DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260516

机器人在斜拉索表观缺陷检测技术中的应用

白午龙,单一舰
(上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032)

摘　要: 为解决斜拉索表观缺陷人工检测风险高、效率低、精度不足等问题,推动桥梁运维智能化发展,开展机器人在斜拉索表观缺陷检测技术中的应用研究。梳理斜拉索检测机器人的系统组成、主流类型,以及图像采集、缺陷识别、精准定位、动力学控制等核心技术;分析当前机器人在复杂工况适配、行业标准、安全可靠性方面存在的挑战。研究表明,轮式、履带式、仿蛇式及可折展式机器人已在工程中得到应用,未来需要向智能化、轻量化、标准化、安全化方向发展,为斜拉索全生命周期运维提供技术支撑。

关键词: 桥梁运维;斜拉索;表观缺陷;检测机器人
中图分类号: U446　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0309-07

Application of Robots in Apparent Defect Detection Technology of Stay Cables

BAI Wulong, SHAN Yijian
(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To address the high risk, low efficiency and insufficient accuracy of manual detection for apparent defects of stay cables, and promote the intelligent bridge maintenance, the research on the application of robots in the apparent defect detection technology of stay cables is conducted. The system composition, mainstream types of stay cable detection robots, as well as core technologies such as image acquisition, defect recognition, precise positioning and dynamic control are sorted out. The challenges currently faced by robots in terms of complex working condition adaptation, industry standards, safety and reliability are analyzed. Research result shows that wheeled, tracked, snake-like and foldable robots have been applied in engineering, and need to develop in the directions of intelligence, lightweight, standardization and safety in the future, which provides technical support for the full life cycle operation and maintenance of stay cables.

Keywords: bridge operation and maintenance; stay cables; apparent defects; detection robots

0　引　言

斜拉桥凭借其跨度大、结构轻盈、受力科学、造型美观等显著特点,已被广泛应用于跨越江河湖海、峡谷深渊的大型交通工程之中,成为现代桥梁工程领域的重要结构型式。斜拉索作为斜拉桥的“生命线”,主要承担着将主梁荷载传递至索塔的关键职责,其工程造价约占桥梁总造价的25%~30%[1]。斜拉索表面铺设的高密度聚乙烯(HDPE)护套,是抵御外界环境侵蚀、防止内部高强钢丝锈蚀、延长索体设计使用寿命的关键防护结构。

然而,斜拉索长期处于复杂、恶劣的自然环境中,同时承受着车辆荷载、风荷载等交变应力的作用,其表面的HDPE护套极易出现划痕、开裂、起皮、锈蚀凹坑等多种表观缺陷(见图1)。从历史案例来看,多座桥梁因斜拉索失效引发了严重的安全隐患与运维难题:济南黄河大桥主体斜拉索锈蚀程度达到15%,广东九江大桥56.25%的斜拉索外皮出现大型裂口;在国际上,委内瑞拉Maracibo大桥、德国Kohlbrand大桥也均出现了不同程度的拉索锈蚀断裂问题。这些桥梁均须通过大规模更换拉索才能保障其安全运营[2]。

传统的斜拉索检测工作主要依靠人工完成,作业人员需要借助液压升降平台、吊篮或钢制脚手架,通过滑轮设备及绳索带动脚手架沿斜拉索向上攀爬,凭借肉眼观察完成缺陷识别工作[2]。这种作业方式不仅劳动强度大、高空作业风险高,而且检测结

收稿日期:2026-05-09
作者简介:白午龙(1988—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁检测与状态评估工作。



