构建水平。传统方法缺乏交互性,存在细节不够生动细致的问题,设计基于多视图深度采样的数字化发电厂三维交互场景重建方法。设计基于点云拼接与空间交会的双相机多视图重建测量方法,设置、安装、标定固连双相机,通过双目相机实施面向数字化发电厂的多视图三维重建测量,实现多视图点云深度采样。通过移动曲面拟合最小二乘迭代算法实施采样结果的滤波处理。通过稠密光流重建滤波后数据,利用表面重建算法、基于视点的 3D 显示方法与交互设备完成数字化发电厂三维交互场景重建。测试结果表明该方法的 EPE 较低,重建效果良好;细节误差比率较低,建模更加生动细致;整体鲁棒性较强。

关键词:数字化发电厂;双目相机;多视图点云深度采样;滤波处理;稠密光流;三维交互场景重建

中图分类号: TP391.9;TM62 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0111-05

3D interactive scene reconstruction of digital power plants based on multi view deep sampling

Ou Xujian, Wang Jingguang, Fan Pengcheng, Yan Chenghan, Gao Lei

(Guangdong Yuedian Binhai Bay Energy Co., Ltd., Dongguan 523932, Guangdong, China)

Abstract: The construction of digital power plants is related to the survival of enterprises and property exhibitions. In the construction of digital power plants, the effect of 3D scene reconstruction affects the overall construction level of digital power plants. Traditional methods lack interactivity and the details are not vivid and detailed enough. Therefore, a 3D interactive scene reconstruction method for digital power plants based on multi view deep sampling is designed. A dual camera multi view reconstruction measurement method is designed based on point cloud stitching and spatial intersection, to set up, install, and calibrate fixed dual cameras, and implement multi view 3D reconstruction measurement for digital power plants through binocular cameras to achieve deep sampling of multi view point clouds. The sampling results are filtered using a moving surface fitting least squares iterative algorithm. The filtered data is reconstructed through dense optical flow, and the 3D interactive scene reconstruction of the digital power plant is completed using surface reconstruction algorithms, viewpoint based 3D display methods, and interactive devices. The test results show that the EPE of this method is low and the reconstruction effect is good; The detail error ratio is lower, and the modeling is more vivid and detailed; The overall robustness is strong.

Keywords: digital power plant; binocular camera; multi view point cloud deep sampling; filtering processing; dense optical flow; 3D interactive scene reconstruction

我国经济早已步入全球化竞争中,作为一种基础商品,电力的价格不仅与每个人的生活成本息息相关,还与各行业的生产成本直接相关,决定着我国企业的全球竞争力。发达国家电厂的操作人数整体较少,而我国电厂的操作人数远高于发达国家。同时近几年煤价居高不下,很多电厂面临亏损,迫使我国必须积极推进改革进程,以实现电厂的竞价上网与市场化运作。只有经营水平好、污染物排放少、能耗低的企业才能获得长足发展,其他企业则可能迎来生存危机[1]。在该背景下,数字化电厂应运而生。数字化电厂是以现代的仿真、通讯、网络、计算机等数字化技术为基础实现全厂仿真控制、辅助、电、炉、机的一体化,不断优化电厂整体运行。在数字化电厂的构建中,三维交互场景的重建是一个重点研究问题,关系着数字化电厂的整体构建水平。

对于三维交互场景重建问题的研究,目前已经实现了基于视觉图像与距离信息等不同数据的三维交互场景重建,数据采集方式也越来越多样化。其中文献[2]就提出一种基于 SLAM、SCNet 实例分割网络、TSDF 的 ORBTSDF-SCNet 三维重建方法,并在 TUM、ICL-NUIM 数据集上验证了该方法的有效性。文献[3]中提出一种基于多源传感

收稿日期:2026-01-30;**录用日期**:2026-03-27

基金项目:国家能源集团项目(SHMFD-ZK-2021-0025)

作者简介:欧旭剑(1985—),男,工程师,研究方向为三维数字化智慧电厂、智能发电、信息化与智能化。

引用本文:欧旭剑,王敬光,范鹏成,等. 基于多视图深度采样的数字化发电厂三维交互场景重建[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):111-115. (Ou Xujian, Wang Jingguang, Fan Pengcheng, et al. 3D interactive scene reconstruction of digital power plants based on multi view deep sampling[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 111-115.)

