

在役大型构件智能检测机器人运动系统设计

黄彬¹ 黄军^{2*} 张锐² 韩西成²

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 中国·四川 德阳 618000

2. 汉正检测技术有限公司, 中国·四川 广汉 618300

摘要: 针对石油、化工领域大型储罐等构件在役检测中, 传统人工检测安全风险高、复杂曲面适配性差, 现有智能检测设备移动性能与吸附稳定性难以兼顾的问题, 本文聚焦智能检测机器人的核心运动系统设计, 研发一款磁力吸附爬壁式运动底盘。该底盘采用“永磁吸附-轻量化机身-高精度定位”一体化设计思路, 通过精细化优化磁路布局、机动结构、定位算法及续航配置, 实现强吸附、高机动、曲面自适应的核心运动性能, 可稳定适配储罐、风电塔筒等大型构件的复杂作业环境, 为多模态检测单元提供可靠的移动支撑, 从设计层面保障检测作业的安全性与效率。

关键词: 在役大型构件; 智能检测机器人; 运动系统; 底盘设计; 磁力吸附

Design of motion system for intelligent inspection robot of large-scale components in service

Huang Bin¹, Huang Jun^{2*}, Zhang Rui², Han Xicheng²

1. Dongfang Boiler Co., Ltd. of Dongfang Electric Corporation, China Sichuan Deyang 618000

2. Hanzheng Testing Technology Co., Ltd., China Sichuan Guanghan 618300

Abstract: Aiming at the problems existing in the in-service inspection of large storage tanks and other components in the petroleum and chemical industries—such as high safety risks in traditional manual inspection, poor adaptability to complex curved surfaces, and difficulty in balancing mobility and adsorption stability of existing intelligent inspection equipment—this paper focuses on the design of the core motion system of intelligent inspection robots and develops a magnetically adsorbed wall-climbing motion chassis. Adopting an integrated design concept of "permanent magnetic adsorption, lightweight body, and high-precision positioning", the chassis achieves core motion performance of strong adsorption, high mobility, and curved surface self-adaptation through refined optimization of magnetic circuit layout, mechanical structure, positioning algorithm, and endurance configuration. It can stably adapt to the complex operating environments of large components such as storage tanks and wind turbine towers, provide reliable mobile support for multi-modal detection units, and ensure the safety and efficiency of inspection operations at the design level.

Keywords: In-service large-scale components; Intelligent inspection robot; Motion system; Chassis design; Magnetic adsorption

0 引言

大型储罐、风电塔筒等铁磁性金属构件是石油、化工、新能源等工业领域的核心基础设施, 其长期服役于腐蚀、交变载荷、高空等恶劣环境, 易产生焊缝开裂、壁面腐蚀等缺陷, 需定期开展无损检测作业^[1]。传统检测方式依赖人工攀爬、搭建脚手架, 存在高空坠落、中毒窒息等显著安全风险, 且作业效率低下、检测覆盖不全面; 现有检测机器人底盘普遍存在吸附力不足、曲面适应性差、定位精度低、负载能力有限等设计缺陷, 难以满足复杂工况下稳定移动、精准检测的实际需求。

运动系统作为检测机器人的核心承载与移动单元, 其设计性能直接决定检测作业的安全性、检测覆盖范围与检

测数据的可靠性。本文针对现有技术痛点, 围绕底盘设计的关键核心技术, 研发集强吸附、高机动、精准定位、长续航于一体的磁力吸附爬壁底盘, 通过结构模块化设计、材料科学选型、多算法融合优化, 从设计根源上解决垂直壁面稳定吸附、复杂曲面灵活移动、作业区域精准定位、长时间连续作业四大核心问题, 为在役大型构件智能检测机器人打造稳定、高效、适配性强的专用运动平台, 推动检测机器人向实用化、工业化方向发展^[2]。

1 运动系统总体设计

本设计遵循模块化、轻量化、高适配、高可靠的核心原则, 采用“功能模块独立设计与系统协同集成”的理念, 将底盘划分为吸附模块、机动模块、定位模块与续航模块

四大核心单元,各模块独立实现专属功能,同时通过结构与控制逻辑的协同设计,实现整体性能最优^[3]。设计整体适配铁磁性金属构件的全场景检测需求,严格执行强吸附不增重、高机动不牺牲稳定性、高精度不增加复杂度的设计平衡,确保底盘在垂直壁面、顶板、曲面、含焊缝凸起等复杂工况下均能稳定运行。

1.1 吸附模块设计

吸附模块是爬壁式底盘的核心功能单元,设计目标为实现垂直壁面/顶板无滑移、复杂曲面紧密贴合、吸附与移动动态协同,采用履带式永磁吸附结构,通过磁路优化、结构柔性设计、场景适配性设计三大维度实现性能提升。

高安全系数磁路设计:选用高性能永磁体作为吸附核心元件,采用阵列式排布方式,通过有限元仿真对磁体间距、排布角度、磁路走向进行多轮优化,消除磁路干扰、提升磁能利用率,设计单轮吸附力 $\geq 150\text{N}$,整体吸附力安全系数 ≥ 2.5 ,确保底盘在极限作业姿态下无滑移、跌落风险。