图1　斜拉索损伤照片

果容易受到作业人员经验、责任心等主观因素的影响，难以实现缺陷的精准识别与量化评估。与此同时，数百千克重的脚手架搭建流程繁琐、操作不便，其滑轮与斜拉索表面的接触还会对索体造成不可逆的损伤，再加上受自然气候条件的限制，甚至可能加快斜拉索的失效速度[2]。随着机器人技术、机器视觉、人工智能等多学科领域的深度融合与快速发展，斜拉索表观缺陷检测机器人应运而生。该类机器人通过自动化攀爬与精准化检测，有效解决了传统人工检测的诸多不足，显著提高了斜拉索检测的安全性、效率与精度，已成为桥梁运维领域的研究热点与发展方向。其中，可折展桥梁斜拉索检测机器人（FIRSCB）作为新型检测机器人分支，凭借其轻量化、可折展、索径适应性强等优势，有效弥补了传统机器人的不足[3]。系统梳理机器人在斜拉索表观缺陷检测技术中的应用现状，重点分析主流机器人类型与核心技术，剖析当前存在的问题与挑战，展望未来发展方向，为相关技术研发与工程应用提供参考依据。

1　斜拉索表观缺陷检测机器人系统构成与主流类型

斜拉索表观缺陷检测机器人是一种融合了机械工程、自动化控制、机器视觉、数据传输等多学科技术的复杂智能化设备，其核心功能是实现斜拉索表面的自动化攀爬与表观缺陷的精准检测。该机器人通常由机械爬升系统、视觉检测系统、数据传输系统及定位系统4个部分构成（见图2），形成“攀爬—采集—分析—定位”的完整检测流程。不同类型检测机器人的系统构成在核心框架上基本一致，均围绕稳定攀爬与精准检测两大核心需求开展设计工作。

1.1　检测机器人核心系统构成

机械爬升系统是检测机器人的核心承载与移动

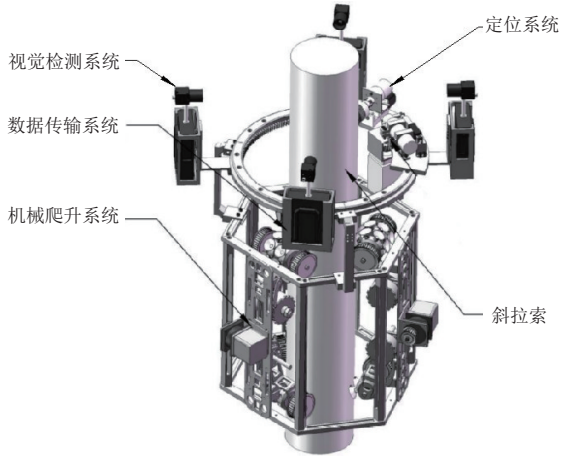


图2　机器人整体结构图

部件，其性能直接决定了机器人的攀爬稳定性与索径适配能力。该系统需要具备较强的附着性、较宽的索径适配范围、良好的越障能力及运动稳定性，以确保机器人能够在不同直径、不同倾角的斜拉索上安全稳定地完成攀爬作业。机械爬升系统的行走机构通常采用轮系、履带或多关节结构，结合弹簧预紧、螺杆压紧等预紧装置与索体紧密贴合，可有效避免攀爬过程中出现偏移、打滑等问题。其中，何鸿宇[4]佐证了轮系行走机构搭配弹簧预紧装置的防偏移打滑效果，张劲泉等[5]认为全面覆盖三类行走机构均须通过预紧装置保障贴合性。岳一领等[6]设计的多功能攀爬机器人变形机构，为行走机构的结构优化提供了重要的技术参考。

视觉检测系统承担着索体表面图像采集与缺陷识别的核心任务。为实现斜拉索表面360°无死角检测，机器人通常采用3~4台相机环形布置的方式，相邻相机的拍摄范围保留一定的重叠区域，确保不会出现检测盲区。部分高端检测机器人还额外集成了微磁检测、超声检测等无损检测装置，可实现斜拉索内部断丝等缺陷的同步检测，进一步提高了检测工作的全面性[2]。

数据传输系统主要采用无线通信技术，如2.4 GHz无线电、5G通信、HC-12无线模块等，实现图像数据与机器人运行状态参数的实时传输[2]。其中，HC-12无线模块的通信距离可达1 000 m，能够充分满足高空远距离作业的数据传输需求，确保地面监控中心可以实时获取机器人的作业数据。

