

大型油罐容积测量装置的设计与分析*

杨萍,高健,段钊

(兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:为测量储油罐实际体积与理论体积的变化,储油罐容积测量装置的设计就显得尤为重要。针对这一问题,设计一种可搭载三维激光扫描仪并在罐体内进行扫描作业的设备。该设备可以实现对不同高度的立式圆柱形储油罐容积的精确测量,还可以完成罐壁的焊缝检测、探伤检查等极限作业任务。运用 SolidWorks 软件对该测量装置进行三维建模,使用 SolidWorks 子插件 Simulation 完成对关键受力部件的静力学分析,运用 Adams 软件对柔性连接部分进行动力学分析,运用 Cinema4D 软件完成运动过程动画仿真,最后进行试验验证该测量装置的可行性与精准度要求。

关键词:储油罐;三维激光扫描仪;测量装置;动力学分析;运动过程仿真;试验验证

中图分类号:TH122;TH703;TE85 文献标识码:A 文章编号:1001-2354(2021)S2-0090-05

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2021.s2.018

Design and analyze the volume measuring device of large oil tank

YANG Ping, GAO Jian, DUAN Zhao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Large metal storage tanks are widely used in the petrochemical industry. After a certain period of use, the tank wall plates will have different degrees of geometric deformation, which will lead to changes in the tank volume, resulting in a reduction of the oil storage volume. Therefore, in order to measure the change of actual volume and theoretical volume of oil storage tank, the design of oil storage tank volume measurement device is particularly important. To address this issue, a device is designed to carry a 3D laser scanner and perform scanning operations inside the tank. The device can accurately measure the volume of vertical cylindrical tanks of different heights, and can also perform extreme tasks such as weld inspection and flaw inspection of tank walls. Solidworks software was used to model the measuring device in three dimensions, the static analysis of the key stressed parts was completed using Solidworks subplug-in Simulation, Adams software was used to analyze the dynamics of the flexible connection part, Cinema4D software was used to complete the animation simulation of the motion process, and finally experiments were conducted to verify the feasibility and accuracy of the measuring device. The feasibility and accuracy requirements of the measurement device are verified experimentally.

Key words: oil storage tank; 3D laser scanner; measuring devices; dynamics analysis; motion process simulation; experimental validation

大型立式圆柱形金属储油罐是石油资源储备的主要设备广泛应用于石油化工行业^[1],经过实地考察与查阅相关资料,储油罐常因金属材质、施工设计、管理运行等方面的缺陷,导致罐体在使用一定期限后油罐壁板会出现不同程度的几何变形^[2],致使油罐体积发生变化,导致储油量减少^[3]。因此精准测量储油罐容积是油罐管理人员的一大难题。现阶段常用的油罐容积测量方法有:全站仪^[4]、具导轨光学径向偏差仪^[5]、移动式径向偏差仪^[6]3种测量方法。这3种方法在一定程度上弥补了人工围尺法^[7]无法直接围尺测量油罐体圈直径的缺点。但存在不能避开障碍物和测量精度较低的缺陷。全站仪测量法成本高、测量精度

低^[8];径向偏差法测量时间长,且需要有一定高空作业要求^[9]。在保证精确测量储油罐容积之外,储油罐还需要定期进行罐壁焊缝的检测、探伤检查等难题作业。为了解决上述问题,提出了一种基于三维激光扫描仪技术的圆柱形容器容积测量装置,以实现不同高度的立式圆柱形储油罐罐体容积的精确测量,且可实现罐壁的焊缝检测、探伤检查等极限作业任务。

1 测量装置总体方案设计

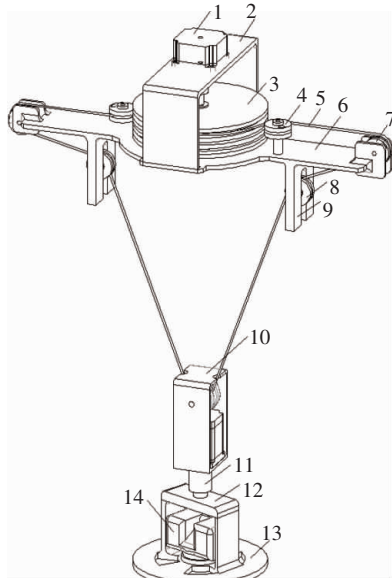
该大型油罐容积测量装置主要分为机械系统、测量系统和

* 收稿日期:2021-06-24;修订日期:2021-08-20

控制系统3个主模块。其中机械系统是整个测量装置的重要组成部分,由绳盘平台和升降平台两部分组成;测量系统是以三维激光扫描仪为核心的一系列部件,将测量系统装备在机械系统的升降平台上,通过连接线接至罐外电脑,可实时控制掌握罐内测量作业的进度以达到理想精度;控制系统是实现整个测量装置作业完成的重要系统,包括控制绳盘平台和控制升降平台。

