

智能电缆除冰小机器人工作原理探析

赵壮壮¹ 王子琪²

1. 晋中学院物理与电子工程系, 山西 晋中 030619

2. 晋中学院经济管理系, 山西 晋中 030619

摘要: 人工智能是当前社会各个领域的一个热点研究项目, 旨在利用先进的技术手段提高社会生产的效率和质量。其中, 智能除冰小机器人作为一种新型的机器人, 具有自动化、高效化、精准化等优点, 在未来的社会发展中具有广阔的应用前景。本文主要探讨智能电缆除冰小机器人的工作原理和方案设计。首先, 简单介绍了智能除冰机器人的背景研究, 设计方案和传动零件的设计, 包括其运动装置、工作装置、传动装置、行走装置等方面。其次, 分析了该机器人的优点和缺点。最后, 就智能除冰小机器人的性能和效果, 并对其未来的发展进行了展望。

关键词: 除冰机器人; 自动化智能化; 自动除冰流程

1 智能电缆除冰小机器人的背景研究

1.1 研究背景

我们项目组正在研发一款全智能, 高效化的智能电缆除冰小机器人, 该机器人配有小型摄像头, 做到可视化的同时减轻重量; 行动采用电磁滑轮, 通过电路连接提供动力, 滑轮卡在线缆上面, 做到了运行稳定; 除冰主要为物理电磁相结合, 遇到较薄冰层直接使用电波除雪, 遇到较厚冰层先可以使用震动敲击然后进行电波处理, 一方面避免损伤电缆另一方面也缩减了成本, 清除高压线上的积冰, 有效维护电力供应, 还可避免人工高危作业, 提高救灾抢险效率^[1]。

1.2 研究现状

当前, 中国南北部分地区频繁出现的降雨、冻雨及云层降温天气导致输电线路表面覆冰, 造成线路压力剧增, 高压输电线路遭受大面积损毁。覆冰可能引发杆塔倾斜倒塌、导线断裂、绝缘子闪络、通信中断、停电停水等问题, 给民众生产生活带来极大不便, 造成严重经济损失。现有除冰作业主要依赖人工操作, 不仅效率低下、劳动强度大, 还存在极高安全风险。传统电缆除冰机器人虽能部分替代人工, 但在

应对厚冰时仍需人工辅助敲击, 需人机协同作业, 导致成本高昂、人力消耗大, 且无法适应多种恶劣天气环境。亟需研发一种操作便捷、高效节能、人力成本低、可应用于多种严酷环境且能独立清除厚冰的小型机器人。目前中国尚未有成熟除冰机器人产品, 但该领域国外技术相对领先, 代表性成果为加拿大研究机构设计的遥控除冰车, 主要用于清除输电线路覆冰。然而该设备存在体积笨重、结构复杂、仅能清理两基铁塔间覆冰且缺乏完全自主功能等缺陷, 未能彻底取代人工除冰^[2]。鉴于国外部分国家地理气候条件与中国相似甚至更为严苛, 为保障电力系统可靠性、提升高压输电线路除冰效率、减少经济损失并保障作业人员安全, 需借鉴国外先进技术优势, 结合国内实际需求进行创新突破。这款除冰机器人集高效, 成本低, 智能化, 可视化, 操作简易, 节省人力于一体, 在市面上有很强的竞争力, 在冰冻地区受益较好, 这款除冰机器人的投入使用, 无疑为雨雪冰冻地区的电力供应加上了一道强有力的保障, 因此研制安全有效的除冰机器人, 以代替人进行导电除冰, 具有良好的应用前景和实用意义^[3]。

2 除冰机器人的方案设计

2.1 工作原理

本设计采用电机带动齿轮旋转结构布局，四个轮子是其行走机构，将线路卡在四个轮子形成的直线空道上（如图一所示），具有小型轻质，除冰效率高，安装方便，适应环境能力强的特点^[4]。工作原理如图所示，除冰机器人工作是电机发动，齿轮传动，使得四个轮子可以转动（如图二），保障可以沿着线路行驶，同时履带也起着传动作用，电机带动齿轮齿轮通过履带将动能传递给金属杆，金属杆彼此连接四个轮子通过电机给齿轮动力（如图三），实现除冰机器人在电线上行走。至于锤击冰块装置采用四感机构，确保锤击装置（图二左边区域）在轮子中间区域活动，电源装置则放在了机身后半部分的下部（如图二），一方面为了美观机器人，另一方面使得重心下移增强稳定性。