定位系统则借助电机编码器、激光测距仪等设备，精准记录机器人在索体上的位置坐标，为缺陷定位提供精准的数据支撑。部分机器人的定位精度可达到毫米级[4]。

1.2　检测机器人主流类型

根据爬行方式的差异，目前应用于斜拉索表观缺陷检测的机器人主要分为轮式、履带式、仿蛇式3类。各类机器人基于不同的结构设计，适用于不同的检测场景与索体工况，是当前工程应用中的主流类型。可折展式机器人（FIRSCB）作为新型分支，能够适配特定场景的检测需求，成为主流机器人的重要补充[2-3]。

1.2.1　轮式检测机器人

轮式检测机器人（见图3）采用轮式行走机构，通过弹簧预紧、螺杆压紧或磁吸等方式实现与索体的紧密附着，具有结构简单、爬升速度快（可达0~10 m/min）、制造成本低、操作便捷等明显优势，是目前应用最为广泛的斜拉索检测机器人类型[4]。



图3　轮式检测机器人现场照片

南京邮电大学研发的双边轮式缆索检测机器人，通过弹簧自适应调节预紧力，能够灵活适应不同直径的斜拉索，已成功应用于武汉军山大桥、十堰汉江大桥等多个实际桥梁工程的检测工作中，展现出良好的工程适用性[5]。Xu F Y 等[7]设计的双边轮式缆索攀爬机器人，为该类型机器人的结构优化与性能提升提供了重要的理论与试验支持。

尽管轮式检测机器人具有诸多优势，但也存在固有的缺陷：轮与索体的接触面积较小，为保证足够的附着力，需要精准控制夹持力，夹持力过大可能会损伤PE保护层，过小则容易导致机器人打滑；环形结构设计使其难以跨越避雷带、阻尼装置、索力传感器等特殊障碍物，限制了其在复杂工况下的应用范围[8]。

1.2.2　履带式检测机器人

履带式检测机器人（见图4）采用履带式行走机构，通过履带与索体表面的大面积接触来增大摩擦力，具有更强的附着稳定性，尤其适用于非光滑表面、带螺旋线或表面有轻微损伤的斜拉索检测场景[1]。

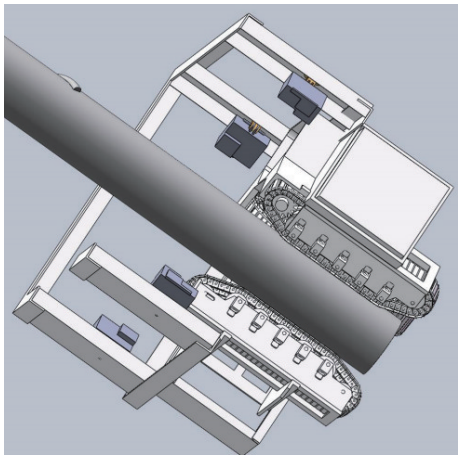


图4　履带式检测机器人三维模型图

韩国成均馆大学研发的MRC²IN系列履带式机器人，通过优化履带纹路提高了对索体表面的适应性，配备快速拆卸装置，可在10 min内完成安装与拆卸，有效提升了多根索体的检测效率，能够携带多种检测设备完成长距离攀爬作业[5]。

福建工程学院设计的弹簧缓冲履带式机器人，在含3~5 mm螺旋线的斜拉索上展现出优异的跨越性能和抗缆索旋转能力[1]。研发团队基于Ansys有限元法对机器人整体结构进行了系统的力学分析与优化，精准确定了薄弱零件并进行了结构改进，通过仿真与试验验证，有效避免了机器人夹紧力对索体PE保护层的损伤[1]。

