

低温环境下鲣鱼切割系统的分析与设计

Analysis and design of Bonito cutting system at low ambient temperature

梁静坤¹ 谢鑫刚¹ 李杰峰² 于淑池¹

LIANG Jing-kun¹ XIE Xin-gang¹ LI Jie-feng² YU Shu-chi¹

(1. 海南热带海洋学院, 海南 三亚 052722; 2. 唐山职业技术学院, 河北 唐山 063004)

(1. Hainan Tropical Ocean University, Sanya, Hainan 052722, China;

2. Tangshan Vocational and Technical College, Tangshan, Hebei 063004, China)

摘要:利用宽温型 PLC 设计了一套能在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下完成鲣鱼切割处理的模拟装置。结果表明,系统在鲣鱼的加工温度、切割速度等方面明显优于常温下的人工处理以及超低温解冻后的机械切割,缩减了冷链物流中的加工及暴露环节,有效减少了温度波动。该装置可以直接装配在围网捕捞船舶的处理舱与速冻舱的中间环节,实现切割与速冻同步进行。

关键词:鲣鱼;保鲜;低温;切割;PLC

Abstract: To solve the problem that many temperature fluctuations occur in cold chain logistics from catching to selling Bonito, a new analog cutting system was designed under $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ environment based on wide-temperature PLC. Results showed that the design was superior to the traditional manual processing under room temperature and mechanical cutting after ultra-low temperature defrosting whether in low-temperature preservation or cutting speed, which reduced the cutting and exposure links and the temperature fluctuations effectively. After being assembled between the processing and quick-frozen cabins of the ocean-going fishing vessel, the synchronization of cutting and quick freezing could be realized, which could provide an effective way to keep fresh for the cold chain logistics of Bonito.

Keywords: Bonito; preservation; low ambient temperature; cutting; PLC

金枪鱼是各国远洋捕捞渔业的重要经济鱼种,具有很高的经济价值^[1-2],鲣鱼是金枪鱼围网的主要捕捞对象,捕获量大,价格昂贵,作为生食的高级鱼产品,鲣鱼在

捕获后要求在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下超低温进行贮藏,以保证其高品质^[3]。目前,鲣鱼从捕捞到售卖的冷物流链环节一般包括捕捞、人工粗加工、速冻、超低温冷冻、解冻、分割、再冷冻、分销等。其切割方式主要有常温鲜鱼手动切割和冻鱼机械切割两种,手动切割发生在捕捞出水后,直接在船舶处理间进行冲洗、放血、去鱼鳃等加工,然后迅速送入 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻舱,再送入 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻舱;冻鱼机械切割是指鲣鱼到达市场后,在低温机械分割间进行人工切割,期间经过船舶冷冻舱室、岸上冷链物流车、市场分货场地、分销商分属冷库等多个场地,存在多次温度波动,易导致冻结鲣鱼发生冰晶升华或重结晶等问题,对鱼肉风味、质地、营养价值有重要影响^[4-7],且低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的人工作业会导致一系列职业健康问题^[8]。文章拟利用宽温型 PLC 设计一套能在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下完成鲣鱼切割处理的模拟装置,旨在解决人工加工及多环节温度变化带来的问题,为多环节合一的低温自动切割系统的开发提供依据。

1 方案设计

1.1 系统组成

远洋金枪鱼围网渔船会配备渔获处理间、速冻舱和冷藏舱室,速冻舱温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右^[9],鱼类的初加工是在渔获处理间完成。在鲣鱼从处理间被送入速冻舱的过程中,需对其进行低温环境下的多功能快速切割。加工过程中,为了保证鲣鱼鱼肉的质量,快速放血、去腮由人工完成^[10],头尾处理、鱼身切割由切割装置完成。切割装置的设计包括控制单元和机械单元,系统由围网捕捞作业船舶供电,其基本功能如图 1 所示。

1.2 控制要求

捕捞上来的鲣鱼经过人工处理后,由传送带送入系统切割处理流程,同时完成速冻。再由其他控制系统将切块传送至 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻鱼舱,控制系统设计内容主要包括:

