doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.005

轨道式南美白对虾捕捞系统设计与试验

李　俊[1]　赵　强[1]　范张晨[1]　吴　刚[2]　马天利[1,3]　陈雷雷[1]　胡庆松[1]

(1.上海海洋大学工程学院,上海 201306;2.常州华溪渔业有限公司,常州 213300;
3.光明食品集团上海崇明农场有限公司,上海 202174)

摘要: 针对南美白对虾捕捞过程中人工参与度高、劳动强度大、效率低及缺乏适用于设施化温棚池塘的自动化装备等问题,基于模块化理念提出了一种轨道式捕捞系统。结合设施化温棚结构及作业需求,系统从下笼、起捕和转运等关键环节出发,明确了轨道式捕捞系统的基本设计要求和功能指标。基于模块化设计理念,设计了集电源系统、升降机构与捕捞装置于一体的总体方案,并在此基础上对系统中的驱动电机、升降电机及轨道半径等核心参数进行了详细计算与合理选型。基于 ANSYS 软件对系统机架的强度、电磁铁的吸附性能等关键部件进行了有限元仿真分析,验证了结构安全性与功能可行性。完成轨道式捕捞系统样机试制,并从行走稳定性、升降可靠性及捕捞效率等方面开展样机运行试验,验证了系统设计的有效性。结果表明,轨道式捕捞系统平均抓捕成功率为 81.25%,单次作业平均总耗时为 240 s,运行平均速度为 0.75 m/s,具备较高的作业效率、稳定性与可靠性。研究结果可为设施化养殖条件下自动化捕捞装备的设计与推广应用提供参考。

关键词: 南美白对虾;设施化温棚池塘;轨道式捕捞;有限元分析;电磁吸附

中图分类号: S972.69　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2025)10-0054-09　　**OSID:**

Design and Experiment of Rail-type Harvesting System for *Penaeus vannamei* in Greenhouse Ponds

LI Jun[1]　ZHAO Qiang[1]　FAN Zhangchen[1]　WU Gang[2]　MA Tianli[1,3]　CHEN Leilei[1]　HU Qingsong[1]

(1. *College of Engineering*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*
2. *Changzhou Huaxi Fishery Co.*, *Ltd.*, *Changzhou* 213300, *China*
3. *Shanghai Chongming Farm Co.*, *Ltd.*, *Bright Food Group*, *Shanghai* 202174, *China*)

Abstract: In response to the persistent challenges of high manual intervention, intensive labor requirements, low operational efficiency, and a critical lack of automated equipment suitable for facility-based greenhouse ponds during the harvesting of *Penaeus vannamei*, a novel rail-based harvesting system was proposed based on an integrated modular concept. Considering the specific structural constraints of greenhouse facilities and practical operational requirements, the system's fundamental design specifications and functional performance indicators were systematically defined, covering all key processes including trap deployment, catching, and transportation. Employing an advanced modular design approach, a comprehensively integrated system was developed, incorporating a centralized power supply system, a precision lifting mechanism, and an efficient catching device. All key parameters, including the drive motor, lifting motor, and optimized track radius, were meticulously calculated and appropriately selected through rigorous engineering analysis. Finite element analysis via ANSYS software was comprehensively conducted to simulate and evaluate the structural strength of the frame and the adsorption performance of the electromagnet, thoroughly verifying structural safety and functional feasibility. A full prototype of the rail-based harvesting system was manufactured and subjected to extensive operational tests evaluating travel stability, lifting reliability, and harvesting efficiency, conclusively confirming the effectiveness of the overall design. The final results demonstrated an average

收稿日期:2025-08-11　修回日期:2025-08-20

基金项目: 上海市农业科技创新项目(沪农科(T2023108))

作者简介: 李俊(1982—),男,讲师,主要从事渔业工程装备研究,E-mail:junli@shou.edu.cn

通信作者: 胡庆松(1979—),男,教授,博士,主要从事海洋工程装备与渔业工程装备研究,E-mail:qshu@shou.edu.cn

capture success rate of 81.25%, a total operation time of 240 s per cycle, and a consistent average operating speed of 0.75 m/s, collectively indicating high operational efficiency, remarkable stability, and reliable performance. The research result can provide valuable insights and practical reference for the design and broader application of automated harvesting equipment in modern intensive aquaculture environments.

Key words: *Penaeus vannamei*; facility-based greenhouse pond; rail-based harvesting; finite element analysis; electromagnetic adsorption

0　引言

水产品作为优质蛋白质和热量的来源，不仅满足了我国食物供给的数量安全，而且促进了居民的多元化膳食结构升级，在世界和我国的食物供给体系中发挥着重要作用。据数据显示，2024 年中国水产品总产量达到 $7.357\,59\times10^7$ t，同比增长 3.39%。淡水养殖产量 $3.648\,72\times10^7$ t，同比增长 3.34%，在捕捞方面，捕捞产量 $1.297\,56\times10^7$ t，同比下降 0.69%[1]。随着“机器代人”需求的不断增长，以及信息技术与自动控制技术的持续进步，农业自动化设备逐步进入应用加速阶段。在水产养殖领域，自动化作业装备的发展对于提高养殖效率、降低人工投入、优化作业环境及保障生产安全等方面具有显著意义[2-3]。

