



原油沉降罐散热量表征实验系统建设

林日亿¹, 郑炜博^{1,2}, 尹钦禾¹, 刘东林¹, 易曼玲¹, 王新伟¹

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 青岛 266580; 2. 胜利油田技术检测中心, 东营 257000)

摘要: 准确表征沉降罐的散热损失对于原油集输系统的节能降耗具有重要意义, 该文通过搭建原油沉降罐散热量表征实验系统, 开展了沉降罐散热过程的内部温度场和不同部位热流分布的实验测量。结果表明, 底面热传导损失 > 侧面综合散热损失 > 拱顶面综合散热损失。该实验系统的开发对于油气储运专业学生深入理解传热学知识在工程领域的应用发挥了积极作用, 培养了学生的动手能力。

关键词: 原油沉降罐; 热电偶测温; 温度分布; 散热损失

中图分类号: TE89

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220624

Construction of Heat Dissipation Characterization Experimental System for Crude Oil Settling Tank

LIN Riyi¹, ZHENG Weibo^{1,2}, YIN Qinhe¹, LIU Donglin¹, YI Manling¹, WANG Xinwei¹

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Technology Inspection Centre of Shengli Oil Field, Dongying 257000, China)

Abstract: Accurate characterization of heat dissipation loss of settling tank is of great significance for energy saving and consumption reduction of the crude oil gathering and transportation system. In this paper, by building the heat dissipation characterization experimental system of the crude oil settling tank, the experimental measurement of the internal temperature field and heat flow distribution in different parts of the settling tank during the heat dissipation process is carried out. The results show that the heat conduction loss of the bottom surface is greater than that of the side surface and greater than that of the arch top surface. The development of the system has played a positive role for students majoring in oil and gas storage and transportation to deeply understand the application of the heat transfer knowledge in the engineering field, and cultivates students' practical ability.

Key words: crude oil settling tank; thermocouple temperature measurement; temperature distribution; heat loss

沉降罐是集输系统用于采出液脱水处理的关键设备, 基于原油与水的密度差, 经过一定时间的重力沉降, 获得清晰的油水界面, 实现油水分离。为改善采出液的脱水效果, 需要维持沉降罐约 80 °C 以上的高温, 实现原油和污水的高效分离^[1-2], 致使原油沉降罐能耗在整个集输系统能耗中占比较大。做好沉降罐能源管理是联合站节能降耗的重要环节, 而在用沉降罐容积多为 3 000~10 000 m³, 直接开展现场实验成本大, 设计搭建小型模拟系统开展相关的研究具有重要的价值。2019 年, 文献 [3] 设计了一种可对油水界面进行机械调节的原

油沉降罐, 研究发现不同高度的油水界面对出油、出水以及换热效果有显著的影响, 但并未给出具体的结果。文献 [4] 通过实验发现原油沉降罐罐底加热盘管的存在会对原油的传热效果产生影响。文献 [5] 通过设计原油沉降罐并实验发现高含水原油的散热速度会明显高于低含水原油。综上, 近年的相关研究多基于原油沉降罐的出油效果, 对于沉降罐的散热损失问题研究较少。原油沉降脱水过程的散热损失受环境、工况的影响^[6], 且由于原油的高粘特性导致罐内温度非均匀分布, 沉降罐各面的散热量也不同^[7]。为获得原油沉

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-13

基金项目: 山东省教学改革重点项目(Z2021102); 中国石油大学(华东)校级教学改革项目(CZ-2022019, CM-2022021, CM-2022055, CM-2022060); 中国学位与研究生教育学会重点课题(2020ZDB42); 高等学校能源动力类教学研究与实践项目(NDJZW2021Z41, NSJZW2021Y-68); 中国高等教育学会 2023 年度高等教育科学研究规划课题(23CJRH0307)。

作者简介: 林日亿(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事热能工程相关教学科研工作。E-mail: linry@upc.edu.cn

降罐内部的温度场分布以及相应部位的散热损失, 本文搭建了原油沉降罐散热表征实验系统。

原油集输系统是油气储运专业学习的核心内容, 沉降罐散热过程模拟实验作为油气储运专业传热学课程的实验项目建设, 既能帮助学生更好地理解传热学基本原理在油气集输领域的应用, 又能培养学生的动手能力, 也是高等学校创新性实验改革的重要环节, 对于激发学生的创新意识、培养创新能力和提高创新思维具有重要的现实意义^[8]。