测量装置机械结构总体设计方案如图1所示,机械本体主要包括以下几部分:

- (1)承重部分:承担升降平台升降任务,对转盘、支架、电机等部件起支撑的作用。
- (2)测量平台:在其中心位置安装三维激光扫描仪,可对罐体内部做详细扫描。
- (3)驱动部分:包括绳盘平台旋转电机和测量平台升降电机,为平台的旋转和升降提供动力,使扫描工作进行顺利。
- (4)连接部分:通过钢丝绳索使得升降平台和绳盘平台连接在一起。
- (5)附件部分:包括绳盘平台电机支架及升降平台箱体、扫描仪支架、红外接收器、主控板、电池、连接线等。



1 步进电机;2 电机支架;3 转盘;4 导向轮;5 钢丝绳;6 绳盘平台;7 定滑轮;8 转轮;9 绳盘平台支架;10 箱体;11 联轴器;12 扫描仪支架;13 测量平台;14 扫描仪

图1 测量装置机械结构

2 测量装置关键受力部件分析

该测量装置在实际测量过程中,绳盘平台和转盘连接轴为关键受力部件,要对其进行静力学分析;钢丝绳作为连接部件,要对其进行动力学分析。

2.1 绳盘平台与转盘连接轴静力学分析

在实际工作中,绳盘平台与绳盘平台支架接触并固定,故对夹具选择固定几何体约束。绳盘平台两端因承受整个测量平台的重力,受力较大,将模型导入 SolidWorks 中的 Simulation 计算

得出最大屈服强度为 18.34 MPa,安全系数取 1.5,计算结果小于材料的屈服极限强度 27.57 MPa。由图 2d 可看出,最大位移出现在绳盘两端 0.8 mm 处,在有效范围之内,满足部件工作要求。综合考虑实际应用目的、加工制造精度、整体机械部件的尺寸,该变化在有效范围之内,满足加工使用要求。

