

一种新型手扶挖藕机的结构设计与研究

刘向军^{1,2}, 王艾伦^{1,2*}, 李世杰¹, 朱卓平^{1,2}

(1. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要 提出了一种新型手扶轮式挖藕机。以车架作为载体承载发动机和喷头支架, 喷头浸没水中靠近泥面, 利用高压水射流对泥土冲刷粉碎, 使得莲藕自动浮出水面。该机器使用双动力系统, 汽油机水泵负责供水, 柴油发动机通过变速箱减速增扭从而驱动机器前进。借助计算机仿真对挖藕机车架强度刚度进行计算, 加工样机并组装零部件, 验证了车架强度刚度设计符合使用要求。最后通过田间现场试验记录样机相关数据, 挖藕机前进平均速度为 1.63 m/min, 工作幅宽为 1.2 m, 平均工作效率为 122.25 m²/h, 相对人工单喷枪挖藕效率提高 3.5 倍左右, 试验结果表明, 该样机作业稳定性能优良, 达到所设计的目标要求。

关键词 挖藕机; 有限元; 车架; 强度刚度; 喷头

中图分类号 S225.99 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)10-0179-04

Research and Design on an Automatic Walking Dig Lotus Root Machine

LIU Xiang-jun^{1,2}, WANG Ai-lun^{1,2}, LI Shi-jie¹ et al (1. Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha, Hunan 410083; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083)

Abstract An automatic walking dig lotus root machine was put forward. With wheel chassis frame fixed engine and carrier the nozzle, the nozzles were submerged in the water near the mud surface, using high pressure water jet to soil erosion, the lotus emerge from the water automatically. The computer simulation was used to calculate dig lotus root locomotive frame strength and rigidity, and results show that the strength conform to the conditions of use. At last, through the field records the related data in site test, the machine average speed was 1.63 m/min, the speed size was controlled by diesel engine throttle, the working width was 1.2 meters, the average efficiency was 122.25 m²/h, and the relative efficiency compared with the manual was increased by 3.5 times. Experiment result showed that the machine dig lotus root had high efficiency and good performance and achieved the goal.

Key words Dig lotus root machine; Finite element; Frame; Strength steel degrees; Nozzle

由于莲藕的食用药用价值高, 人们种植积极性持续上涨, 种植面积也逐年增多, 但因莲藕生长环境的特殊性, 莲藕采收成为困扰农户的一个问题, 农户为收获莲藕投入了大量的人力物力, 但效率低下、经济效益差, 不利于莲藕产业的长期发展。粗略的统计全国的莲藕种植面积高达 400 万 hm², 其中人为浅水种植占 65%, 沼泽地湖区自然生长的占 35%, 莲藕生长随机分布于泥土中, 一般的品种产量约 37.5 t/hm², 单个藕支重量为 3~4 kg, 莲藕在泥田中分布密度约为 1 支/m²[1]。目前, 莲藕主要依靠人工单喷枪采挖, 这种传统的挖藕方式在一定程度上提高了人们的工作效率, 但对挖藕师傅的经验要求高, 劳动强度大而且长时间泡在水中对身体有损害[2]。针对日益增大的莲藕种植面积, 高强度、低效率的传统人工挖藕方式越来越不能满足人们的需求, 据实地调研, 人工单喷枪挖藕效率约 35 m²/h, 每年有大量的莲藕由于没有及时采挖而就地腐烂, 伴随着农村经济结构的调整, 劳动者趋向于老龄化, 传统的人工挖藕方式终将被淘汰, 因此, 开发一种高效挖藕机械势在必行。

为了解决繁重低效的人工挖藕方式, 国内外学者对挖藕机械进行了研究, 日本的日东工业研究所在 20 世纪 80 年代初期对挖藕机开始了研究, 共研制了三代相关挖藕机, 即带高压水泵的 I 型喷流式挖藕机、宽幅度作业 II 型挖藕机、水泵定置式 III 型挖藕机[3]; 2009 年南京农业大学工学院的科