基金项目:海南省高新技术产业发展(知识产权)专项基金(编号:琼财行 2020-513);海南省自然科学基金(编号:2019RC237)

作者简介:梁静坤,女,海南热带海洋学院教授,博士。

通信作者:谢鑫刚(1982—),男,海南热带海洋学院讲师,硕士。

E-mail: xiexg@hntou.edu.cn

收稿日期:2020-09-10

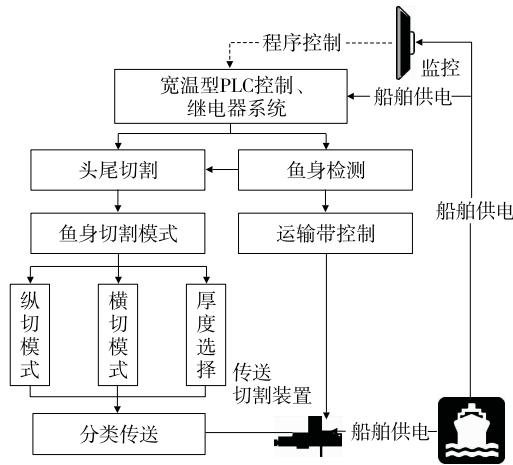


图1 功能框图

Figure 1 Block diagram

- (1) 系统监测、故障报警等功能。
- (2) 鱼身的自动检测和传送控制。
- (3) 可实现对鱼头、尾的单独处理;鱼身分段切割的横、纵模式可选,鱼块厚度可调。

2 控制系统设计

根据现代捕捞船速冻舱与鲑鱼的自身保鲜要求,控制系统要求能在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中稳定工作。核心控制器选用宽温型PLC,鱼身检测等测量采用低温测距传感器,执行元件包括中间继电器、电机、推杆等机械设备。机械设备的设计尽量减轻切刀架重量,采用最高切断速度以及规划切刀轨迹^[11]。为了保证设备低温下工作的稳定性,采用超低温润滑油,为了提高系统的可靠性,系统配有内部加热器^[12]。

2.1 硬件设计

根据系统控制要求,本着操作简单,避免误操作的原则,设置自动和手动起停功能、横纵切和厚度等模式选择、鱼身位置检测功能,设备运行工作温度检测、报警等功能,确定输入输出设备I/O分配如表1所示,未设置的输入输出可按需求进行功能扩展。

核心控制器选用西门子S7-200PLC宽温型模块,工作温度 $-25\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足船舶速冻舱 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境要求。采用广泛用于船舶及海洋设备的FLS-CH10低温激光测距传感器,检测鲑鱼的位置及鱼身长度,鲑鱼体长为 $243\sim733\text{ mm}$,质量为 $300\sim9\ 165\text{ g}$ ^[13],设备的运输带宽度等设置为 $1\ 000\text{ mm}$,为控制器提供运输带起停及切刀选择提供输入信号,工作时激光测距传感器测量距离调制 50 mm , $-40\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳定工作,防水食品级材质,供电电压 $24\sim30\text{ VDC}$, 2.5 A ,与PLC控制、船舶供电参数相符,电机功率 3 kW ,设备输入额定电压 380 V 三相电,切割厚度可调,默认刀距 50 mm 。

表1 部分I/O分配

Table 1 Part I/O address allocation

输入设备	I/O口地址	输出设备	I/O口地址
启动按钮	I0.0	传送带 1	Q0.1
停止按钮	I0.1	传送带 2	Q0.2
位置检测开关 1	I0.2	切刀控制 1	Q0.3
位置检测开关 2	I0.3	切刀控制 2	Q0.4
纵切选择	I0.4	夹紧 1	Q0.5
横切选择	I0.5	夹紧 2	Q0.6
厚度加	I0.6	推杆 1	Q0.7
厚度减	I0.7	推杆 2	Q1.0
温度检测	I1.0	刀具间距控制 1	Q1.1

2.2 软件设计

上位机界面设计包括启动、停止、工作状态指示、温度显示、工作模式选择等功能,参照金枪鱼市场需求纵向切段或横剖切片的食用特点,鱼身切割设定为横、纵切模式可选,鱼块厚度可根据订购者需求在一定范围内可调,其监控界面如图2所示。