目前国内外学者对水产品捕捞技术进行了相关研究，如拖网、吸力泵或抓斗等方式。艉滑道网板拖网是现代渔业中广泛应用的一种捕捞方式，具有船舶配置简单、操作便捷、适用场景广泛等优势，尤其适用于南极磷虾等中上层资源的高效获取。然其亦存在虾体破损率高、作业强度大及环境恶劣等问题，制约了作业质量与船员作业安全[4]。周浩等[5]针对自然养殖环境中海洋生物的目标捕获问题，设计了吸纳式水下捕捞机器人。通过大气压的作用产生吸力，将外界的水生物通过吸管吸入水下机器人体内，配备视觉感知来实现目标捕获，大幅提高自然养殖环境下的捕捞效率。TEOH 等[6]设计了一种名为旋转驱动折叠多面体(Rotary actuated dodecahedron, RAD)的水下捕捞机器人，该机器人配备旋转驱动电机，通过操控十二面网格折叠结构的机械手实现目标捕捉。该系统在不依赖复杂传感器与多自由度控制的前提下，实现了对水下柔性目标的稳定抓取，相关研究为水下多面体机构在生物捕捞及水下操作等领域的应用提供了新思路与技术参考。蒋绍博等[7]设计的球形捕捞机械手水下机器人，采用悬挂式并联机械手、透水式捕捞笼、双目自动识别系统，具备高自动化等优点，但未在实际场景中应用。岳鹏等[8]设计的水下七功能电动机械手，其基于新型自主水下机器人(Underwater vehicle manipulator system, UVMS)，具有 6 个自由度和夹钳剪切功能，搭载于智能水下机器人(Autonomous underwater vehicle, AUV)系统的水上机器人上可自主作业。文享龙[9]设计了一种集成收纳筐的抓取式捕捞机构，该机构具备良好的操控性能，并通过有限元仿真与实体样机验证了结构设计的可行性与可靠性。此外，配套的收纳筐结构为实现水下连续捕捞作业提供了潜力。然而，该研究仅停留在理论设计与仿真验证阶段，尚未开展实地水下捕捞性能测试。

现有水下捕捞装备的研究主要面向自然水域或开放式养殖环境，已在一定程度上实现自动化作业，具备较成熟的技术体系与应用经验。然而，对于以温棚为代表的设施化养殖环境，其空间受限、作业节奏快、目标密集等特点尚未被充分关注和适配，相关自动化捕捞装备仍较为匮乏。目前该类环境中仍普遍采用传统地笼进行作业，虽具有对虾体损伤小的优势，但存在人工参与度高、作业效率低等问题，难以满足高密度、工业化养殖系统对捕捞效率和自动化水平的需求。

针对上述问题，本文结合设施化温棚池塘钢结构的特点，提出一种轨道式捕捞系统，实现自动化捕捞。对机架和升降挂载部件进行设计，通过理论分析、仿真模拟和样机试验等方法验证捕捞系统的工作性能，保障捕捞质量。

1　轨道式捕捞系统总体设计

1.1　设计目标与整体结构

轨道式捕捞系统的工作场景为设施化温棚池塘，依据上海市城市电力养殖基地的设施结构，该养殖场具备设施化温棚池塘养殖典型的结构特征。具体参数为：该设施化温棚内总宽约 40 m，总长约 280 m，屋脊呈三角形，内部共计 12 个池塘，塘宽约 18 m，塘长约 30 m，两塘间设有约 2 m 的工作通道，供养殖人员投喂、捕捞、巡检等。结合设施化温棚内环境特点进行分析，池塘成列整齐排列，捕捞线路固定。因此，综合考虑设施化温棚内设施结构，采用悬挂轨道式方案。根据实际作业环境的特点与捕捞作业的功能需求，轨道式捕捞系统需具备良好的承载

能力,应能够集成电源系统、升降机构以及捕捞装置等关键部件,实现下笼、捕捞和转运;具备足够的负载能力和行驶稳定性,最大负载能力为 30 kg,行驶速度为 0.6 m/s;车架结构设计紧凑且布局合理,其强度与刚度均能满足设施化温棚池塘作业的运行需求,确保了捕捞作业的稳定性与效率。系统动力输出充足,制动性能灵敏且可靠,适应复杂作业环境下的安全运行要求。基于以上设计方案,轨道式捕捞系统主要由行走驱动装置、升降挂载机构、捕捞模块组成,整体结构如图 1 所示。

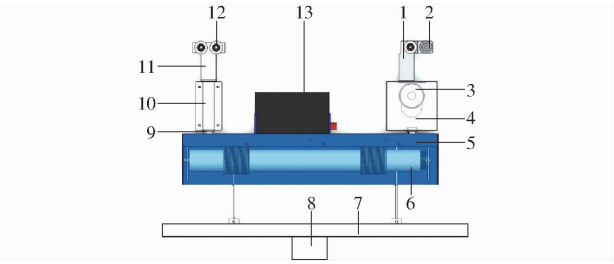


图 1 轨道式捕捞系统整体结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure of orbital fishing system

1. 主动轮固定件 2. 主动轮 3. 驱动电机 4. 主动轮箱体 5. 升降机箱体 6. 升降机机构 7. 联结横杆 8. 电磁吸 9. 箱体联结件 10. 从动轮箱体 11. 从动轮固定件 12. 从动轮 13. 电源