研人员设计出 4SWO-1.2 型船式挖藕机; 华中农业大学工程技术学院黄海东等[4] 开发设计 4CWO-3.2 型船式自动挖藕机; 2010 年湖北省武汉兴盛开发有限公司研究出浮筒鸭嘴式莲藕采挖机, 依靠左、右 2 个圆柱大浮桶排水从而使得机器漂浮; 安徽省淮北市孙疃镇黄庄千碧荷农业开发有限责任公司也对挖藕机进行了多年研究, 生产 Q1、Q2、Q3 3 种型号挖藕机, 匹配的水泵功率分别为 9、10、11 马力, 船身整体式设计质量较大。目前国内外所研制的挖藕机均为船式挖藕机, 但其存在以下不足: 机器整体式设计, 质量体积大, 需多人搬运, 价格昂贵难以被农户接受; 船体漂浮水面依靠人工推进, 依然需要一定的劳动强度; 船身具有一定的吃水深度, 所以在浅水藕田无法正常漂浮作业; 喷头距离泥面较远, 在水中射流沿程损失较大。笔者提出了一种车架手扶轮式挖藕机, 其结构设计紧凑, 各部分便于拆装运输, 质量小成本低, 自带车轮驱动装置, 可搭配不同尺寸轮圈适应不同深度的泥田, 相对以往船式挖藕机对泥田深度适应范围更广, 对手扶轮式挖藕机结构进行了有限元分析, 并对加工样机进行了田间试验, 检验了样机的作业适应性和稳定性。