切割控制设备上电自检后,基本程序控制流程如图3所示,切割时同时计数,软件同时设有急停、故障报警等处理功能,可以根据需求完成手动或自动操作。

2.3 机械结构

鲑鱼切割过程中鱼身的推送和夹紧及刀具调整采用液压传动机构,采用低凝点液压油^[14]。机构的执行元件使用活塞式液压缸,由三位四通电磁换向阀控制液压缸推杆的伸出和退回。切掉头尾的鱼身随传送带移动,触碰到挡板后触发限位开关,电磁换向阀通电产生电磁吸力,电磁阀动作,液压推动活塞杆外伸。夹紧装置的一端为固定夹板,另一端为可自由活动的可调夹板,可调夹板的位移由液压缸推动,夹紧力的大小由液体压力调定。夹紧装置夹紧鱼身的开始和结束时间以及液压推杆的退回可由程序控制(开始计时时间可从限位开关动作的时刻计算,结束计时时间可由切断最大鱼身的时间设定),直至完成横向切片。横向切开的鱼身继续传送,直至触碰到挡板触发至相应的限位开关时,对应的推杆开始推

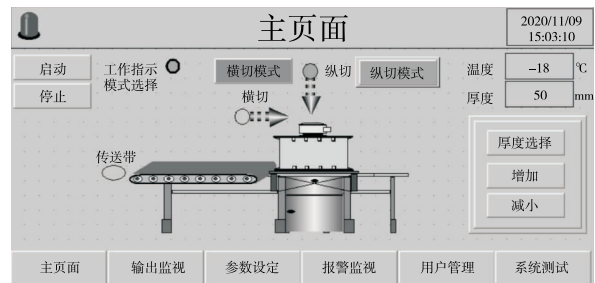


图2 监控界面

Figure 2 Supervisory control system

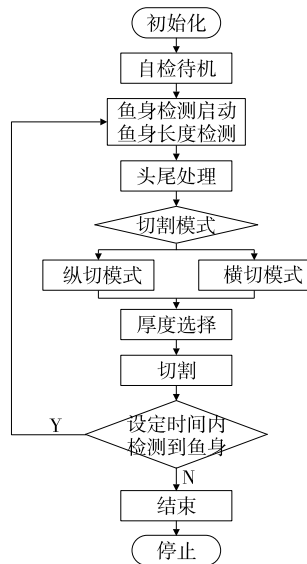


图 3 软件流程图

Figure 3 Software flow chart

动鱼身移动,并由夹紧装置夹紧,直至鱼身切断完毕,夹紧装置松开同时液压推杆退回。

(1) 横向切刀和切断刀的旋转可通过各自的花键轴来带动,刀具的间距根据鱼身的尺寸可通过安装在花键轴上的液压缸进行调整。液压缸采用双伸出杆活塞缸,液压传动公式:

$$Q = Av, \quad (1)$$

式中:

Q ——进入液压缸的液压油流量, mm^3/s ;

A ——活塞缸的截面积, mm^2 ;

v ——活塞的移动速度, mm/s 。

活塞缸的截面积公式:

$$A = \pi(D/2)^2, \quad (2)$$

式中:

D ——活塞缸直径, mm 。

刀具的调整间距为:

$$\Delta L = vt = [4Q/(\pi D^2)]t, \quad (3)$$

式中:

ΔL ——刀具调整间距, mm ;

t ——进入活塞缸液压油的持续时间(可由 PLC 程序设定,用来调整刀具间距的变化量), s 。

(2) 切片刀是切割机构的主控制部分,为了有效减少新鲜鱼肉的粘连,根据经验数据切刀的转速控制在 2.5~3.0 r/s 为宜,刀具的切削速度计算公式为:

$$V = fZn, \quad (4)$$

式中:

V ——刀具的切削速度, mm/s ;

f ——刀具每齿切削的进给量, mm ;