1 实验装置

1.1 实验平台总体结构

以 5 000 m³ 容积的原油沉降罐为例, 罐底直径为 18.32 m, 罐侧壁高度为 18.97 m, 根据相似准则, 设计了一个底面直径和罐侧壁高度同为 500 mm 的沉降罐, 如图 1 所示。该实验系统主要由沉降罐主体、温度记录仪、加热装置和罐底支撑装置(铝块/砂体)组成。沉降罐主体仿照油田现场沉降罐的样式制造, 具体尺寸如表 1 所示, 材质为不锈钢。从图 1(a)可见, 沉降罐内部均匀布置 3 层热电偶测温, 每层设间隔 120° 的 3 条分支, 每条分支上装有等间距的 3 个热电偶, 沉降罐的侧壁面与拱顶也分别安装 3 个热电偶测温点, 热电偶统一采用 K 型热电偶。沉降罐中部设置中空管用以将热电偶线引出至温度记录仪。系统采用 2 个 32 路温度记录仪分别对罐内和外部测温点进行记录并实时显示温度值, 加热装置为一可拆卸的加热盘, 可实现对含水原油进行 100 °C 以内的均匀加热效果。为方便、准确表征沉降罐罐底的热传导散热损失, 罐底支撑装置采用圆盘型纯铝制作, 中心垂向设置 3 处热电偶, 分别距离铝块顶部为 10.0、20.0、30.0 mm。

该实验系统通过加热装置对采出液加热后静置, 从而模仿油田采出液的沉降过程。通过内部热电偶获得采出液沉降过程中的温度场分布情况; 通过沉降罐顶部、罐底以及铝块内的测温, 基于相关传热学公式计算获得原油沉降罐四周的散热情况, 从而量化各部分的散热损失关系。此外, 沉降罐外装有喷水系统, 可模拟降雨对沉降罐散热的影响。学生也可在实验系统周围增加风扇, 模拟风速对散热的影响。

液面高度和罐底支撑材料的选择是影响沉降罐各面散热的主要因素。控制采出液液面距罐底距离 400 mm, 与油田实际现场相似。对于罐底支

撑材料, 为表征方便选用导热系数大的材料, 实验采用纯铝, 导热系数为 237 W/(m·K)。此外, 可采用其他的支撑材料, 如泥沙、土壤等, 不同材料会呈现不同的实验结果, 便于学生分析热传导的影响。

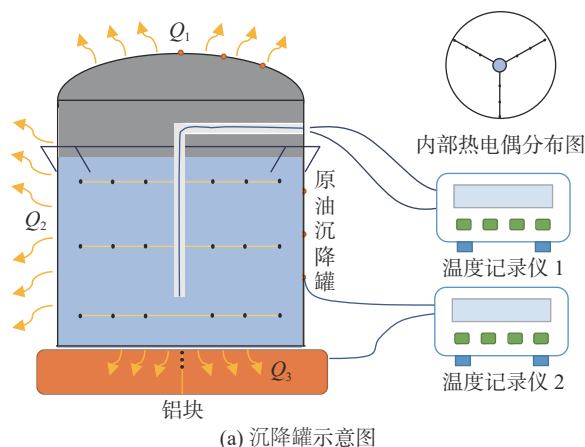


图 1 原油沉降罐模拟实验系统装置图

表 1 沉降罐模拟系统参数

沉降罐参数	数值/mm
沉降罐高度	650
沉降罐外径	500
顶盖高度	150
壁面厚度	2.2
铝块直径	600
铝块高度	80

1.2 实验步骤

1) 敷设测温点

在沉降罐内部分 3 层, 每层均匀布设 9 个热电偶测温点, 同时在罐拱顶、罐侧壁和铝块上各布设 3 个热电偶测温点, 如图 1 所示, 并将热电偶与温度记录仪连接。

2) 添加采出液

将原油沉降罐放在加热盘上, 打开拱顶盖, 倒

入含水原油(采出液), 液面距罐底距离约 400 mm, 盖上拱顶盖。

3) 采出液加热

打开加热盘电源开关, 将采出液加热至 80 ℃ 左右, 温度稳定后关闭加热盘电源开关。

4) 沉降模拟

将原油沉降罐移动到罐底支撑装置(铝块)上, 模拟采出液自然重力沉降过程。

5) 数据记录

设置温度记录仪参数, 以 1 次/min 的频率采集温度, 直至实验结束。

6) 数据处理

画出沉降罐内的温度场分布, 根据罐侧壁及罐底铝块温度, 由综合换热规律及傅里叶导热定律获得各散热面的散热量, 构建不同散热面的热损失关系。

7) 误差分析

实验误差主要来源于沉降罐底与罐底支撑装

置间的接触热损失、测温误差以及综合换热系数的处理等。

2 实验结果与分析

2.1 采出液沉降过程的温度分布

给定初始温度后, 记录 60 h 内的各点温度变化, 初始时刻沉降罐各面温度场分布的热像图如图 2 所示, 沉降罐内部 3 层, 每层 9 个热电偶测温点, 前 20 h 的降温数据如表 2 所示。