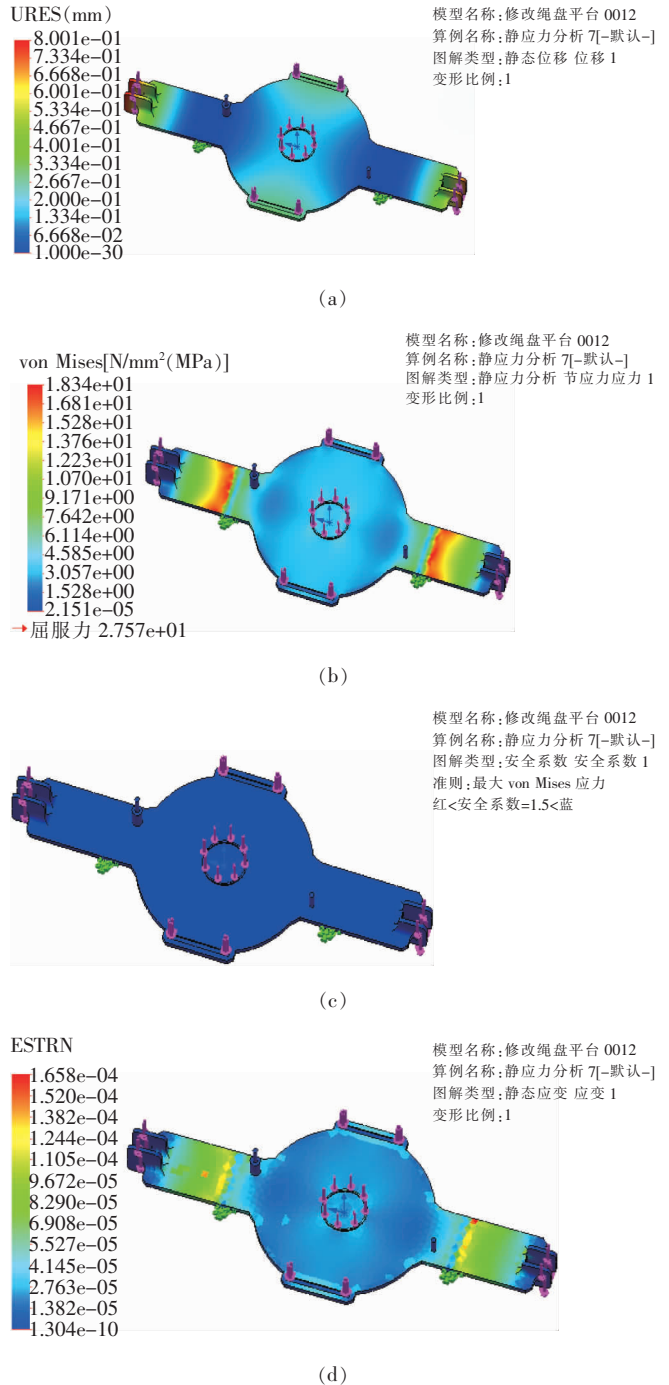


图2 绳盘平台结构受力分析

转盘连接轴作为连接转盘和联轴器的纽带,为转盘传递电机转速,在整个系统中发挥举足轻重的作用。转盘连接轴一端受联轴器夹持,另一端与转盘连接,对联轴器接触一端设置为固定端约束,并对接触面施加压力,与转盘接触一端键槽部位施加压力,材料选择合金钢。通过 SolidWorks 子插件 Simulation 计算得

到最大屈服力为 26.6 MPa, 其结果远小于材料极限屈服强度 620 MPa, 最大位移为 0.002 4 mm, 变形量几乎为 0。其力学性能完全满足要求, 图 3 为其静力学分析图。

