队提前发现了水泵管道与钢结构之间的空间冲突，并通过调整管道的走向和钢结构的位置有效解决了这一问题。该项目利用 BIM 技术在设计阶段进行优化，确保水泵设备和钢结构的安装能够高效、顺利地进行。施工阶段，BIM 模型提供了精准的施工指导，进一步避免了施工中的设计冲突和返工情况。项目实施结果表明，水泵系统与金结工程的施工周期缩短了约 10%，而且施工过程中返工率和设备安装故障率大大降低，项目总体进度得到了有效控制。这一成功案例充分证明了 BIM 技术在复杂项目中促进多专业协同设计与施工优化的巨大潜力 [3]。

## 5 BIM 技术在电气设备安装中的协同设计与施工优化

### 5.1 电气设备安装设计中的 BIM 应用

电气系统是大型机电安装工程中的核心组成部分，涉及到电气设备的选择、布置、安装及维护。传统的电气设计方法往往面临设备选择不当、设备布局不合理等问题，这些问题不仅影响安装质量，还可能增加后期维护的难度和成本。BIM 技术的引入，为电气设备的设计提供了三维可视化的解决方案，使设计团队能够在一个数字化平台上进行精确的布局与优化。通过 BIM 技术，电气设备的布置和走向能够在设计初期得到有效优化，避免了与其他系统（如暖通、管道、土建结构等）产生空间冲突。同时，BIM 技术能确保设备之间的间距和适配性，进一步提升安装精度和可靠性。通过与其他专业的数据集成，BIM 模型使得电气设备的设计不仅仅局限于电气系统内部的协调，还能够与建筑整体设计紧密结合，减少因设计变更或信息传递不畅引起的安装问题，确保电气设备与建筑其他部分的完美协调 [4]。

### 5.2 电气系统的施工优化与冲突检测

电气设备安装过程中，施工人员常常面临管线、设备与建筑结构之间的空间冲突问题，这不仅影响施工进度，也可能导致额外的成本和资源浪费。BIM 技术在施工阶段的应用，尤其是冲突检测功能，为解决这些问题提供了有效的解决方案。BIM 模型能够提前识别电气系统与建筑结构、其他设备之间的潜在冲突，设计团队可在施工前进行调整，避免施工过程中发现问题的情况发生。通过 BIM，施工团队能够清晰地获取设备的具体位置、安装顺序和施工细节，确保施工精度和安装效率。在施工过程中，BIM 技术支持实时更新和信息共享，使得施工人员能够掌握最新的施工进度，快速应对设计变更，并及时调整施工方案，避免因设计冲突或施工错误导致的工期延误和额外费用。同时，BIM 技术与施工管理系统的结合，使得施工过程中的资源配置、进度安排和成本控制更加精细化和透明化，大幅提高了施工管理的效率与质量 [5]。

### 5.3 电气设备与其他专业的协同工作机制

BIM 技术的一个重要优势是促进了不同专业之间的协同工作。在大型机电安装工程中，电气设备的设计和安装与其他专业领域（如土建、电机、水泵等）的设计紧密相关，传统的设计方法往往无法实现各专业之间的高效协作，容易造成设计上的冲突和施工中的重复工作。通过 BIM 技术，各专业团队可以在同一个数字平台上共享设计数据，实时进行更新和调整，确保各专业的设计互相兼容。例如，电气设备的布置需要与管道、电机设备的位置进行协调，BIM 技术使得这些设计数据能够在平台上进行同步共享，避免了信息孤岛的出现，减少了设计与施工过程中的协调成本。BIM 技术的集成化平台不仅提高了各专业设计团队的协作效率，还通过冲突检测、施工模拟等功能，确保了工程的顺利实施。此外，BIM 技术为项目管理提供了实时监控工具，使得项目团队能够及时掌握项目进展，快速应对突发问题，进一步提高了项目的整体管理水平和施工质量。