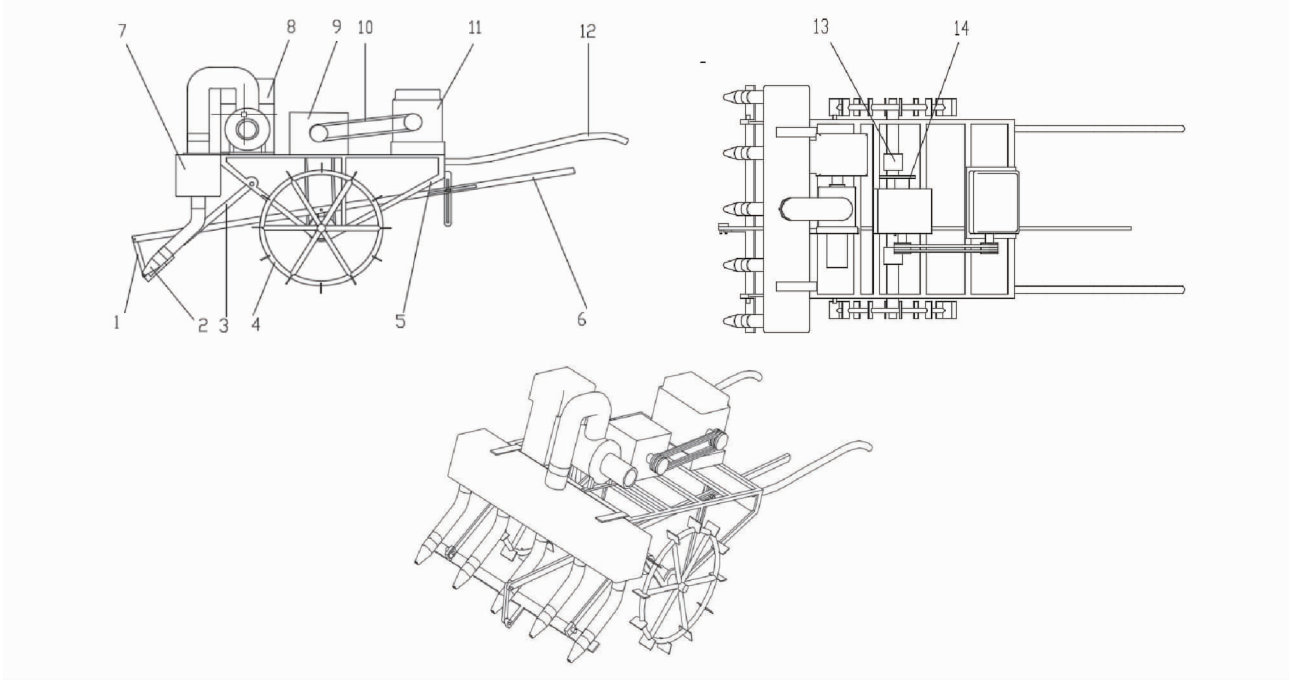
1 手扶挖藕机结构与工作原理

1.1 手扶轮式挖藕机基本构造 手扶轮式挖藕机主要是由发动机、减速箱、传动系统、水泵、分水器水箱、喷射系统、车轮、车架、喷头角度调节杠杆机构等部分组成, 基本结构如图 1 所示。手扶轮式底盘结构设计, 该机在工作时各部分便于拆装运输, 对于作业人员具有一定的轻便性。喷头射流高度角度均可调节, 水柱与泥面直接作用, 减小喷头浸没时在水中射流的沿程损失, 相对以往挖藕机而言对水泵流量和扬程要求更低, 节约能量且作业效率高。

基金项目 湖南省科技厅社会发展重点项目科技支撑计划项目(2013SK2010)。
作者简介 刘向军(1992—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向: 机械设计及其理论。* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事机械设计及其理论研究。
收稿日期 2018-01-16

在整个挖藕机结构设计过程中,优先考虑结构的强度、刚度以及行进过程中的重心平衡,由于机架几乎支撑了整个挖藕机的重量,所以两侧采用三角形承重结构,保证结构形

状的稳定性。车身上部面板采用矩形框架式结构,便于零部件的放置及固定安装,车身载体使用 3 mm 厚矩形空心管材,保证整机结构具有足够的强度刚度。



注:1. 摆动连杆;2. 喷头;3. 喷头支撑杆;4. 车轮;5. 车架;6. 摆动杆;7. 分水器;8. 水泵;9. 减速器;10. 皮带;11. 发动机;12. 扶手;13. 车轮离合器;14. 链条
Note:1. Swinging rod;2. Nozzle;3. Nozzle support rod;4. Wheel;5. Frame;6. Oscillating rod;7. Water segregator;8. Water pump;9. Reducer;10. Belt;11. Engine;12. Armrest;13. Wheel clutch;14. Chain

图 1 轮式挖藕机的基本结构

Fig.1 The basic structure of wheel dig lotus root machine

1.2 挖藕机工作原理 挖藕机作业时,先把车架底盘放入泥田中,然后将发动机、水泵、减速箱、喷头、分水器定位安装在车架上。水泵负责供水,水先经过滤网莲蓬头到达水泵中,把水抽到分水器,分水箱有 1 个入口和 5 个出口,每个出口通过软管连接 1 个锥形喷头,调节汽油发动机油门来控制水泵的流量和压力,可以通过支撑杆 3 和摆杆 6 调节喷头位置高低和角度,喷头靠近泥面冲刷,减小水中的沿程射流损失。驱动柴油机通过皮带连接变速箱减速增扭从而驱动车轮前进,该机通过更换不同尺寸的轮圈适用于不同深度的泥田,喷头适当摆动对前方泥土冲刷、粉碎和推移效果更佳,同时也可以对挖出来的莲藕起到清洗作用。车轮离合器 13 用钢丝绳连接至扶手,控制挖藕机器拐弯行走,莲藕本身密度比水小,在高压水柱的冲洗下可以脱离泥土和杂草的束缚自动浮出水面。水泵进水管拖在挖藕机后下方,进水口连接细密网格的铁质莲蓬头,防止杂草进入水泵堵塞管路,莲蓬头利用自身重力沉入水底,由于莲蓬头处于机器刚行走过的区域,相当于形成一条状的水沟,莲蓬头潜底吸水防止进入空气保证了良好的密封性。因此,该样机相对以往船式挖藕机而言,更加适用于浅水藕田,更换较大直径的轮圈可以在泥脚相对较深的藕田使用。挖藕机主要技术参数:挖藕机外形尺寸为 1 626 mm×850 mm×1 050 mm;喷头内径为 15 mm,共 5 个;水泵流量为 55 m³/h。

2 基于 ANSYS 车架结构有限元分析

由于该轮式挖藕机主要以车架作为载体,水泵、减速箱、发动机等零部件固定于车架上方,车架的强度刚度对机器使用安全密不可分,同时利用有限元仿真可以为设计、加工样机提供有效的理论依据,节约材料、时间成本,所以有必要对整个挖藕机的车架结构进行有限元强度刚度分析。建立车架结构三维模型,根据有限元分析结果判断整个车架结构的薄弱位置,并加以改进优化,避免应力集中,使车架结构强度刚度得到进一步改善。

