

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.02.005

螺杆传动式贻贝卸苗设备设计

程海, 袁跃峰*, 谢飞, 李德然

(浙江海洋大学海洋工程装备学院, 浙江舟山 316022)

摘要:针对目前贻贝卸苗工序存在自动化程度低、操作繁琐及工人配置不合理等问题,课题组提出了一种螺杆传动式贻贝卸苗设备。借助目前所使用的卸苗设备,课题组从工作环境进行分析,确定卸苗需要的拉力,作为新型设备的设计依据;采用了SolidWorks软件和Simulation模块分别对设备进行结构建模和关键部件的有限元仿真,同时对设备控制系统进行了设计。仿真结果表明:该设备的部件之间装配合理且无干涉存在;卸苗钩和卸苗模具最大应力分别为33.9 MPa和5.89 MPa,均未超出屈服极限206 MPa,最大变形量分别为1.800 mm和0.049 mm,均不影响卸苗作业要求;机架前5阶共振频率段为13~19 Hz,未与卸苗作业振动频率发生重合。设计的贻贝卸苗设备安全可靠,可长时间运行。

关键词:贻贝卸苗;卸苗机械;螺杆传动;有限元分析;PLC

中图分类号:TH237;S986.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2021)02-0023-07

Design of Screw-Driving Mussel Breeding Rope Removal Equipment

CHENG Hai, YUAN Yuefeng*, XIE Fei, LI Deran

(School of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract: Aiming at the problems of low automation, cumbersome operation and unreasonable configuration of workers in the current mussel breeding rope removal process, a screw drive type mussel breeding rope removal equipment was designed. With the aid of the breeding rope removal equipment currently used, the work environment was analyzed to determine the pulling force required for breeding rope removal, as the basis for the design of new equipment. SolidWorks software and Simulation module were used to carry out structural modeling and finite element simulation of key components of the equipment, respectively, and the equipment control system was designed. The simulation results show that the components of the equipment are reasonably assembled and with no interference; the maximum stress of the breeding rope removal hook and the mold are 33.9 MPa and 5.89 MPa respectively, neither of which exceeded the yield limit of 206 MPa, and the maximum deformation is 1.800 mm and 0.049 mm, which does not affect the requirements for operation of breeding rope removal; the first 5th order resonance frequency section of the frame is 13-19 Hz, which does not coincide with the vibration frequency of breeding rope removal process. The designed mussel breeding rope removal equipment is safe, reliable and can run for a long time.

Keywords: mussel breeding rope removal; seedling removal machinery; screw drive; FEA (Finite Element Analysis); PLC (Programmable Logic Controller)

贻贝(mussels),又称“淡菜”、“海红”,是一种利用足丝附着于礁石表面的双壳类软体动物。由于其易于人工养殖,且繁殖力又极强,已成为我国海洋养殖的主要贝类。贻贝蛋白质含量极高,且富含多种人体所

需的氨基酸,具有较高的营养价值,是多种保健品的主要原材料^[1-4]。我国贻贝规模化养殖开始于20世纪60年代,距今已有60余年的历史,年产量逐年攀升,据中国渔业年鉴统计,2018年国内贻贝总产量已超过

收稿日期:2020-09-11;修回日期:2021-01-12

基金项目:舟山市科技计划专项:贻贝专用采收船的研制(2014C41014);横向项目:嵊泗县贻贝产业链提升发展若干技术研究。

第一作者简介:程海(1994),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为贻贝自动化加工设备。通信作者:袁跃峰(1976),男,浙江舟山人,工学博士,副教授,主要研究方向为机电一体化设计。E-mail: yuanyuefeng@126.com

80余万吨,约占世界贻贝总产量的1/4^[5]。养殖成熟的贻贝收割后,需经过卸苗、打散、清洗及装袋等工序,最后送入市场或加工车间。卸苗作为贻贝加工首道工序,作业方式已从最初的人工卸苗发展成机械化卸苗;卸苗速度在原先的基础上有所提升,但仍然存在人员配置多、自动化程度低等问题^[6-8]。AnSCO^[9]公司为解决新西兰当地贻贝卸苗问题,设计了双滚筒式卸苗设备,但由于诸多问题,国内暂未引进。国内在贻贝卸苗

