

基于 AI 视觉识别的全自动海洋垃圾清理机器人

张嘉名¹, 华闻进, 龙钊, 翟鸿扬, 沙辰辰, 陈昌林, 马一凡, 徐梦洁, 舒双宝²

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为解决海洋清理船自动化水平低、人力成本高、无法海陆同时作业等问题, 设计了全自动海陆两栖垃圾清理智能机器人, 该机器人具有以下功能和创新: 螺旋滚筒推进方式实现海陆两栖; RJS 算法实现 AI 视觉检测海洋垃圾; 依靠北斗导航和路径规划算法实现机器人自主规划最优清理路径和返航路径; 智慧云服务平台以及手机 APP 实现用户远程操控和周围环境监测等。

关键词: 螺旋滚筒推进, 海陆两栖, AI 视觉 RJS 算法, 路径规划, 垃圾清理机器人

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

1 引言

海洋垃圾污染已成为一种经济、政治和环境问题, 引起了国际社会的广泛关注^[1-2], 且随着排海垃圾逐渐增加, 全球海洋垃圾污染形势日益严峻。

多项研究表明, 塑料废弃物构成了海洋和沿海垃圾的重要部分^[3-4]。全球海洋中估计至少含有 5.25 万亿个塑料颗粒, 总重量约为 26.9 万吨^[5]。微塑料颗粒一旦被海洋生物摄食, 将通过食物链传播, 危害人体健康, 并对生态系统和生物多样性产生负面影响。

传统海洋垃圾清理依赖人工劳动, 安全和效率得不到保障。现有清理船采用的传送带方法, 易出现收集不准、垃圾卡住、无法应对潮间带垃圾、不能实现海陆两栖、垃圾转移到岸上难度大等问题。此外, 这些设备昂贵、耗能、需要大量劳动力且效率相对较低。

为解决上述问题, 本研究提出了一种基于螺旋推进的智能垃圾清理机器人。该设计采用螺旋滚筒和机械臂铲斗的创新机械结构, 使机器人兼具海洋表面垃圾清理和潮滩垃圾运输的双重功能。设计 RJS 算法和电化学检测模块, 实现垃圾检测识别和路径规划。

实验结果显示, 该机器人能够很好地实现海陆两栖和高效清理垃圾, 这些创新设计元素有望为垃圾清理机器人领域带来重大突破。

¹ 第一作者信息 (姓名: 张嘉名; 性别: 男; 研究方向: 机械结构设计, 机器视觉, 自动化控制; 邮箱: 1508886453@qq.com)

² 通信作者信息 (姓名: 舒双宝; 性别: 男; 职称: 合肥工业大学测控系副主任, 副教授; 研究方向: 等离子体物理诊断计算、智能光电测量与诊断技术、机器视觉与图像处理、自动化测试计量技术等, 邮箱: shu@hfut.edu.cn)

2 机器人设计背景和应用价值

2.1 产业背景

海洋覆盖地球 70% 以上的面积，是孕育生命的摇篮、联通世界的纽带、促进发展的平台，对人类社会生存和发展具有重要意义^[6]。然而海洋环境正遭受着严重破坏和污染，海洋塑料垃圾的问题日益严重。根据联合国环境规划署预测，海洋中的塑料垃圾量每年将增加 2300~3700 万 t，到 2040 年，将增加近 3 倍^[7]。中国国家海洋局的数据显示，中国 84% 的沿海地区遭受严重的塑料垃圾污染^[8]，这给海洋生态安全、人们的日常生活和环境、经济、旅游业都带来了严重的负面影响，因此，清理海洋垃圾的工作刻不容缓。