在对车架结构进行有限元分析时,组成车架结构为刚性材料,外力作用下引起的形变为弹性形变,当引起变形的外力撤除后依然可以恢复到原来的形状,车架形变完全取决于受力时刻的外力,即可以把车架强度问题当成弹性力学去研究,弹性体都是三维立体结构,假设物体是连续的,完全弹性物体遵从胡克定律:

$$[K]\{X\} = \{F\} \tag{1}$$

假设 $[K]$ 是一个连续的常量刚度矩阵,材料满足线性小变形理论, $\{F\}$ 为加载在物理模型上的力,静态力学分析所施加的载荷包括作用力和压力。基于 ANSYS Workbench 网格划分平台,网格划分质量直接关系到计算的收敛性、效率和精度,大量的单元需要更多的计算资源、内存和运行时间,因此根据车架实际情况对结构进行合理的网格划分^[5]。利用

Pro/Engineer 建立车架三维模型,然后导入 Workbench 软件中进行网格划分及求解运算^[6]。仿真过程中材料属性选择钢材 Q235,设定弹性模量 $E = 2.08 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比为 0.277,质量密度 $\rho = 7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,选择四面体网格划分方法,设置单元尺寸为 2 mm 用于控制初始单元的大小,边界条件的设定主要是施加约束条件和载荷,整个车架主要承受水泵、减速器、驱动柴油机、分水器、喷头支撑杆的弹力^[7]。水泵、减速器、驱动柴油机重量分别为 40、25、30 kg,各部件通过 4 个支点与车架衔接,垫片接触面积 $S = \pi r^2 = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,通过 $P = F/S$ 可得,水泵接触面压强约 0.58 MPa,减速器接触面压强为 0.36 MPa,驱动柴油机接触面压强为 0.43 MPa,同理可计算出喷头支架连接处载荷为 0.2 MPa,分水器支撑板压强为 0.05 MPa。

通过初始仿真计算可知,车架前端分水器支撑板连接处应力值最大,附近区域应力值下降较快,该点出现了应力集中,可以推断出此处的高应力是由于几何形状的不合理设计而导致的,把连接处设置几何倒角圆滑过渡,部分应力较小杆件尺寸缩小,结构优化后,通过计算机仿真得到车架结构应力分布云如图 2、3 所示。

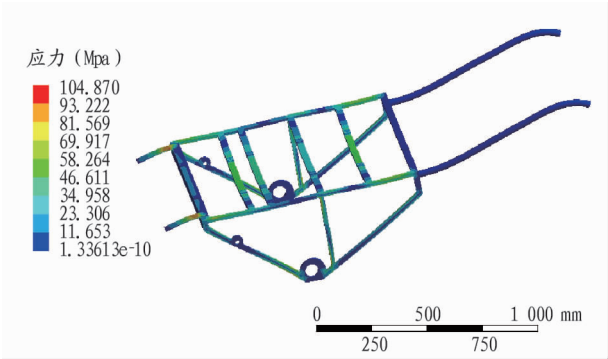


图 2 车架应力分布云示意

Fig.2 The distribution cloud of frame stress

通过查询材料的属性,Q235 钢材的屈服强度 $\sigma_s = 235 \text{ MPa}$,考虑挖藕机实际使用情况取安全系数 $S = 1.5 \sim 1.8$,即在该条件下材料的许用应力值:

$$[\delta] = \frac{\delta_s}{S}$$

(2)

表 1 轮式挖藕机试验数据和某船式挖藕机对比

Table 1 The comparison between wheel dig lotus root machine and boat dig lotus root machine

类型 Type	适水深度 Optimum water depth//m	质量 Weight kg	水泵流量 The pump flow//m ³ /h	速度 Speed m/min	工作效率 Work efficiency m ² /h	油耗率 Fuel consu- mption rate kg/h	藕采净率 Net rate of lotus root//%	藕损伤率 Damage rate of lotus root//%
轮式挖藕机 Wheel dig lotus root machine	0.1~0.6	120	55	1.63	122.25	2.6	96.4	3
船式挖藕机 Boat dig lotus root machine	0.3~1.0	150	75	2.40	100.00	2.8	95.0	2