器数据融合的三维场景重建方法,有效结合目标检测与三维建模这2个过程,完成无冗余目标的校园场景点云地图构建。以上方法在数字化发电厂三维交互场景重建的应用中缺乏交互性,并且存在细节不够生动细致的问题,因此设计一种基于多视图深度采样的数字化发电厂三维交互场景重建方法。

1 三维交互场景重建方法设计

1.1 可见光多视图点云深度采样

基于空间交会和点云拼接设计一种双相机多视图重建测量方法,实现数字化发电厂的多视图点云深度采样。该方法可以分为2个核心部分,第1个核心部分是固连双相机的设置、安装与标定,第2个核心部分是通过该双目相机实施面向数字化发电厂的多视图三维重建测量。

该方法的整体流程设计如下。

1)安装与设置双目相机

所使用的是2台3D定焦单反相机,使用固定杆件将2台单反相机分别固定于杆件两端。使用同步触发器实现两台定焦单反相机的同步触发[4]。

在安装与设置中,需要注意以下两点:a)使用小光圈、短焦镜头,确保相机景深较深。b)控制定焦单反相机的安装姿态,确保其拥有较大公共视场。

2)相机标定

相机标定过程如下:a)布置空间控制点。必须合理布置标定中的空间控制点[5]。在布置中,需要保证相机与待测点之间的距离与控制点与相机之间的距离大致相同。控制点需要均匀布设,避免出现局部区域过于集中的问题,同时整个视场都应该布设标志点,以标定像差系数。b)计算相机内参数。利用全站仪测量各控制点的对应空间位置并计算相机参数初值。

3)计算双相机固连关系

依旧参考系下双目相机的位置、姿态数据计算二者的固连关系[6]。将参考系下的相机1、相机2的平移矩阵设为$\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$,旋转矩阵设为$\boldsymbol{C}_1$、$\boldsymbol{C}_2$。则当以相机1坐标系为参考时,相机2的位置与姿态可以用下式来表示,即

$$\begin{cases}\boldsymbol{C}_{12}=\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{C}_1^{-1}\\ \boldsymbol{B}_{12}=\boldsymbol{B}_2-\boldsymbol{C}_2^{-1}\boldsymbol{C}_1\end{cases} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{C}_{12}$是相机2的位置;$\boldsymbol{B}_{12}$是相机2的姿态。

4)标志点布置

在待测区域整体均匀地贴设标志点。对于各标志点,需要对其实施编号处理,便于后续匹配。

5)多视图深度采样

使用双目相机从不同角度与位置实施多次拍摄,确保将全部标志点覆盖,完成多视图深度采样。

6)双目交会

以相机1为参考系,通过线-线交会的方式获取参考系下公共视场的双目相机测量点三维坐标。

7)图像对应相机坐标系统一

将参考坐标系定为某时刻相机1坐标系,计算相机1坐标系之间在相邻时刻的对应位姿关系,依据传递关系实施各时刻相机1的坐标系位姿关系计算[7]。

8)点云拼接与融合

坐标系统一后拼接各时刻的点云。利用计算均值的方式实施点云融合,以初步获取所有标志点的空间坐标。具体计算公式如下

$$Q^q=\frac{1}{M^q}\begin{bmatrix}\sum X_j^q\\ \sum Y_j^q\\ \sum Z_j^q\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,q指的是待融合空间;X_j^q是指不同时刻空间点j在q中的X轴坐标;Y_j^q指的是不同时刻空间点j在q中的Y轴坐标;M^q是全部时刻q在重建点云内出现的次数;Z_j^q是指不同时刻空间点j在q中的Z轴坐标[8]。