吸附移动协同结构设计:履带采用橡胶与钢片复合的柔性材质,内置独立永磁体单元,形成大面积柔性接触,既保证吸附贴合度,又降低转弯、变向时的接触阻力,避免传统刚性吸附结构“吸附强则移动难”的问题,实现吸附稳定性与移动灵活性的动态平衡。

多曲率曲面适配设计:针对不同曲率的大型构件,优化磁体阵列的排布密度与间距,设计适配曲面曲率 $\leq 5\text{m}$ 的作业场景,通过柔性履带自适应变形与磁体均匀排布,使吸附面始终与构件曲面紧密贴合,避免局部吸附力衰减。

1.2 机动模块设计

机动模块承担底盘的移动、负载、越障功能,设计目标为轻量化机身、高负载能力、强越障性能、可调速移动,从材质选型、驱动系统、越障结构三大方面进行精细化设计。

轻量化高强度材质选型:机身框架采用铝合金与碳纤维复合材质组合,主承力结构选用高强度铝合金,非承力部件与防护结构选用碳纤维材质,在保证结构强度的前提下实现机身轻量化,设计负载能力 $\geq 8\text{kg}$,可兼容 EMAT 测厚、阵列涡流检测、机器视觉等多模态检测单元同时搭载。

无级变速双驱系统设计:配置双直流电机独立驱动系统,左右履带分别由独立电机控制,支持 0-10 米/分钟的无级变速调节,可根据检测精度需求灵活调整移动速度;同时实现原地转弯、小半径变向,提升作业空间适

应性。

抗颠簸越障结构设计:履带表面采用防滑耐磨花纹设计,底盘配置扭簧式弹性悬挂系统,可有效缓冲路面颠簸与焊缝凸起冲击,设计越障能力 $\leq 5\text{mm}$,确保检测探头与构件表面距离恒定,避免检测精度下降。

1.3 定位模块设计

定位模块为检测数据提供精准空间坐标基准,设计目标为高精度定位、误差自补偿、边界智能识别,采用“硬件多源采集+算法融合优化+边界智能感知”的设计思路,实现定位精度 $\leq \pm 15\text{mm}$ 的设计要求。

多源互补定位硬件配置:集成光电编码器、惯性测量单元(IMU)双核心定位硬件,光电编码器实现相对位置定位,惯性测量单元采集姿态、加速度、角速度数据,对定位误差进行实时补偿,形成“轮速定位+姿态补偿”的互补定位机制。

多算法融合定位设计:采用“编码器里程计+视觉标志点识别”的融合定位算法,基于扩展卡尔曼滤波(EKF)对多源定位数据进行优化处理,抑制数据噪声、消除累积误差;结合机器视觉模块的焊缝跟踪功能,以焊缝特征作为天然定位标志点,提升定位精准性与可靠性^[4]。

激光式边界识别与避障设计:底盘前端与两侧搭载激光测距仪,实时采集距离数据,实现作业区域边界智能识别与主动避障,当检测到障碍物较近时自动触发减速或停止指令,保障作业安全。

1.4 续航模块设计

续航模块保障底盘长时间连续作业能力,设计目标为长续航时间、安全电源管理、电量实时监测,从电源配置、电源管理、数据交互三大方面进行设计。

高能量密度电源配置:搭载高性能锂离子电池组,选用高能量密度、高循环寿命的锂电芯,满电状态下支持连续工作 ≥ 4 小时,可覆盖大型构件单次检测作业时长需求。

全维度安全电源管理:集成专用电源管理模块(BMS),实现过充、过放、过流、短路四重安全保护,配置温度监测功能,当电池温度过高时自动触发散热或卸载保护,保障电源系统可靠性。

电量实时监测与数据交互:电源管理模块实时采集电池剩余电量、电压、电流、温度等数据,通过无线通信模块反馈至地面控制站,剩余电量过低时自动发出声光报警,提醒操作人员及时回收充电。

2 底盘关键技术优化设计

在四大核心模块基础设计的前提下,针对爬壁式底盘

设计中的共性技术难题,从磁吸附与移动协同、轻量化与负载平衡、定位精度提升三大核心方向进行深度优化设计,进一步提升底盘整体性能与作业适配性。

2.1 磁吸附与移动协同优化设计

针对传统永磁吸附底盘转弯阻力大、曲面适应性不足、吸附力分配不均等问题,采用“柔性履带+分区磁吸附+姿态自适应调节”的组合优化设计,实现吸附性能与移动性能双重提升。

柔性履带结构优化:优化履带橡胶基材配方与钢片夹层结构,提升柔韧性与抗疲劳性,使履带可随构件曲面自适应变形;在履带与磁体单元之间增加缓冲垫层,避免硬接触,保护构件表面并提升曲面贴合度。

分区式独立磁吸附设计:将底盘履带划分为多个独立吸附单元,每个单元配备独立磁路控制模块,可根据作业姿态自动调整吸附单元激活数量与吸附力大小,实现吸附力按需分配。

姿态自适应磁路调节:搭载姿态传感器,实时采集作业姿态数据并传输至磁路控制模块,模块根据数据自动调整各吸附单元磁通量,使吸附力均匀分布,提升吸附稳定性与移动灵活性。