根据表 1 统计对比,某船式挖藕机整机重量 150 kg,适水深度为 0.3~1.0 m,作业效率为 100 m²/h 左右,手扶轮式挖藕机经过现场试验与某船式挖藕机参数进行比较,手扶轮式挖藕机结构紧凑,整体质量为 120 kg,成本较低,各部分可以拆装便于搬运,能在水深 0.1~0.6 m 的藕田藕塘作业,作

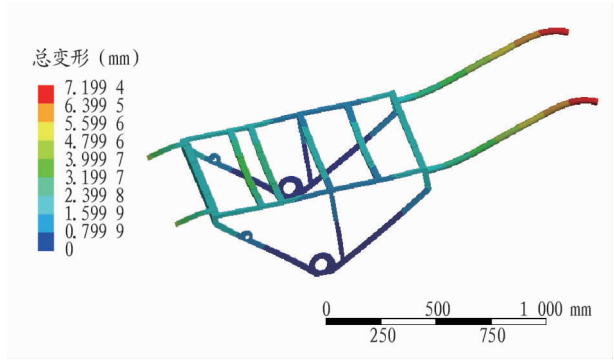


图 3 车架总变形分布云示意

Fig.3 The distribution cloud of total frame deformation

仿真结果云图显示,车架应力最大值为 104 MPa,扶手臂较长所以出现最大形变量为 7.2 mm,车架在考虑安全系数后的许用应力值在 130.55~156.66 MPa。通过分析可知,车架结构强度满足设计要求,在使用的过程中车架不会出现断裂和大变形的情况,保证了作业的可靠性和安全性。

3 现场试验分析

3.1 试验目的 检验挖藕机在不同深度藕田中作业情况,整个样机的可行性、工作稳定性,测定样机作业的各项指标,挖藕机的前进速度、莲藕采净率、损伤率、工作效率等,为后续挖藕机的改进提供参考^[8]。

3.2 试验工具及条件 皮尺、时钟、电子秤、扳手钳子工具箱 1 套,在郊区选取了 2 块不同深度的试验田进行样机试验。

3.3 挖藕机设计要求 整块藕田的采净率在 95% 以上,并且损伤率不能高于 5%,莲藕经过高压水柱射流冲刷能自动浮出水面,在作业过程中挖藕机的发动机不出现熄火的情况,同时测量出油耗,可得挖藕机的工作燃油经济性。

试验测得挖藕机最大前进速度为 2.1 m/min,通过柴油机油门可控制,工作幅宽为 1.2 m,根据前进速度和作业幅宽得知每小时的工作效率,称量采挖出莲藕的质量以及损伤质量、机器采挖过的藕田再进行 1 次人工清挖,得到出藕率、损伤率和采净率,轮式挖藕机藕田试验数据和某船式挖藕机实地调研数据见表 1。

业效率为 122.25 m²/h;船式挖藕机水泵流量为 75 m³/h,手扶轮式挖藕机水泵流量为 55 m³/h,喷头靠近泥面减少了高压水柱浸没状态的沿程损失,能量利用效率高,船式挖藕机在浅水藕田更加适应,但在深水藕塘或者湖藕基地,船式挖藕机较适应。通过上述试验可见,手扶轮式挖藕机藕田试验

效果优良(图4、5),结果达到设计要求。



图4 藕田现场试验

Fig.4 Field experiment of lotus root



图5 所采挖的莲藕

Fig.5 The collected lotus root

4 结论

手扶轮式挖藕机底盘结构设计紧凑,各部分可以拆装运

输,对于农户使用具有一定的轻便性,且加工便利,采用轮式结构设计相对船式挖藕机更适应于浅水藕田工作,适水深度为0.1~0.6 m,操作简单易学。

对车架结构的强度刚度进行有限元分析,车架应力最大值为104 MPa,最大变形量在扶手处为7.2 mm,考虑安全系数检验,最大应力应变在材料许用应力值范围内,车架强度刚度满足使用条件。