9)点云位置优化

通过光束法平差的方法同时实施相机外参数与空间点云位置的优化。

将各相机相面上各空间点的重投影残差和作为目标函数,具体表示式如下:

$$H^{\mathrm{img}}(\alpha,X_{\mathrm{g}})=\sum_i\sum_j\|\hat{y}_{j,i}(\alpha,X_{\mathrm{g}})-y_j\|^2 \tag{3}$$

式中,$\hat{y}_{j,i}(\alpha,X_{\mathrm{g}})$是指在当前空间点坐标估计值$y_j$与外参数估计$\alpha$下空间点$X_{\mathrm{g}}$在第$i$张图像上的预测像点坐标或重投影像点坐标[9]。

将$H^{\mathrm{img}}(\alpha,X_{\mathrm{g}})$最小化即可实现优化点云位置的目标,具体如下式

$$(\alpha,X_{\mathrm{g}})=\underset{\alpha,X_{\mathrm{g}}}{\arg\min}H^{\mathrm{img}}(\alpha,X_{\mathrm{g}}) \tag{4}$$

10)形变信息与待测尺寸参数计算

利用重建结果计算数字化发电厂待测尺寸参数和形变信息[10]。

1.2 多视图点云深度采样滤波处理

通过移动曲面拟合最小二乘迭代算法对多视图点云深度采样结果实施滤波处理。地形曲面为复杂的曲面空间,假设该空间由多个结构简单的、小的曲面网格构成,通过二次多项式将网格拟合为二次曲面,实现滤波处理。

滤波处理的具体步骤如下。

1)点云数据预处理

通过高程限制法将存在严重误差的点云数据删除,通过角度限制法将无效数据点删除。

2)将离散的点云数据索引至kd-tree中,通过移动窗口实施二次多项式曲线拟合[11]。其中地形曲线的计算通过最小二乘方法来实现,具体如下式

$$\vartheta=b_0\rho^2+b_1\theta^2+b_2\rho\theta+b_3\rho+b_4\theta+b_5 \tag{5}$$

式中,b_0、b_1、b_2、b_3、b_4、b_5指的是最小二乘参数;ρ、θ、ϑ为地形曲线的三轴坐标。

根据上式能够获得网格中点h的误差R,计算公式如下,即

$$R = \vartheta_k - b_0\rho_k^2 + b_1\theta_k^2 + b_2\rho_k\theta_k + b_3\rho_k + b_4\theta_k + b_5 \tag{6}$$

式中，k 表示点云数据样本。将上式简化为以下的误差方程，即

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{SB} - \boldsymbol{\vartheta}' \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{S}$ 为 ρ_k、θ_k 的最小二乘关联矩阵，表达式为

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_1^2 & \boldsymbol{\theta}_1^2 & \boldsymbol{\rho}_1\boldsymbol{\theta}_1 & \boldsymbol{\rho}_1 & \boldsymbol{\theta}_1 & 1 \\ \boldsymbol{\rho}_2^2 & \boldsymbol{\theta}_2^2 & \boldsymbol{\rho}_2\boldsymbol{\theta}_2 & \boldsymbol{\rho}_2 & \boldsymbol{\theta}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\rho}_n^2 & \boldsymbol{\theta}_n^2 & \boldsymbol{\rho}_n\boldsymbol{\theta}_n & \boldsymbol{\rho}_n & \boldsymbol{\theta}_n & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$\boldsymbol{B}$ 为最小二乘参数矩阵，具体为

$$\boldsymbol{B} = [b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]^t \tag{9}$$

式中，t 指的是最小二乘阈值[12]。

$\boldsymbol{\vartheta}'$ 为 ϑ_k 构成的矩阵，具体如下式

$$\boldsymbol{\vartheta}' = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \cdots, \vartheta_n\}^t \tag{10}$$

$\boldsymbol{r}$ 为 R 构成的矩阵，具体如下式

$$\boldsymbol{r} = [R_1, R_2, \cdots, R_n]^t \tag{11}$$

根据误差方程求出残差的最小二乘和为

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}^t\boldsymbol{r} = \min\boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{L} = ((\boldsymbol{S}^t\boldsymbol{S})^{-1}\boldsymbol{S}^t\boldsymbol{\vartheta}') \end{cases} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{L}$ 指的是二乘和。