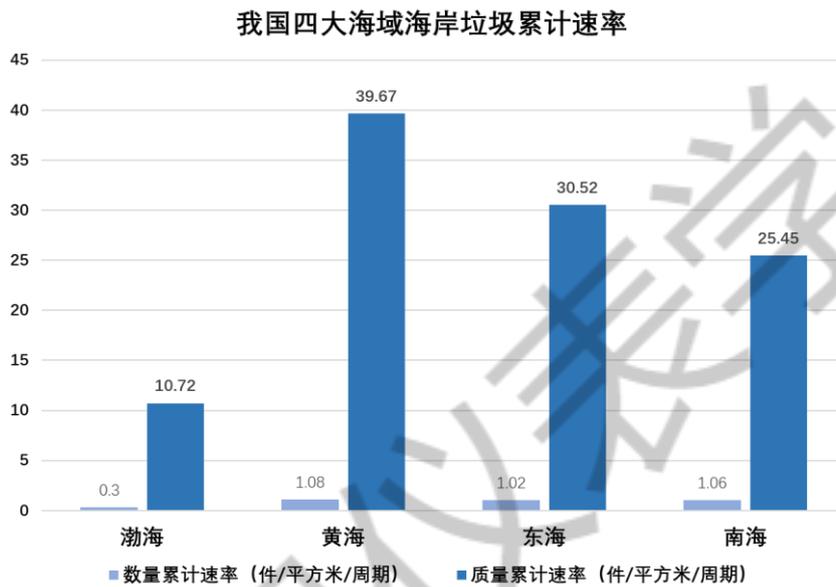


图 1 我国四大海域海岸垃圾累计速率

目前，自动化垃圾回收设备已经成为清理海洋垃圾的必然趋势，但目前市场上的设备存在诸多问题，如规模化应用困难、结构复杂、价格过高等。因此，我们设计并研发出了一款全自动的海陆两栖垃圾清理机器人，其采用双螺旋推进结构，能够在复杂的水陆工作环境中运行，搭载自主巡航和人工智能垃圾识别技术，并配备了实时水质检测功能，为海洋垃圾清理工作提供一种高效、自动化、易于操作的解决方案。

2.2 机器人应用价值

团队研发的“基于 AI 视觉垃圾识别的全自动海洋垃圾清理机器人”为优化海洋垃圾治理技术能力提供了新的思路，有望加强海洋生态保护和污染综合性治理，促进蓝色经济的可持续发展，研发成果也将为其他研究者在海洋水面垃圾清理产品方面提供参考和借鉴，引领开启清洁海洋行动的新篇章，力求推动海洋垃圾清理取得深刻、实质性的成效。

目前各研究方向主要集中在研发一款可以有效收集和处理海洋垃圾的机器人上，旨在利用物理吸附配合高精度传感器等多种不同的技术来收集漂浮垃圾，但在处理复杂海洋条件和大规模漂浮垃圾方面存在限制。存在的另一个问题则是如何将收集到的垃圾从海洋转运至指定区域进行回收和处理，需要考虑到运输过程中不同的环境和设施，以确保垃圾的安全转移和高效收集。此外，用机器清理海洋垃圾还面临制造成本过高、能源消耗过快等挑战。综上，我们的研究方向就是解决这些问题，开发一款适用性广、产品效率高、工作周期长的海洋和陆地垃圾清理机器人系统。

2.3 机器人整体设计

机器人可以实现全自动工作，用户登录微信小程序选择清理的海域，机器人自动从充电站出发到达指定位置后，进行垃圾清理和水域重金属电化学检测，并通过北斗导航通讯和路径规划设定最优垃圾清理行径。机器人使用机械臂自动手机垃圾，也可实时判断是否达到垃圾最大可承重。清理完成后机器人将返回垃圾处理站自动倾倒垃圾，最终返回充电站。