轮式挖藕机喷头浸没靠近泥面冲刷,减少了高压水柱的沿程射流损失,且喷头可以通过摆动机构自由俯仰调节0~15°,对前方硬泥冲刷效果较好,同时对采挖出来的莲藕具有一定的清洗作用。轮式挖藕机带驱动传动机构可自动行走,无需人工推进。

经藕田试验测试,手扶轮式挖藕机平均工作效率为122.25 m²/h,人工单喷枪挖藕效率约35 m²/h,相对人工挖藕效率提高3.5倍左右,手扶轮式挖藕机藕田试验效果优良,达到设计要求。

参考文献

- [1] 柯卫东,刘义满,黄新芳.水生蔬菜安全生产技术指南[M].2版.北京:中国农业出版社,2014:55-58.
- [2] 郭泽民.水田莲藕采挖机设计与研究[D].武汉:华中农业大学,2015:1-3.
- [3] 张耀宏,姜喆雄.喷流式挖藕机的研制[J].粮油加工与食品机械,1982(8):33-38.
- [4] 黄海东,张国忠,夏俊芳,等.4CWO-3.2型船式挖藕机的研制[J].湖北农机化,2008(3):24-25.
- [5] 张福星,郑源,汪清,等.基于ANSYS Workbench的深沟球轴承接触应力有限元分析[J].机械设计与制造,2012(10):222-224.
- [6] 凌桂龙,丁金滨,温正.ANSYS Workbench 13.0从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2012:114-116.
- [7] 邵超城,刘强,龙飞永.纯电动汽车车架设计及有限元分析[J].机械设计与制造,2011(8):39-41.
- [8] 王维,顾宝兴,姬长英.4SWJ-1型船式水力挖藕机研制[J].农业机械,2009(4):88-90.

(上接第164页)

- [11] PARASTAR H, AKVAN N. Multivariate curve resolution based chromatographic peak alignment combined with parallel factor analysis to exploit second-order advantage in complex chromatographic measurements[J]. Analytica chimica acta, 2014, 816: 18-27.
- [12] RAJKÓ R, OMIKIDIA N, ABDOLLAHI H, et al. On uniqueness of the non-negative decomposition of two-and three-component three-way data arrays[J]. Chemometrics and intelligent laboratory systems, 2017, 160: 91-98.
- [13] XIA A L, WU H L, FANG D M, et al. Alternating penalty trilinear decomposition for second-order calibration with application to interference-free analysis of excitation-emission matrix fluorescence data[J]. Journal of chemometrics, 2005, 19(2): 65-76.
- [14] THOMAS R, KAI U T. Quantification of pH-dependent speciation of organic compounds with spectroscopy and chemometrics[J]. Chemosphere, 2017, 172: 175-184.
- [15] LENHARDT L, ZEKOVIC I, DRAMIC CANIN T, et al. Characterization of cereal flours by fluorescence spectroscopy coupled with PARAFAC[J]. Food chemistry, 2017, 229: 165-171.
- [16] ELCORARISTIZABAL S, CALLEJ N R M, AMIGO J M, et al. Fluores-

cence excitation-emission matrix spectroscopy as a tool for determining quality of sparkling wines[J]. Food chemistry, 2016, 206: 284-290.

- [17] BERTRAM H C, STRAADT I K, JENSEN J A, et al. Relationship between water mobility and distribution and sensory attributes in pork slaughtered at an age between 90 and 180 days[J]. Meat science, 2007, 77(2): 190-195.
- [18] 梁逸曾, 俞汝勤. 化学计量学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 191-226.
- [19] QIU S S, WANG J. The prediction of food additives in the fruit juice based on electronic nose with chemometrics[J]. Food chemistry, 2017, 230: 208-214.
- [20] CHEN L, TIAN Y Q, SUN B H, et al. Rapid, accurate, and simultaneous measurement of water and oil contents in the fried starchy system using low-field NMR[J]. Food chemistry, 2017, 233: 525-529.
- [21] 陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 等. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [22] HAYKIN S. 神经网络与机器学习[M]. 申富饶, 徐烨, 等译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 197.
- [23] GUTIERREZ-OSUNA R. Pattern analysis for machine olfaction: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(3): 189-202.