计算最小二乘和后即可获得拟合曲面。

3）通过自适应阈值将点标记合成非地面或地面。

4）利用移动曲线滤波器实施一系列减小网格的重复迭代，直到完成所有点的分类[13-14]。

5）对于非地面点，对其实施多尺度加权插值，获取 DEM。

1.3　三维交互场景重建

通过稠密光流对多视图点云滤波数据实施重建，以便点云生成后为表面保留更多细节，利用表面重建算法、基于视点的 3D 显示方法与交互设备完成数字化发电厂三维交互场景重建。

首先基于深度学习网络实施光流匹配点计算，选用的网络结构为 FlowNetS。通过匹配点替换点云即可生成稠密点云。

由于稠密光流需要表示向下一帧运动的大小与方向，通过 HSV 颜色空间对其可视化处理[15]。

接着通过表面重建算法实施数字化发电厂三维模型的重建，选用的表面重建算法为泊松表面重建法。算法通过构建指示函数来表示三维点在表面外还是表面内。当其值为 1，表明在表面内；当其值为 0，表明在表面外[16-17]。

其重建示意图如图 1 所示。通过指示函数可以实施整个空间的梯度计算，只有物体表面附近才能实现梯度的计算，其他位置处的梯度均为 0。

其中指示函数的表达式为

$$Y_{\mathrm{M}} = \min_{\zeta} \| \nabla_{\zeta} - F \| \tag{13}$$

式中，∇_{ζ} 指的是指示梯度；F 是指有相点集；ζ 指的是 F 中的点。

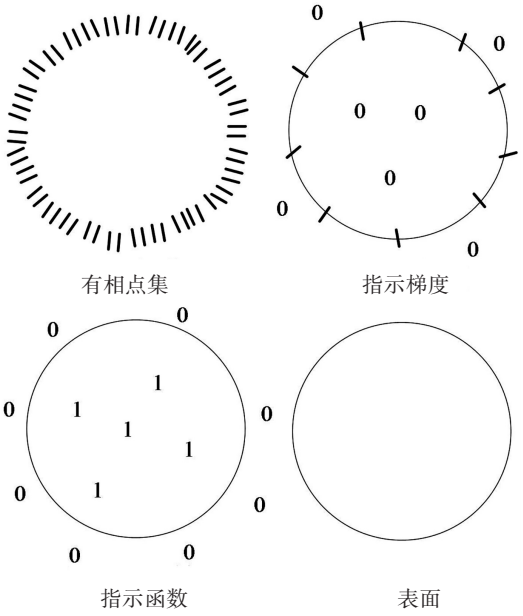


图 1　泊松表面重建示意图

Fig. 1　The schematic diagram of poisson surface reconstruction

对于重建的数字化发电厂三维模型，通过基于视点的 3D 显示方法与交互设备实现其 3D 交互显示[18]。具体来说，将 2D 显示器放在柱透镜光栅焦平面上，将各像素的光线约束为平行光，从而将像素位置信息转化为不同视点光线的方向信息。接着通过 VR 头显观察不同视点光线的方向信息，实现数字化发电厂三维模型的交互化展示。

2　三维交互场景重建实例测试

2.1　数字化发电厂选取与实验

通过所设计的方法实施某数字化发电厂的三维交互场景重建，测试该方法的三维交互场景重建性能。实验中的数字化发电厂原型为某地区港电项目中的发电场项目的一期，由超超临界湿冷发电机组（2×10^3 MW）、全钢构架悬吊结构 II 型锅炉、烟气脱硝与脱硫装置以及其他发电设备构成。其经济指标与技术指标在国内均较为领先，在项目推进过程中同步搭建了数字化发电厂。

利用设计方法对实验数字化发电厂实施三维交互场景重建时，首先通过设计的双相机多视图重建测量方法，实施其多视图点云深度采样。其中实验采集设备的安装情况如图 2 所示。

