



机器人虚拟仿真实验设计及教学实践

王 帅, 房立金, 王军义*, 丁其川, 王 昊

(东北大学 机器人科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 结合机器人建模仿真软件 V-REP 逼真的三维图像显示功能和 MATLAB 程序强大的计算能力, 开发六自由度机器人虚拟仿真实验平台。首先在 V-REP 中建立机器人模型, 然后介绍 V-REP 的通信模式和调用机制, 最后用机器人关节空间轨迹规划仿真和笛卡尔空间直线规划的例子说明如何使用 MATLAB 编写程序实现对 V-REP 内部机器人的运动仿真。利用机器人仿真技术搭建形象有趣的实验平台, 应用到机器人基础原理实验课堂中, 探索翻转课堂实验教学模式, 提高学生学习和机器人设计仿真能力。

关键词: 机器人虚拟仿真; MATLAB; V-REP; 翻转课堂

中图分类号: G434

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230043

Design and Teaching Practice of Robot Virtual Simulation Experiment

WANG Shuai, FANG Lijin, WANG Junyi*, DING Qichuan, WANG Hao

(Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A virtual simulation experiment platform for 6-DOF robot is developed by combining the realistic 3D image display function of the robot simulation software V-REP (virtual robot experimentation platform) and the powerful computing ability of MATLAB program. Firstly, the robot model is built in V-REP. Then the communication mechanism and communication call mode of V-REP are introduced. Finally, the simulation of robot joint space trajectory planning and Cartesian space line planning are used to illustrate how to use the MATLAB program to realize the motion simulation of the robot inside V-REP. The robot simulation technology is used to build an interesting experimental platform, which is applied in the experimental classroom of robot basic principle. The experimental teaching mode of flipped classroom is explored to improve students' learning interest and robot design simulation ability.

Key words: robot simulation; MATLAB; V-REP; flipped classroom

机器人基础原理是机器人专业学生必修课之一, 该课程以机器人技术作为教学重点, 具有专业性和实践性强的特点。传统机器人实验教学中, 教师利用课堂教学的时间讲授机器人技术知识, 学生使用仅有的几台机器人设备验证算法。存在的问题是: 学生上课时没有做好预习准备, 上课时不知所云; 机器人设备台套数量少, 学习效果参差不齐等问题。为了把晦涩难懂的机器人技术理论公式转化为让学生更容易理解的知识, 探索利用机器人虚拟仿真, 在高校机器人教育领域具有很大的发展前景^[1]。

东北大学机器人科学与工程学院在新工科的理念引导下^[2], 积极探索课程建设^[3], 结合机器人虚拟仿真技术方法, 联合 MATLAB 和 V-REP 两种仿真工具优点搭建机器人虚拟仿真实验平台, 并在机器人基础原理实验课堂中进行教学实践。从教学资源、教学设计、教学过程等方面进行课程改革, 采用课前学习线上慕课课程预习基础知识, 课中利用虚拟仿真实验等多种数字化信息化教学资源深化知识, 课后开放实验、巩固知识的三步曲教学, 全面深化课程建设, 提高学生学习兴趣和机器人设计仿真能力。

收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(62273081)。

作者简介: 王帅(1985-), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事智能机器人技术、人工智能、自动化等相关实验教学工作。

*通信作者: 王军义(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事人工智能、机器人技术、多机器人协同等相关研究和教学工作。E-mail: wangjunyi@mail.neu.edu.cn

1 V-REP 与 MATLAB 联合仿真实验平台搭建

1.1 V-REP 与 MATLAB 仿真软件特点

在科学研究和机器人工程应用领域, 机器人仿真技术提供安全可靠的设计、规划和分析工具, 帮助机器人系统解决日益复杂的设计和编程问题, 缩短开发周期、节省设计成本^[4]。目前, 科研或商业领域有多款机器人仿真软件, 如专用软件 RobotStudio^[5]、MATLAB^[6]、V-REP 等^[7]。不同的机器人仿真软件在物理逼真度、功能仿真度和编程语言及扩展性等方面各有千秋。专用软件适用于特定品牌的机器人, 难以进行扩展开发。MATLAB 虽然具有强大的数学计算能力, 其 robotic toolbox 工具箱在机器人领域广泛应用^[8], 但其并不擅长三维图像显示和工作环境的三维仿真。V-REP 是一款开源的机器人仿真软件, 具有丰富的应用编程接口, 可以进行机器人快速原型构建和仿真验证、算法设计、工业自动化系统模拟、监控安全等任务。V-REP 主要由场景中的物体、计算模块、控制方式 3 个方面所构成。场景中的物体是指各类实体, 包括机械构件、装置、传感器、工具、运动轨迹、图形、光照系统等。计算模块包括碰撞检测、正向/逆向运动学、物理动力学引擎、轨迹/运动规划、最小距离估算 5 个部分。控制方式包括嵌入式脚本、附加功能、插件、远程 API 客户端、定制解决方案以及 ROS 节点 6 个实现途径。V-REP 拥有完善的程序扩展接口, 可以通过多种语言, 如 C/C++、Java、