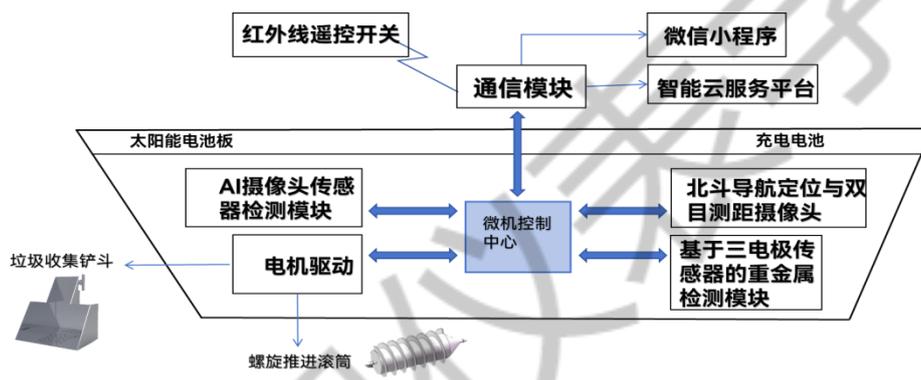


图 2 系统结构图

2.3.1 软件设计

(1) 底层软件设计

该系统包含两种控制方案，其一是使用红外遥控器进行远程操控，其二则是通过手机 APP 端进行操作。该控制系统包括上位机和从机，如图 3 所示。

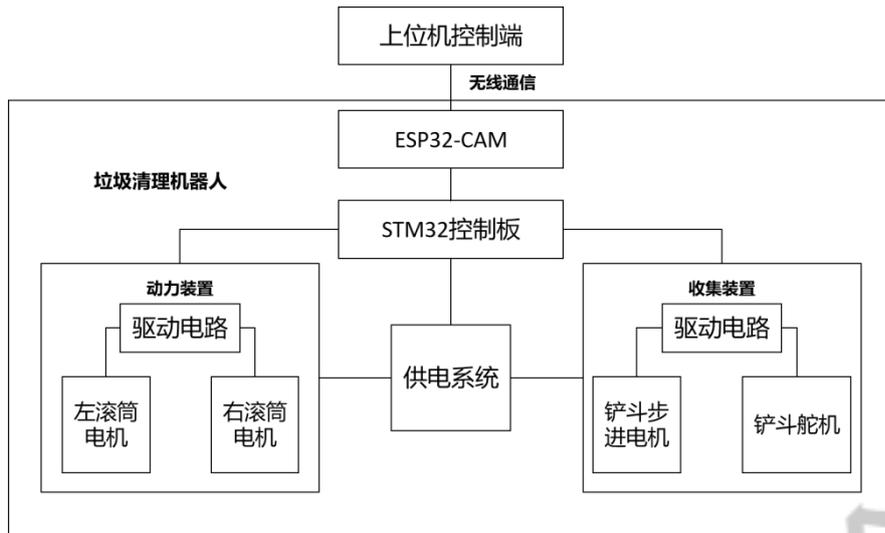


图3 机器人控制系统总体设计框图

(2) 上层软件用户遥控操控模块和智慧云服务模块

用户可以通过 APP 远程操控机器人并调节速度等参数，实现人工和自动操控的转换，机器人控制模块包括登录连接模块，数据反馈模块，视角显示模块，GIS 模块，人工操控模块，自动运行监控模块，参数配置模块。

智慧云服务模块系统结构如图所示，它不仅存储采集数据，还可以对上传的垃圾种类数、垃圾总量、垃圾分布情况以及水质状态等数据进行综合分析。通过对这些数据的综合分析，该模块可以给出对当地环境质量的评估结果。

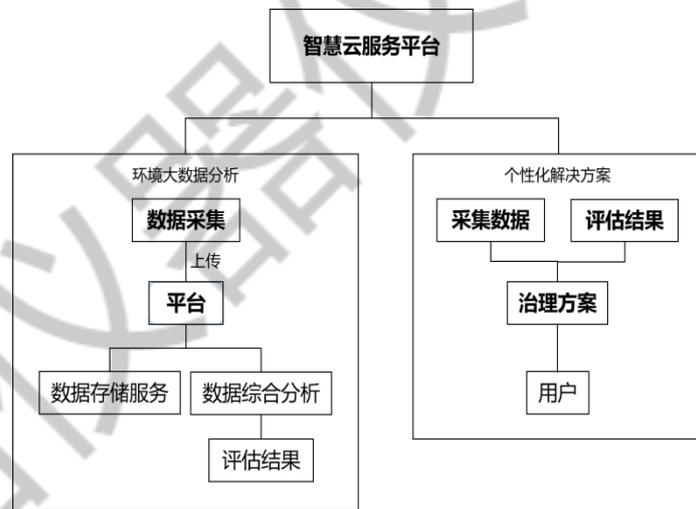


图4 智慧云平台系统结构图

(3) D*人工势场融合的路径规划方法

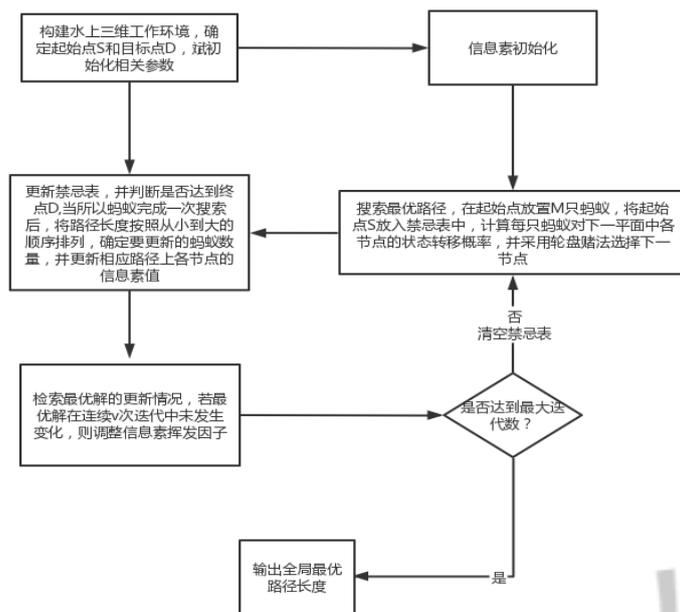


图 5 蚁群算法改进的具体流程图

2.3.2 硬件设计

机器人的硬件产品由电控设备、功能模块和信息交互模块组成，使其既可以自主识别垃圾、规划路径、自动巡航，也可以让工作人员通过蓝牙设备进行远程遥控操作。电控设备包括控制设备、通信设备和传感设备。

