

中文引用格式:都亮,邢述,王大朋,等,空间点云数据在储罐结构有限元建模中的应用[J]. 中国安全科学学报,2025,35(9):106–112.

英文引用格式:DU Liang, XING Shu, WANG Dapeng, et al. Application of spatial point cloud data in finite element modeling of storage tanks[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 106–112.

空间点云数据在储罐结构有限元建模中的应用^{*}

都亮^{1,2}正高级工程师,邢述^{1,2}高级工程师,王大朋^{1,2}工程师,
张春义^{1,2}工程师,石秀山^{**1,2}高级工程师,闫河^{1,2}正高级工程师

(1 中国特种设备检测研究院,北京 100029;2 国家市场监督管理总局技术
创新中心(油气管道与储存设备安全),北京 100029)

中图分类号:X959

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1124

资助项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK207);十四五国家重点研发计划课题项目
(2023YFC3008703);中国特检院青年科技英才项目(KJYC-2023-05)。

【摘要】 为提高危化品储罐结构安全评价的准确性,提出一种基于三维激光扫描的有限元模型构建流程,通过点云数据构建有限元仿真模型,精准表征罐体不圆度、局部凹凸变形等实际结构拓扑形态。首先,利用3D激光扫描系统获取现场高精度空间结构数据,提出包含坐标系转换、节点对应和坐标值更新的轻量规则化预处理方法;其次,结合有限元模型单元构造方法,基于坐标更新后的点云节点生成计及初始几何缺陷的数值仿真模型,并开展模型精度分析;最后,以某在役拱顶储罐为例,基于3D激光扫描数据完成储罐变形分析,采用高精度有限元模型构造方法,构建罐壁全尺寸有限元模型,进而开展罐壁强度性能评价。结果表明:点云数据处理方法可实现计及储罐几何变形的有限元单元模型构建,单元节点空间位置精度达0.01 mm,点云数据量可缩减70%;相较于传统考虑初始几何变形的有限元仿真模型,计及储罐几何变形的有限元单元模型的结构安全评价结果更偏保守,储罐评价结论更偏于安全。

【关键词】 点云数据; 储罐结构; 有限元; 安全评价; 圆筒结构

Application of spatial point cloud data in finite element modeling of storage tanks

DU Liang^{1,2}, XING Shu^{1,2}, WANG Dapeng^{1,2}, ZHANG Chunyi^{1,2},
SHI Xiushan^{1,2}, YAN He^{1,2}

(1 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;
2 Technology Innovation Center of Oil and Gas Pipeline and Storage Equipment Safety,
State Administration for Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: To improve the accuracy of structural safety evaluation results for hazardous chemical storage tanks, a finite element model construction process for storage tanks based on 3D laser scanning was proposed. This process utilized point cloud data to build a finite element simulation model that accurately reflected the actual structural topology of the tank, such as out-of-roundness and local concave-convex

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0106-07; 收稿日期:2025-04-22; 修稿日期:2025-07-02

** 通信作者:石秀山(1978—),男,安徽颍上人,硕士,高级工程师,主要从事危化品常压储罐安全评价和标准方面的研究。E-mail: shixiushan@csei.org.cn。

deformations, thereby enhancing the accuracy of the analytical model. First, high-precision spatial structural data from the field were acquired using a 3D laser scanning system. A lightweight regularization preprocessing method was proposed, including coordinate system transformation, node correspondence, and coordinate value updates. Next, combined with the finite element model unit construction method, the point cloud nodes with updated coordinates were used to generate a numerical simulation model that accounted for initial geometric defects, followed by an analysis of model accuracy. Finally, taking an in-service dome-roof tank as an example, deformation analysis of the storage tank was conducted based on 3D laser scanning data. A high-precision finite element model construction method was employed to build a full-scale finite element model of the tank wall, and an evaluation of the wall's strength performance was carried out. The results indicate that the point cloud data processing method proposed in this paper enables the construction of a finite element model that accounts for geometric deformation of storage tanks. The spatial position accuracy of the unit nodes can reach 0.01 mm, and the volume of the reduced point cloud data can be decreased by 70%. Compared to traditional finite element simulation models that consider initial geometric deformation, the structural safety evaluation data obtained from this model are more conservative, leading to safer assessment conclusions for storage tanks.