Python、MATLAB、Lua 等进行外部控制^[9]。V-REP 结合 MATLAB 强大的数据处理能力和 V-REP 3D 渲染功能, 可以搭建出具有物理引擎的机器人仿真实验平台。

1.2 建立机器人模型

六轴机械臂结构利用 SolidWorks 软件建立机械臂基座和 6 个连杆零件, 如图 1(a)所示。选择“文件>新建>装配体”, 将创建的零部件依次导入装配体, 使用配合工具, 确保各关节按照约束条件正确连接, 每个关节具有旋转自由度, 如表 1 “运动范围”所示。在 SolidWorks 中, 参考几何体中的坐标系工具, 为各个关节添加坐标系标注, 建立六自由度机器人坐标系如图 1(b)所示。以 (x_1, y_1, z_1) 坐标系原点作为整个机械臂坐标系的原点, (x_i, y_i, z_i) 为机器人各关节坐标系 $(i=1, 2, \dots, 6)$ 。确保 z 轴与关节轴方向相同, x 轴与相邻连杆的传动轴垂直且相交。B 为基座坐标系, T 为工具坐标系, 建立改进 Denavit-Hartenberg (DH) 参数如表 1 所示。其中, $d_1=0.342$ m, $a_1=0.040$ m, $a_2=0.275$ m, $a_3=0.025$ m, $d_4=0.280$ m, $d_6=0.073$ m。

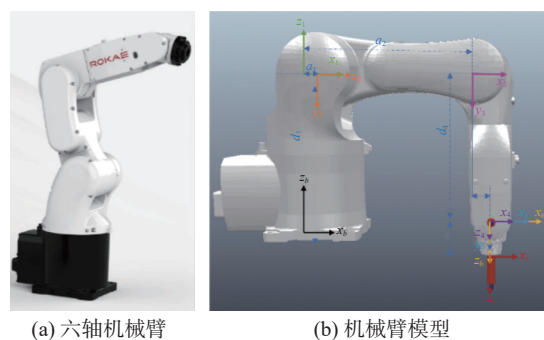


图 1 机器人坐标系

表 1 改进 DH 参数

	坐标系	扭转角 α_{i-1}/rad	杆长 a_{i-1}/m	关节偏距 d_i/m	关节转角 θ_i/rad	运动范围/ $(^\circ)$
	B	0	0	d_1	0	-
i取值	1	0	0	0	0	-170~170
	2	$-\pi/2$	a_1	0	$-\pi/2$	-84~130
	3	0	a_2	0	0	-188~50
	4	$-\pi/2$	a_3	d_4	0	-170~170
	5	$\pi/2$	0	0	0	-117~117
	6	$-\pi/2$	0	0	0	-360~360
	T	0	0	d_6	0	-

1.3 3D 机器人模型导入 V-REP

V-REP 支持导入 CAD 文件进行建模, 其支持的 CAD 数据格式有 OBJ、STL、URDF、3DS 和

Collada, 本文采用 STL 的格式。以 Rokae 机器人为例, 在 SolidWorks 中打开机器人 CAD 文件, 将导出的 STL 文件导入到 V-REP 中。由于 CAD

文件中有一些冗余的零件模型，对其进行删除处理，并对一些模型进行合并。点击每个关节组件，使用 Add 工具为每个关节设置旋转自由度，组成连杆并添加关节，建立符合 V-REP 标准的机器人层次化模型，如图 2 所示。

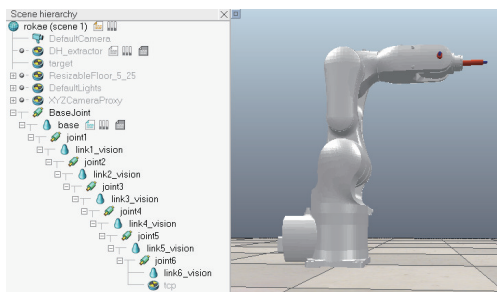


图 2 V-REP 中层次化机器人模型

1.4 V-REP 与 MATLAB 通信

V-REP 远程 API 服务器端通过常规 API 的 V-REP 插件来实现。只有在远程 API 插件在 V-REP 启动时被载入时，远程 API 服务器端才能自动启动。远程 API 插件可以通过内置脚本等方式控制服务的启动和停止。