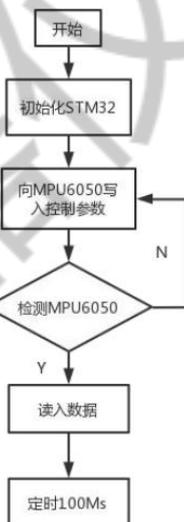


图 6 传感器信息采集流程

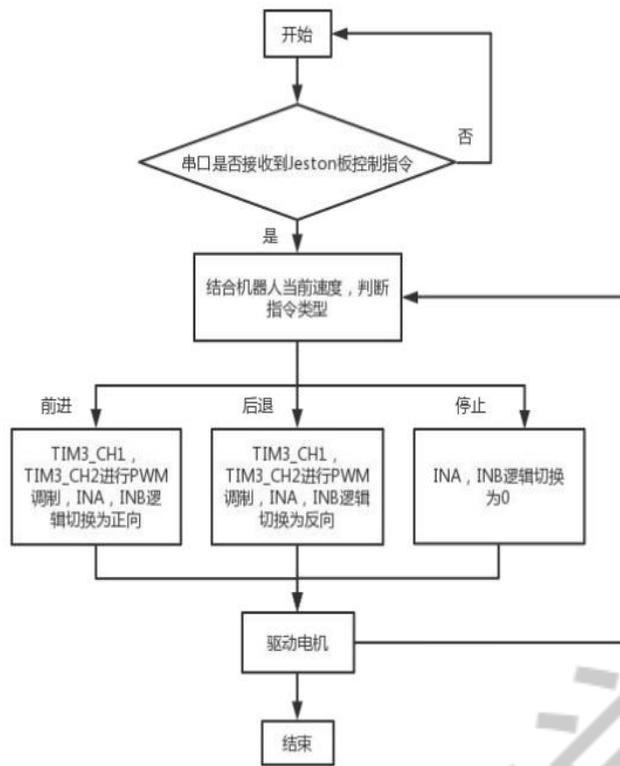


图7 电机驱动模块流程

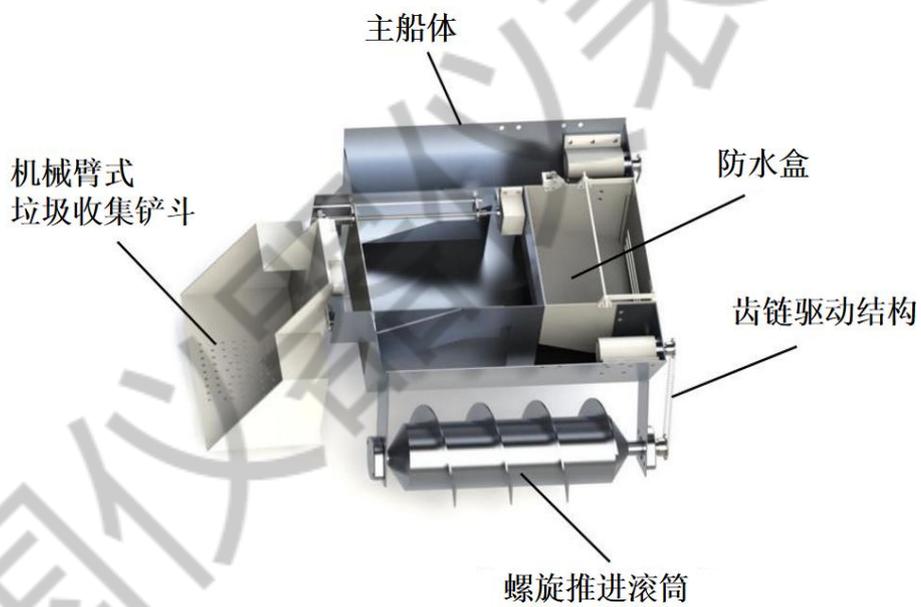


图8 结构设计图

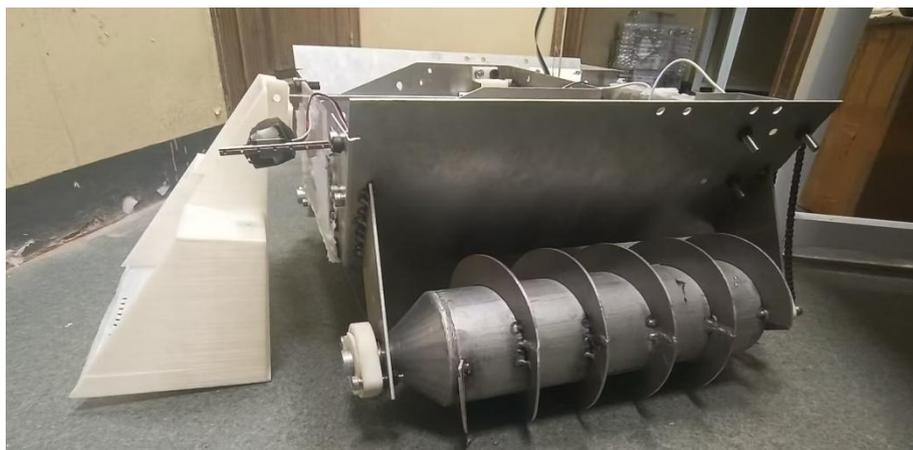


图9 产品实物图

3 传感器的创新点与优势

3.1 传感器系统的应用效果

采用螺旋滚筒推进和避障传感器模块结合实现海陆两栖无障碍工作；AI摄像头传感器检测模块通过RJS算法实现垃圾精准识别；采用北斗导航定位技术和双目测距摄像头，进行最优垃圾清理路径规划和自主巡航；基于三电极传感器实现海洋重金属检测；压力传感器模块在垃圾满载后自主返航倾倒。

而其他同类作品，如WasteShark需专职人员遥控，行进速度慢，效率低，不能收集大体积海漂垃圾；智能保洁无人船，抗风浪能力弱应用场景狭窄，无法实现海陆两栖行进速度慢，效率低不适合收集漂浮垃圾。

相比之下本机器人贯彻简单高效自动化，海陆两栖作业，可实现低成本保护海洋。

3.2 传感器的创新点与优势