1.2 工作原理

轨道式捕捞系统的动力源为 24 V 磷酸铁锂电池,为驱动电机、升降电机、电磁吸和整车控制器供电,整车控制器输入电压为 12 V,需经过变压器进行供电。

整机采用无人遥控技术,遥控器与控制器通过 AS62-T20 无线串口收发模块进行通信。控制器收到遥控器指令后分别控制驱动电机、升降电机和电磁吸执行在轨行走、升降和电磁吸通断的动作。操控员通过操控遥控器,控制驱动电机前后移动,使行走驱动装置悬停于地笼正上方后,主控板收到指令,随即控制升降机垂直下降,同时使继电器吸合(或使继电器常开触点闭合),从而使电磁吸通电。下降过程中联结横杆机构上的电磁吸与地笼上的铁圆盘进行吸附,随后操作升降机垂直上升,随着升降机的持续升高,地笼被吊起直至脱离水面,完成地笼捕捞的抓取动作。行走驱动装置将地笼运送至集中处理点后继续操作升降机垂直下降,并由现场工作人员将地笼中的南美白对虾倒出,待工作人员将地笼中的虾全部取出之后,关掉电磁吸开关,地笼脱离行走驱动装置,至此完成一次捕捞作业。轨道式捕捞系统控制结构图如图 2 所示。轨道式捕捞系统主要设计参数如表 1 所示。

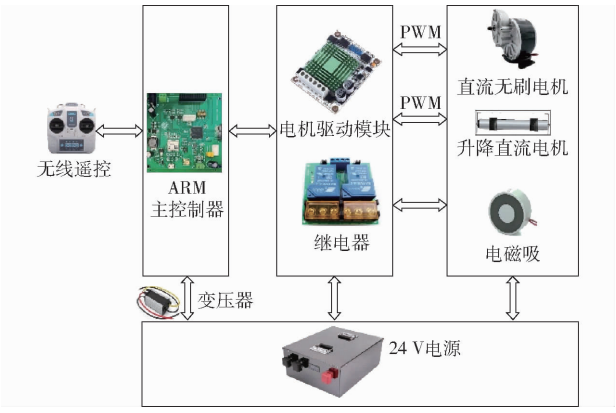


图 2 轨道式捕捞系统控制结构图

Fig. 2 Diagram of control structure of orbital fishing system

表 1 轨道式捕捞系统主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of orbital fishing system

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 100×280×525
承载质量/kg	30
行驶速度/(m·s^{-1})	0.6
升降速度/(m·s^{-1})	0.1

2 关键部件设计

2.1 驱动电机计算选型

2.1.1 驱动电机设计与选型

行走驱动装置是捕捞系统的动力来源,直接影响捕捞系统的性能。为了使行走驱动装置有足够动力克服行驶阻力,需要行走驱动装置运动达到一定的平稳性。直流无刷电机具有优良的制动性能,能够实现平稳的无级调速,并在低速运行时保持较大的输出转矩。基于以上特性,本文选用直流无刷电机作为水平驱动系统的主要动力来源。电机选择时主要考虑电机功率、电机转速和转速比等要求,电机功率受到加速阻力 F_j、爬坡阻力 F_i、滚动阻力 F_f 以及风阻 F_w 影响[10-11]。鉴于作业环境,本研究不考虑风阻影响,且轨道均为水平状态,故不考虑爬坡阻力[12-13]。

基于以上分析,在运行过程中,轨道式捕捞系统受到的滚动阻力 F_f 为

$$F_f = fmg \tag{1}$$

式中 f——驱动轮与轨道间的摩擦因数,取 0.18

m——整机质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

经计算得,F_f = 88.2 N。

轨道式捕捞系统受到的加速阻力 F_j 为

$$F_j = \varepsilon m f_a \tag{2}$$

式中 ε——旋转换算系数,取 1

f_a——阻力加速度，取 0.35 m/s^2

计算得加速阻力 $F_j = 17.5$ N。总驱动力计算公式为

$$F = F_j + F_f \tag{3}$$

经计算可得总驱动力为 105.7 N。驱动轮所需扭矩 T_1 公式为

$$T_1 = Fr \tag{4}$$

式中　r——驱动轮半径，m

驱动轮半径 r 为 0.028 m，经计算得 $T_1 = 2.96$ N·m。

电机输出扭矩 T_2 为

$$T_2 = \frac{T_1}{i\eta} \tag{5}$$

式中　i——电机减速比，取 10

η——电机传动效率，取 0.78

经计算得 $T_2 = 0.379$ N·m。

电机所需功率计算公式为

$$P_m = T_2\omega \tag{6}$$

式中　ω——电机角速度，rad/s

经计算得 $P_m = 119$ W。

计算得电机输出转矩为 0.379 N·m。根据上述计算，电机功率需大于 119 W，电机转矩需大于 0.379 N·m，根据市场常见型号电机的功率情况，选用 MY1016Z 型电机，额定功率为 350 W，额定转速为3 000 r/min，额定转矩为 1.1 N·m。

2.1.2　升降电机选型

根据轨道式捕捞系统设计参数设计，捕捞装置的升降速度 $v_{max} = 0.1$ m/s，升降机构末端承载质量约为 30 kg，则升降机构驱动电机的功率应为[14]

$$P_0 = m_0 g v_{max} \tag{7}$$

式中　m_0——升降机构末端承载质量，kg

v_{max}——捕捞装置最大升降速度，m/s

经计算得升降机构驱动电机功率为 29.4 W。电机转速 n_0 为

$$n_0 = \frac{60 v_{max}}{2\pi r_0} \tag{8}$$

式中　r_0——升降套筒半径，取 0.085 m

经计算得电机转速为 1.24 r/min。

计算扭矩为

$$T_0 = \frac{9.95 P_0}{n_0} \tag{9}$$

根据上述计算，电机功率需大于 29.4 W，电机转矩需大于 26 N·m，根据市场常见型号电机的功率情况，选用 5DC200－24GU 型直流电机，额定功率为 200 W，额定转速为 24 r/min，额定转矩为 30 N·m。