2.2 轻量化与负载平衡优化设计

为实现“轻量化机身”与“高负载能力”的设计平衡,解决垂直作业时重心偏移问题,采用“拓扑优化+重心精准调节+对称式负载布局”的优化设计方法。

机身框架拓扑优化:采用有限元拓扑优化技术,对铝合金机身框架进行仿真分析,去除冗余结构与应力集中区域,在保证强度的前提下实现轻量化,经优化后机身重量较传统底盘降低 30%,提升功率重量比。

重心精准调节设计:设计阶段通过仿真确定核心重心区域,将核心部件集中布置在重心区域附近;预留重心调节滑轨,可根据检测单元重量与尺寸灵活调整安装位置,确保整体重心始终居中。

对称式负载布局设计:检测单元安装接口采用对称式布局,无论搭载单一或多模态检测模块,均可通过对称安装实现负载均匀分布,避免重心偏移导致的侧倾、吸附力衰减等问题。

2.3 定位精度提升优化设计

针对单一定位方式累积误差大、受环境影响显著等问题,采用“多源数据融合+视觉辅助校准+动态实时修正”的优化设计思路,消除定位误差。

多源定位数据深度融合:在编码器与 IMU 基础上,

引入机器视觉定位与激光测距定位数据,构建四源定位数据采集体系;优化扩展卡尔曼滤波算法参数与流程,提升多源异构数据融合处理能力,抑制噪声与误差。

视觉辅助精准定位校准:利用构件表面焊缝、法兰等天然特征作为定位标志点,建立特征点坐标数据库;作业过程中机器视觉模块实时识别特征点,与标准坐标比对并校准定位结果,消除累积误差。

长距离作业动态实时修正:设计动态校准触发机制,每隔 5 米自动触发定位校准,通过激光测距仪与视觉特征点识别进行双重修正;设计打滑识别与补偿算法,当检测到轮速与实际移动距离不匹配时,自动通过 IMU 与视觉数据补偿定位结果,确保定位精度始终 $\leq \pm 15\text{mm}$ 。

3 设计总结

本文围绕在役大型构件智能检测机器人的运动系统设计,完成了磁力吸附爬壁式底盘的全维度、精细化设计,通过模块化功能划分与核心技术优化,解决了传统检测机器人底盘吸附与移动难以兼顾、定位精度不足、曲面适应性差、负载能力有限等设计痛点,打造了集强吸附、高机动、高精度、高负载、长续航、多适配于一体的专用运动底盘,核心设计优势体现在三个方面:

吸附系统设计安全高效:采用履带式永磁吸附结构,通过磁路优化、分区吸附与柔性设计,吸附力安全系数 ≥ 2.5 ,适配 $\leq 5\text{m}$ 曲率复杂曲面,兼顾移动灵活性,保障高空作业安全与场景适配性。

机动与负载设计平衡统一:通过复合材质选型、机身拓扑优化、重心精准调节,实现轻量化与 $\geq 8\text{kg}$ 高负载能力的统一,可兼容多模态检测单元,平稳跨越 5mm 焊缝凸起,满足工业现场需求。

定位系统设计精准可靠:构建“多硬件采集+多算法融合+多方式校准”的高精度定位体系,定位误差 $\leq \pm 15\text{mm}$,实现检测点精准追溯,配备激光避障功能,提升作业智能化与可靠性。

本设计为大型构件智能检测机器人提供了高性能专用运动平台,实现检测作业无脚手架、无人工攀爬,大幅降低安全风险与作业成本,保障检测数据准确性。该底盘可直接应用于大型储罐检测,经小幅调整后亦可适配风电塔筒、桥梁钢构等场景,具备广泛工业应用前景。

未来可进一步优化磁吸附结构动态调节能力,提升极小曲率构件适配性;融合 AI 路径规划算法,实现自主路径规划与检测;优化电池能量密度与快充技术,延长续航、缩短充电时长,推动其在多领域的规模化应用。

参考文献:

- [1] 李伟, 吴运新, 龚海等. 面向高温的 PE-EMAT 无损检测系统有限元分析与优化[J]. 传感器与微系统, 2019,38(01):7-11.
- [2] 张广纯. 电磁声技术的进展与应用[J]. 无损检测, 1990,12(04):103-105+111.
- [3] 韩金华, 王海龙, 王刚等. 仿蟹机器人横行步态运动稳定性及能耗分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017,38(06):898-906.
- [4] 杨理践, 李春华, 高文凭等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. 仪器仪表学报, 2012,33(06):1218-1223.

作者简介: 黄彬 (1974-), 男, 汉族, 四川自贡, 大专, 高级技师, 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 研究方向: 从事锅炉压力容器无损检测的应用与研究。

* 通讯作者: 黄军 (1979-), 男, 汉族, 四川绵阳, 本科, 正高级工程师, 汉正检测技术有限公司, 研究方向: 能源装备智能检验检测技术的研究与应用。