(1) 针对垃圾无法识别种类问题，设计AI摄像头传感器检测模块。AI视觉识别模块内含有摄像头传感器，搭载USB高清摄像头ESP32-S/CAM，获取到视野内垃圾图像，实现垃圾的视觉检测和识别。首创递归最小二乘法RJS(Recursive Least Square)垃圾识别算法，从而提升了机器人垃圾识别的迁移学习能力。通过调用摄像头模块，可以实时采集图像信息，达到视频流实时识别垃圾种类的功能，运行速度约为12frame/s到14frame/s。这种算法可以实现在新的样本数据到来时，利用新的样本数据以及旧的最优模型参数来便捷地计算新的满足最小二乘最优模型参数，从而避免直接计算方法中的逆矩阵运算。显著提高了垃圾识别的准确性和效率。与传统的CNN算法(卷积神经网络)和SYM算法相比，这种方法在准确率上大幅度提升，并降低了因垃圾种类繁多而带来的训练时间和空间成本。

该方法包括如下步骤:①获得源域数据集和目标域数据集;②搭建领域自适应网络模型,

包括:特征提取器, 源域分类器, 目标域分类器;③使用正则化联合自主训练策略训练领域自适应网络模型;④使用训练好的领域自适应网络模型进行图像分类。本系统实现了模型的自动跨领域泛化和模型对噪声数据的鲁棒性, 克服了传统领域自适应方法受限于训练开销较大、依赖于高质量数据集等困难而无法广泛应用的问题, 使识别准确率大幅提高, 同时降低训练所需时间和空间成本, 更贴合图像分类的实际应用场景。