远程 API 客户端配置需在 V-REP 的安装目录 programming/remoteApiBindings/，将 remoteApi-Proto.m、remoteApi.dll、remApi.m 3 个文件放入控制程序相同的文件夹内。MATLAB 服务器端和 V-REP 客户端通过 socket 互相传递数据，如图 3 所示，即可实现 MATLAB 与 V-REP 之间数据通信^[10]。

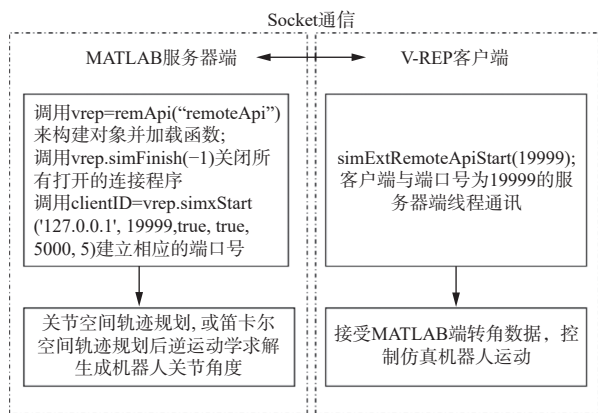


图 3 MATLAB 与 V-REP 端通信流程图

2 实验项目设计

机器人基础原理实验教学内容安排采用自顶向下的设计思路，依次包括机器人运动学、关节空间轨迹规划和笛卡尔空间轨迹规划实验。采用模块化编程方式，实验内容层层递进。下面以关

节空间多项式规划以及笛卡尔空间直线轨迹规划为例，说明如何使用 MATLAB 编写程序实现对 V-REP 内部机器人的通信和联合仿真，并对比单纯用 MATLAB robotic 工具箱做轨迹规划的效果。

2.1 关节空间轨迹规划

机器人关节空间规划以 5 次多项式为例进行插补，假设各关节初始角度 θ_0 、初始速度 $\dot{\theta}_0$ 、终止速度 $\dot{\theta}_f$ 、初始加速度 $\ddot{\theta}_0$ 、终止加速度 $\ddot{\theta}_f$ 均为 0，设定机器人各关节最终角度 θ_f $\theta_f=[10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60]*\pi/180$ 。调用 MATLAB robotic 工具箱中 jtraj 函数将初始角度和终止角度之间用 5 次多项式规划，得到一条光滑的运动曲线，如图 4(a)所示。

MATLAB 与 V-REP 联合仿真开始时，先点击 V-REP 中的仿真按键，然后在 MATLAB 中运行控制程序，V-REP 中的机器人就会按照 MATLAB 控制程序生成的控制值进行运动调用 V-REP Remote API 中关于 MATLAB 的函数 simxStartSimulation，启动仿真程序。利用 simxGetObjectHandle 函数得到关节句柄，最后利用 simxSetJointTargetPosition 函数设置关节最终位置，将 MATLAB 中规划的关节角度传递给 V-REP，得到如图 4(b)所示的运动仿真效果图。MATLAB 与 V-REP 联合仿真关节空间轨迹规划，MATLAB 部分代码如下所示。

```
vrep.simxStartSimulation( clientID,vrep.simx_op
mode_oneshot);
qz = [0 0 0 0 0 0];
qn=[10 20 30 40 50 60]*pi/180;
t = 0:0.01:1;
joint_pos = jtraj(qz,qn,t);
Trans=XB7.fkine(qn)
for k = 1:size(joint_pos,1)
    for i=1:6
        vrep.simxSetJointPosition( clientID,rokae-
JointHandle(i),joint_pos(k,i),vrep.simx_opmode_blo
cking );
    end
    vrep.simxSynchronousTrigger(clientID);
end
```