Keywords: storage tank structure; point cloud data; finite element; safety assessment; cylindrical structures

0 引言

立式焊接常压储罐为典型圆筒结构,其结构强度、刚度及稳定性是储罐设计、施工和管理人员关注的重点,其安全性能是否满足使用要求直接关乎储罐安全运行^[1-2]。当前储罐结构安全评价以有限元仿真模型评价方法为主,所用有限元模型与储罐实际结构的一致性,直接影响到仿真结果的准确性^[3-4]。因此,提升模型与储罐实际结构的一致性,对储罐结构安全评价具有重要意义。

国内学者借助 ANSYS、ABAQUS 等通用有限元分析软件,针对含几何缺陷结构的安全问题开展了系列研究。石磊^[5]、马尚^[6]等采用有限元软件二次开发技术,基于测量数据研究了地基沉降对石油储罐象足屈曲的影响及其复原技术。赵慧磊^[7]、胡明磊^[8]等通过引入屈曲模态方法,探究了含缺陷结构的储罐罐壁稳定性问题。邢述^[9]、郭洪^[10]等通过现场实验验证了点云数据分析储罐结构尺寸变形的可行性,但并未涉及有限元数值建模和拓扑结构优化过程。YOUNG^[11]、BAI Yun^[12]等则针对非圆筒形结构开展了数值建模和点云数据坐标转换研究。现有研究在考虑初始缺陷影响的建模方法上仍存在局限^[13-14],难以真实刻画储罐实际结构变化对力学特性的影响,导致有限元模型与实际结构的一致性及仿真结果的准确性有待进一步提高。

鉴于此,笔者拟基于三维激光扫描检测得到的

点云数据,提出一种数据轻量规则化预处理方法,构建计及罐体圆筒结构不圆度、局部凹凸变形等结构几何缺陷的有限元仿真模型,提升有限元分析模型与实际结构的一致性和安全评价结果准确性。

1 基于点云数据的数值模型构造

基于点云数据的圆筒结构数值模型构造流程如图 1 所示。

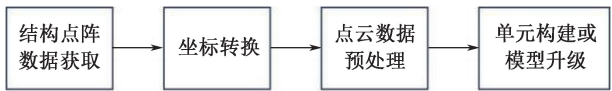
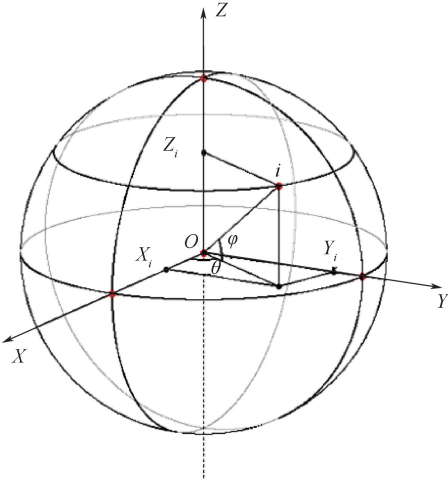


图 1 基于点云数据的圆筒结构数值模型构造流程
Fig. 1 Construction process of numerical model for cylindrical structures based on point cloud data

1.1 原始点云数据获取

通过三维激光扫描获取原始点云数据,计算激光行程、时间或波长相位差来确定扫描点坐标^[15]。采用反射棱镜和补偿器进行三维空间扫描,记录有效测距范围内的点云数据。空间数据扫描点坐标如图 2 所示。

三维激光扫描系统可分为相位式和脉冲式,相位式基于相位差计算距离,具有精度高、速度快、分辨率高的优势,但扫描距离有限;脉冲式通过时间差测量距离,虽测量距离更远,但存在速度慢、精度较低的局限^[16]。危化品储罐点云数据采集通常在百米范围内进行,需满足快速连续扫描、数据高效拼接、设



注: X_i, Y_i, Z_i 为空间节点 i 在笛卡尔坐标 $OXYZ$ 中的坐标值;
 θ, φ 为空间节点 i 在球坐标中的坐标值。

图2 空间节点笛卡尔坐标和球坐标表示

Fig. 2 Cartesian and spherical coordinates for spatial nodes

备便携低功耗等要求,且需便于检测人员在更佳的环境或更短的时间内完成操作,同时,高精度和高分辨率是提升检测效果的关键。因此,相位式激光扫描系统是危化品储罐点云数据采集的理想选择。相位式激光3D扫描系统采集的三维点云模型信息包括系统自建坐标系 $OXYZ$ (Z 轴为重力方向)、点云模型各数据点的编号及对应空间坐标值等。