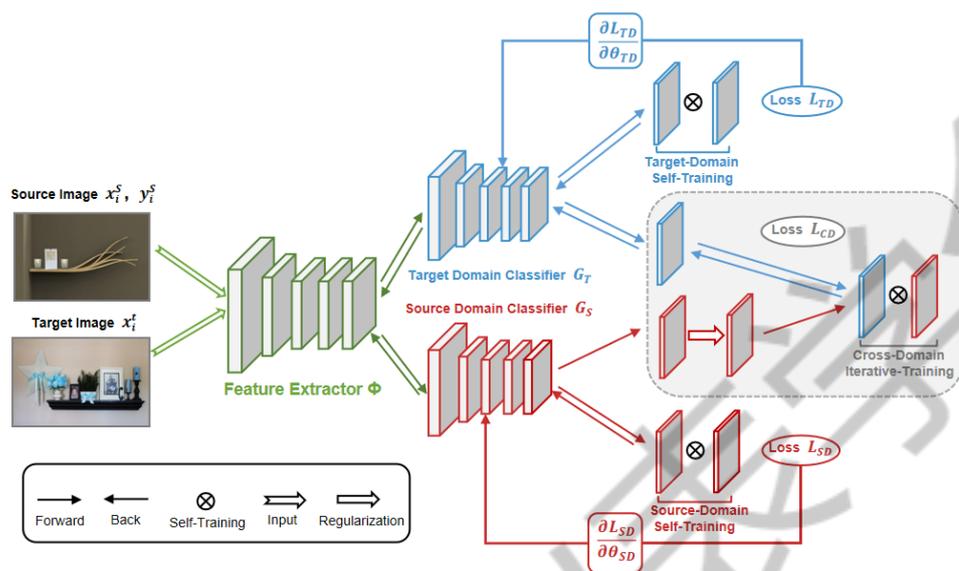


图 10 RJS 算法

(2) 针对清理船无法自动巡航捡拾垃圾和返航问题, 设计双目摄像头测距传感器的路径规划模块。双目摄像头能够准确测得垃圾与清理船之间的距离和位置, 这些数据会传输至云服务平台, 使用户可以远程监控。同时, 自主研发基于北斗导航和蚁群算法的 D*人工势场融合的路径规划方法, 使清理船能够自主巡航捡拾垃圾并返航。



图 11 机器人导航示意图

(3) 为防止作品功能过于单一，设计水质监测传感器模块。检测方面主要采用基于模块化设计的便携式电化学传感器电路。同时模块采用创新的三电极传感器，能够精准检测海洋中的重金属污染物质，为环境保护机构提供重要的数据支持。相比其他同类产品，设计实现了小型化、自动化，可以快速、灵敏地实时检测水质情况。其操作简便易上手，适用于各类实际应用场景。

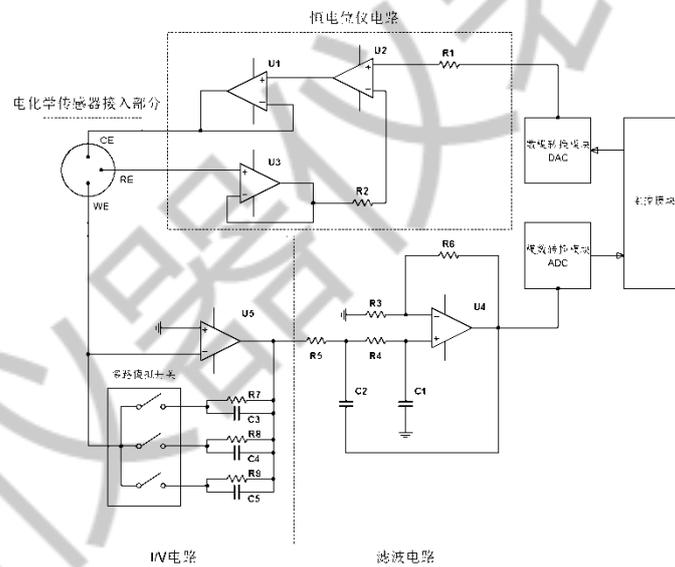


图 12 电化学检测电路图

该电路包括:电化学传感器接入部分,恒电位仪电路, IN 电路, 滤波电路,数模转换电路,数模转换电路。本发明通过数字通讯总线获取外部的平台系统传输的数字信号, 经由数模转换器 DAC 转换为测量所需的激励信号, 恒电位电路根据信号对电化学传感器进行作用,

使得工作电极产生相应电流，再经 IN 电路，滤波电路处理后，被模数转换器 ADC 转换为数字信号,通过数字通讯总线传输给外部的平台系统。本发明具有灵敏度高,准确性好的特点,可满足便携式检测场景下的需求;此外，本模块仅需稍加改动即可模块化的添加到一个需要电化学检测技术的平台系统当中，简化产品的开发流程。

4 机器人实现方案简介

4.1 双螺旋结构实验

4.1.1 实验设计原理

机器人通过螺旋滚筒的转动来实现其在陆地上的一切行动；在水面时，则靠滚筒及水下推进器来行动。遇到垃圾时，首先铲入机械臂铲中，然后机械臂铲向上倾斜后，将其中的垃圾倒入机器人的垃圾收集箱内。为了确保机器人的垃圾回收效率，则对其的螺旋滚筒转速有着一定要求，方便我们观察其在陆地上和水面上的行进速度。