方面的研究较少,限制了自动化贻贝脱苗设备的研发。课题组设计的螺杆传动式卸苗设备,是基于当前卸苗设备的一种改进,利用PLC自动控制,减少了加工人员的数量,同时加工效率得到了明显提高。

1 贻贝卸苗原理及现状

1.1 卸苗设备及作业现状

成熟的贻贝、养殖苗绳和卸苗设备分别如图1所示。

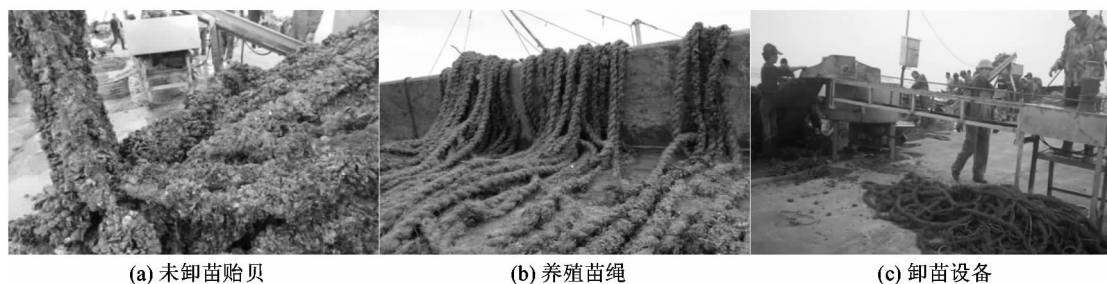


图1 贻贝卸苗现状

Figure 1 Current status of mussel breeding rope removal

养殖成熟的贻贝吸附于苗绳表面,整体近似长条状,成熟贻贝收割后,需要将苗绳从中抽出,便于下一次养殖使用,从成熟贻贝中取下苗绳的工序称为贻贝卸苗。目前贻贝卸苗采用机械化作业,工人需将苗绳穿过卸苗模具孔,再将养殖苗绳与牵引绳索相连,并将牵引绳索缠绕在卷筒表面,利用电机带动卷筒旋转,拉动牵引苗绳,启动电机后,牵引绳索带动苗绳前进,苗绳表面的贻贝在前进过程中被模具挡板阻挡,苗绳被抽出,完成卸苗。卸苗完成后,工人需完成脱绳等工作。由于此类卸苗作业工序较为复杂,单次作业时间较长,同时养殖苗绳属于柔性物体,给穿绳作业和苗绳打结作业带来了一定的困难,因此卸苗作业效率不高,为实现贻贝高效率加工,设计一款可以提高卸苗作业效率,降低工人劳动强度的自动化卸苗设备很有必要。

1.2 卸苗所需拉力计算

根据设备设计需要,对浙江嵊泗贻贝养殖基地的贻贝卸苗设备进行了参数采集,主要包括电机相关参数和卷筒相关参数,如表1和表2所示。

表1 电机相关参数

Table 1 Motor-related parameters

电机型号	电机相数	额定电压/V	额定功率/kW	同步转速/(r·min ⁻¹)
Y90L-4	3	380	2	1 400

表2 卷筒相关参数

Table 2 Reel-related parameters

卷筒最大直径 $d_{\max}$ /mm	卷筒最小直径 $d_{\min}$ /mm	卷筒高度 h /mm	工作转速 n /(r·min ⁻¹)	卷筒与减速器连接方式
400	300	800	70	联轴器

由于V型带和减速器传动存在功率损耗,查阅机械设计相关资料^[10],确定设备的总传动效率为0.81,则执行部件功率为1.62 kW;同时,已知转速为70 r/min,计算出卷筒工作扭矩如式(1)所示。

$$M = 9\,550 \times (P/n) = 9\,550 \times 1.62/70 = 221 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