## 6 结语

BIM 技术在大型机电安装工程中的应用已从设计阶段扩展到施工和运维阶段，显著提升了项目管理的精细化水平和协同工作效率。通过案例分析，BIM 技术有效解决了土建、电机、水泵、金结、电气设备等专业之间的协调问题，优化了设计方案，减少了施工中的冲突和返工，提升了施工效率和工程质量。特别是在大规模、复杂项目中，BIM 技术的协同设计与施工优化作用不可或缺。然而，BIM 技术的应用面临挑战：一方面，实施 BIM 技术需要较高的技术和资金投入，尤其是在中小型项目中，如何确保其效果是一个难题；另一方面，BIM 技术的推广还需依赖于专业知识和人员培训，确保设计和施工人员能够熟练使用 BIM 平台。尽管如此，随着 BIM 技术的持续发展，建筑行业的数字化和智能化前景将更加广阔。

## 参考文献

[1] 赵洪海,马梦琪,孟文芳,等.基于BIM技术大型机电安装工程研究[J].粉煤灰综合利用,2022,36(03):125-131.

[2] 丁柯婷.BIM在大型公共建筑机电设备设计施工中的应用研究[D].福建工程学院,2020.

[3] 郭朋亮.BIM技术在特大型地铁车辆段工程建设中的研究与应用[D].安徽理工大学,2022.

[4] 王建平,基于BIM技术的大型公共建筑机电安装可视化技术.云南省,中国水利水电第十四工程局有限公司,2024-08-02.

[5] 谭立新,BIM技术在机电安装工程中的应用研究.湖南省,中建五局工业设备安装有限公司,2015-03-13.

 DOI: https://doi.org/10.12345/hgyjxjz.v4i3.37700

# The Stable Application Technology of Industrial Robots in High-temperature and High-pressure Oil Operation Environments

**Li Ma**

Urumqi Vocational University, Urumqi, Xinjiang, 830002, China

**Abstract**

High-temperature and high-pressure working environments have become the norm in the oil and gas industry. The extreme conditions pose severe challenges to the traditional manual operation mode. Industrial robot technology, with its excellent environmental adaptability, operational stability, and programmable nature, has become the core technical approach to solving the problems of oil and gas operations in high-temperature and high-pressure environments. This paper systematically explains the special technical challenges posed by high-temperature and high-pressure working environments to the robot system, and deeply analyzes the core technical system necessary to ensure the stable operation of the robot in such extreme conditions. Research shows that the HPHT robot system that has been engineered and successfully applied can significantly improve the safety control level of on-site oil and gas operations, effectively enhance operation efficiency and operational consistency, and significantly reduce the long-term operating costs of the industry. This research aims to provide a systematic technical path reference and engineering practice guidance for the transformation of the oil and gas industry towards intelligence and automation.

**Keywords**

High-temperature and high-pressure; Oil operations; Industrial robot; Stability technology

# 高温高压石油作业环境下工业机器人的稳定应用技术

马丽

乌鲁木齐职业大学，中国 · 新疆 乌鲁木齐 830002

**摘　要**

高温高压作业环境已成为油气行业作业的常态，其极端工况对传统人工操作模式形成了严峻挑战，工业机器人技术凭借其优异的环境适配性、运行稳定性与程序可编配性，成为破解高温高压环境下油气作业难题的核心技术抓手。本文系统阐释了高温高压作业环境对机器人系统提出的特殊技术挑战，深入剖析了保障机器人在该极端工况下实现稳定运行所必需的核心技术体系。研究表明，经工程化落地并成功应用的HPHT机器人系统，能够显著提升油气现场作业的安全管控水平，有效提高作业执行效率与操作一致性，同时大幅降低行业长期运营成本。此次研究旨在为石油天然气行业向智能化、自动化转型提供系统化的技术路径参考与工程实践指导。