履带式检测机器人的负载能力较强，可搭载更多种类的检测设备，但同时也存在结构相对复杂、机械损耗较大、爬升速度较慢等不足，更适用于对检测精度要求高、索体表面工况复杂的检测场景[8]。

1.2.3　仿蛇式检测机器人

仿蛇式检测机器人（见图5）基于仿生学原理，采用多关节模块化结构设计，通过螺旋缠绕、身体摆动等方式实现索体攀爬，具有极强的灵活性和环境适应性，能够灵活适应弯曲、倾斜、变径等复杂索形[5]。

华南理工大学研发的蛇形机器人，采用正交关节连接设计，通过调整螺旋半径、螺距和爬升速度，实现了在不同倾角斜拉索上的稳定攀爬；机器人头



图5　仿蛇式检测机器人照片

部搭载多传感器与高清相机，可完成缺陷图像采集与数据融合分析，有效提高了缺陷检测的精准度[5]。

美国卡内基梅隆大学研制的超冗余串联蛇形机器人，采用模块化架构与全封闭执行器，通过3个自由度的万向节实现摆动、侧绕和滚动等多种动作，能够灵活适应复杂的索体环境[4]。魏武等[9]对蛇形机器人在缆索检测中的螺旋滚动步态开展了深入研究，为其攀爬稳定性的优化提供了重要的技术支撑。

仿蛇式机器人的核心优势在于对复杂索形的适应性强，可跨越小型障碍物，但也存在明显的短板：多关节协同控制算法复杂，对控制系统的实时性与可靠性要求极高；电池续航能力有限，难以满足长距离斜拉索的检测需求；关节磨损与密封问题突出，在恶劣环境下的耐久性有待进一步提高[5]。

1.2.4　可折展式检测机器人（FIRSCB）

可折展式检测机器人（FIRSCB）（见图6）是为解决传统机器人在部分场景中适配不足的问题而研发的补充类型，其核心优势在于可折展结构带来的索径适配灵活性与安装便捷性[2-3]。该类机器人采用可折展构型设计，能够灵活适配不同直径的斜拉索，安装与拆卸流程简便，目前已完成实验室样机试验，可在特定中小型桥梁或复杂索径场景中作为补充应用[2-3]。总体而言，该类型机器人的技术仍处于完善阶段，尚未实现大规模工程应用，未来还需要通过大量试验与工程实践来优化其性能。

2　斜拉索表观缺陷检测机器人核心技术

斜拉索表观缺陷检测机器人的精准高效作业，离不开图像采集与预处理、缺陷识别与分类、缺陷精准定位、动力学仿真与控制等核心技术的协同支撑。这些核心技术的不断优化与创新，推动着检测机器人向智能化、精准化、高效化方向发展，为斜拉索表观缺陷的精准检测提供了重要保障。

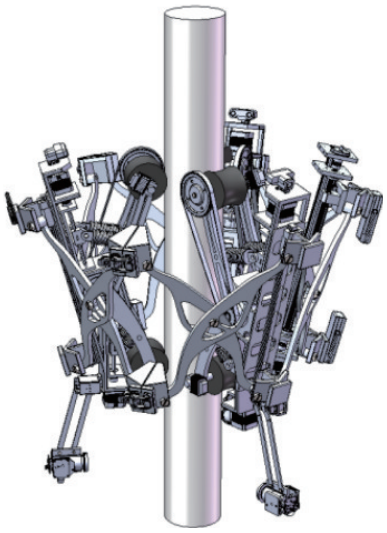


图6　可折展式检测机器人（FIRSCB）CAD模型

2.1　图像采集与预处理技术

图像采集与预处理是缺陷检测的基础环节，其处理效果直接关系到缺陷识别的精度与效率。为实现索体表面的全周覆盖检测，机器人通常采用3~4台相机环形布置的方案，相邻相机的拍摄范围保留一定的重叠区域，确保无检测盲区。图像拼接技术是实现索体全表面可视化的关键技术，目前应用最为广泛的是SIFT（尺度不变特征变换）算法。该算法提取的特征点具有稳定性好、信息量丰富的特点，可实现不同角度、不同光照条件下的图像精准拼接[8]。