2.2　轨道转弯半径计算

轨道式捕捞系统的运行路径取决于轨道形状，而长距离轨道布置通常也伴随着弯道。考虑在轨运行过程中需要通过弯道，为了保证轨道式捕捞系统在轨道式运动的流畅性，需要对轨道式捕捞系统结构进行设计。传统轨道半径计算通过行走机构的轴距、底盘长度等进行设计。如图 3 所示，轨道半径计算公式为[15－16]

$$R \geqslant \frac{\frac{1}{4}(b^2 - d^2) + \frac{1}{2}d - a - ad}{2(d - a)} = 1.90 \text{ m} \tag{10}$$

式中　b——轮组单元的底盘长度，m

a——底盘横向宽度，m

d——轨道宽度，m

R——轨道半径，m

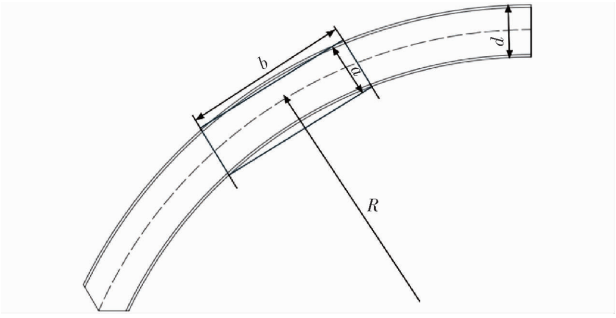


图 3　轨道半径计算尺寸关系图

Fig. 3　Diagram of dimensional relationship for calculating orbital radius

考虑到设施化温棚操作空间有限，需要对轨道半径进行缩小。为适应轨道半径小的问题，通过模块化的设计理念，设计一种轮组箱体与升降机箱体分离式的机架。轮组箱体与升降机箱体通过图 4 所示方式联结。此时只需要保证单个轮组箱体通过弯道时，另外一个轮组还未进入弯道。如图 5 所示，当主动轮离开弯轨，从动轮进入弯轨时，存在以下几何关系

$$b = c = \sqrt{2}R \tag{11}$$

式中　c——转弯时所需的最小对角距离，m

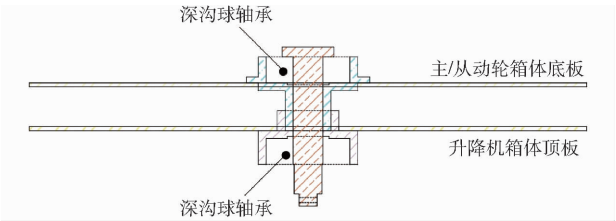


图 4　轮组箱体与升降机箱体联结方案

Fig. 4　Coupling scheme between wheel box and elevator box

根据计算，当 $b = 0.8$ m 时，可得轨道半径应满足 $R = 0.565$ m。为确保轮组在转弯过程中具备充分的活动空间，本文选取轨道半径 $R = 0.5$ m 作为设计值。

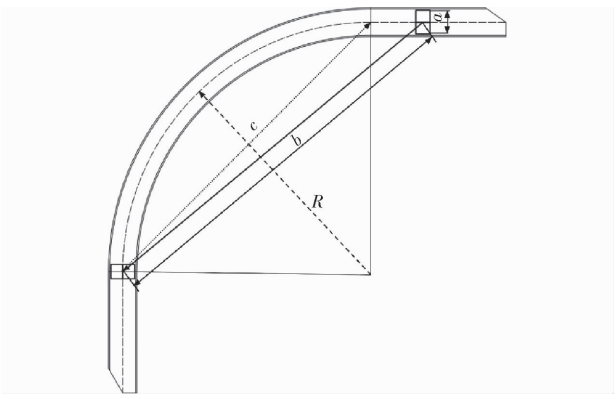


图 5 轨道半径优化计算尺寸关系图

Fig. 5 Orbital radius optimization calculation dimension diagram

2.3 机架结构设计

机架的结构和质量分布影响整机作业的可靠性和稳定性。综合考虑强度和轻量化要求,机架主体采用 304 不锈钢,采用上下分层设计。机架上层为行走驱动装置箱体,用于联接驱动轮组、从动轮组和放置驱动电机,机架下层为升降挂载机构箱体,为电源提供安装位置和连接升降机构。机架上下层通过法兰联结件进行联结。

2.3.1 机架强度有限元分析

为了保证所用材料和设计结构能够满足捕捞系统的强度要求,基于 ANSYS Workbench 对机架进行静力学仿真分析。将机架模型导入 Workbench 2024R1 软件中,设定机架材料为 304 不锈钢,其材料主要参数见表 2[17-19]。为提升仿真计算的效率与精度,对机架模型进行了适当简化处理。具体包括:①省略部分安装孔,并将倒角和圆角结构简化为直角形式。②忽略焊接工艺对机架材料性能的影响[20]。③除连接部位外,机架上的其他装配孔均不予考虑,以简化模型结构[21]。本文采用多面域网格划分方法进行网格划分[22]。轨道式有限元模型如图 6 所示。

表 2 机架材料主要参数

Tab. 2 Main properties of frame materials

参数	数值
弹性模量/Pa	1.93×10^{11}
泊松比	0.31
质量密度/(kg·m^{-3})	7 750
抗剪模量/(N·m^{-2})	$7.366\,4\times10^{10}$
张力强度/(N·m^{-2})	5.86×10^{8}
屈服强度/(N·m^{-2})	2.07×10^{8}