1.2 坐标转换

新建储罐坐标系 $O'X'Y'Z'$,取点云数据中全部点 X, Y 坐标的算术平均值为储罐坐标系原点 O' 在系统自建坐标系中的位置,即:

$$X_{O'} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} X_i}{N_p}, Y_{O'} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} Y_i}{N_p} \quad (1)$$

式中: $X_{O'}, Y_{O'}$ 为新建坐标系坐标原点在自建坐标系中的 X, Y 轴坐标值; i 为点云节点编号; X_i, Y_i 为点云节点 i 的 X, Y 轴坐标值; N_p 为点云节点总数。

储罐坐标系原点 O' 的 Z 轴坐标取罐底板点云的最高点位置,即:

$$Z_{O'} = \max(Z_i) \quad (2)$$

式中: $Z_{O'}$ 为新建坐标系坐标原点在自建坐标系中的 Z 轴坐标值; Z_i 为点云节点 i 的 Z 轴坐标值,取值从1到 N_p 。

储罐坐标系 X', Y', Z' 轴分别平行于自建坐标系 X, Y, Z 轴,其坐标原点 O' 相对于系统自建坐标系的坐标增量 $\Delta_{OO'} = (X_{O'}, Y_{O'}, Z_{O'})$ 。

转换后,任意点云数据点 i 在储罐坐标系 $O'X'Y'Z'$ 下的坐标值为: $X'_i = X_i - \Delta_{OO'}^X, Y'_i = Y_i - \Delta_{OO'}^Y, Z'_i = Z_i - \Delta_{OO'}^Z$ 。

1.3 点云数据预处理

点云模型数据虽然能够较好地反映真实圆筒结构状态,但直接用于有限元模型构建会存在数据量过大,数据标记散乱不规则的情况,因此,给出一种点云筛选及序号赋值方法,实现对点云数据预处理,为标准有限元模型的坐标升级提供数据基础。

1.3.1 标准模型构建

利用 ANSYS 软件划分无缺陷模型的有限元网格,得到储罐标准模型的有限元网格节点和单元信息,包括标准单元编号及所含标准节点编号、标准节点空间坐标等,构建罐底、罐壁、罐顶结构的储罐无缺陷标准模型。

1.3.2 确定标准模型节点目标点

设定标准有限元模型节点与点云数据模型目标点的对应原则,针对罐壁、罐顶、罐底节点的具体规则如下:

1) 罐壁。以过标准节点 (X'_s, Y'_s, Z'_s) 的半径所在直线为目标直线 l_s ,选取距离该直线最近的点云数据点 (X'_c, Y'_c, Z'_c) 作为标准节点在点云数据模型中的对应点,并依次求解全部标准节点在3D扫描模型点云中的对应点。其中,目标直线 l_s 方程表示为:

$$\begin{cases} \frac{X'}{X'_s} = \frac{Y'}{Y'_s} \\ Z' = Z'_s \end{cases} \quad (3)$$

2) 罐底。以过标准节点 (X'_s, Y'_s, Z'_s) 且平行于标准圆柱轴线的直线为目标直线 l_b ,选取距离该直线最近的点云数据点 (X'_c, Y'_c, Z'_c) 作为标准节点在点云数据模型中的对应点,并依次求解全部标准节点在3D扫描模型点云中的对应点。其中,目标直线 l_b 方程表示为:

$$\begin{cases} X' = X'_s \\ Y' = Y'_s \end{cases} \quad (4)$$

3) 罐顶。以过标准节点 (X'_s, Y'_s, Z'_s) 和罐顶弧面球心 $C(0, 0, Z'_c)$ 的直线为目标直线 l_t ,选择距离该直线最近的点云数据点 (X'_c, Y'_c, Z'_c) 作为标准节点在点云数据模型中的对应点,并依次求解全部标准节点在3D扫描模型点云中的对应点。其中,目标直线 l_t 方程表示为:

$$\frac{X' - X'_s}{-X'_s} = \frac{Y' - Y'_s}{-Y'_s} = \frac{Z' - Z'_s}{Z'_c - Z'_s} \quad (5)$$

通过剔除点云数据中除对应点外的其他数据点,实现数据轻量化,同时将对应点的节点编号统一为匹配的标准节点编号,完成目标点云数据的规则化排序。

1.4 罐体单元模型构建

基于 ANSYS 二次开发工具,采用以下 2 种方式构建基于规则化节点的罐体单元模型:

- 1) 通过二次开发语言命令 (E, I, NODE1, NODE2, NODE3, NODE4) 生成新单元。其中, I 为单元编号, NODE1—NODE4 分别为构成单元 I 的点云数据对应点的编号,其坐标值为扫描模型点云数据实际坐标值。
- 2) 将规则化后的点云节点坐标数据映射至原标准模型,更新节点坐标,实现有限元单元模型的构建,流程如图 3 所示。

1.5 模型拓扑结构精度分析与有效性验证

数值模型的尺寸精度主要取决于采集的点云数据的坐标精度,三维激光扫描系统的扫描范围可达

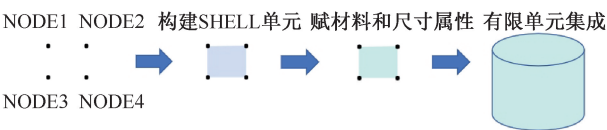
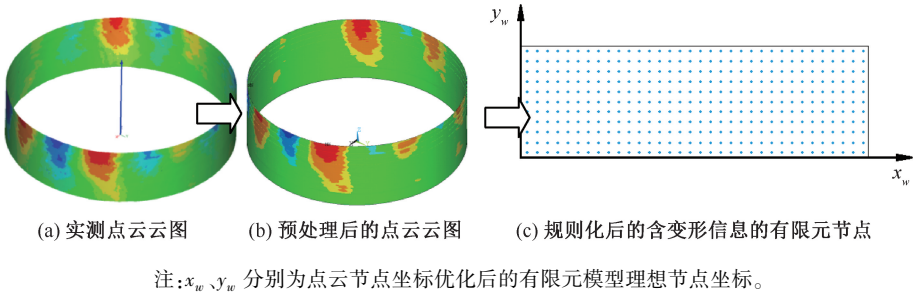


图 3 基于规则化节点的有限元单元模型构建流程
Fig. 3 Construction of finite element model based on regularized nodes

0.6~350 m,测距误差为±1 mm,测角精度:19" (垂直/水平角),构建的有限元数值模型节点坐标来源于获取的实体结构点云数据,可保证模型几何与储罐实际结构尺寸的一致性,且模型节点位置精度可达 0.01 mm。

为验证模型拓扑结构的有效性,以 100 000 m³ 储罐罐壁结构为例,采用 Python 开发含缺陷罐体的参数化建模程序。通过导入修改坐标文件,实现几何缺陷的精确还原。罐壁检测缺陷与还原缺陷的对比如图 4 所示。原始点云包含 94 853 个节点,经预处理后得到 27 376 个理想节点,在确保缺陷还原精度的前提下,数据量缩减 71%。



注: x_w 、 y_w 分别为点云节点坐标优化后的有限元模型理想节点坐标。
图 4 罐壁检测缺陷与还原缺陷的对比
Fig. 4 Comparison of detected defects and restored defects of tank wall

2 储罐结构点云数据有限元建模及应用

2.1 变形罐体点云数据获取

以某石化企业 1 000 m³ 轻油污拱顶储罐为例,采用罐内检测方式,将检测系统部署在罐底板中央,对储罐内部开展 360°全向扫描,得到罐壁 3D 检测变形云图,如图 5 所示。由图 5 可知:罐壁变形范围主要在[-11.6, 15.2] mm 区间内,对应面积占比 78.7%;局部最大内凹变形量为 65.4 mm,最大外凸变形量为 150 mm。

图 6 为 4 m 处罐壁截面变形图,由图 6 可知:测量坐标第 4 象限位置观测到 57 mm 的最大内凹变形。为进一步确定超标变形对罐壁结构力学性能的影响,需通过建立有限元模型,基于应力分析开展罐壁安全评价。