式中: P 为功率, n 为转速。

在实际加工过程中,卷筒卷绕绳索都是从最小半径开始的,且开始阶段,贻贝所需的卸苗拉力最大,因此,该处的拉力以最初拉力计算,工作所需拉力为:

$$F = M/d_{\min} = 221/0.15 = 1\,473 \text{ N} \quad (2)$$

1.3 未卸苗贻贝相关参数采集

未卸苗贻贝吸附于苗绳表面,整体近似长条状,由于设计需要,对其主要进行长度和周径2方面的尺寸进行数据采集,如表3所示。

根据测量结果可知,未卸苗贻贝长度尺寸保持在4.2 m左右,周径尺寸保持在0.4~0.5 m之间。养殖绳索均采用标准麻绳,长度保持在5 m左右,周径为50 mm。

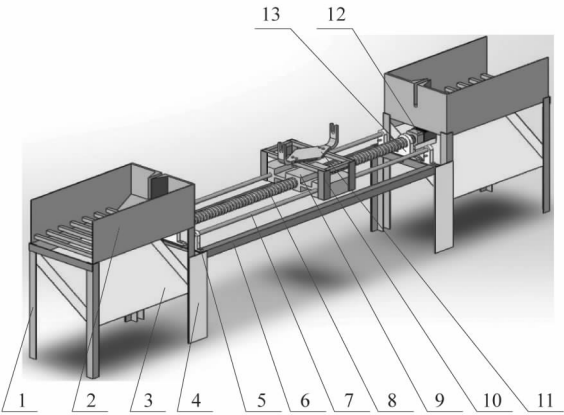
表3 未卸苗贻贝尺寸数据
Table 3 Size data of mussels without
breeding rope removal

序号	长度/m	周径/m
1	4.12	0.42
2	4.36	0.46
3	4.02	0.48
4	4.24	0.45
5	4.16	0.42

2 螺杆传动式贻贝卸苗设备设计

2.1 设备总体结构及工作原理

为了降低当前卸苗作业的复杂程度和提高加工效率,课题组基于 SolidWorks 软件设计的螺杆传动式贻贝卸苗设备,结构如图2所示。同时对各部件的装配进行了干涉检查,没有发现干涉,各部件装配合理^[11-12]。



1—卸苗模具机架;2—卸苗模具;3—出料口;4—机架连接钢板;
5—导杆支架;6—卸苗机架;7—滑车导杆;8—螺杆;9—卸苗滑
车;10—滑车机架;11—卸苗钩;12—电机;13—丝杆轴承座。

图2 设备结构

Figure 2 Equipment structure

设备主要由卸苗模具、滚珠螺杆、螺母、卸苗架、卸苗钩、出料口和电机等组成。在卸苗工作开始前,将带苗贻贝的传输带与卸苗模具口对接,形成一个整体。设备启动后,由1名工人将未卸苗的贻贝苗绳挂在卸苗钩上,按动按钮,由电机驱动丝杆旋转,经过螺纹副对作用力的转化,使卸苗钩产生拉力,贻贝受到卸苗模具的阻挡,从模具的底部漏下,由出料口排出。卸苗钩运动到另一个工作位后自行停止,完成单方向卸苗作业,同时另一名工人在工位另一端挂上苗绳,重新启动电机,卸苗钩在电机的驱动下,进行反方向运动,完成逆向卸苗作业。该设备在工作过程中,取消了传递绳索和打结绳索等工序,缩短了加工时间,提高了加工效率。

2.2 滚珠丝杆的选用

考虑到该设备中丝杆的轴向长度较大,选用丝杆

在满足轴向载荷的同时,还要满足刚度要求,因此,综合强度和刚度,选用 FFZD3205-3 型号的滚珠丝杆,公称直径 32 mm,导程 5 mm,螺杆螺纹长度为 5 m,基本额定静载荷和动载荷分别为 31.4 kN 和 11.7 kN,刚度为 826 N/ μm ^[13-14]。

2.3 伺服电机的选用

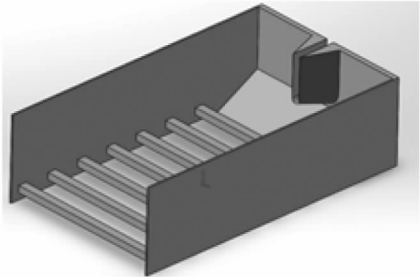
伺服电机作为该设备的驱动单元,需要为丝杆提供足够的扭矩,型号选用之前,要对工作所需的扭矩进行相关计算,如式(3)所示。

$$T = (F \times l) / (2 \times \pi \times 0.9) = (1\,473 \times 0.005) / (2 \times 3.14 \times 0.9) = 1.3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3)$$