李新科等[10]提出的简化特征变换算法，优化了SIFT算法的计算步骤，大幅提升了图像拼接效率。改进后的SIFT算法减少了对无用区域的运算，显著提高了特征点提取效率与图像拼接精度。刘朝涛等[11]基于图像处理技术研制的桥梁缆索检测系统，也充分验证了图像预处理技术在缺陷提取中的有效性。

图像预处理技术主要用于消除图像噪声干扰、增强缺陷特征，常用的处理方法包括灰度转换、阈值处理、中值滤波等[4]。由于彩色图像数据量大、计算复杂度高，通常先将其转换为灰度图像，以有效减少数据处理量；采用阈值处理（如反二值化阈值处理）分离目标与背景，精准提取索体表面特征；针对图像采集过程中产生的椒盐噪声，多采用中值滤波技术进行降噪处理。重庆科技学院研发的检测机器人采用5×5窗口中值滤波，有效去除了椒盐噪声；通过反二值化阈值处理（阈值设为150），成功提取了缆索表面特征，为后续的缺陷识别奠定了坚实基础[4]。

部分高端检测机器人还集成了无损检测数据处理功能，通过微磁检测等模块采集索体内部缺陷数

据，结合表面图像数据实现索体的全方位检测，进一步提升了检测的全面性。周建庭等[12]开展的基于磁记忆的钢绞线腐蚀检测试验，为无损检测模块的优化提供了重要的试验依据。

2.2　缺陷识别与分类技术

缺陷识别与分类是检测机器人的核心功能，其技术发展经历了从传统边缘检测算子到基于深度学习的智能识别模型的迭代升级过程[8]。在传统边缘检测算子中，Laplacian 算子对噪声敏感，检测出的缺陷边界较为粗糙；Canny 算子检测精度高，但容易过度提取表面纹理特征，导致缺陷误判；Sobel 算子兼顾检测速度与边缘完整性，边缘宽度适中，成为斜拉索缺陷检测中的首选方案[4]。

随着人工智能技术的快速发展，深度学习模型在缺陷识别与分类中展现出了巨大的优势。迁移学习由于能够有效解决样本不足的问题，被广泛应用于斜拉索缺陷检测领域。重庆科技学院构建的 VGG19 迁移学习模型，利用提取的缺陷边缘信息作为训练集，训练全连接层的权值与阈值，实现了对横向开裂、纵向开裂、刮痕、起皱等常见缺陷的自动分类[4]。

余朝阳等[13]基于卷积神经网络研发的 Faster-RCNN 模型，通过预训练与微调，实现了多类型缺陷的同时检测与定位，平均准确率达到 87.8%。Hou Shitong 等[8]提出的迁移学习算法，将混凝土裂缝的深度学习模型迁移至斜拉索划痕缺陷识别中，仅需少量斜拉索缺陷样本即可建立高精度识别模型。李帮建[14]基于计算机视觉技术开展的表面缺陷检测研究，也为斜拉索缺陷识别算法的优化提供了重要的技术参考。

2.3　缺陷精准定位技术

缺陷的精准定位是后续运维作业的重要前提，目前检测机器人主要采用“电机编码器 + 无线传输”的组合定位方案。电机编码器与机器人驱动轮相连，通过自动判断电机旋转方向并进行计数，实时获取机器人的爬行距离与速度信息；这些数据经下位机处理后，通过无线模块传输至地面 PC 端，结合机器人的初始位置坐标，即可精准计算出缺陷在索体上的具体位置[4]。

东南大学研发的检索机器人通过该定位方案，实现了缺陷位置的毫米级定位，地面监控中心可实时显示缺陷坐标与索体三维分布图，为后续的运维作业提供了精准指引。部分高端机器人还融合了激光测距仪、惯性导航模块等设备，进一步提高了定位精度与稳定性，尤其适用于长距离、大倾角斜拉索的检测场景[5]。王翔[15]研究的桥梁拉索内部断丝电磁探测技术，可与机器人定位系统相结合，实现内部断丝缺陷的精准定位。