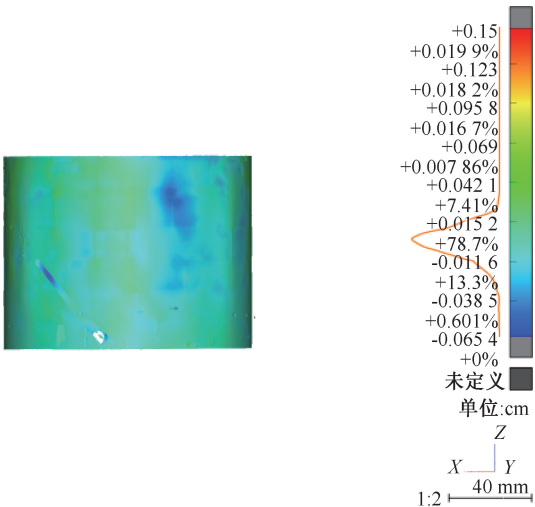


图 5 罐壁 3D 检测变形云图
Fig. 5 3D deformation cloud map for tank wall detection

采用 1.3 节点云数据预处理方法,得到预处理后的储罐 3D 检测点云预处理模型(图 7)。

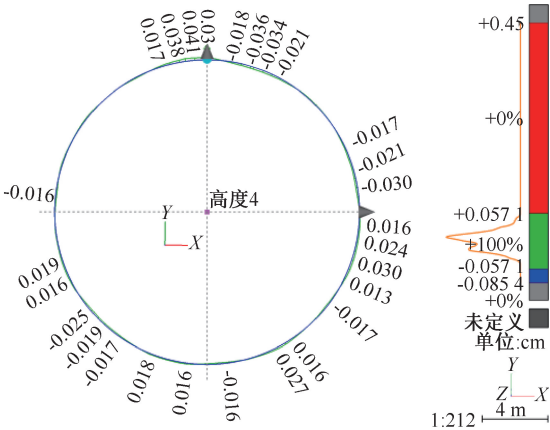


图6 4 m处罐壁截面变形

Fig.6 Deformation of tank wall cross-section at 4 m



图7 储罐3D检测点云预处理模型

Fig.7 Preprocessing model of 3D detection point clouds for storage tank

2.2 有限元模型建立

为量化评估储罐变形对结构强度的影响,构建储罐有限元分析模型(图8),开展结构应力分析。由图8可知:点云数据处理后的有限元节点模型的节点位置反映储罐实际变形状态,相较于标准有限元节点模型可提供更接近真实工况的应力分析结果。

罐体结构采用板壳单元(SHELL 63),储罐基础采用实体单元(SOLID45),罐体与基础间连接通过目标单元 TARGE170 和接触单元 CONTA175 实现,定义为实体-壳约束,采用多点约束算法,接触类型为绑定接触。罐壁单元截面属性为罐壁厚度,材质参数与设计资料材质保持一致,罐体和地基参数见表1。计算载荷取储罐静液压、设计内压、风载荷以及罐顶固定载荷,见表2。

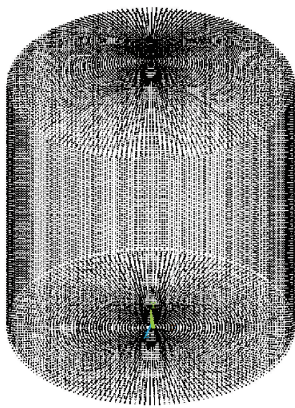


图8 储罐有限元分析模型

Fig.8 Finite element model of actual tank

表1 罐体和地基参数

Table 1 Tank and foundation parameters

位置	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
罐体	201.0	0.3	7 850
地基	3.0	0.2	2 500

表2 载荷

Table 2 Load parameters

载荷种类	计算方法	载荷/kPa	施加位置及方向
自重	重力加速度为 9.8 m/s ² ,轻污油密度为 1 180 kg/m,最高工作液位为 6.2 m	71.70	整体坐标系 Z 向
储罐静液压	罐壁压力随罐壁高度变化	0~71.70	垂直于罐壁指向离心方向
风载荷	依据《建筑结构荷载规范》(简称 GB 50009—2012) ^[7] ,基于储罐所在地(张家港)基本风压计算	0.45	整体坐标系 Y 向
罐顶固定载荷	依据设计资料及 GB 50009—2012 ^[17] ,取罐顶固定载荷为结构件及活动载荷之和	2.5	整体坐标系 Z 向

2.3 基于有限元模型的数值分析及评价应用

采用静力学分析方法,依据《压力容器分析设计》^[18]中关于薄膜应力、弯曲应力等应力分类的表述和强度校核要求,对储罐结构有限元模型开展应力分析和校核。

采用点处理法选取罐壁内外表面节点作为计算对象,得出罐壁板内外侧最大变形母线轴向应力与

环向应力随高度变化曲线,如图 9、图 10 所示。由图 9 可知:最大轴向应力位于罐壁上沿内侧,值为 198.90 MPa。由图 10 可知:一层壁板的环向应力随高度增加逐渐增大,在 0.9 m 高度处,外侧环向应力达最大值 105.40 MPa;二层壁板的环向应力则随高度增加呈现先小幅上升后降低的趋势。