2.3.2 添加载荷

在本文中,机架的力学边界条件由其自重及外部载荷所产生的惯性力共同构成。首先,机架本体的重力通过其三维几何属性,并设置材料属性(如钢材密度、泊松比和弹性模量)进行定义。在仿真中施加垂直方向的重力加速度,使机架重力以惯性力的形式体现。其次,电池、驱动电机和升降系统的重力通过集中重力点的方式施加于机架结构上。最后,驱动电机在主动轴上产生的轴向压力同样以集中重力形式加载于主动轴处。车架载荷参数见表 3。

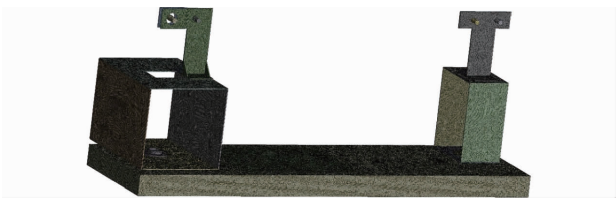


图 6 轨道式捕捞系统有限元模型

Fig. 6 Finite element model of an orbital fishing system

表 3 车架载荷参数

Tab. 3 Frame load

载荷名称	加载位置	方向	力/N
压轴力	主动轴位置	+Z	57.163
电池重力	均匀分布在升降箱体安装位置	+Z	130
车架自重力	以重力加速度方式加载	+Z	346
驱动电机重力	主动轮顶箱体	+Z	25
升降机构重力	升降机箱体顶箱体	+Z	300

驱动电机主动轴上产生的压轴力计算公式为[23-25]:

链速
$$v=\frac{nzp_1}{60\times1\,000} \tag{12}$$

有效圆周力
$$F_e=\frac{1\,000P}{v} \tag{13}$$

竖直布置时的压轴力
$$F_p=k_{F_e}F_e \tag{14}$$

式中 k_{F_e}——安全系数,取 1.05

p_1——链条节距,取 15.875 mm

z——齿轮齿数,取 9

P——电机额定功率,取 350 W

n——驱动电机转速,取 2 700 r/min

经计算可得链速 $v=6.429$ m/s,竖直布置时的压轴力为 57.163 N。

2.3.3 网格无关性验证

在此区块划分基础上进行网格无关性验证,选取低密度、中等密度、高密度共 3 种网格尺寸进行数值计算,并分析网格尺寸对轨道式捕捞系统等效应力计算收敛性的影响,结果如表 4 所示。

表 4 网格验证

Tab. 4 Mesh validation

网格类型	网格数量	等效应力/MPa
低密度网格	267 461	188.68
中密度网格	440 697	188.73
高密度网格	2 443 372	190.46

计算结果误差随网格数量增加而减小，中密度网格与高密度网格的等效应力计算误差较小。然而，高密度网格在机架局部细节（如应力集中区域、曲面过渡部位）表现出更精细的应力分布，能够更准确反映真实受力状态，并减少因网格过大导致的局部计算失真。因此，综合考虑计算精度与后续分析需求，本文选取高密度网格作为最终计算网格。该网格划分节点数为 4 031 434，单元数为 2 443 372。

2.3.4　结果分析

根据静力学分析结果，当轨道式捕捞系统承载 30 kg 状态下，尽管机架局部区域出现较高的应力和变形，如图 7、8 所示，但所有应力值均低于材料的屈服强度，且变形相较于整体尺寸较小，说明机架结构设计合理，其强度能够满足作业需求。主动轮组固定件区域的受力最为显著，该处最大应力达到 190.46 MPa。最大位移 3.858 mm 集中显现于升降机箱体区域，此形变主要由电池组集中载荷及升降机构自重载荷耦合作用导致。

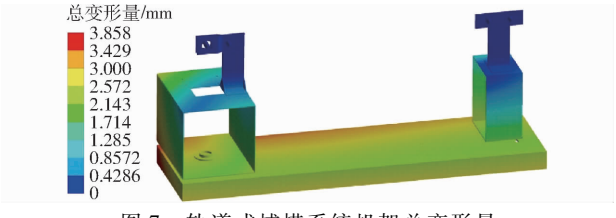


图 7　轨道式捕捞系统机架总变形量

Fig. 7　Total deformation of rack of orbital harvesting system



图 8　轨道式捕捞系统机架等效应力分布

Fig. 8　Equivalent stress distribution of rack of an orbital harvesting system

2.4　电磁铁选型

在捕捞作业中，电磁铁作为捕捞机构中的关键执行部件，其吸力性能直接影响捕捞过程的顺利实施。若电磁铁的吸力不足以克服地笼网及虾体的整体重量，将导致捕捞失败。因此，合理选型电磁铁是确保系统可靠运行的前提。结合单次捕捞量及装置轻量化设计的要求，参考市售电磁铁的吸力性能参数，初步选定电磁铁型号为 KK－P80/34。然而，由于电磁铁的实际吸力受到多种因素的影响，包括被吸附物体的尺寸和材质、工作环境温度以及驱动电流等，其在实际工况下的性能可能与标称值存在偏差。因此需要对电磁铁进行磁场仿真分析以确定其是否满足实际使用需求[26]。