Z ——刀具的齿数;

n ——刀具的转速, r/s 。

(3) 刀具的加工厚度也是需要考虑的一个参数,刀具加工宽度按式(5)计算,以 8 mm 为宜。

设定一个 x, y, z 坐标系见图 4。

$$W = W_l + W_r = 2r \sqrt{\frac{2hR_y - h^2}{rR_y - r^2} - \left(\frac{2hR_y - h^2}{2rR_y - 2r^2}\right)}, \quad (5)$$

式中:

W ——削切宽度, mm ;

W_l —— O_1 处左边的削切宽度, mm ;

W_r —— O_1 处右边的削切宽度, mm ;

r ——刀具半径, mm ;

h ——切削最大残余高度, mm ;

R_y ——沿 y 轴方向的表面法曲率半径, mm 。

实际加工中 $|R_y| \gg h$, 式(5)中 h^2, h^3 和 h^4 可以忽略, 刀具半径 r 可用有效工作半径 r_e 代替。

$$\begin{cases} r_e = \frac{r \cos^2 \omega}{\sin \theta}, \theta \neq 0^\circ \\ r_e = r, \theta = 0^\circ \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

θ ——刀具绕 y 轴方向旋转倾角角度, $^\circ$;

ω ——刀具绕 z 轴方向旋转转角角度, $^\circ$ 。

则刀具加工宽度简化为^[15]:

$$W = \sqrt{\frac{8hr_e R_y}{R_y - r_e}}. \quad (7)$$

图 5 为机械结构设计示意图。

3 样机试验

为验证试验设计的可靠性,设置如下:① 试验场地选用当地海鲜冷库,模拟捕捞船的速冻舱,保持 -18°C 低温;② 控制模块密封,与切割模拟系统置于冷库入口处,触摸屏置于冷冻室外壁,试验目的主要是验证切割系统在低温环境下各模块功能是否实现;③ 由于鲣鱼主要分布在印度洋、太平洋和大西洋,市场上无法提供新鲜鱼标本,加工测试样本选用三亚崖州市场上形体和肉质与鲣鱼相似的新鲜马鲛鱼替代,鱼身长度约 700 mm,最大宽

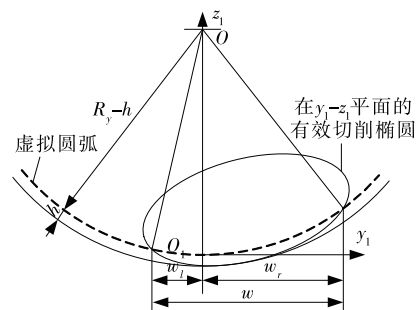
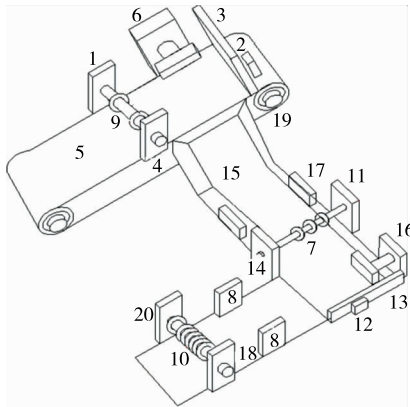


图 4 加工带宽计算

Figure 4 Calculation of cutting bandwidth



1,11,20. 刀架 2,12. 限位开关 3,13. 挡板 4,14,18,19. 驱动电机 5,15. 传送带 6,16. 气动推杆 7. 横向切刀 8,17. 加紧装置 9. 头尾切刀 10. 可调切段刀

图5 机械结构示意图

Figure 5 Mechanical structure

度约 120 mm,最大厚度约 70 mm,切段厚度 50 mm,便于切片食用,按照系统设置的功能进行头尾切除、鱼身切割、厚度调整等操作,测试系统温度检测、鱼身检测、参数选择、鱼身切割等功能是否正常运行,并与捕捞船人工的鲜鱼切割、冷库的机械切割在切割速度等方面进行比对分析,其切割块见图 6,试验内容及结果见表 2。