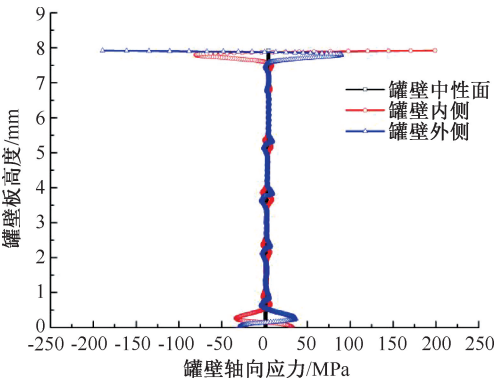


图 9 罐壁最大变形母线轴向应力随高度变化曲线
Fig. 9 Curve of axial stress of maximum deformation busbar on tank wall with height variation

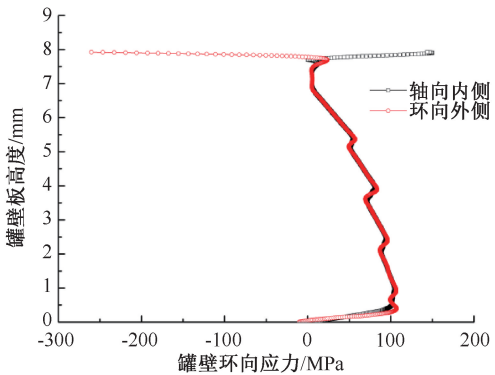


图 10 罐壁最大变形母线环向应力随高度变化曲线
Fig. 10 Curve of circumferential stress of maximum deformation busbar on tank wall with height variation

取罐壁中性面的轴向应力、环向应力和径向应力为一次薄膜应力 S_I 的主应力分量;取罐壁内外侧

轴向应力为一次局部薄膜加一次弯曲强度 S_{III} ;取环向应力、轴向应力和径向应力结果为主应力分量,计算一次加二次应力强度,得到考虑几何变形的罐壁任意截面上各项应力强度最大值与许用值。罐壁应力强度结果见表 3,其中,载荷组合系数 K 值取 1.25, S_{III} 取 157 MPa。

表 3 罐壁应力强度结果			
Table 3 Stress intensity results of tank walls			
应力强度	计算值 (本文)	计算值 (不考虑结构变形)	许用值
S_I	175.24	155.46	KS_m
S_{III}	190.12	165.44	$1.5KS_m$
S_{IV}	336.99	299.18	$3S_m$

表 3 数据表明:考虑实际变形的罐壁结构应力水平相较于未考虑结构变形的有限元分析结果有显著增加,但仍处于许用值范围内,评价结果偏于安全。

3 结 论

1) 计及储罐几何变形的有限元单元模型中,单元节点空间位置精度可达到 0.01 mm,缩减后的点云数据量可减少 70%,相较于当前普遍采用的拟合曲面划分有限元单元法,可省去曲面拟合过程中的人工数据清洗操作。

2) 相较于传统的考虑初始几何变形的有限元仿真模型,计及储罐几何变形的有限元单元模型的结构安全评价数据更偏保守,对储罐的评价结论更偏向安全。

3) 点云数据处理和有限元建模方法具有通用性,除立式拱顶储罐外,还可推广应用于外浮顶储罐、卧式储罐等结构。

4) 研究未考虑储罐腐蚀、基础沉降等结构变化因素,后续可结合定点测厚、沉降检测等数据,进一步完善储罐有限元模型。

参 考 文 献

[1] 石磊,帅健,许葵. 在役外浮顶储罐的强度评估方法[J]. 应用力学学报,2020,37(3):1 350–1 355,1 410–1 411.
SHI Lei, SHUAI Jian, XU Kui. Strength assessment method for floating roof storage tank in service[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(3): 1 350–1 355, 1 410–1 411.

[2] 苏文强,陈志平,马赫,等. 地基不均匀沉降和风载荷联合作用下的大型储罐屈曲分析[J]. 压力容器,2019,36(3):35–43.
SU Wenqiang, CHEN Zhiping, MA He, et al. Buckling analysis of large storage tank under the combined action of uneven settlement and wind load of the foundation[J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(3): 35–43.