2.4　动力学仿真与控制技术

动力学仿真与控制技术是保障检测机器人稳定作业的关键。目前，主流检测机器人的控制技术主要基于 PID 控制与模糊 PID 控制，其中模糊 PID 控制由于响应速度快、超调量小，被广泛应用于机器人行走控制[2]。研发团队通常通过 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真，构建机器人虚拟样机模型，设置索体接触参数与障碍模型，验证机器人的防偏移效果、越障性能与工作稳定性，为实物样机的优化提供重要支撑[2]。

此外，机器人多采用模糊逻辑控制实现抱缆力的自适应调节，通过压力传感器实时监测机器人与索体的接触压力，自动调整压紧力，有效避免了因压紧力过大损伤索体或过小导致打滑的问题，进一步提高了机器人的攀爬稳定性[2]。

3　机器人应用存在的问题与挑战

结合检测机器人的技术研发与工程应用现状可以看出，虽然该技术已有效解决了传统人工检测的诸多弊端，在斜拉索检测中发挥了重要作用，但在复杂工况适配、行业标准制定、安全可靠性等方面仍存在诸多问题与挑战。这些问题制约了检测机器人的规模化推广，也对其优化升级提出了更高的要求。

3.1　复杂工况适配能力不足

斜拉索的服役环境复杂多样，强风、暴雨、高温、高湿等恶劣天气会严重影响机器人的作业稳定性；索体上的避雷带、阻尼装置、索力传感器等特殊障碍物，给机器人的越障带来了巨大挑战，尤其是轮式机器人的环形结构，难以跨越此类障碍物[8]。非光滑表面斜拉索（如带螺旋线、凸凹面索）的缺陷检测难度较大，表面凹凸结构容易与缺陷特征混淆，导致缺陷识别准确率下降；大倾角（接近 90°）斜拉索的攀爬稳定性问题突出，机器人容易出现打滑、倾覆风险，对附着机构与驱动系统的设计要求极高[4]。总体而言，各类机器人在复杂工况下的稳定性仍需要进一步提升，适配范围需要持续拓展。

3.2　行业标准缺失与通用性不足

目前，我国尚未制定统一的斜拉索机器人检测

行业标准，不同厂家研发的机器人在索径适配范围、检测精度、缺陷分类标准、数据格式等方面存在明显差异，导致检测数据难以实现互通共享，无法形成统一的运维数据库[8]。机器人的通用性较差，多数机器人是针对特定类型的斜拉索或缺陷设计的，难以适应不同桥梁的个性化需求。同时，设备成本较高，小型桥梁运维单位难以承担，限制了其规模化应用[5]。此外，检测数据与桥梁运维系统的融合度不足，未能形成“检测—评估—预测”的全生命周期管理闭环，检测数据的价值未能得到充分发挥[5]。

3.3　安全可靠性有待提升

高空作业环境对机器人的安全可靠性提出了极高要求，一旦发生机器人坠落、部件脱落等事故，可能会造成索体损伤、交通中断等严重后果[5]。当前，机器人的故障自诊断与应急处理能力不足，在复杂工况下出现故障时，难以实现自主应急处置（如紧急制动、稳定附着）；无线通信的稳定性容易受到环境干扰，导致控制指令传输延迟或数据丢失，影响作业安全性[5]。此外，部分机器人的轻量化设计不够完善，自重过大可能会对索体产生额外荷载，长期作业可能会影响斜拉索的受力状态[4]。

4　未来发展方向展望

结合当前斜拉索表观缺陷检测机器人的技术现状及存在的问题，未来该技术应聚焦智能化、高效化、通用化、安全化的发展方向，通过多学科技术的融合创新，推动机器人技术的不断优化与升级，实现其大规模工程应用。