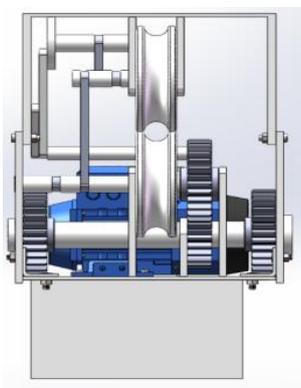


图 1

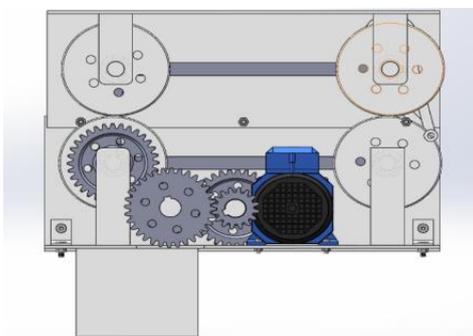


图 2

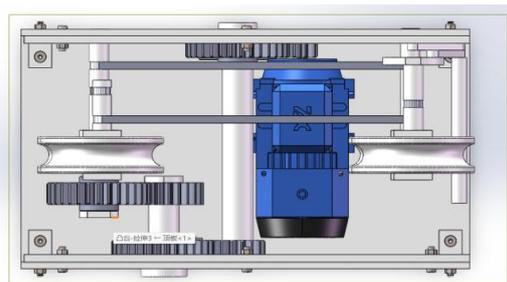


图 3

2.2 设计方案

2.2.1 驱动方式选择

1) 柴油机驱动的优点是马力大，适应环境能力强。但重量和所占空间过大，驱动时会产生较大振动，会导致电线上下摇晃，不适用于在输电上行走使用，另外对环境会产生污染，不环保。

2) 电动机驱动，其优势在于型号较多，选择范围广。在质量和振动方面有着不可替代的优势。对环境无污染，可以满足环保要求。

因此选择电动机驱动方式。

2.2.2 减速方式选择

1) 带传动减速:优点是强度较大，耐湿性好，廉价，可以传送较大功率。但所需空间比较大，不适用于受空间限制要求的小型除冰机器人。

2) 链条传动减速:其要求较低，链轮齿受力情况较好承载能力较大:有一定的缓冲与减震性能:中心距可大而结构轻便。可以适应恶劣的工作环境。但是同样，所需空间较大，不适用于受空间限制要求的小型除冰机器人。

3) 齿轮传动:传动比范围大，可用于减速或增速:速度和传递功率范围大，可用于高速($V > 40\text{m/s}$)、中速和低速($V < 25\text{m/s}$)传动:功率可从小于 1W 到 105kW:传动效率高，一对高精度渐开线圆柱齿轮，效率可达 99%以上:结构紧凑，适用于短距离传动

4) 蜗杆传动:蜗杆传动用于传递运动和传动比大，工作稳定，结构紧凑，可大功率驱动。但其效率较低，容易发热，蜗轮制造需要较贵

的减摩金属，成本较高。链传动和带传动虽然适应环境的能力比较强，但是需要的传动空间比较大，不适合在除冰车上使用。蜗杆传动效率低，易发热，环境适应性差。所以综合考虑各方面因素，通过齿轮传动机构选择减速方式。

2.2.3 行走方式选择

1) 履带行走：

履带行走其优势在于接地面积大，比较稳定，越过障碍物能力强，牵引力也比较强大，负载质量大，但其能耗较高，适合道路土地工作，不适用于电缆上工作。

2) 轮式行走：

轮式行走应用范围极广，可在大多数路况行走，适应能力较强。质量较轻，便于携带、装配、更换，在实际操作中方便，复杂性低。适用于线路除冰机器人行走选择。

3) 液压缸式传动：

液压缸传动，比较平稳，一方面具有高功率和自动化，另一方面其结构紧凑，可以灵活布局，同时方便人们操作，针对性强。但其结构复杂，上手难度较高，还有泄露燃油的危险，结合实际和操作简易，不适用于电缆除冰。

因此除冰小机器人的行走机构采用轮式轮式行走机构。通过配备电池，电机发电，带动齿轮转动，金属杆进行轮子的制动，使得能量传递，损耗较小。为了使轮式行走机构在输电线上行走更加平稳，将四个轮子中间设置凹槽卡住线缆并且将电池设计机身后半部分底部增强稳定性。

2.2.4 除冰方式选择

1) 振动驱动

通过偏心电机或振动锤产生高频振动，使覆冰层因共振碎裂并抖落。通过伺服电机控制振动频率，适配不同冰层厚度减少线缆损伤。无需停电，可带电作业；对线缆无机械损伤，适用复杂地形；除冰效率较高（如单边 20mm 冰层，速度达 6-8m/min）。