图 2(a)为沉降罐侧面主视图, 可见下部温度较上部温度稍偏高, 为气液分界面, 下部为采出液, 上部为空气; 图 2(b)罐底红线为沉降罐与加热盘接触导致的局部高温; 图 2(c)为沉降罐内采出液温度场分布, 可见整体温度较为均匀; 图 2(d)为拱顶面的温度场分布。沉降过程中单点的温度变化曲线如图 3 所示, 因原油沉降罐内的温度基本均匀, 可看作是整个沉降罐内的温度变化曲线。

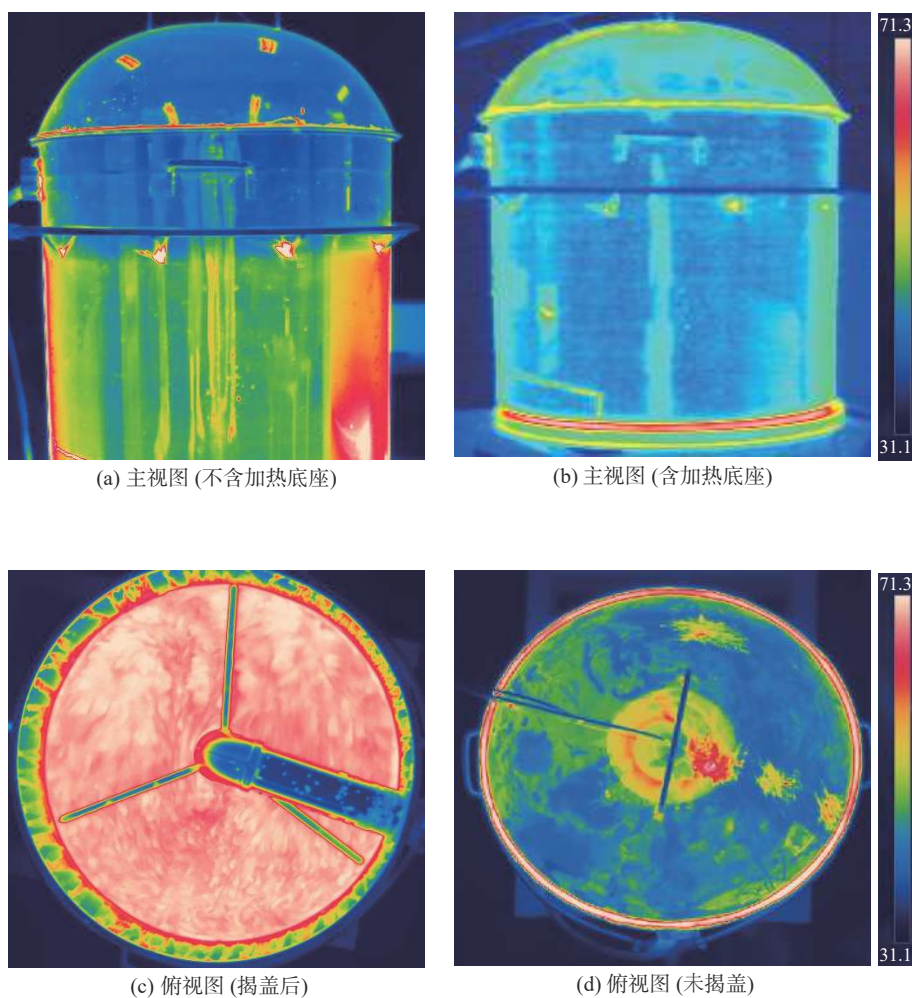


图 2 沉降初始阶段的热像图

表 2 沉降罐初始、10 h、20 h 后温度变化

		外圈温度/℃			中圈温度/℃			内圈温度/℃		
初始	第三层	80.85	81.25	81.55	80.91	81.71	81.43	81.27	82.03	81.34
	第二层	80.78	80.87	81.61	80.83	81.25	81.27	80.91	81.45	81.01
	第一层	81.94	81.58	81.96	81.81	81.70	82.32	81.80	81.98	81.02
10 h 后	第三层	49.08	49.57	49.89	49.30	49.86	49.71	49.42	50.19	49.71
	第二层	49.07	49.02	49.89	49.03	49.42	49.64	49.11	49.66	49.34
	第一层	49.90	49.72	50.21	49.88	49.90	50.38	49.84	50.08	49.01
20 h 后	第三层	37.60	38.06	38.40	37.48	38.32	38.19	37.90	38.67	38.04
	第二层	37.56	37.49	38.34	37.49	37.88	38.16	37.59	38.13	37.87
	第一层	38.42	38.24	38.70	38.44	38.42	38.93	38.39	38.63	37.48

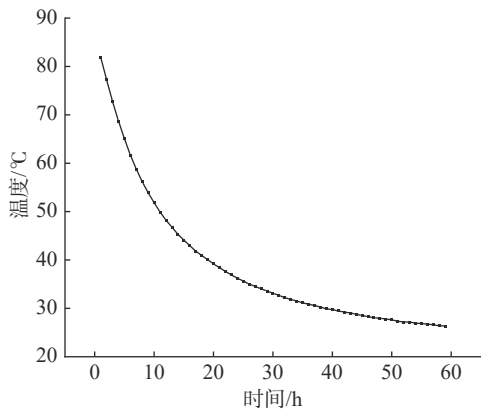


图 3 实验过程中罐内温度变化

由图 3 可见，沉降罐罐内温度随时间延长逐渐降低并趋于平缓。根据能量守恒定律和热量计算有：

$$C \cdot m \cdot dt = q_{\text{总}} \cdot A \cdot \tau \quad (1)$$

式中： C 为采出液的比热，单位 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ； m 为采出液的总质量，单位 kg ； dt 为实验前后采出液的温差，单位 ℃ ； $q_{\text{总}}$ 为整个储罐表面的平均热流密度，单位 W/m^2 ； A 为储罐表面的总面积，单位 m^2 ； τ 为沉降时间，单位 s 。