2.2 笛卡尔空间直线规划

如图 5(a)所示，机器人笛卡尔空间规划以空间直线插补为例，初始位姿为各个关节角度为 $\theta_0=$

[0 0 0 0 pi/5 0]时位姿, 终止姿态与初始姿态相同, 运动到设定小球的位置(0.26, 0.30, 0.45 m)。利用 V-REP 和 MATLAB 联合仿真, 首先利用 simxGetObjectHandle 函数得到关节句柄, 然后调用调用 MATLAB robotic toolbox 中 fkine 函数得到机器人初始位姿, 最后调用 MATLAB robotic

toolbox 中 ctraj 函数将初始位姿和终止位姿间用直线进行插补, 并把中间插补的位姿利用调用 MATLAB robotic toolbox 中 ikine 函数进行逆解, 得到各个时刻的关节角度, 通过 simxSetJoint-TargetPosition 函数发送给仿真机器人, 这样可以得到如图 5(b)所示的运动曲线。

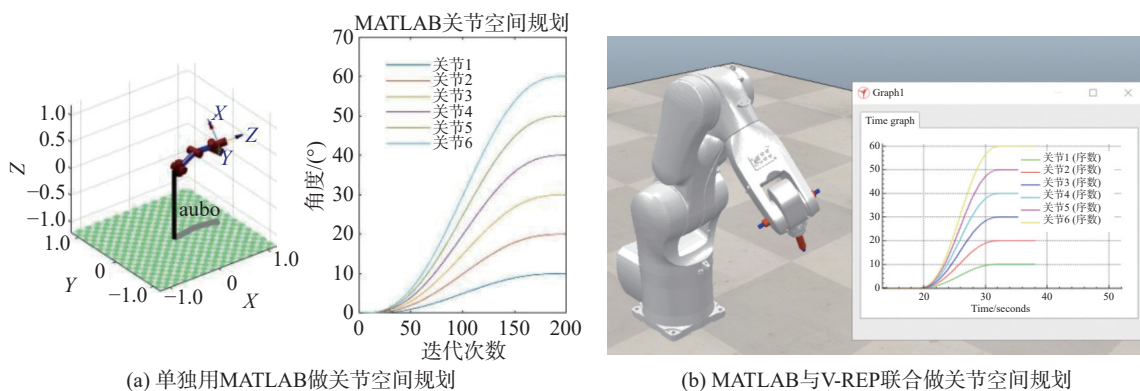


图 4 运动仿真效果对比图

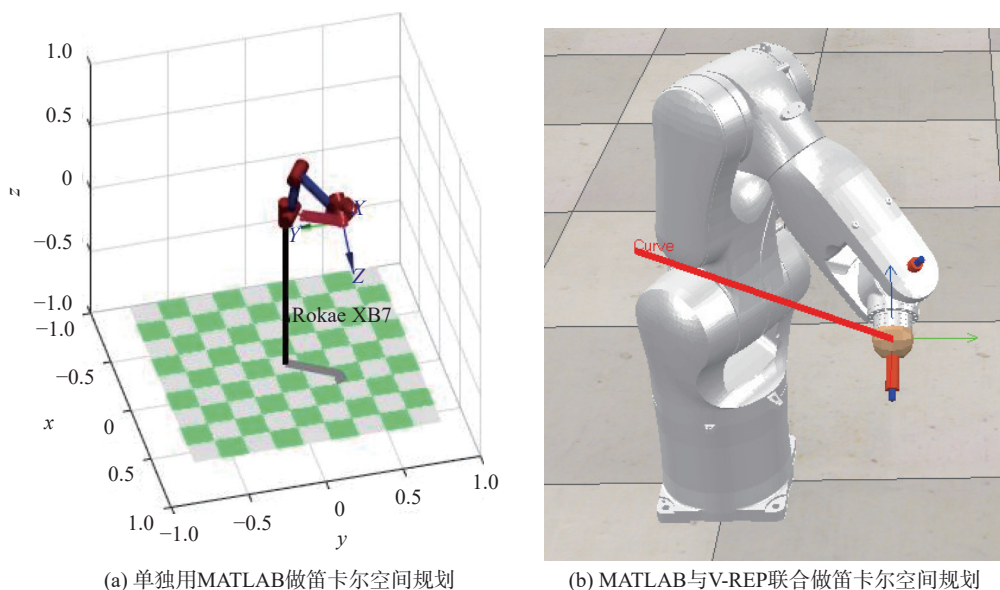


图 5 运动仿真效果对比图

MATLAB 与 V-REP 联合仿真笛卡尔空间轨迹规划, MATLAB 部分代码如下所示。

```
vrep.simxStartSimulation( clientID,vrep.simx_op
mode_oneshot);
qz = [0 0 0 0 0 0];
qn = [0 0 0 0 pi/5 0];
t=0:0.05:1;
joint_pos = jtraj(qz,qn,t);
for k = 1:size(joint_pos,1)
```

```
for i=1:6
    vrep.simxSetJointPosition(clientID, rokae-
JointHandle( i), joint_pos( k,i), vrep.simx_opmode_
blocking );
end
vrep.simxSynchronousTrigger(clientID);
end
jointPosition = zeros(1,6);
for i=1:1:6
```

```

[res, jointPosition( i )] = vrep.simxGetJoint-
Position( clientID, rokaeJointHandle( i ), vrep.simx_
opmode_blocking);
end
T_tcp = Rokae.fkine(jointPosition);
T1 = T(T_tcp);
T2 = T1;
T2(1,4) = 0.26; T2(2,4) = 0.3; T2(3,4) = 0.45;
t1=0:0.01:1;
tc = ctraj(T1, T2, t1);
qd=[];
for i=1:1:size(tc,3)
    qd = [qd; Rokae.ikine(tc(:,i))];
end
for i=1:1:size(tc,3)
    for j=1:6