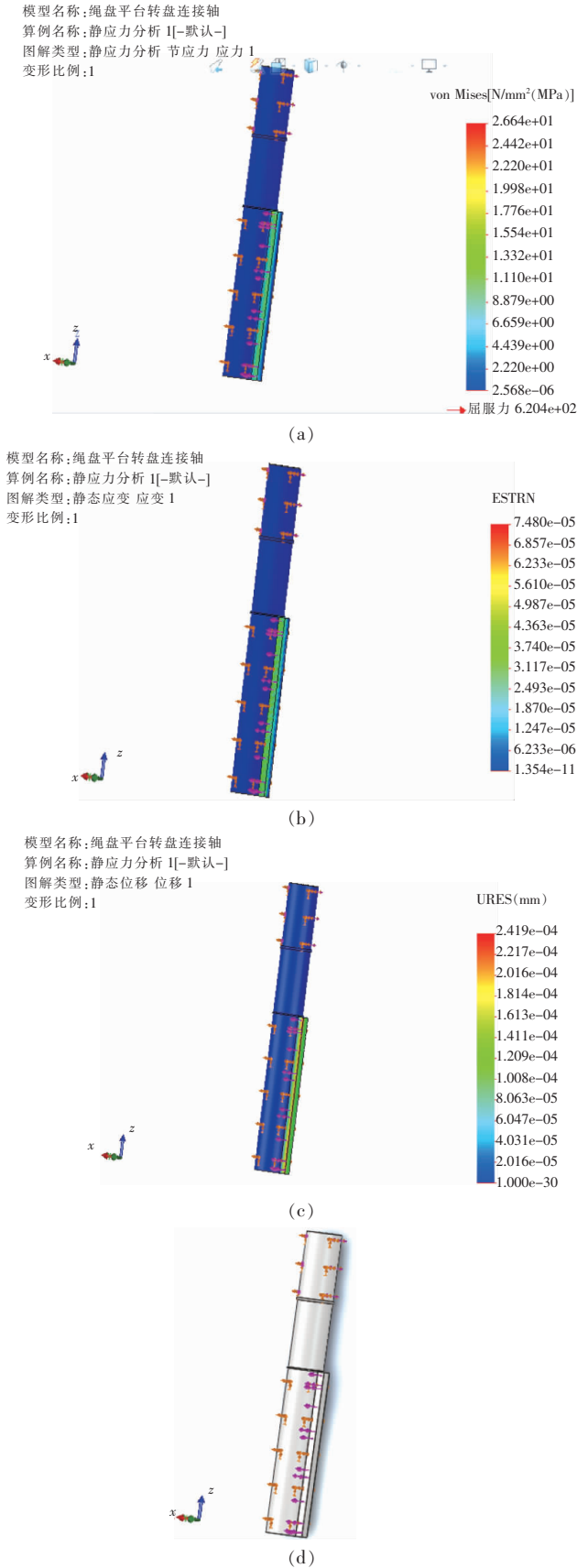


图 3 转盘连接轴受力分析

2.2 钢丝绳动力学分析

在测量装置运行过程中, 绳索作为绳盘平台和升降平台的连接纽带, 其性能好坏直接关系到扫描作业的成败。绳盘平台工作过程中, 尽量保证升降平台运行稳定、平稳升降减少晃动, 因此选择稳定性较好的钢丝绳索, 能保证其在升降过程中平稳运行, 避免增加测量误差。利用 Adams 软件子插件 cable 工具建立钢丝绳模型。因为绳索之间摆副变化主要在升降平台两侧, 故将钢丝绳的两个锚点选在绳盘平台支架转轮旁边, 两端分别与卷筒连接, 将电机的转矩等同为卷筒的转矩, 卷筒上施加一个旋转驱动, 驱动函数为: $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 1.5, -60d \cdot 1.2) + \text{step}(\text{time}, 7.5, 0, 9, 60d \cdot 1.2)$, 函数类型为 velocity, 仿真时间 9 s, 仿真步数为 100 步, 升降平台用等同重物代替, 其机构模型如图 4 所示。

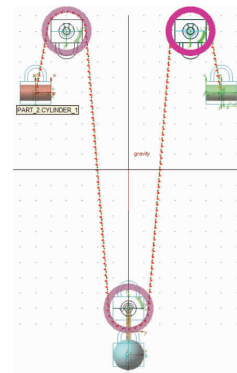
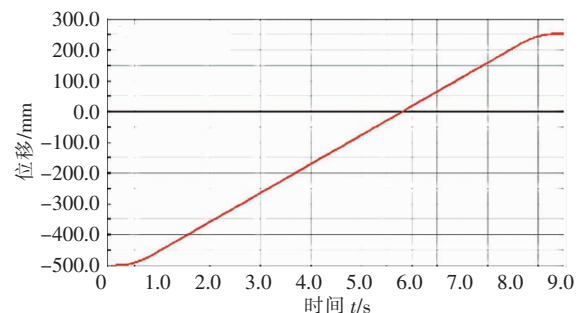
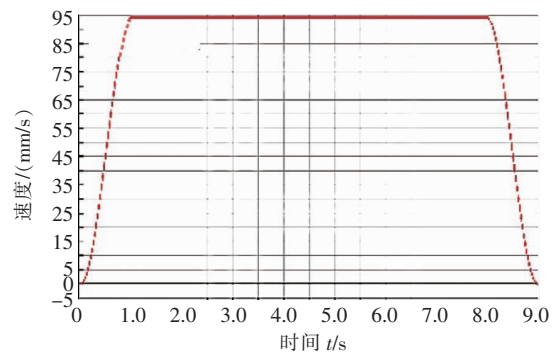


图 4 钢丝绳系统模型

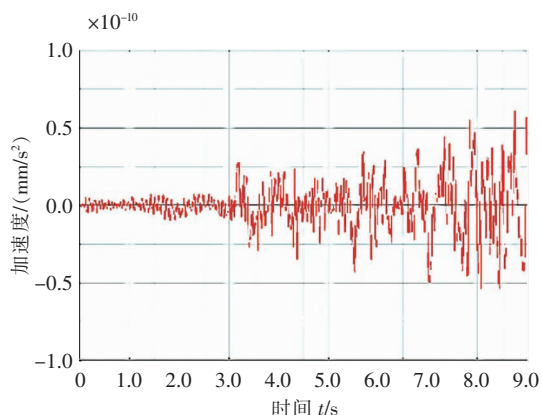
将该模型导入仿真平台, 仿真栏中选择仿真运行结果 Last_Run, 图 5 分别表示测量平台中心点的位移、速度、加速度曲线图。在启动和制动阶段, 速度平稳增大或者减小, 由于钢丝绳是柔性体, 加速度出现周期性振荡。