根据该型号电磁铁的相关参数，在 Solidworks 软件中建立电磁铁内部紫铜线圈的三维模型，其中线圈外径为 80 mm，内径为 35 mm，厚度为 38.5 mm。将三维模型导入 ANSYS Workbench 软件，选择静磁分析（magnetostatic），由于抓取过程中，电磁铁作用于改造地笼的上方铁圆盘上，设置直径 200 mm，高度 200 mm 的圆柱形空气域作为边界以得到电磁铁作用于铁圆盘的吸力大小。设定线圈匝数 50，导电面积 0.01 mm^2，工作电流 470 mA，环境温度 22℃。参数设置完成后对磁场合力进行求解，得到的仿真结果如图 9 所示。由仿真结果图 9a 可知，完全接触时边界处中心与铁圆盘接触部分的磁场合力最大值为 2 294.8 N，满足设计需求。由仿真结果图 9b 可知，在间隔 5 mm 条件下，整体磁场合力水平明显低于完全接触状态，但局部节点存在数值峰值（最高达 20 455 N），大部分区域合力低于 2 803.8 N。该峰值可能与局部接触条件或计算网格相关，并不代表整体吸力水平。综合考虑主要受力区域的平均合力水平，两种工况下 KK－P80/34 型电磁铁均可满足设计需求。

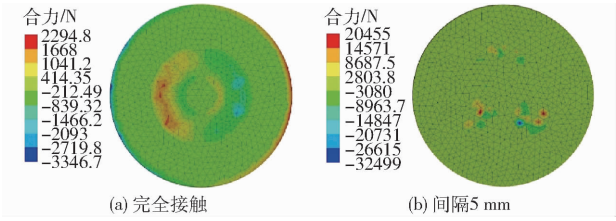


图 9　电磁铁静磁仿真结果

Fig. 9　Electromagnet simulation results

3　性能试验

为验证本文设计的轨道式捕捞系统作业性能，结合理论设计与选型结果完成样机试制。2025 年 5 月在上海市崇明区城市电力设施化温棚池塘养殖基地进行试验，作业对象为南美白对虾。试验仪器主要包括库伦仪（电压精度 0.01 V，电流精度 0.01 A），皮卷尺（规格：50 m × 14 mm）、钢卷尺（规格：5 m × 25 mm）、秒表（精度：0.01 s）等。试验条件如表 5 所示。

表 5　塘间试验条件

Tab. 5　Experimental conditions in pond

参数	数值
虾体长 × 质量/（cm × g）	10 × 10.5
轨道式捕捞系统最大载荷/kg	30
轨道式捕捞系统行驶速度/（$m \cdot s^{-1}$）	0.60
轨道式捕捞系统转弯半径/m	0.5

3.1　行驶性能试验

为测试装置在水平轨道上的最高行驶速度，将

测试区段划分为 3 个功能区域,分别为启动加速区、匀速测试区和减速停车区。其中,匀速测试区用于获取装置在稳定运行状态下的速度数据。为确保试验结果的重复性与可靠性,每组试验均进行 5 次重复测量。试验结果如表 6 所示。

表 6 水平轨道速度测试试验结果

Tab. 6 Horizontal orbit speed test results

编号	行驶距离/m	时间/s	最大速度/(m·s^{-1})	最大加速度/(m·s^{-2})
1	18	24.09	0.747	0.541
2	18	22.86	0.787	0.589
3	18	25.14	0.715	0.573
4	18	23.47	0.767	0.583
5	18	24.30	0.741	0.577
均值			0.751	0.573
标准差			0.027 2	0.018 7

由表 6 可知,轨道式捕捞系统运行速度均值为 0.751 m/s,标准差为 0.027 2 m/s,加速度均值为 0.573 m/s^2,标准差为 0.018 7 m/s^2。该结果表明,装置的速度波动范围较小,表现出较强的运行一致性,说明其驱动系统和控制策略在结构布设及负载条件下具备良好的稳定性和可重复性。最大速度波动幅度在 ±0.03 m/s 范围内,加速度波动幅度亦较小,反映出系统在启停及稳定运行过程中的动力响应较为平缓。

3.2 捕捞性能试验

为全面评估装置在实际水产养殖环境中的作业性能,试验选取 2 个典型养殖塘口,在每个塘口中分别设置 2 个点位,共布设 4 个捕捞测试点位。在每个点位开展 40 min 的捕捞作业,共进行 4 组捕捞试验,总计完成 16 组试验。试验过程中,分别记录每组的捕捞成功率、单次抓取耗时等关键性能指标,并对每组的实际捕捞量进行称量与记录,以量化装置在不同环境与点位条件下的捕捞效率与稳定性。现场捕捞试验如图 10 所示。试验结果如表 7 所示。平均吊运成功率计算公式为

$$S_t = \frac{N_t}{16} \times 100\% \tag{15}$$

式中 N_t——16 组试验中吊运成功的次数

每组试验以轨道式捕捞系统将捕捞地笼完全吊起为一次抓取,以捕捞系统于捕捞点将地笼运送至回收点至脱离为一次卸载。分别记录所需时间。单次捕捞任务(从抓取启动到卸载完成)的平均总耗时 T_p 的计算式为

$$T_p = \frac{T}{N_t} \times 100\% \tag{16}$$

式中 T——每组试验抓取和卸载所需时间,s



图 10 轨道式捕捞系统捕捞试验

Fig. 10 Orbital fishing system fishing test

表 7 捕捞性能试验结果

Tab. 7 Results of fishing performance tests

编号	吊运	单次捕捞任务耗时/s	质量/kg
1	Y	227	9.6
	Y	267	2.7
	Y	231	3.18
	Y	237	4.67
2	Y	220	4.05
	Y	236	2.54
	N		
	N		
3	Y	225	3.09
	Y	235	3.15
	Y	232	2.55
	Y	231	2.54
4	Y	284	4.05
	Y	280	3.85
	N		
	Y	219	2.25