        vrep.simxSetJointPosition( clientID, rokae-
JointHandle(j),qd(i,j),vrep.simx_opmode_streaming );
    end
    vrep.simxSynchronousTrigger(clientID);
end

```

对比图 4 和图 5 运动仿真效果对比图, 其中图 4(a) 和图 5(a) 为单独用 MATLAB robotic 工具箱做轨迹规划, 图 4(b) 和图 5(b) 为 MATLAB 与 V-REP 联合做轨迹规划, 可以看出规划结果一样, 但是 MATLAB 与 V-REP 联合仿真效果更加逼真, 更能激发学生在学习枯燥的机器人技术理论知识时的学习兴趣。

3 机器人基础原理教学实践

机器人基础原理实验教学方式采用翻转课堂教学的方式^[11]。以学生为中心, 采用课前移动学习、预习基础知识, 课中互动探索、深化知识和课后开放实验、巩固知识的三步曲教学。

1) 课前自主学习, 掌握基础知识

教师提前把实验报告和仿真实验程序模板、机器人基础原理慕课中教学视频^[12] 等微视频、预习内容放到 BlackBoard 教学平台中, 让学生进行课前自主学习, 同时把预习情况作为实验评定的标准之一, 使成绩评定更有的放矢。

2) 课中互动探索, 深化知识

课上教师进行内容讲解、答疑, 完成教学活动, 学生通过翻转课堂的方式展示仿真结果。之

后学生自行整理预习设计、MATLAB 与 V-REP 联合仿真程序、仿真结果作为实验报告内容, 提交至 BlackBoard 教学平台。建立课程 QQ 群, 可以在课堂内外即时沟通交流。

3) 课后开放实验, 巩固知识

课后, 有余力的学生进行开放性实验, 自己编写机器人工具箱中的正运动学、逆运动学以及轨迹规划函数, 锻炼学生底层代码的编写能力, 巩固所学知识, 并作为机器人基础原理实验成绩加分依据。

4 结束语

利用机器人虚拟仿真技术, 充分结合了 MATLAB 强大的数据处理能力和 V-REP 3D 渲染功能, 提出了联合 MATLAB 和 V-REP 进行机器人运动仿真的方法建立机器人虚拟仿真实验平台。在教学资源、教学过程、教学设计等方面取得了一定成效。

1) 整合教学资源, 打造“BlackBoard 平台多媒体资源+MOOC 线上课程+线上线下结合+QQ 群即时通信”的信息化、数字化教学模式。

2) 翻转课堂的教学过程, 提高学生自主学习能力。不同于传统教学模式, 翻转课堂强调以学生为主体, 设置开放性实验培养不同层次学生的创新思维能力、分析和解决问题的能力。

3) 在教学设计方面, 采用虚拟仿真技术, 搭建形象有趣的机器人仿真平台, 满足了虚拟机械臂与实物机械臂配合, 作为“以实补需, 虚实结合”的实验平台, 利用 3D 动画可视化系统动态观察实验结果, 可以提高学生学习兴趣和机器人设计仿真能力。

该机械臂虚拟仿真实验项目已经在机器人基础原理实验课中实施 5 年, 在实验班级中, 共收集了超过 300 名学生的反馈。结果显示, 98% 的学生认为教学过程清晰、有条理, 95% 的学生对教学设计的创新性给予了高度评价。同时, 课程期末测试的平均成绩提升了 15%, 进一步验证了该教学模式的有效性。