(a) 测量平台位移曲线图



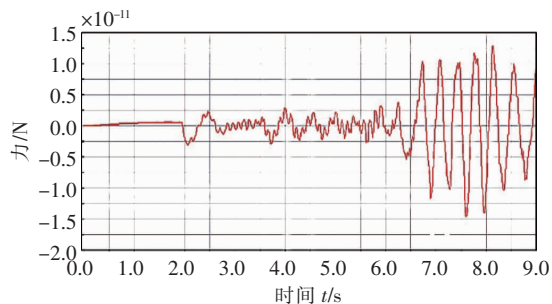
(b) 测量平台速度曲线图



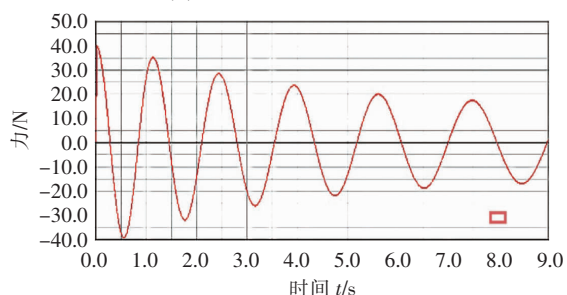
(c)测量平台加速度曲线图

图5 测量平台位移、速度、加速度曲线图

将绳子分为4段进行受力分析,依次为动滑轮两侧和卷筒两端,其受力图如图6所示。动滑轮两侧受力相同,卷筒两端绳子受力相同。在实际测量过程中,需要考虑测量作业效率,也要考虑测量装置的安全性能。



(a)动滑轮两侧绳索受力图



(b)卷筒两侧绳索受力图

图6 钢丝绳受力

3 测量装置整体运动过程仿真

Cinema4D 软件具有强大的视频动画仿真功能,能对测量装置三维模型做运动全过程仿真。Cinema4D 的动画仿真主要有两种方式:K 关键帧和编程控制,因测量装置整体运动过程简单,故采用编程控制。图7为软件建立的虚拟样机。

在扫描工作开展之前,测量平台处于原始位置即罐顶孔位置处,首先对扫描仪参数进行调节,其后,主控板控制步进电机转动进而带动绳盘转动,测量平台降至预定最低点扫描位置,接着,测量平台到达预定位置后扫描仪开始工作,通过红外遥控器控制测量平台旋转,实现了搭载的三维激光扫描仪进行预定位

置筒壁处的全方位扫描。最后,预定位置扫描工作完成后,测量平台上升到下一个预定点位置作业。重复以上操作步骤直至扫描工作完成,测量平台回到罐顶初始位置。

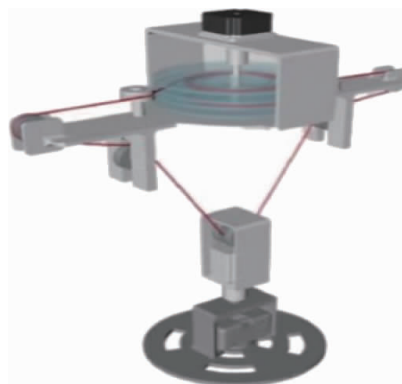


图7 虚拟样机

4 试验验证

4.1 不同测量方法进行对比试验

通过对比试验验证三维激光扫描仪法的测量精度,进而验证该测量装置的可行性。采用实验室小型油桶进行试验验证,由于围尺法测量精度较高,选用围尺法测量结果为参考标准。比较围尺法和三维激光扫描仪法两者测量结果。扫描仪的参数设置与重复性试验相同即:扫描范围选择 Normal;扫描分辨率选择 High;质量控制选择 High。围尺法测量油桶截面选择以 100 mm 为间隔,总共测量 8 个截面,表 1 为截面面积与容积对比数据。