4.1　智能化水平持续提升

融合深度学习与机器视觉技术，开发多缺陷类型自适应识别算法，提高非光滑表面、复杂光照条件下的缺陷识别准确率，减少环境干扰带来的误判[8]。引入数字孪生技术，构建斜拉索数字孪生模型，将检测数据与数字模型实时融合，实现缺陷发展趋势的精准预测与运维方案的智能规划[5]。陈开利[16]的研究表明，日本在桥梁自动化检测技术领域已实现多机器人协同、长距离续航等突破，其技术经验可为我国机器人智能化升级提供参考。发展多传感器数据融合技术，整合视觉、激光、红外等多源传感器数据，实现缺陷信息的全面提取与精准评估，提高复杂缺陷的识别能力[5]。探索基于强化学习的机器人自主控制算法，实现攀爬路径、越障策略的自主优化，减少人工干预[5]。

4.2　轻量化与多功能集成发展

采用碳纤维复合材料、钛合金等轻质高强度材料，优化机器人结构设计（如镂空设计、模块化设计），降低机器人自重（目标控制在20 kg以内），减少对索体的额外荷载[11]。王晓琳等[17]研发的轻型碳纤维爬索机器人，验证了轻质材料在机器人轻量化设计中的有效性。推动多功能集成设计，在同一机器人平台上集成检测、清洗、涂覆、探伤等多种功能，实现“一次攀爬、多重作业”，大幅提升运维效率[5]。优化能源供给系统，采用高效锂电池、太阳能辅助供电等方案，延长机器人的续航时间，满足长距离斜拉索的检测需求[5]。

4.3　标准化与协同化发展

加快制定斜拉索机器人检测的行业标准，统一缺陷分类方法、检测精度要求、数据格式规范等，促进不同厂家设备的互联互通与数据共享[11]。构建多机器人协同作业网络，结合无人机进行全局巡查与机器人部署引导，形成“无人机巡查-专用机器人精检”的立体化运维体系，提高运维覆盖面与效率[5]。Zheng Z L等[18]研发的CCRobot-V蠕动式协同缆索机器人，为多机器人协同作业提供了典型范例。推动检测数据与桥梁BIM（建筑信息模型）系统、运维管理平台的深度融合，建立斜拉索全生命周期运维数据库，实现缺陷信息的可追溯、可分析、可预测，为桥梁运维决策提供数据支撑[5]。

4.4　安全可靠性持续优化

研发高可靠性的附着与驱动系统，采用冗余设计、防滑制动装置等，提高机器人在大倾角、复杂索形下的攀爬稳定性；增强故障自诊断与应急处理能力，开发智能监测模块，实时监测机器人的运行状态，当出现故障时可快速启动紧急制动、稳定附着等应急措施[5]。优化无线通信方案，采用5G + 边缘计算、抗干扰通信模块等，保障控制指令与数据传输的稳定性与实时性；开发机器人远程救援系统，当机器人发生故障无法自主返回时，可通过救援机器人实现远程回收，降低事故损失[5]。

5　结　论

目前，机器人在斜拉索表观缺陷检测技术中的应用已取得了显著成效，检测技术体系日趋成熟，彻底改变了传统人工检测高危、低效的现状。从技术应用现状来看，已形成轮式、履带式、仿蛇式三大主流检测机器人类型，可折展式检测机器人作为补充

分支逐步完善，各类机器人分别适用于不同的索体工况与检测需求；图像采集与预处理、缺陷识别与分类、精准定位等核心技术不断优化，深度学习、多传感器融合等先进技术的应用，进一步提高了检测精度与自动化水平。多款机器人已成功应用于杭州湾跨海大桥、武汉军山大桥等实际工程中，充分验证了该技术的工程适用性。