接着通过移动曲面拟合最小二乘迭代算法对多视图点云深度采样结果实施滤波处理。其中某处设备场景的滤波处理结果如图 3 所示。

观察图 3 可以发现，点云深度采样结果经过滤波处理以后整体噪声较低，较为清晰。

最后通过稠密光流对多视图点云滤波数据实施重建，并通过表面重建算法等完成实验数字化发电厂的三维交互场景重建。其中重建的数字化发电厂三维模型如图 4 所示。



图 2 实验采集设备的安装照片

Fig. 2 The installation photo of the experimental collection equipment

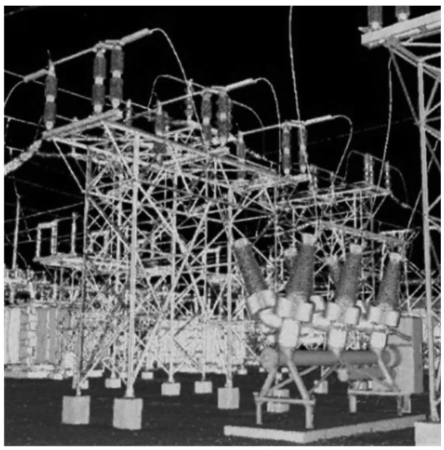


图 3 某处设备场景的滤波处理结果

Fig. 3 The filtering processing result of a certain device scene



图 4 重建的数字化发电厂三维模型

Fig. 4 The three-dimensional model of the reconstructed digital power plant

通过基于视点的 3D 显示方法与交互设备实现 3D 交互显示。可以发现该方法相对于前文提到的基于 SLAM、SCNet 实例分割网络、TSDF 的 ORBTSDF-SCNet 三维重建方法、基于多源传感器数据融合的三维场景重建方法已经实现了交互性方面的突破。

2.2 对比测试方法选择

为比较几种方法的三维场景重建性能,将以上两种方法作为对比方法,分别用方法 1、方法 2 来表示,共同进行 3 种方法的三维场景重建性能测试。

2.3 评价指标选取

测试三种方法的 EPE 与误差比率。其中 EPE 的计算公式具体如下

$$\mathrm{EPE} = \frac{D(\vec{K},\vec{W})}{m} \tag{14}$$

式中 $\vec{K}$ 指的是像素预测光流向量; m 是指全部像素数量; $\vec{W}$ 指的是真实光流向量; $D(\vec{K},\vec{W})$ 是指 $\vec{K}$ 与 $\vec{W}$ 的欧式距离。

误差比率是指三维场景重建中与原数字化电厂的细节误差比率。

2.4 测试结果

2.4.1 EPE 测试结果

三种测试方法的 EPE 测试结果如图 5 所示。

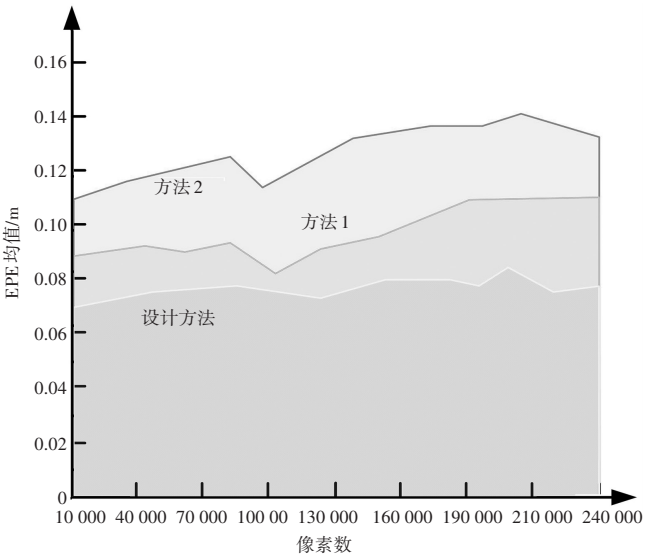


图 5 三种测试方法的 EPE 测试结果

Fig. 5 The EPE test results of the three test methods

根据上图测试结果,设计方法的 EPE 最低,方法 1 的 EPE 测试结果居中,而方法 2 的 EPE 最高,说明设计方法的三维场景重建效果更好。同时,在 3 种测试方法中,设计方法随着像素数的增长,其 EPE 涨幅较低,说明其鲁棒性较强。