表1 截面面积与容积对比试验

截面序号	围尺法		三维激光扫描法		相对偏差/%
	截面面积/mm ²	容积/mm ³	截面面积/mm ²	容积/mm ³	
1	271 409.04	1.899 867×10 ⁷	267 303.03	1.825 660×10 ⁷	1.5/3.9
2	267 728.96	4.377 155×10 ⁷	266 050.84	4.297 021×10 ⁷	0.6/1.8
3	265 898.34	6.770 241×10 ⁷	264 074.56	6.768 382×10 ⁷	0.7/0.3
4	265 898.34	9.296 274×10 ⁷	261 438.02	9.239 743×10 ⁷	1.6/0.6
5	260 444.16	1.190 071×10 ⁸	258 013.65	1.171 110×10 ⁸	0.9/1.5
6	266 812.87	1.456 883×10 ⁸	264 074.04	1.418 246×10 ⁸	1.0/2.6
7	251 479.46	1.683 214×10 ⁸	249 469.75	1.665 383×10 ⁸	0.8/1
8	251 479.46	1.922 119×10 ⁸	249 374.13	1.912 519×10 ⁸	0.8/0.5

由表1可看出,两种测量方法截面面积最大相差为 0.004 6 mm²,最小相差为 0.001 7 mm²,相对偏差最大为 1.6%,平均相对偏差为 0.99%。两种测量方法最大偏差为 0.003 9 mm³,最大相对偏差为 3.9%,平均相对偏差为 1.52%。三维激光扫描仪法在非工业测量类型中测量精度较低,但无论是截面面积还是容积测量其平均相对误差都在允许范围之内。因此所设计的测量装置和测量方法具有可行性,可以应用于罐体变形扫描作业。

4.2 重复试验

通过多次重复性试验,得到多次测量数据与实际油桶数据比较,得到测量装置测量精度与误差。在设备基本参数和测量环

境都不变的前提下,进行 8 次重复测量油桶容积试验,测量 4 次油桶变形前容积,4 次油桶变形后容积。通过 4 次变形前测量数据与油桶出厂设计容积数据对比,以及对比 4 次变形前和变形后的数据,即可计算出该设备测量的精准度,其结果如表 2 所示,其中理想容积为油桶出厂设计体积,实测容积为油桶变形前后测量结果。

表 2 截面面积与容积对比试验 m^3

测量次数	理想容积	变形前容积	变性后容积
1	0.229 2	0.227 6	0.245 3
2	0.229 2	0.226 9	0.243 2
3	0.229 2	0.227 2	0.242 6
4	0.229 2	0.228 3	0.243

由表 2 可看出:将油桶出厂设计容积与油桶变形前容积测量结果相比较,实际测量误差在 0.002 ~0.003 3 m^3 范围之间,4 次测量变形前容积结果最大差距为 0.001 3 m^3 ,4 次测量变形后容积结果最大差距为 0.002 8 m^3 ,容积测量相对偏差最大为 1%,在误差允许范围之内,因此所设计的测量方法具有可行性与精准度要求。

5 结论

针对大型金属储油罐在使用一定期限后出现的几何变形导致储油量减少的问题,设计了一种可搭载三维激光扫描仪并在罐体内进行扫描作业的设备。并通过三维建模建立模型,对关键部位进行静力学与动力学分析,最后进行试验验证。结果表明,

所设计的基于三维激光扫描仪法的罐体扫描作业设备精准度较高,实时性强,具有可行性。

参考文献

- [1] 蒋挺大. 亮聚糖[M]. 北京:化学工业出版社,2001:127-129.
- [2] 金三林. 我国石油储备管理体制和运行机制的机构[J]. 开学导报,2007, 23(5): 21-24.
- [3] 范继义. 金属油罐的变形与整修[J]. 石油库与加油站, 2006(3): 15-16.
- [4] 王玉强. 全站仪在立式储油罐容积计量应用[J]. 工业计量, 2020, 30(5): 29-30.
- [5] API MPMS Chapter 2.2B(R2007)—1989 Calibration of upright cylindrical tanks using the optical reference line method[S].
- [6] GB/T 13235.2—1991 石油和液体石油产品立式圆筒形金属油罐容积标定法(光学参比法)[S].
- [7] GB/T 13235.1—1991 石油和液体石油产品立式圆筒形金属油罐容积标定法(围尺法)[S].
- [8] 朱亮华. 全站仪在检定立式金属罐容量中的应用[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 173-174.
- [9] ISO7507-2-2005 Petroleum and petroleum products-Calibration of vertical cylindrical tanks-Part2:Optical-reference-line method[S].

作者简介:杨萍(1964—),女,教授,博士,研究方向:CAD/CAM、虚拟设计、机器人等。E-mail:yangping_cad@163.com