注:“Y”表示吊运成功,即同时满足抓取成功、吊运过程不掉落以及卸载成功;“N”表示吊运失败,即抓取失败、吊运过程掉落或卸载失败。

根据表 7 试验结果所示,捕捞系统在 16 组捕捞作业中,平均捕捞成功率为 81.25%,成功记录中,抓取与卸载平均耗时为 240 s。此外,每组捕捞质量从 2.25 kg 到 9.6 kg 不等,波动范围较大,说明捕捞系统在高密度或低密度虾群下的捕捞效率存在不确定性。

3.3 承重性能试验

为研究捕捞系统在不同负载条件下的能耗特性,设定负载质量分别为 10、20、30 kg,在长度为 18 m 的轨道上进行运行试验。试验过程中,采用库伦仪对主电路电流及电池端电压进行实时监测,获取各载荷工况下的运行电参数据。试验结果如表 8 所示。

表 8 捕捞系统在不同载荷条件下行驶情况

Tab. 8 Robot driving under different load conditions

负载/kg	电压/V	功率/W	行驶速度/(m·s^{-1})
10	25.13	82.43	0.73
20	24.43	113.59	0.75
30	24.95	125.08	0.76

从表 8 数据可见，捕捞系统在 10、20、30 kg 负载下的行驶速度分别为 0.73、0.75、0.76 m/s，显示其负载适应性良好，且负载增大后轮组在轨道上的摩擦力增大，系统通过提升驱动电机的输出功率来补偿因负载提升带来的能耗增加，电机及其驱动控制策略能够在检测到负载变化时动态调整输出，维持电机转速与扭矩的稳定输出，确保捕捞系统运行速度不显著下降。基于最高功耗 125.08 W 估算，本系统在 24 V/100 A·h 电池下可连续作业约19 h，基于单次抓取耗时 240 s 计算可知，本系统能够起捕约 285 次。利用温棚现有钢架结构敷设供电线路，在轨道式捕捞系统入轨处安装了固定充电点，该充电点直接安装在轨道起始端上，充电操作仅在系统停靠于指定起始位置时进行，对捕捞系统在轨道上的正常运行、捕捞作业全程无任何干扰，能够确保当捕捞系统需要补充电量时，能够实现系统便捷、安全在轨充电。

综合试验表明，轨道式捕捞系统行驶稳定，负载性能良好，各模块工作正常，能够满足实际应用需求。

4　结论

（1）基于设施化温棚的结构布局和捕捞作业流程，明确轨道式捕捞系统设计参数，提出集成电源系统、升降机构与电磁吸吸附装置的总体方案。针对捕捞系统工况分析计算了驱动电机与升降电机参数，并进行了合理选型。为提升系统在有限空间内的通过能力，设计了小转弯半径结构，并对轨道转弯半径进行了优化计算，最终确定轨道最小转弯半径为 0.5 m。

（2）利用 ANSYS 软件对系统关键部件进行有限元仿真分析。机架结构仿真结果显示，在最大承载 30 kg 工况下，结构最大应力为 190.46 MPa，低于 304 不锈钢屈服强度，最大位移为 3.858 mm，满足强度与刚度要求；电磁铁吸力仿真结果表明，其在实际吸附距离下的最大吸力可达 2 045.5 N，可满足捕捞作业中对地笼的稳定吸附需求。

（3）在实际设施化温棚池塘中开展了系统性能试验。在载荷 30 kg 条件下，轨道式捕捞系统平均运行速度为 0.751 m/s，平均加速度为 0.573 m/s^2；在 16 组试验中，平均抓捕成功率为 81.25%，平均单次作业耗时为 240 s，运行表现稳定，动力响应良好。在不同负载下系统运行速度波动小，功率响应平稳，体现出良好的能耗控制能力和负载适应性。

参　考　文　献

[1] 2024 年全国渔业经济统计公报[J]. 中国水产，2025(7)：8－9.

[2] 黄一心，鲍旭腾，徐皓. 中国渔业装备科技研究进展[J]. 渔业现代化，2023，50(4)：1－11.
HUANG Yixin, BAO Xuteng, XU Hao. Research progress of fishery equipment science and technology in China[J]. Fishery Modernization, 2023, 50(4): 1－11. (in Chinese)

[3] 刘世晶，李国栋，刘晃，等. 中国水产养殖装备发展现状[J]. 水产学报，2023，47(11)：190－203.
LIU Shijing, LI Guodong, LIU Huang, et al. Current development status of aquaculture equipment in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 190－203. (in Chinese)

[4] 王万勇，郭黎明，池炼，等. 南极磷虾捕捞技术和装备研究进展[J]. 海洋渔业，2025，47(2)：322－332.
WANG Wanyong, GUO Liming, CHI Lian, et al. Research progress on the Antarctic krill fishing technology and equipment [J]. Marine Fisheries, 2025, 47(2): 322－332. (in Chinese)

[5] 周浩，姜述强，黄海，等. 基于视觉感知的海生物吸纳式水下机器人目标捕获控制[J]. 机器人，2019，41(2)：242－249，275.
ZHOU Hao, JIANG Shuqiang, HUANG Hai, et al. Vision based target capture control for sea organism absorptive underwater vehicle[J]. Robot, 2019, 41(2): 242－249, 275. (in Chinese)

[6] TEOH Z E, PHILLIPS B T, BECHER K P, et al. Rotary-actuated folding polyhedrons for midwater investigation of delicate marine organisms[J]. Science Robotics, 2018, 3(20): eaat5276.