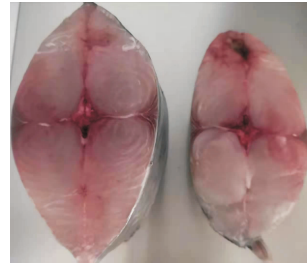


图6 切割样品

Figure 6 Cutting block section

表2 试验结果

Table 2 Test results

工作模式	工作温度/℃	冷冻时间/h	鱼身长×宽×厚度/mm ³	切段厚度/mm	切段时间/s	头尾处理时间/s	总时间/s	鱼肉粘连
人工切刀处理	常温	0	720×120×70	50	3~4	30	80	有
人工机械处理	0~5	>24	720×120×70	50	1~2	30	51	无
试验系统	-18	0	720×120×70	50	1	0(与切割同时)	1	无

在模拟速冻舱-18℃环境下,机械部分提前预热,监控部分、控制部分、机械部分均可持续正常运行,系统要求的各项功能均可实现。由表2可知,与常温的人工切刀和冷库环境下的人工机械切割相比,自动切割系统更适合低温工作环境,大批量作业,系统处理速度快,有利于鲑鱼的保鲜。但试验系统存在以下问题:①自动切割系统去内脏、去鱼鳍等细节处理不容易实现自动控制;②为了提高机械设备的可靠性,切割机械在低温环境中需要进行提前预热,初期的预热可能会对鱼的切面鲜度产生影响。

4 结论

针对多次温度波动引起鲑鱼鱼质劣化以及人工不适合长期在低温下大规模作业等问题,结合宽温型PLC设计了一种低温环境下鲑鱼自动切割处理系统。该系统可依照市场需求灵活设置切割方式、切块大小、头尾处理等模式,并在-18℃低温下进行连续切割工作,经试验对比,其效果明显。利用该系统可形成包括捕捞、人工粗加工、速冻(同步切割)、超低温冷冻、分销等环节的新的远洋捕捞冷链物流,有效缩减了鲑鱼的冷链环节,为鲑鱼的冷链保鲜提供了一种快速的低温加工模式。加上后期的快速保鲜及塑封处理,有效地减少了冷冻食品在冷链物流中,特别是在疫情阶段多次暴露引发的污染机率。后

续可将低温自动切割控制系统移植到大型捕捞船上进行实验验证,并进一步研究切刀面温度对鱼身保鲜的影响,切割控制系统去除鱼鳍和内脏的细节控制技术。

感谢食品工程学院、海南蔚蓝海洋食品有限公司的大力支持。

参考文献

- [1] 周劲望,杨铭霞,陈新军,等.世界主要金枪鱼捕捞产量分析[J].渔业信息与战略,2014,29(2):149-155.
- [2] 贾建萍,周彦钢,林赛君,等.金枪鱼骨营养成分分析[J].食品工业科技,2013,34(10):334-337.
- [3] 张峰,秦颖.36.6 m FRP 延绳钓金枪鱼渔船超低温冷冻系统设计[J].船海工程,2017,46(6):90-93.
- [4] JIANG Qing-qing, JIA Ru, NAKAZAWA N, et al. Changes in protein properties and tissue histology of tuna meat as affected by salting and subsequent freezing [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 550-560.
- [5] 郑大宇,刘蕾,毛伟杰,等.金枪鱼解冻技术研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2017,31(1):56-60.
- [6] 汤元睿,谢晶,李念文,等.不同冷链物流过程对金枪鱼品质及组织形态的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):285-292.

(下转第123页)

表 4 1 000 Hz 负载电压对比

Table 4 1 000 Hz load voltage comparison

项目	理论值/kV	仿真值/kV	误差/%
R ₁	4.284	4.272	0.28
R ₂	6.100	6.082	0.29
R ₃	9.406	9.393	0.18

杀菌系统可以通过调节频率和幅值得到较好的杀菌效果。仿真结果表明该系统满足同时灭除青霉菌、酵母菌和大肠杆菌的要求。

4 结论

仿真结果表明,试验设计的多模块杀菌系统在频率范围为 100~1 000 Hz,脉宽为 10 μ s 时可产生幅值不同的双极性高压方波,从而实现连续灭除不同菌种的目的,改善了传统杀菌系统效率较低且无法对多种菌群进行处理的问题。该系统在运行过程中开关较多,且承受的电压大,存在击穿的危险,所以对开关的要求高,价格贵,不利于商业使用,该系统可继续研究一个合适的开关方式来保证其开关安全。