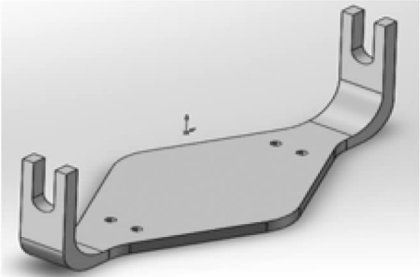
实际加工过程中,贻贝卸苗牵引拉力偶尔会超过理论计算值,电机选用需要留出一定的余量,才能保证加工可靠性。根据常规设计经验,扭矩在理论计算值的基础上增加 20%,较为可靠,即扭矩为 1.56 N·m。根据选型手册,选择 JSF 系列中的 80 系列伺服电机,额定转矩为 2.4 N·m,额定转速为 3 000 r/min,额定功率为 0.75 kW,相应的伺服驱动器型号为 SA3L04C^[15-16]。

2.4 卸苗模具和卸苗钩的设计

卸苗模具和卸苗钩如图3所示。



(a) 卸苗模具



(b) 卸苗钩

图3 卸苗模具和卸苗钩结构

Figure 3 Structure of breeding rope
removal mold and hook

卸苗模具采用钢板经过焊接而成,2侧钢板由于受力较小,厚度为 10 mm,前端钢板在卸苗过程中要阻挡贻贝,受力较大,设计为 15 mm。为方便底部出料,

模具长度设计为 1 m, 宽度为 0.7 m, 为减小卸苗所需的拉力, 卸苗口设计为具有一定斜度的刃口, 刃口宽度为苗绳直径 1.1 倍, 即 55 mm。同时模具底部采用钢条焊接而成, 每根钢条之间的间距为 150 mm, 用于贻贝出料。卸苗钩结构设计为开口形式, 方便挂绳和取绳作业, 提高加工效率。

3 关键部件有限元仿真

3.1 材料参数定义

316 不锈钢材料的性能参数如表 4 所示。

表 4 316 不锈钢性能参数^[17]

Table 4 316 stainless steel performance parameters

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
316	7 980	0.3	206	172	485

由于设备的工作环境处于沿海地区, 采用普通材料制作设备, 会造成设备短时间内锈蚀, 降低设备的使用寿命及影响贻贝食用安全, 316 不锈钢材料具有很好的耐腐蚀性, 用于制作该设备较为合适。

3.2 卸苗钩和支架组合体应力和应变仿真分析

卸苗钩和支架组合体应力云图和变形云图如图 4 所示。



图 4 卸苗钩和支架组合体有限元仿真

Figure 4 Finite element simulation of breeding rope removal hook and bracket assembly

卸苗钩是通过 4 颗螺栓紧固于支架的横梁上, 支架采用型钢焊接而成, 将卸苗钩和支架结合在一起分析, 比较符合实际变形情况。采用 SolidWorks 软件中的 Simulation 模块进行分析: 材料选取 316 不锈钢, 输入材料的性能参数, 固定支架底部, 在卸苗钩一端施加 1 473 N 的卸苗载荷。经过计算, 最大应力位于卸苗钩拐角附近, 为 18.39 MPa, 远小于材料屈服强度 172 MPa; 最大变形量位于挂钩端部, 为 0.45 mm, 未超过材料的弹性极限, 不会产生塑性变形。卸苗钩的边角采用了圆角过渡, 没有出现应力集中现象^[18]。