2) 碾压驱动

通过碾压轮或履带对覆冰层施加压力，直接压碎冰层。动态调整碾压力度，适应不同冰层硬度；结合大推力电机，清除坚冰。对厚冰层（如 >60mm）效果显著；结构简单，维护成本低，但所需操作空间大，配备物体比较重。

3) 冲击驱动

通过切削刀具或空包弹爆炸产生的冲击力碎冰。无人机挂载撞击棒：适用于松散覆雪，但对雨凇等坚冰效果有限，但他的冲击力强，但可能损伤线缆。全风险高，易导致线缆疲劳损坏；适用场景受限，仅适合特定冰层类型。

4) 机械臂驱动

通过双臂或多关节机械臂抓取并破冰。结合振动与切割功能，清除冰层后沿导线行走。灵活性强，可应对复杂冰层；集成度高，可扩展巡检功能。但其可操作性低，所需空间较大，配备较重，

5) 牵引驱动

通过无人机或绝缘杆牵引机器人上线，再通过行走轮或履带移动，可以利用无人机挂载牵引绳，机器人自主攀爬至导线。其优势在于部署便捷，适应高空作业；可以减少人工攀爬风险。但他操作要求较高，系统更为复杂

综上所述，结合实际因素，选择震动除冰（锤击除冰）一方面具有高效性与安全性；另一方面振动驱动可带电作业，避免停电损失，且振动频率智能匹配冰层特性，碎冰效率高，适用于雨凇、雾凇等多种覆冰类型，且能在 -20℃ 至 50℃、强风等极端条件下工作。同时相比冲击驱动，振动驱动无需爆炸装置，维护成本低；相比碾压驱动，对线缆损伤更小，延长设备寿命 5. 行走轮同步行走方法与减震方法

2.3 主体结构的设计

2.3.1 除冰机器人上部

除冰机器人上部能把小车悬在线缆上，提供向上的支撑力。同时，配备小锤装置，具有除冰能力，可以清理完全的覆冰。前端是除冰

装置的一部分,能使其完成除冰工作,采用四感装置保持其在固定范围工作,针对性除冰。

2.3.2 除冰机器人下部

除冰机器人下部向小车提供向前的推力,推进小车向前行走。同时,通过电池组,电动机,齿轮,金属杆等一系列连环装置实现动力传输。

2.3.3 敲击除冰部位

为了节约资源,除冰主要为物理电磁相结合,该机器人配有锤击装置,遇到较薄冰层直接使用电波除雪,遇到较厚冰层先可以使用震动敲击然后进行电波处理,一方面避免损伤电缆另一方面也缩减了成本,清除高压线上的积冰,有效维护电力供应,还可避免人工高危作业,提高救灾抢险效率。

2.3.4 电池组支架

电池组支架用于存放电池组,为除冰机构和行走机构提供电能。可以有效减轻输电线轮式除冰机的重量。同时使得机身的重心下移,保持机身稳定。

3 传动零件的设计

3.1 齿轮机构的设计

1. 选定齿轮的类型,精度等级,材料以及齿数

1) 传动方案。因为齿轮受轴向力很小,所以选用直齿圆柱齿轮传动,现实比较常见,一方面制作比较简单另一方面可以降低成本。

2) 该输电线轮式除冰机工作时的行进速度较低,所以选择 8 级精度齿轮(GB10095-88)。

3) 齿轮的核心选择要求

高承载能力与抗冲击性,需承受除冰作业中的高频振动、冰层破碎的冲击力

高精度与传动效率,需实现精准的除冰参数调节,齿轮传动误差需控制在 $\pm 0.1^\circ$ 以内。传动效率需 $\geq 95\%$,以减少能量损耗并延长续航。

耐低温与抗腐蚀性,适应 -25°C 以下低温环境,避免材料脆化或润滑失效。需耐受雨雪、

盐雾等腐蚀性介质。

轻量化与紧凑设计,需匹配机器人整体轻量化需求,结构需紧凑,避免占用过多空间影响机器人攀爬或除冰机构动作。

表面处理与耐磨性,表面需具备高硬度以抵抗冰层摩擦。可采用渗碳、氮化等工艺提升抗疲劳性能。

4) 齿轮的材料选择结果

综合上述要求,合金钢或表面强化铝合金是最优选择,具体分析如下:

合金钢(如 20CrMnTi)