**关键词**

高温高压；石油作业；工业机器人；稳定性技术

## 1 HPHT 石油作业环境界定及其对机器人的挑战

### 1.1 高温高压环境的定义与典型参数范围

在石油工业领域，高温高压（HPHT）环境并非固化的技术概念，其界定标准随行业技术迭代与作业场景拓展持续演变[1]。当前国际油气行业公认的 HPHT 环境界定阈值为井底温度 ≥150℃、井底压力 ≥70MPa。而伴随超深井、深水井钻探及地热资源开发的持续推进，极端 HPHT 作业工况愈发普遍，此类场景下井底温度可攀升至 200℃~230℃及以上，井底压力更是突破 140MPa。该类极端 HPHT 环境，对机器人在内的各类井下作业设备及近井口配套设备的运行可靠性提出了近乎极限的技术要求。

### 1.2 对机器人系统的综合性、严苛性挑战

高温高压环境对机器人系统的作用呈现多维度、系统性特征，其带来的核心技术挑战主要集中于材料物理化学特性的显著劣化、传统润滑与传动体系的功能性失效、感知与控制系统的信号畸变及功能失常、高压动态密封与极端介质腐蚀防护的技术难题、动力与能源供给的双重制约。

## 2 面向 HPHT 环境的机器人稳定应用核心技术体系

为保障工业机器人在高温高压环境下实现长期、稳定、

【作者简介】马丽（1986–），女，回族，中国青海民和人，硕士，中级专业十级，从事机械专业，智能制造研究。

可靠的作业执行效果，需从系统工程视角开展针对性的定制化设计与核心技术攻关工作。本文对支撑其极端工况适配性的核心技术体系展开详尽阐释。

### 2.1 耐极端环境材料与特种结构设计技术

材料为技术实现之根基，结构为功能承载之载体，HPHT 机器人需依托系列特种材料选型与结构优化设计实现极端工况适配 [2]。耐热合金与先进复合材料应用机械臂连杆、关节壳体等承力结构，广泛选用 Inconel 718、Inconel 625 等镍基高温合金、Haynes 25 等钴基合金及钛合金，陶瓷基复合材料、碳纤维增强复合材料则适用于非承力部件与轻量化结构件，该类材料在高温工况下仍能保持优异的比强度与尺寸稳定性。特种润滑与轴承技术研发摒弃传统油脂润滑体系，采用全固体润滑技术方案。具体可在滑动摩擦表面喷涂二硫化钼、石墨或聚四氟乙烯复合涂层，滚动轴承则采用保持架镶嵌固体润滑块的结构形式，或直接选用氮化硅全陶瓷轴承。该类润滑方案在真空、高温、辐照等极端环境中均能实现稳定的润滑效能。针对酸性气体作业环境，选用符合 NACE MR0175/ISO 15156 标准、具备抗硫化物应力开裂与抗氢致开裂性能的专用钢材，机器人外表面采用热喷涂铝、陶瓷涂层等防腐涂覆工艺，或布设阴极保护系统。所有电子舱体均采用气密式或油密式充压结构设计，舱内填充氮气等惰性气体或绝缘油，既能够有效隔绝外部腐蚀介质的侵入，又可发挥辅助散热的功能。

### 2.2 动力传动系统的适应性强化技术

动力传动系统作为机器人的动力执行与运动传递核心，类比为整机的“肌肉”与“关节”，针对 HPHT 工况开展适应性技术改造，是实现机器人极端环境稳定运行的关键环节。选用合成烃、酯类或硅酸盐酯类耐高温液压油，该类介质的高温氧化安定性与粘温特性均显著优于传统矿物油，系统集成压力 - 温度补偿器、高效板翅式冷却器，同时配置泄漏收集与在线监测装置。液压泵、控制阀等核心元件均采用适配高温介质的特种结构设计。电机适配 H 级，即 180℃及以上耐温等级的绝缘体系，定子绕组采用聚酰亚胺薄膜等耐高温绝缘材料制备；转子若采用永磁体结构，需选用钐钴磁钢等高居里温度特种永磁材料。电机内部可集成微型涡流管冷却器，或利用相变材料实现瞬时热负荷的高效吸收，驱动控制器则需部署于专用冷却舱内，或采用全密封式耐高温封装设计。优先选用传动效率高、背隙精度优、密封性能佳的谐波减速器或 RV 减速器，此类减速器可通过内部预填充特种高温润滑脂、摩擦面涂覆固体润滑薄膜的方式，保障 HPHT 工况下的长期稳定运行，同时摒弃开放式齿轮传动结构，从设计层面规避污染物侵入与润滑体系失效的技术难题。