4.1.2 实验设计方法

机器人在陆地和湖面上进行了垃圾收集实验，其中重点包括机器人的运动测试和清理漂浮垃圾两个方面。

具体来说，机器人在陆地上使用螺旋滚筒作为主要的行进方式；另一方面，为了使其能够在水环境中快速行动，机器人底部装配了一个水下推进器。在水面上运行时，机器人通过防水性能极好的主体提供浮力，并通过水下推进器在水面上行进。两侧的螺旋滚筒提供转向动力。为了确保实验的准确度，我们选择了 5 米的测试距离，并且在同一场景不同环境（比如：天气不同）进行了三次实验的重复，以确保结果的准确性。

4.1.3 实验验证过程

对于机器人的滚筒转速，进行了三次测转速测试，最后的平均转速约为 0.53r/s。机器人在陆地上行进的三次实验速度测出平均速度为 0.29m/s。机器人在水面上行进的三次测速实验得出其在水面上的平均速度为 0.33m/s。通过对实验结果的分析，我们可以看出我们所设计的海陆两栖垃圾收集机器人在水面上行进的速度与在陆地上行进的转速具有很好的一致性。其行进速度并不会因为测试环境的不同而产生巨大差异，说明机器人在陆地和海洋中具有极佳的通过能力。样机主要测试参数及实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

测试参数	平均结果
转速	0.53r/s
陆地行进速度	0.29m/s
水面行进速度	0.33m/s

经过测试，我们设计的机器人的最大续航时间为 8 个小时，一般可持续运行时间约为 6 至 7 小时。在没有干扰的空旷环境下，导航操作的最大距离可达 80 米。同时，机器人的垃圾斗容量为 0.5 立方米，最大承载重量为 12 千克。机器主要的外形尺寸参数如表 2。

表 2 机器人主要结构尺寸参数表

尺寸参数	长度	宽度 (直径)	高度
主体	0.50m	0.53m	0.33m
螺旋滚筒	0.50m	0.11m	-
铲斗	0.20m	0.34m	0.30m
导轨	0.30m	-	-
螺旋副	0.30m/s	0.008m/s	-

4.2 AI 视觉检测 RJS 算法实验

为了说明本算法的分类性能，将其与经典领域自适应算法在 VisDA-2017、Office-Hom e、Office-31 上的分类精度进行了对比。分类结果如表 3、表 4 和表 5 所示，消融实验结果如表 6 所示。

表 3 VisDA-2017 数据集平均分类准确度 (单位: %)

DANN	69.3
VAT	68±0.3
MCD	69.2±0.3
CDAN	70
MixMatch	69.3
FixMatch	74.5±0.2
MDD+FixMatch	77.8±0.3
Ours	87.1

表 3 展示了本发明在 VisDA-2017 数据集实验分准确度。Ours 方法即为本发明提出的

完整方法。本发明在 VisDA-2017 数据集上取得了最高平均分类准确度。

表 4 Office-Home 数据集模型实验分类准确度 (单位: %)

	Ar- Cl	Ar-P r	Ar-R w	Cl-A r	Cl-P r	Cl-R w	Pr-A r	Pr- Cl	Pr-R w	Rw- Ar	Rw- Cl	Rw- Pr	平均
DANN	45.6	59.3	70.1	47	58.5	60.9	46.1	43.7	68.5	63.2	51.8	76.8	57.6
CDAN	50.7	70.6	76	57.6	70	70	57.4	50.9	77.3	70.9	56.7	81.6	65.8
FixMatc h	51.8	74.2	<u>80.1</u>	63.5	<u>73.8</u>	61.3	64.7	51.4	80	73.3	56.8	81.7	67.7
MDD	54.9	73.7	77.8	60	71.4	71.8	61.2	53.6	78.1	72.5	60.2	82.3	68.1
MDD+I A	56.2	<u>77.9</u>	79.2	64.4	73.1	74.4	64.2	54.2	79.9	71.2	58.1	83.1	69.6
SENTR Y	<u>61.8</u>	77.4	<u>80.1</u>	<u>66.3</u>	71.6	<u>74.7</u>	<u>66.8</u>	<u>63</u>	<u>80.9</u>	<u>74</u>	<u>66.3</u>	<u>84.1</u>	<u>72.3</u>
Ours	73.9	79.6	80.6	70.1	75.2	77	69	74.7	83	84.7	71.5	84.4	77.0

表 4 展示了本算法在 Office-Home 数据集上 12 对迁移任务的分类准确度结果。本算法在 12 个迁移任务中均取得了最高准确度。在领域迁移的情况下, 标准自我训练方法会受到伪标签质量降低的影响。例如, 在领域分布差异较大的 Pr-Cl 任务中, 其他方法的准确度平均为 53.3%, 而本算法的准确度达到了 74.7%, 本算法的表现明显优于其他方法。