由于各时刻散热量不同，式(1)中 $q_{\text{总}}$ 总是在变化，由图 3 可见 $q_{\text{总}}$ 随时间延长逐渐减小。实验 0 和 20 h 时刻各表面的热流密度 $q_{\text{顶}}$ 、 $q_{\text{侧}}$ 和 $q_{\text{底}}$ 由式(2)和式(3)计算得到，结果如表 3 所示。

$$q_{\text{顶/侧}} = h\Delta t \quad (2)$$

$$q_{\text{底}} = \lambda \frac{dt}{dx} \quad (3)$$

式中： h 为综合换热系数，单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ ，取 $h=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ ； λ 为底面接触材料的导热系数，单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ，本文采用纯铝，取 $\lambda=237 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ 。

表 3 实验 0 和 20 h 时刻各表面的热流密度

时刻/h	顶面与环境温差/℃	侧面与环境温差/℃	罐底温度梯度 $\frac{dt}{dx}/(\text{℃} \cdot \text{m}^{-1})$	顶面热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	侧面热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	底面热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0	41.33	46.70	15.00	413.33	467.00	3555.00
20	4.72	9.31	8.50	47.23	93.10	2014.50

结果显示，0 时刻各面的热流密度比为顶：侧：底=413:467:3555，约 1:1:8。20 h 后各面的热流密度比为顶：侧：底=47:93:2014，约 1:2:40。降温时间越长，热流密度越小，与图 3 温度初始阶段下降快，随后逐渐变缓的趋势吻合。

2.2 沉降罐各表面的散热量表征

表 4 为沉降实验进行 10 h 后罐顶、罐侧壁和罐底测温点的温度。

表 4 10 h 后罐顶内外、罐侧壁内外和罐底测温点的温度

	测温点1 温度/℃	测温点2 温度/℃	测温点3 温度/℃	环境温度/℃
罐顶内	43.74	44.26	44.16	
罐顶外	41.18	41.12	41.08	
罐侧壁内	49.08	49.07	49.90	27.53
罐侧壁外	46.44	46.22	47.09	
罐底	36.59	36.44	36.41	