尽管检测机器人技术已实现规模化试点应用，但在实际推广过程中仍面临诸多突出问题与挑战。机器人对复杂工况的适配能力不足，难以应对恶劣天气、特殊障碍物及非光滑、大倾角索体等复杂场景；行业标准的缺失导致不同设备的数据无法互通、通用性较差，且设备成本偏高，制约了小型运维单位的应用；高空作业的安全可靠性仍须提升，故障应急处置能力与无线通信稳定性有待进一步优化。这些问题共同限制了检测机器人技术的规模化、常态化应用。

未来，斜拉索表观缺陷检测机器人技术应朝着智能化、高效化、通用化、安全化的方向持续突破。通过融合数字孪生、强化学习等新技术，提升机器人缺陷识别的智能化水平与自主作业能力；采用轻质高强度材料优化结构设计，推动多功能集成，延长机器人续航时间；加快制定统一的行业标准，促进设备互联互通与数据共享，构建立体化协同运维体系；强化安全冗余设计，提升故障应急处置能力，推动检测数据与桥梁运维系统深度融合。通过多维度的技术升级，逐步实现复杂工况下的全流程无人化检测，完善斜拉索全生命周期运维管理闭环，为斜拉桥的安全稳定运营提供坚实的技术保障，助力桥梁运维行业向智能化、绿色化转型发展。

参考文献：

[1] 陈昕熙. 履带式斜拉索检测机器人的设计与研究[D]. 福州：福建工程学院，2023.

[2] 汪逸超. 可折展桥梁斜拉索检测机器人运动机构设计与优化[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2023.

[3] 汪逸超. 桥梁斜拉索用可折展机器人运动机构设计与研究[D]. 上海：上海交通大学，2021.

[4] 何鸿宇. 大跨度斜拉桥缆索表面缺陷检测机器人研究[D]. 重庆：重庆科技学院，2021.

[5] 张劲泉，晋杰，汪云峰，等. 公路桥梁智能检测技术与装备研究进展[J]. 公路交通科技，2023，40(1)：1-27.

[6] 岳一领，冯鹏超，张东旭，等. 多功能攀爬机器人攀爬机构和变形机构的设计[J]. 太原理工大学学报，2016，47(6)：758-763.

[7] Xu F Y, Wang X S, Xu J L. Design and analysis of a bisected wheel-based cable climbing robot[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 25(1): 41-46.

[8] 张洪，袁野，夏润川，等. 斜拉索病害检测机器人研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2022，41(12)：62-69.

[9] 魏武，朱红山. 蛇形机器人在缆索检测中螺旋滚动步态的研究[J]. 计算机工程与设计，2011，32(2)：700-702.

[10] 李新科，高潮，郭永彩，等. 利用改进的SIFT算法检测桥梁拉索表面缺陷[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2015，40(1)：71-76.

[11] 刘朝涛，杜子学，武维，等. 基于图像处理的桥梁缆索检测系统研制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2014，33(2)：5-9.

[12] 周建庭，赵亚宇，夏润川，等. 基于磁记忆的钢绞线腐蚀检测试验[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2019，39(1)：81-89.

[13] 余朝阳. 斜拉索检测机器人的智能表观检测研究[J]. 公路交通技术，2020，36(2)：86-92.

[14] 李帮建. 基于计算机视觉的表面缺陷检测及应用[D]. 南京：东南大学，2016.

[15] 王翔. 桥梁拉索内部断丝电磁探测技术研究[J]. 桥梁建设，2020，50(6)：27-32.

[16] 陈开利. 日本桥梁自动化检测技术研究新进展[J]. 世界桥梁，2020，48(5)：89-94.

[17] 王晓琳，陆绍辉，李东平，等. 一种轻型碳纤维爬索机器人及其检测系统研究[J]. 广西科技大学学报，2017，28(4)：25-31.

[18] Zheng Z L, Ding N, Chen H, et al. CCRobot-V: A silkworm-like Cooperative Cable-climbing Robotic System for Cable Inspection and Maintenance[C]//2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Philadelphia: IEEE, 2022: 164-170.