3.3 卸苗模具应力和应变仿真分析

卸苗模具的应力云图和变形云图如图 5 所示。

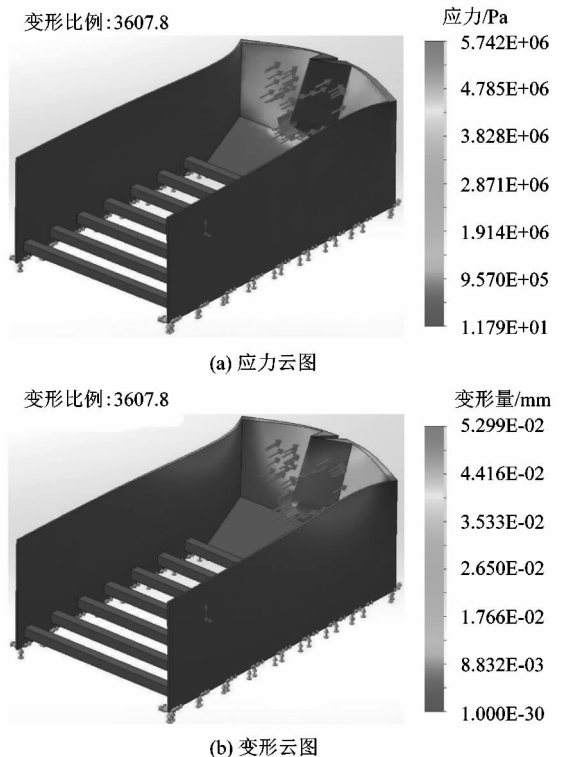


图 5 卸苗模具应力云图和变形云图

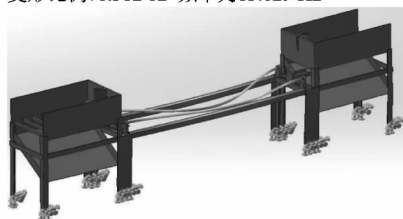
Figure 5 Stress cloud diagram and deformation cloud diagram of seedling removal mold

卸苗模具的有限元分析过程和上述相同, 材料定义为 316 不锈钢, 对底部施加固定约束, 由于卸苗模具主要是对苗绳上的贻贝形成阻挡, 贻贝对模具前端挡板的作用力主要呈近似圆形的分布状态, 因此, 对前端挡板面施加分布载荷 1 473 N, 分布区间直径为 500 mm。经计算, 最大应力位于模具的前端面, 应力值为 5.74 MPa, 远小于材料的屈服极限 172 MPa, 最大变形位置处于卸苗口的顶部, 最大变形量为 0.053 mm, 不影响卸苗正常作业^[19]。

3.4 机架的模态分析

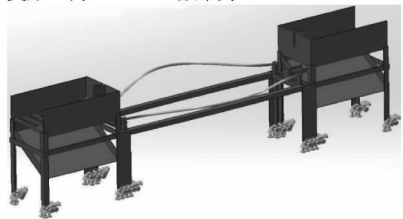
通过仿真,机架前5阶模态振型云图如图6所示。经分析,第1阶和第5阶模态云图如图6(a)和图6(e)所示,振型位置均集中于滑车导杆和设备机架横梁位置;第2,3,4阶模态分别如图6(b)、图6(c)和图6(d)所示,振型位置均集中于滑车导杆位置。根据仿真结果,1~5阶振幅分别为0.124,0.147,0.195,0.195和0.085 mm,均可满足实际加工要求。为了进一步保证设备工作的可靠性,继续利用Simulation模块求解出前5阶振动频率,分别为13.629,14.559,15.231,15.237和17.096 Hz。从计算结果可知,机架前5阶固有频率为13~18 Hz范围之间,而该设备作业过程中,主要振动来源于卸苗过程中的苗绳与贻贝产生错动而产生的振动,根据常规的卸苗速度,振动频率小于5 Hz,避开了机架固有频率范围,因此,机架的结构设计合理^[20-21]。