参考文献

- [1] 袁正, 马国清, 张磊, 等. “互联网+”时代工业机器人虚拟仿真实验教学研究[J]. 课程教育研究, 2020(11): 226.
- [2] 吴爱华, 侯永峰, 杨秋波, 等. 加快发展和建设新工

- 科主动适应和引领新经济[J]. 高等工程教育研究, 2017(1): 1-9.
- [3] 陈强强, 郭宇, 吴红梅, 等. “互联网+”背景下工科无机化学实验教学资源整合与教学模式创新[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(6): 103-108.
- [4] 杨辰光, 李智军, 许扬. 机器人仿真技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [5] 雷旭昌, 陈江魁, 王茜菊, 等. 工业机器人 RobotStudio 仿真训练教程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2019.
- [6] CORKE P. Robotics, vision and control-fundamental algorithms in MATLAB[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2017.
- [7] FREESE M, SINGH S, OZAKI F, et al. Virtual robot experimentation platform V-REP: A versatile 3D robot simulator[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [8] 任军, 吴正虎, 曹秋玉. 基于 MATLAB Robotics 工具箱的 ER50 机器人轨迹规划与仿真[J]. *机械设计与制造*, 2022(378): 33-36.
- [9] ROHMER E, SINGH S, FREESE M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo: IEEE, 2013: 1321-1326.
- [10] 乐斌, 曾兴斌. V-REP 机器人仿真远程控制方法研究[J]. *工业控制计算机*, 2018, 31(9): 41-43.
- [11] 董春桥, 王秀萍, 梁莎. “互联网+”环境工程原理虚拟仿真实验教学项目建设[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(8): 11-14.
- [12] 房立金, 王斐, 贾子熙, 等. 机器人基础原理慕课 [EB/OL]. [2021-08-29]. <https://www.icourse163.org/course/NEU-1003431001?from=searchPage/>.

编辑 钟晓

(上接第 12 页)

参 考 文 献

- [1] MILMAN B L, UTSAL V A, LUGOVKINA N V, et al. Comparative determination of fatty acid composition of low-molecular components of blood plasma by three mass spectrometry techniques: the ‘old-new’ exercise in lipidomics[J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2015, 70: 1601-1613.
- [2] GAGNE S, CRANE S, HUANG Z, et al. Rapid measurement of deuterium-labeled long-chain fatty acids in plasma by HPLC-ESI-MS[J]. *Journal of Lipid Research*, 2007, 48: 252-259.
- [3] JUNG H J, LEE W Y, CHUNG B C. Mass spectrometric profiling of saturated fatty acid esters of steroids separated by high-temperature gas chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, 1216: 1463-1468.
- [4] 张亚平. 血清游离不饱和脂肪酸: 慢性疾病早期发现的生物标志物[D]. 北京: 北京协和医学院, 2014.
- [5] COHEN L H, GUSEV A I. Small molecule analysis by MALDI mass spectrometry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002, 373: 571-586.
- [6] POGORELOVA S P, ZAYATS M, BOURENKO T, et al. Analysis of NAD(P)+/NAD(P)H cofactors by imprinted polymer membranes associated with ion-sensitive field-effect transistor devices and Au-quartz crystals[J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75: 509-517.
- [7] ZHANG Z H, LONG Y M, LI H. Molecularly imprinted thin self-assembled on piezoelectric quartz crystal surface by the sol-gel process for protein recognition[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, 21: 1244-1251.
- [8] FANG L, CHEN S, GUO X, et al. Azobenzene-containing molecularly imprinted polymer microspheres with photo-and thermoresponsive template binding properties in pure aqueous media by atom transfer radical polymerization[J]. *Langmuir*, 2012, 28: 9767-9777.
- [9] PENG H, DONG R, WANG S, et al. A pH-responsive nano-carrier with mesoporous silica nanoparticles cores and poly(acrylic acid) shell-layers: Fabrication, characterization and properties for controlled release of salidroside[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2013, 446: 153-159.
- [10] 姜丽艳, 闫国栋, 徐阳. 基于 MALDI-MS 检测的静电纺丝装置搭建与应用[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(1): 97-100.
- [11] 陈铭, 莫广艳, 叶溪, 等. 葛根素对棕榈酸诱导胰岛 MIN6 细胞损伤的保护作用[J]. *中国药理学通报*, 2022, 38(6): 893-897.
- [12] 王婷, 刘凯, 李柯颖, 等. 敲除 USP13 促进棕榈酸诱导的小鼠肝实质细胞凋亡[J]. *中国生物工程杂志*, 2022, 42(4): 9-16.

编辑 张俊