2.4.2 误差比率测试结果

接着测试三种方法的细节误差比率,测试结果如表 1 所示。

表 1 细节误差比率

Tab. 1 Detail error ratio

建模区域/m^3	误差比率/%		
	设计方法	方法 1	方法 2
5 000	0.035 5	0.236 5	0.352 4
10 000	0.046 8	0.485 2	0.584 1
15 000	0.055 2	0.952 1	1.125 8

测试结果表明,设计方法的细节误差比率在 3 种测试方法中最低,说明设计方法的建模更加细致。同时随着建

模区域的翻倍,设计方法的细节误差比率增幅很低,同样说明其鲁棒性较强。

3 结论

针对数字化发电厂三维场景重建与交互显示的相关内容实施了深入研究,基于多视图深度采样设计了一种三维交互场景重建方法,使最终三维场景重建结果兼具交互性与良好的显示效果,同时其细节更加生动细致,取得了良好的研究成果。

参考文献

[1]高伟,何搏洋,张婷,等. 基于注意力机制的变电站作业场景三维目标检测[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(22):165-173.
[2]李翔宇,张雪芹. ORBTSDF-SCNet:一种动态场景在线三维重建方法[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2023,49(2):284-294.
[3]陈义飞,郭胜,潘文安,等. 基于多源传感器数据融合的三维场景重建[J]. 郑州大学学报:工学版,2021,42(2):80-86.
[4]李勇,何良波,詹建东,等. 基于数字化全息的虚实混合场景动态三维显示[J]. 液晶与显示,2022,37(5):632-638.
[5]陈晨,宋晓帆,董平先,等. 基于数字孪生的变电站逻辑模型移交深化应用[J]. 现代电力,2023,40(1):108-116.
[6]董玲洁,代广红,冀松. 基于 3D 激光投影的室内场景三维重建模型[J]. 应用激光,2022,42(7):125-132.
[7]孙克强,缪君,江瑞祥,等. 基于空洞卷积与多尺度特征融合的室内场景单图像分段平面三维重建[J]. 传感技术学报,2021,34(3):370-378.
[8]张庆鹏,曹宇. 室内场景下弱纹理物体三维重建算法的研究[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(8):197-203.
[9]张研,王保平,方阳,等. 基于目标场景结构化稀疏重构的三维雷达成像方法[J]. 电子与信息学报,2021,43(4):1185-1191.
[10]范劲松,陈晓聪,陈雪兰. 传统陶瓷艺术作品的三维数字化重建及应用的研究与实践[J]. 包装工程,2021,42(22):8-13.
[11]高瞩,丁栋,姜乾喆,等. 基于场景交互理论的智能道路清扫车安全设计研究[J]. 包装工程,2023,44(6):410-419.
[12]程斌,杨勇,徐崇斌,等. 基于 NeRF 的文物建筑数字化重建[J]. 航天返回与遥感,2023,44(1):40-49.
[13]张为威,金彤彤,孙童心,等. 智能居家养老场景下跌倒检测摄像头的交互设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(2):238-247.
[14]屈杨. 多波束测深和图像分割的海底地貌边界提取研究[J]. 自动化技术与应用,2024,43(6):38-42.
[15]洪韬,朱月琴,郭艳军,等. 基于 XR 技术的交互式地质场景模型构建方法研究[J]. 地质通报,2023,42(2):469-478.
[16]孙克强,缪君,江瑞祥,等. 基于空洞卷积与多尺度特征融合的室内场景单图像分段平面三维重建[J]. 传感技术学报,2021,34(3):370-378.
[17]章立,彭涛,黄焕,等. 基于点云的柔性线缆模型三维重建方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(4):133-139.
[18]庞锐,许自龙,朱海伟,等. 面向地震数据交互分析场景的高效分布式缓存框架[J]. 石油物探,2022,61(6):1090-1098,1114.