则对于罐体顶面和侧面散热, 处于环境空气中考虑对流和辐射的综合换热, 其散热量用可分别计算为:

$$Q_1 = h_1 A_1 \Delta t_1 \quad (4)$$

$$Q_2 = h_2 A_2 \Delta t_2 \quad (5)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为罐顶和罐侧壁的散热量, 单位 W; h_1 和 h_2 为综合换热系数, 单位 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_1 和 A_2 分别为罐顶和罐侧壁的散热面积, 单位 m^2 ; Δt_1 和 Δt_2 分别为罐顶和罐侧壁与环境空气的散热温差, 单位 $^\circ C$ 。

对于罐底散热, 通过不同材料的支撑装置与沉降罐罐底直接接触, 模拟不同传热能力的地面环境。其散热方式为热传导, 根据傅里叶导热定律散热量可计算为:

$$Q_3 = \lambda A_3 \frac{dt}{dx} \quad (6)$$

式中: λ 为导热系数, 单位 $W/(m \cdot ^\circ C)$, 由具体材料决定; A_3 为罐底散热面积, 单位 m^2 ; $\frac{dt}{dx}$ 为罐底支撑内的温度梯度, 单位 $^\circ C/m$, 通过安装在铝块内部的热电偶测温及其位置分布获得。

计算得到罐顶散热 Q_1 、罐侧壁散热 Q_2 和罐底散热 Q_3 后, 便可量化各部分散热所占比例, 计算结果如表5所示。

表5 沉降罐散热量计算结果

沉降罐部位	散热面积/ m^2	散热温差/ $^\circ C$	散热量/W	所占比例/%
罐顶散热 Q_1	0.312	13.597	42.42	7.51
罐侧壁散热 Q_2	0.550	19.053	104.79	18.54
罐底散热 Q_3	0.196	0.180	418.07	73.95

原油沉降罐各散热面的散热大小关系如图4所示: 罐顶散热<罐侧壁散热<罐底散热。由于沉降罐罐底与铝块接触, 铝的导热性能强。因此罐底散热明显大于罐顶散热和罐侧壁散热的总和, 占据主要部分。而罐顶散热面积较小, 且并未与水面有直接接触, 因此散热比例最小。

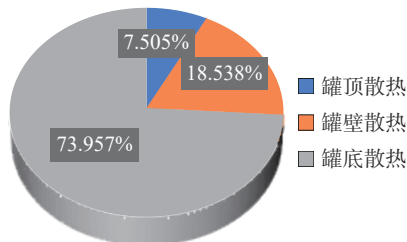


图4 各散热面散热量所占比例图

利用罐侧壁散热量 Q_2 代替罐底散热量 Q_3 带入式(6), 得到导热系数为 $59.4 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。由于改变导热系数时罐底温差也会发生变化, 因此至少要选用导热系数在 $59.4 W/(m \cdot ^\circ C)$ 以下的材料与沉降罐罐底接触, 才能使罐底散热和罐侧壁散热在相同当量。在实际油田环境下, 沉降罐的罐底通常与混凝土接触, 而普通混凝土的导热系数为 $1.28 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。在保持罐底温差不变的情况下, 将铝块导热系数替换为普通混凝土的导热系数, 得到各部分散热比例为罐顶:罐侧壁:罐底=28%:70%:2%, 同样由于导热系数降低会导致实际罐底温差增大, 因此其散热比例在2%~74%之间, 具体数值可通过实验确定。

2.3 误差分析

实验误差之一是沉降罐底与罐底支撑间的接触热损失, 该损失无法精确测量, 但其与总体散热相比微小, 在一定程度上可以忽略不计。另一方面, 综合换热系数 h 会随着温度、空气流动等变化而改变^[9], 本文计算时统一取 $h=10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 进行计算。为减少实验误差, 则应实时计算当时环境下的 h 值, 从而保障计算结果的准确性。

3 实验教学平台功能的多元化

基于本实验平台学生既可以直观地了解采出液在沉降罐中的沉降过程, 明确沉降罐内的温度变化规律, 还能表征沉降罐各面的散热量关系, 促进了学生对导热、对流、辐射以及综合换热相关理论的应用。此外, 学生还可进一步探究各因素对沉降罐内温度场的影响。实验过程培养了学生的动手能力, 加深了对所学知识的认识程度, 激发了学生的科研兴趣, 实现教学与科研的紧密结合^[10-11]。本实验平台既可服务于中国石油大学油气储运工程专业的实验教学, 满足创新训练的需要, 又可供大学生自主科研实验, 使学生成为主动实验的参与者和探索者, 实现了实验室资源的整合和高效利用。