参考文献

- [1] 李立, 孙智慧, 苗卿华. 超高压加工技术在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技. (2020-08-14) [2020-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200814.0944.004.html>.
- [2] BEVERIDGE J R, MACGREGOR S J, MARSILI L, et al. Comparison of the effectiveness of biphasic and monophasic rectangular pulses for the inactivation of micro-organisms using pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(4): 1 525-1 531.
- [3] 尹倩, 徐维昌, 金妙仁, 等. 高压脉冲电场杀菌技术在酱油生产中的应用初探[J]. 现代食品, 2018(9): 44-46.
- [4] 夏涛, 吴云峰, 王胜利, 等. 高压脉冲电场杀菌系统中高压脉冲发生器研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 229-231, 236.

(上接第 117 页)

- [7] 余璐涵, 陈旭, 蔡茜茜, 等. 汪少芸鱼糜蛋白冷冻变性规律及调控方法研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 1-8.
- [8] 肖军. 低温作业的职业危害防护[J]. 职业卫生, 2011(1): 96-97.
- [9] 孙文志, 卢振义, 张维英, 等. 远洋金枪鱼围网渔船总布置特征[J]. 船舶工程 2011, 33(1): 5-8.
- [10] 海洋餐桌 日本: 金枪鱼从捕捞到拍卖的“鲜”字秘[EB/OL]. (2019-02-15) [2020-11-10]. <http://tv.cctv.com/2019/02/15/VIDE34009VM3viZSdKOFld4190215.shtml>.
- [11] 贾瑞修, 刘冲, 李经民. 刀具尺寸对超声切割系统振动性能

- [5] 曹丽娜, 章建浩, 王晓婷, 等. 高压电场低温等离子体对槟榔包装产品冷杀菌效能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 133-139, 193.
- [6] 让一峰, 陈晓婵, 田一雄, 等. 高压脉冲电场强化杀菌对哈密瓜汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 49(17): 105-109.
- [7] BALASUBRAMANIAM V M, MARTINEZ-MONTEAGUDO S I. Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6: 435-462.
- [8] HUANG Hsiao-wen, LUNG Hsiang-mei, YANG Bing-huei, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing [J]. Food Control, 2014, 40 (31): 250-259.
- [9] 孙学兵, 方胜, 陆守道. 高压脉冲电场杀菌的工业化展望[J]. 食品与机械, 2002, 18(1): 6-8.
- [10] BEVERIDGE J R, MACGREGOR S J, ANDERSON J G, et al. The influence of pulse duration on the inactivation of bacteria using monopolar and bipolar profile pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33 (4): 1 287-1 293.
- [11] 时兰春, 王伯初. 高压电脉冲灭菌理论的研究进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002(4): 144-147.
- [12] 延二宝. 高压脉冲电场灭菌技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010: 26-28.
- [13] 王丹. 桃汁高压脉冲电场非热杀菌研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 30-31.
- [14] 裴长达. 卷心菜汁高压脉冲电场非热杀菌研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 47-48.
- [15] KHOSRAVI R, REZANEJAD M. A new pulse generator with high voltage gain and reduced components[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2 795-2 802.
- [16] 方婷, 魏奇, 陈锦权. 高压脉冲电场处理室的改进及其对液体食品的杀菌效果[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 183-188.
- [17] 张涛. 高压脉冲电场灭菌参数及电穿孔机制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018: 13-15.
- [18] 影响的研究[J]. 机电技术, 2020(4): 20-23.
- [12] 舒望, 陈光伟. 基于铂电阻和硬件闭环控制的食物干燥设备恒温控制系统[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 104-108.
- [13] 王学昉, 朱国平, 叶旭昌, 等. 中西太平洋金枪鱼围网流木鱼群中鲷鱼种群结构分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28 (2): 293-299.
- [14] 李磊, 汪磊, 周婧. 基于 PLC 控制的自动称重配料设备设计与试验[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 109-113.
- [15] 闵莉, 王洪畅, 陈颖. 五轴铣削加工刀轴矢量平滑控制算法[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 141-144.