[3] 夏燕. 风荷载作用下大型钢制储罐屈曲行为研究[D]. 重庆:西南石油大学,2018.
XIA Yan. The study about the wind-induced of the large steel tanks[D]. Chongqing: Southwest Petroleum University,

- 2018.
- [4] 王莉莉,付世博,乔宏宇,等. 立式储罐静力分析的简化有限元模型[J]. 油气储运,2021,40(1):51-57.
WANG Lili, FU Shibao, QIAO Hongyu, et al. Simplified finite element model for static analysis of vertical storage tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(1): 51-57.
- [5] 石磊,帅健,王晓霖,等. 地基沉降对石油储罐象足屈曲的影响[J]. 中国安全科学学报,2018,28(9):56-61.
SHI Lei, SHUAI Jian, WANG Xiaolin, et al. Effect of foundation settlement on elephant foot buckling of oil tank[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(9): 56-61.
- [6] 马尚. 地基不均匀沉降下含缺陷储罐结构屈曲和安全评价[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2021.
MA Shang. Buckling and safety evaluation of storage tank with defects under uneven settlement of foundation[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [7] 赵慧磊,钱才富. 大型储罐外压稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(增2):280-282.
ZHAO Huilei, QIAN Caifu. Stability of large storage tank subjected to external pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(S2): 280-282.
- [8] 胡明磊,张维,尚宪和. 核级大型储罐屈曲状态下的复原技术探讨[J]. 中国核电,2020,13(2):227-233.
HU Minglei, ZHANG Wei, SHANG Xianhe. System solution for the buckling state of nuclear-scale large storage tanks[J]. China Nuclear Power, 2020, 13(2): 227-233.
- [9] 邢述,杜邦胜,都亮,等. 空间数据扫描技术在大型常压储罐变形检测中的应用[J]. 无损检测,2022,44(10):20-24.
XING Shu, DU Bangsheng, DU Liang, et al. Application of spatial data scanning technology in large atmospheric storage tank deformation detection[J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(10): 20-24.
- [10] 郭洪,李修能,都亮,等. 常压储罐壁板变形检测方法探讨[J]. 中国特种设备安全,2022,38(8):43-46,54.
GUO Hong, LI Xiuneng, DU Liang, et al. Discussion on deformation detection method of atmospheric storage tank shell[J]. China Special Equipment Safety, 2022, 38(8): 43-46, 54.
- [11] YOUNG H J, SEONGHYUK H. Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(2): 53-59.
- [12] BAI Yun, YANG Chaozhi, LI Guanlin, et al. Point-GSMAE: a graph convolution and scale-based masked autoencoder for 3D point cloud representation[J]. Information Sciences, 2025, 719: DOI: 10.1016/j.ins.2025.122474.
- [13] YUE Hongzhe, WANG Qian, ZHANG Mingyu, et al. 2D-3D fusion approach for improved point cloud segmentation[J]. Automation in Construction, 2025, 177: DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106336.
- [14] 张强. 基于激光视觉融合与深度学习的点云重建技术研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2024.
ZHANG Qiang. Research on point cloud reconstruction technology based on laser vision fusion and deep learning[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [15] 周保兴,王兵,张航钊,等. 融合多源空间数据的复杂场景真三维模型构建方法[J]. 测绘通报,2024(4):13-17.
ZHOU Baoxing, WANG Bing, ZHANG Hangfan, et al. A method for constructing true 3D models of complex scenes based on multi-source spatial data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(4): 13-17.
- [16] 廖岳,李汉涛,刘界鹏,等. 基于点云数据和启发式算法的复杂龙骨:面板结构智能数字化施工方法[J/OL]. 土木与环境工程学报:1-11. [2024-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240125.1826.002.html>.
LIAO Yue, LI Hantao, LIU Jiepeng, et al. Intelligent digital construction for complex frame-panel structures based on point cloud data and heuristic algorithms[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-11. [2024-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240125.1826.002.html>.
- [17] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012, Load code for the design of building structures[S].
- [18] GB/T 4732.4—2024, 压力容器分析设计 第4部分:应力分类方法[S].
GB/T 4732.4—2024, Pressure vessels design by analysis part 4: stress classification methods[S].

作者简介: 都亮 (1986—),男,山东安丘人,博士,正高级工程师,主要从事危化品储存装备安全评价等方面的研究。E-mail:duliang.sme@163.com。