4 结束语

本文搭建的原油沉降罐散热过程模拟实验系统可用于直观观察采出液沉降过程的内部温度分布, 研究其沉降与散热过程。实验结果表明: 在原油沉降罐罐底与纯铝直接接触时, 原油沉降罐的罐底散热所占比例最大, 罐侧壁散热次之, 罐

顶由于并未与水面有直接接触,因此散热最少。罐底散热明显大于罐顶和罐侧壁散热之和,所占比例高达 73.957%。该实验系统帮助学生加深了对该方面理论知识的理解,在一定程度上培养了学生的实践能力与创新意识。

参考文献

- [1] 赵洪达,王朝勃.立式原油沉降罐脱水效果优化分析[J].*化工管理*,2017(18):203.
- [2] 李福双.大型浮顶罐内长储原油沉降分层与计量研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [3] 冯勋骄.原油沉降罐机械式调节水箱调节范围的设计[J].*山东工业技术*,2019(8):71-74.
- [4] 任虎林.原油沉降罐加热盘管防腐技术探讨[J].*全面腐蚀控制*,2019,33(11):61-63.
- [5] 叶子浩.高含水原油沉降罐智能切水器的研究[D].西安:西安石油大学,2020.
- [6] 施雯,邱源海.储油罐温度分布模拟研究[J].*广东石油*
化工学院学报,2013,23(1):50-52.
- [7] HE Y N, CAO F, JIN L, et al. Development and field test of a high-temperature heat pump used in crude oil heating[J]. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2017, 231(3): 1989-1996.
- [8] 林日亿,杨正大,王新伟,等.氮气/蒸汽混合气体状态特性探究实验教学平台的搭建及应用[J].*实验技术与管理*,2020,37(5):166-169.
- [9] LIU B D, HUANG Q H, WANG P Y. Influence of surrounding gas temperature on thermocouple measurement[J/OL]. (2022-03-19). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.10067>.
- [10] 张金彪,周碧青.高校分析测试中心的发展及其在实验教学中的作用[J].*实验技术与管理*,2020,37(10):13-15.
- [11] 王新伟,潘慧达,杨正大,等.稠油水热裂解动态模拟实验平台建设[J].*实验室研究与探索*,2020,39(11):63-66.

编辑 张俊

(上接第 72 页)

- [2] 蒙臻,倪敬,周晶,等.工业机器人伺服系统服役性能综合性实验设计[J].*实验技术与管理*,2020,37(6):48-52.
- [3] 王嘉,范蟠果.PMSM伺服系统位置环的PI-模糊混合控制器研究[J].*微电机*,2020,53(7):33-36.
- [4] 刘沛,蒋超.蚁群算法优化PID的机器人位置伺服控制[J].*国外电子测量技术*,2021,40(7):59-63.
- [5] 张臻,周扬忠.永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J].*仪器仪表学报*,2022,43(5):263-271.
- [6] 倪敬,史雨,何利华.机器人电气接插件可靠性加速实验系统设计[J].*实验技术与管理*,2020,37(2):95-99.
- [7] 周晓华,张银,蓝会立,等.无刷直流电动机闭环调速系统虚拟实验平台设计[J].*实验室研究与探索*,2020,39(1):98-102.
- [8] 刘恒娟.基于MATLAB的电力电子电路仿真实验平台[J].*实验室研究与探索*,2020,39(8):134-137.
- [9] 张玮,钟啸,张瑞祥.线上线下虚实结合的“电机与拖动”课程实验教学模式构建[J].*西部素质教育*,2023,9(10):1-4.
- [10] 胡朝燕,祝勇俊.基于MATLAB的直流电机拖动教学研究[J].*中国电力教育*,2020(11):62-65.
- [11] 彭飞,金家东,黄允凯,等.交直流电机控制教学实验平台的开发[J].*电气电子教学学报*,2022,44(1):155-158.
- [12] 王晓旭,闫朋涛,王承林,等.基于MATLAB GUI的电机拖动辅助教学平台设计[J].*电气电子教学学报*,2020,42(3):580-84.
- [13] 林厚健,王小增,王发良,等. MATLAB/Simulink 仿真教学的应用[J]. *电子技术与软件工程*, 2022(18): 108-111.
- [14] 王慧,孙丽玲,田艳军.基于MATLAB仿真的电力电子技术综合性课程设计[J].*实验技术与管理*,2021,38(9):191-194.

编辑 钟晓