变形比例:6.312 62 频率为13.629 Hz



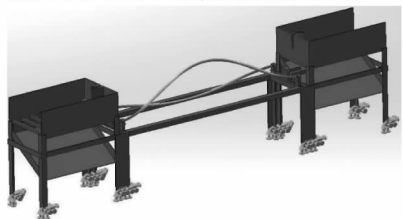
(a) 第1阶模态振型

变形比例:5.354 15 频率为14.559 Hz



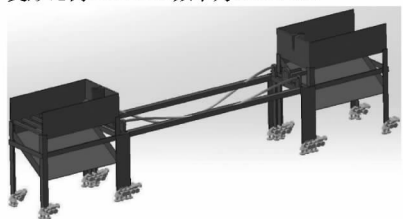
(b) 第2阶模态振型

变形比例:4.008 11 频率为15.231 Hz



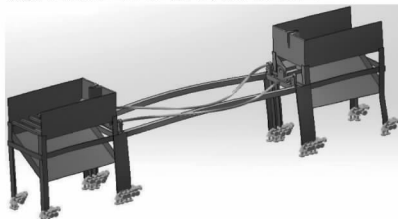
(c) 第3阶模态振型

变形比例:4.068 98 频率为15.237 Hz



(d) 第4阶模态振型

变形比例:9.133 52 频率为17.096 Hz



(e) 第5阶模态振型

图6 设备机架前5阶模态振型云图

Figure 6 Mode shape cloud diagram of the first 5 modes of equipment rack

4 控制系统设计

设备运行简图如图7所示。电机驱动丝杆旋转带动卸苗滑车往返运动,为了保证设备可自动化运行,在A、B两端增设行程开关,当一端行程开关闭合,滑车可停止数秒,等待工人取绳和挂绳作业,停止时间结束,滑车向另一端运行。

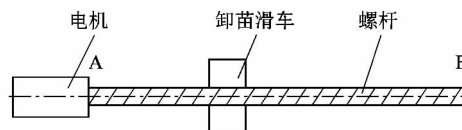


图7 设备运行简图

Figure 7 Equipment operation diagram

该设备控制系统主要由S7-200PLC、三菱MR-JE-20A伺服驱动器、JSF系列中的80系列伺服电机及相应附件组成。PLC编程之前,需将PLC相应输入、输出端口进行分配,如表5所示。PLC输出端直接与伺服驱动器连接,伺服驱动器控制端SP1和SP2用于电机转速控制,ST1和ST2用于转向控制,由于该设备的伺服电机工作转速恒定,因此,直接对驱动器进行输出转速设定,此处设定伺服电机转速为3 000 r/min,即SP1为1,SP2为0。ST1和ST2用于控制电机转向,正转设定ST1为0,ST2为1,反转设定ST1为1,ST2为0。

表5 I/O端口分配表

Table 5 I/O port allocation table

输入端口			输出端口		
输入点	输入元件	作用	输出点	输出元件	作用
I0.0	SB1 常开触点	设备启动	Q0.0	SP1	控制伺服电机速度
I0.1	SB2 常闭触点	设备停止	Q0.1	SP2	控制伺服电机速度
I0.2	SB3 常开触点	工位B行程开关	Q0.2	ST1	控制伺服电机转向
I0.3	SB4 常开触点	工位A行程开关	Q0.3	ST2	控制伺服电机转向
I0.4	SB5 常开触点	设备复位			

PLC控制程序如图8所示。该设备运行方式为往返式,PLC可采用顺序控制指令进行编程。设备启动

前,工人需检查滑车位置,如果滑车不处于A端工作位,可通过常开按钮SB5,将滑车复位至A端。当A端工作位挂上苗绳后,启动电机,程序跳转S0.0,滑车向B端运行,当滑车触碰到B端工作位的形成开关后,程序跳转S0.1,同时对PLC输出端进行清零,由于伺服电机自身具有制动功能,可保证滑车在B端立即停止。当S0.1程序段中的定时器T37计时条件满足后,程序立即跳往S0.2,伺服电机反转,滑车向A端运行,当滑车运行到A端后,其控制方式和B端相同。如果需要停止设备或遇到紧急情况时,可通过按钮SB2触发I0.1,对各程序段进行复位,同时对PLC输出端进行清零,伺服电机失电。