### 2.3 感知与控制系统的热防护与智能补偿技术

感知与控制系统作为机器人的环境感知单元与核心控制中枢，类比为整机的“感官”与“大脑”，需确保其在高温工况下始终保持检测精准性与运行稳定性。为摄像头、激光雷达、力、扭矩传感器等外置感知传感器配置独立式主动或被动热管理系统 [3]。主动防护方式包含循环冷却夹套、热电制冷器及氮气等惰性气体吹扫冷却，被动防护方式则采用多层隔热材料包覆、高反射率表面改性处理及热沉结构优化设计。构建机器人动力学模型、传感器检测模型与环境温度的量化映射关系，于系统关键测点布设 PT100、热电偶等温度传感器，实现温度数据的实时采集与控制算法的在线馈入，完成关节位置偏差、力反馈信号失真、视觉图像畸变等问题的在线补偿校正。该技术方案为自适应控制策略的典型应用，可有效抑制热漂移引发的系统性能衰减。选用 -55℃至 +125℃及更高耐温等级的军品级 / 宇航级电子元器件，对电路板实施防潮、防霉、防盐雾的三防工艺处理；采用分布式控制架构，将部分数据处理功能下沉至靠近执行机构的强化防护型本地控制器，降低中央处理单元的运算负荷与热量集聚效应，对核心电路模块实施冗余化设计配置，提升系统容错能力。

### 2.4 系统级高效热管理与高压动态密封技术

热管理技术与密封技术是维系 HPHT 环境下机器人整机系统内部工作环境稳定性的核心关键技术。规划布设贯通机器人整机内部的冷却流道网络，通过动力泵驱动特种硅油、氟化液等专用冷却剂完成闭式循环，将电机、控制单元、传感器等核心热源产生的热量导出至外部散热装置，或经由机身壳体实现与外部环境的热交换。针对井下作业机器人，可依托钻井液的流通特性，利用其流经机器人外壳完成被动冷却。针对旋转轴、往复运动轴等动态密封部位，采用多级式、多原理耦合的组合密封结构。其典型配置为首道设置金属或弹性体刮削环，实现对大部分外部杂质的阻隔与过滤，中段布设单道或多道弹性体 O 形圈、格莱圈，作为主密封单元承担核心密封功能，末段可增设磁性流体密封或迷宫密封结构，实现对微泄漏的精准管控。

### 2.5 基于环境模拟的可靠性验证与测试技术

所有 HPHT 机器人的设计方案在完成工程化试制并投入现场作业前，均需通过严苛的实验室环境模拟验证测试。搭建 HPHT 环境模拟测试平台，该平台核心配置包含可模拟井下压力场与介质环境的大型高压釜、高温烘箱及专用加热系统、介质循环注入系统，同时配套全维度数据采集与实时监控系统，可精准复现温度、压力、介质腐蚀性的单一作用工况及多因素耦合作用工况。开展加速寿命试验与极限工况测试，测试内容除整机及核心部件的长期稳态运行测试外，还涵盖模拟起下钻过程温度冲击的热循环测试、压力循环测试、振动特性测试，以及含 $H_2S/CO_2$ 腐蚀介质的静态浸泡测试。通过对测试对象施加加速应力条件，在短周期内完成其长期运行可靠性的综合评估与验证。表 1 列示了 HPHT 机器人各核心子系统的典型测试技术规范示例。

## 3 典型现场应用案例分析

在巴西桑托斯盆地盐下油田的深水钻井作业水深约 2200 米场景中，作业主体大规模应用工作级遥控潜水器搭