表 5 Office-31 数据集模型实验分类准确度 (单位: %)

	a-w	d-w	w-d	a-d	d-a	w-a	平均
DANN	82.0	96.9	99.1	79.7	68.2	67.4	82.22
CDAN	93.1	98.2	100	89.8	70.1	68.0	86.53
MDD	94.5	98.4	100	93.5	74.6	72.2	<u>88.87</u>
AFN	88.8	98.4	<u>99.8</u>	90.7	73.0	70.2	86.82
MCD	88.6	<u>98.5</u>	100	<u>92.2</u>	69.5	69.7	86.32
GTA	89.5	97.9	<u>99.8</u>	87.7	<u>78.8</u>	71.4	87.52
Ours	<u>92.5</u>	99.4±0.1	100	91.4	80.9	<u>71.8</u>	89.33

表 5 本算法在展示了 Office-31 数据集模型实验分类准确度。本发明在 6 个迁移任务中的 4 个取到了最高的准确率。值得注意的是, 在以往的工作中, CDAN、MDD 作为特征对

齐方法通常对大到小任务（A-W、A-D）表现更好，而 GTA 作为像素级自适应方法对小到小任务（D-A、W-A）可以获得更高精度。然而，本算法在 D-A、W-A 任务上取得了最高的精度，在 A-W、A-D 上分别取得了第二和第三的精度，在六项任务中取得了最高的平均准确度，这显示出本算法的有效性和高准确性。

表 6 在 VisDA-2017 上的消融实验

Method	Accuracy
FixMatch	74.5±0.2
Ours w/o ELR-loss	72.0±0.4
Ours+Entropy	76.2±0.6
Ours	87.1±0.3

表 6 研究了本算法各部分在训练中的作用。ELR-loss 表示早期正则化损失函数。Ours w/o ELR-loss 表示 Ours 删除了 ELR 损失函数。Ours+Entropy 使用标准熵代替 ELR-loss。观察表 4-6 的结果。虽然 Ours+Entropy 在 VisDA-2017 上的平均精度比 Ours w/o ELR-loss 高 5.5% 左右，但是仍比 Ours 落后约 12.5%，这表明 ELR-loss 是比标准熵更优秀的正则化方法。FixMatch 是标准自主训练方法，其表现虽然优于 Ours w/o ELR-loss，但是落后 Ours 约 14.5%，这表明在域间类分布偏移的情况下，Ours 通过引入 ELR-loss 解决伪标签噪声问题获得了相比于标准自主训练更高的鲁棒性。

5 总结

本研究提出了一款海洋垃圾清理机器人，通过螺旋滚筒推进、AI 视觉识别、路径规划等创新技术，实现了高效、自主的海陆两栖垃圾清理。这一设计为解决海洋垃圾污染和保护海洋生态提供了一种全新的解决方案。通过实验验证，该机器人展现出出色的清理能力和创新性的设计。此外，我们希望这项研究能够激发更多关于海洋垃圾治理的研究，并引领清洁海洋行动的新篇章。我们相信，基于机器人技术的海洋垃圾清理将为未来的环境保护和可持续发展做出重要贡献。

参考文献：

- [1] Xu, X.; Hou, Y.; Zhao, C.; et al. Research on cooperation mechanism of marine plastic waste management based on complex network evolutionary game. *Marine Policy* 2021, 134, 104774.

- [2]Bellou, N.;Gambardella, C.; Karantzalos, K.; et al. Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. *Nature Sustainability* 2021, 4(6), 516-524.
- [3] Williams, A. T.; Rangel-Buitrago, N. Marine litter: solutions for a major environmental problem. *Journal of coastal research* 2019,35(3), 648-663.
- [4]Sheavly,S.B.; Register, K. M. Marine debris & plastics: environmental concerns, sources, impacts and solutions. *Journal of Polymers and the Environment* 2007, 15, 301-305.
- [5]Eriksen, M.; Lebreton, L. C. M.; Carson, H. S.; et al. Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic piecesweighing over 250,000 tons afloat at sea. *Plo S one* 2014, 9(12), e111913.
- [6]王远,谢亚宏,张远南. 推动全球海洋事业发展不断开启新篇章[N]. 人民日报,2023-04-24(03).DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2023.004235.
- [7]黄辉.微塑料在中国近海的污染现状及其生物毒性和防控建议[J].海岸工程,2023,42(03):207-217.
- [8]马瑞雪. 微/纳米塑料经小鼠消化道入血及经尿排出的变化趋势研究[D].中国医科大学,2022.DOI:10.27652/d.cnki.gzyku.2022.000480.