[7] 蒋绍博，吴玉玮，丁海旭，等. 水下捕捞机械手结构设计与研究[J]. 机械研究与应用，2020，33(1)：116－120.
JIANG Shaobo, WU Yuwei, DING Haixu, et al. Structural design and research on the underwater fishing manipulator[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(1): 116－120. (in Chinese)

[8] 岳鹏，张奇峰，安晓卫，等. 水下七功能电动机械手设计研究[J]. 机械设计与制造，2014，(4)：114－117.
YUE Peng, ZHANG Qifeng, AN Xiaowei, et al. Structure desian of 7F underwater electric manipulator and feasibility analysis [J]. Mechanical Design & Manufacture, 2014, (4): 114－117. (in Chinese)

[9] 文享龙. 海底生物捕捞 ROV 结构设计与抓取性能分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2018.
WEN Xianglong. The structure design and grabbing property analysis of benthos capture ROV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)

[10] 张建莉，岳丹丹，吴伟斌，等. 苗圃田间自走式电动双轨运输机设计与试验[J]. 武汉：华中农业大学学报，2020，39(6)：113－120.
ZHANG Jianli, YUE Dandan, WU Weibin, et al. Design and test of a self-propelled electric double-track transporter for

nursery field[J]. Wuhan: Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 113 - 120. (in Chinese)
[11] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
[12] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
[13] 陈吉朋,王凯,陈佳佳,等. 双轨式油茶果采摘机器人的动力轨道平台设计[J]. 林业工程学报,2025,10(2):138 - 146.
CHEN Jipeng, WANG Kai, CHEN Jiajia, et al. Design of a dual track power platform of Camellia oleifera fruit picking robot [J]. Journal of Forestry Engineering, 2025, 10(2): 138 - 146. (in Chinese)
[14] 黎思奇. 温室大棚悬挂式轨道巡检机器人设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
LI Siqi. Design of greenhouse suspended track inspection robot[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[15] 张伟. 电动自走式双轨运输机的设计[D]. 广州:华南农业大学,2018.
ZHANG Wei. Design of electric self-propelled double track transporter[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[16] 叶日鸿,周梓达,林泽润,等. 一种轨道式巡检机器人底盘的设计与实现[J]. 机械,2020,47(10):74 - 80.
YE Rihong, ZHOU Zida, LIN Zerun, et al. Design and realization of an orbital inspection robot chassis[J]. Machinery, 2020, 47(10): 74 - 80. (in Chinese)
[17] 蔡圣杰,周成全,孙大伟,等. 轨道式精准投饲机器人设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(9):241 - 250.
CAI Shengjie, ZHOU Chengquan, SUN Dawei, et al. Design and test of rail-type automatic precision feeding robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(9): 241 - 250. (in Chinese)
[18] 李善军,陈辉龙,彭际博,等. 丘陵山地果园全液压遥控式履带动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):119 - 127,201.
LI Shanjun, CHEN Huilong, PENG Jibo, et al. Design and test of hydraulic remote control crawler power chassis for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 119 - 127, 201. (in Chinese)
[19] 刘双喜,徐春保,张宏建,等. 果园开沟施肥机机架优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):113 - 122.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Optimization design and experiment for rack of orchard ditching-fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 113 - 122. (in Chinese)
[20] 李鹏,劳彩莲,杨瀚,等. 基于移动机器人平台的玉米植株三维信息采集系统[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊):15 - 21.
LI Peng, LAO Cailian, YANG Han, et al. Plant 3D information acquisition system based on mobile robot platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 15 - 21. (in Chinese)
[21] 权龙哲,张景禹,姜伟,等. 基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):115 - 123.
QUAN Longzhe, ZHANG Jingyu, JIANG Wei, et al. Development and experiment of intra-row weeding robot system based on protection of maize root system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 115 - 123. (in Chinese)
[22] 李俊,李怀进,汪振华,等. 海洋牧场组合式无人监测船设计与试验[J]. 上海海洋大学学报,2023,32(5):1048 - 1058.
LI Jun, LI Huaijin, WANG Zhenhua, et al. Design and test of marine ranching combination-type unmanned monitoring vessel [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 1048 - 1058. (in Chinese)
[23] LITTLE J P, ADAM C J. Geometric sensitivity of patient-specific finite element models of the spine to variability in user-selected anatomical landmarks[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18(6): 676 - 688.
[24] 李春明. 万向联轴节速比关系式及带传动压轴力计算式等的修正[J]. 世界科技研究与发展,2008(1):38 - 41.
LI Chunming. The correct of rotation angle relation of universal joint and expression of axial force in belt drive[J]. World Sci-Tech R&D, 2008(1): 38 - 41. (in Chinese)
[25] 吕文星. 皮带传动压轴力计算及其对减速机选型影响[J]. 机械工程师,2019,(12):10 - 11,14.
LYU Wenxing. Calculation of compression force on belt drive and its impact on the selection of reducer[J]. Mechanical Engineer, 2019, (12): 10 - 11, 14. (in Chinese)
[26] 段洁利,李伟希,李伟钦,等. 山地蕉无人机自主吊运装置研制[J]. 农业工程学报,2024,40(15):1 - 10.
DUAN Jieli, LI Weixi, LI Weiqin, et al. Development of UAV autonomous lifting and transportation equipment for mountain bananas[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(15): 1 - 10. (in Chinese)