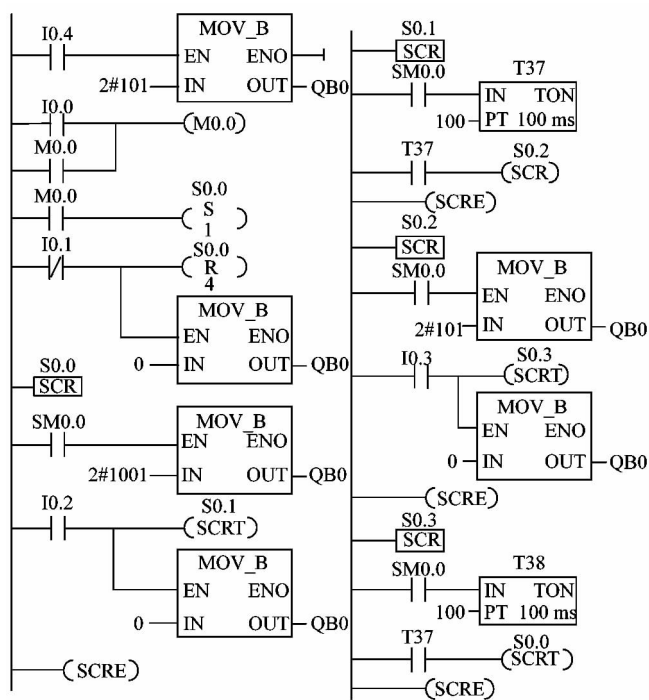


图8 PLC控制程序

Figure 8 PLC control program

5 螺杆式卸苗设备与卷筒式卸苗设备的参数对比

2种卸苗设备参数对比信息如表6所示。

表6 2种卸苗设备参数对比信息归纳

Table 6 Parameter comparison information summary of two breeding rope removal equipment

卸苗设备名称	单次作业时间/s	加工人员数量	电机功率/kW	自动化程度	占地面积/m ²
螺杆式	20	2	0.75	PLC控制, 自动化程度较高	7
卷筒式	31	3	2.00	人工进行绳索连接和释放	4

通过对比可知,螺杆式卸苗设备单次作业时间(每根绳卸苗时间)约为卷筒式卸苗设备的2/3,节约时间约11s。借助螺杆传动的“低扭矩、大推力”特性,电机功率仅为卷筒卸苗设备电机的37.5%,同时可减少1名加工人员,进一步降低加工成本。螺杆式卸苗设备整机采用PLC控制,相比卷筒式卸苗设备,加工人员作业强度可大幅度降低。由于螺杆轴向尺寸较大,设备占地面积高于卷筒式卸苗设备3m²,因此,采用螺杆式卸苗设备的同时,需对剩余工序的加工设备重新进行合理布置。

6 结论

螺杆传动式贻贝卸苗设备,是对目前卸苗设备的一种改进,利用滚珠丝杆特有的“低扭矩、大推力”特性,降低设备能源消耗的同时,卸苗过程更加流畅。课题组利用SolidWorks软件对设备进行了三维建模,同时对卸苗架、卸苗钩和卸苗模具进行了静应力分析及对机架进行了模态分析,结果表明:相应部件静应力未超过屈服强度,机架前5阶固有频率在13~18Hz之间,未与作业过程中产生的振动频率重合,设备可长时间正常化运行。采用PLC控制伺服电机,自动化程度进一步提高,据计算,该设备单次卸苗时间约为20s,相比当前卸苗设备,效率可提高30%左右。基于当前国内贻贝面向产业化发展,而加工设备仍然存在自动化程度不足、人员配置多等问题,螺杆式卸苗设备的成功设计,对降低工人劳动强度,提升贻贝加工效率具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李苹苹. 贻贝生物活性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006: 1-10.
- [2] 宋广磊. 贻贝的加工利用与开发[J]. 渔业现代化, 2003(2): 30-31.
- [3] 段伟文, 罗伟, 段振华, 等. 贻贝的加工利用研究进展[J]. 渔业现代化, 2013, 40(3): 51-55.
- [4] 刘志峰, 李桂生. 紫贻贝营养成分的分析及重金属的检测[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2002(2): 147-150.
- [5] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 33-73.
- [6] 忻华忠, 陈璐, 吴钧, 等. 嵊泗贻贝加工企业内质量可追溯体系[J]. 中国渔业质量与标准, 2013, 3(3): 88-92.
- [7] 汪之和, 陈述平, 于斌, 等. 我国水产品加工科技现存的问题与发展方向[J]. 渔业现代化, 2005(4): 8-9.
- [8] 沈建, 林蔚, 郁蔚文, 等. 我国贝类加工现状与发展前景[J]. 中国水产, 2008(3): 73-75.
- [9] Anso. Mussel unloading equipment[EB/OL]. (2019-09-18)[2020-08-20]. <http://www.kramer-machines.nl/en/solutions/mussels.html>.

(下转第34页)