优势:高强度(抗拉强度 $\geq 800\text{MPa}$)、高耐磨性,适合高负载场景;通过渗碳处理可提升表面硬度至 HRC58-62,延长使用寿命。

应用场景:高压线缆机器人振动除冰机构的核心传动齿轮。

表面强化铝合金(如 7075-T6+硬质阳极氧化)

优势:重量轻(密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$)、耐腐蚀,阳极氧化后表面硬度可达 HV300,适用于轻量化需求高的机器人本体传动系统。

应用场景:桥梁缆索机器人攀爬机构的驱动齿轮。

不锈钢(如 316L)

优势:耐腐蚀性强,适合潮湿、含盐环境,但强度与耐磨性略低于合金钢。

应用场景:沿海地区桥梁或输电线路的辅助传动齿轮。

5) 其他设计考量

齿轮类型选择:

行星齿轮:结构紧凑,适合空间受限的机器人本体

润滑方案:采用低温合成润滑油或固体润滑涂层,确保 -25°C 下齿轮正常运转。

动态测试:需通过振动台模拟冰层冲击、高温低温循环测试,验证齿轮组的可靠性。

总结除冰机器人齿轮的最终选择表面强化铝合金,其适合轻量化优先的场景。实际应

用中，可结合复合齿轮（如钢芯铝壳）进一步优化性能。

3.2 金属杆的材料选择

金属杆的材料主要是碳钢和合金钢。钢轴材料使用多数用轧制圆钢和锻件，有的直接用圆形钢^[5]。

钛合金或高强度铝合金可能是最优选择，具体分析如下：

钛合金优势：轻质（密度约 4.5g/cm^3 ）、高强度（抗拉强度 $\geq 900\text{MPa}$ ）、耐腐蚀性优异，尤其适合高寒潮湿环境。

应用场景：适用于需要高强度且需频繁更换的部件，如冠能机器人的双臂破冰机构。

高强度铝合金（如 7075-T6）

优势：重量轻（密度约 2.7g/cm^3 ）、成本较低，抗疲劳性能优异，可通过表面阳极氧化提升耐腐蚀性。

应用场景：适合对重量敏感的机器人本体连接结构，如配网机器人的行走轮支架。

不锈钢（如 316L）

优势：耐腐蚀性强，适用于盐雾、高湿度环境，但密度较高（ 8.0g/cm^3 ）。

应用场景：若机器人需长期暴露于沿海或工业污染区域，可作为备选方案。

其他设计考量

结构优化：采用空心管状设计或蜂窝结构，兼顾轻量化与强度。

表面处理：通过喷丸强化、涂层（如陶瓷涂层）提升耐磨性及抗冰附着力。

动态测试：需通过 35° 爬坡测试及模拟冰层冲击实验，验证实际工况下的可靠性。

4 总结

除冰机器人金属杆的最终选择需根据具体应用场景（如高压或配网线路）、冰层类型（雨淞/雪淞）及成本预算综合评估。钛合金在高性能需求场景中更具优势，而高强度铝合金则适用于轻量化优先的场景。实际应用中，可结合复合材料（如碳纤维增强金属基复合材料）进一步优化性能。

参考文献

- [1] 梁志强, 郑浩然, 杜宇超. 弱刚度构件工业机器人铣削偏转误差建模[J]. 2025, 4(14): 15-19.
- [2] 赵小川, 杨立辉, 侯保江. 机器人压力传感器设计及其信息处理[J]. 计算机测量与控制, 2025, 19(07): 1801-1803.
- [3] 陈路, 谢维斯, 谭杰, 陈丽竹, 高勇. 面向移动机器人的多传感器紧耦合导航定位方法[J]. 电子科技大学学报. 2025, 4(14): 25-28.
- [4] 纪娜. 基于 Android 的工业移动机器人远程控制终端软件设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 41(11): 27-31.
- [5] 刘建伟, 周娅, 黄祖钦. 高压输电线路除冰技术综述[J]. 机械设计与制造. 2023, 4(11): 37-41.

作者简介: 赵壮壮 (2003—), 男, 汉族, 山西临汾人, 晋中学院物理与电子工程系 2022 级电子科学与技术 2202 班本科生;

王子琪 (2006—), 女, 汉族, 山西忻州人, 晋中学院经济管理系 2022 级财务管理 01 班本科生

*基金项目: 本文系 2024 年度晋中学院大学生创新创业训练项目 (项目级别: 国家级, 项目名称: 智能电缆除冰小机器人, 项目编号: 20241156) 阶段性研究成果, 并受上述基金计划资助。