

复合型管道焊缝渗透检测机器人系统设计

李 彰, 吴学洲, 李宜全, 聂 勇, 廖述圣

(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430200)

摘 要: 为代替人工实施管道焊缝检测, 设计了一套复合型管道焊缝渗透检测机器人, 对机器人的系统组成等进行了介绍。为验证机械臂具备实施自动渗透检测的灵活性, 建立了7自由度机械臂运动学模型, 并采用归一化的方法对擦拭和喷涂工艺进行了圆弧轨迹规划, 然后在仿真环境下进行了工艺实现能力验证。最后, 通过机械臂规划与控制, 实现了复合管道焊缝的机器人检测, 并通过渗透工艺的灵敏度测试, 验证了该机器人系统实施渗透检测工艺的可行性。

关键词: 复合机器人; 渗透检测; 复合工具设计; 轨迹规划

中图分类号: TP242.3; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2024)08-0070-07

Design of composite robot system for penetration inspection of pipeline welds

LI Zhang, WU Xuezhou, LI Yiquan, NIE Yong, LIAO Shusheng

(China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430020, China)

Abstract: To replace manual implementation of pipeline weld seam detection, a composite pipeline weld seam penetration detection robot was designed, and the system composition of the robot was introduced. The end tool of the system adopted a composite structure and had a quick change form. To verify the flexibility of the robotic arm in implementing automatic penetration technology, a 7-degree-of-freedom kinematic model of the robotic arm was established, and a normalized method was used to plan the arc trajectory of the wiping and spraying processes. The process implementation capability was verified in a simulation environment. Finally, the robot detection of composite pipeline welds was achieved through robotic arm planning and control, and the feasibility of the penetration detection process of the robot system was verified through sensitivity testing of the penetration process.

Key words: composite robot; penetration inspection; composite tool design; trajectory planning

核电站主要设备间皆由管道连接, 核电站运行期间管道的安全性和完整性十分重要, 各管道又由短管道通过焊接的形式拼接而成, 管道的主要薄弱点为焊接接缝处, 该位置是在役检查期间管道无损检测的重中之重。

渗透检测是以毛细作用原理为基础的检查表面开口缺陷的重要无损检测方法。管道焊缝的渗透检测通常采用人工的方式进行, 劳动强度大, 耗时长, 渗透工艺本身对于检测人员的作业能力具有较高要求, 检测人员技能素质的差异会导致检测结

果的偏差, 而对于部分具有辐照的区域, 人工实施渗透检测会有辐射风险, 此时可采用具有渗透工艺操作能力的机器人系统代替人员进入辐照区域开展渗透检测, 结合渗透工具设计、自动规划等技术可实现半自主的渗透工艺实施, 保证工艺效果的一致性。

核电站具有复杂的非结构化地形特点, 需要机器人具有较高的移动能力和越障能力, 同时还能携带机械臂和工装系统进行工艺操作, 因此应用于核电站的机器人系统应属于典型的复合机器人系统。复合机器人已被广泛研究并得到了一定程度的应用, 如德国航空航天中心的类人移动机器人 Rollin Justin^[1]、KUKA的全向移动操作臂 youbot^[2]、AKASHArobot系统^[3]、上海大学的全向移动平台^[4]

收稿日期: 2024-01-11

作者简介: 李 彰(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为核工业特种机器人技术

通信作者: 李 彰, lizhang@cnp.com.cn

和新松的HSCR5等,除此之外,国内外许多研究者在复合机器人的动力学、协同控制、动态规划、导航避障等方面开展了研究^[4-10]。但是由于核工业本身的安全性要求,复合机器人在核工业领域仍处于研究探索和应用落地的阶段。

笔者主要针对核电站管道焊缝的渗透检测工艺,研制了一套复合型作业机器人,重点描述了机器人的系统设计、工具工装设计、机械臂运动学分析、轨迹规划、仿真分析等内容。同时采用该机器人对管道焊缝缺陷进行检测试验,以验证其实施渗透检测工艺的可行性。

1 机器人总体设计

管道焊缝检测机器人平台的总体结构如图1所示。该机器人移动平台为单摆臂式履带机器人移动平台,具有较强的越障能力。多自由度机械臂为检测机器人平台的操作机构,7自由度的构型形式使其具有更加灵活的运动能力,可通过机械臂的精确运动控制保证末端的精确移动,以完成检测任务。云台相机搭载在升降机构上可实现更大范围视野的观察。

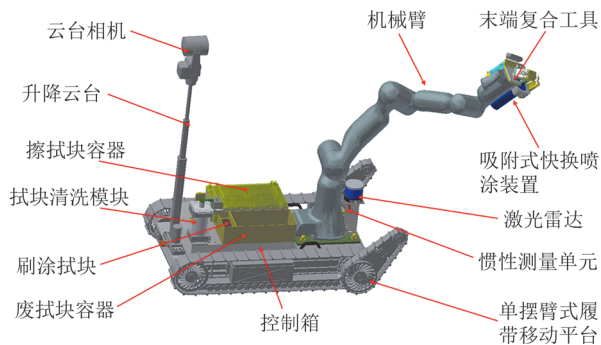


图1 管道焊缝检测机器人平台总体结构

根据焊缝渗透检测的工艺要求,需进行表面预清洗、干燥、渗透剂施加、多余渗透剂去除、显像剂施加、观察和显像剂清除等工艺步骤。相应的工具系统主要包括机械臂末端复合工具、吸附式快换喷涂装置、擦拭块容器、刷涂拭块和废拭块容器。机械臂末端复合工具主要用于擦拭块的吸附和喷涂装置的吸附快换,擦拭块容器主要储存了多块擦拭块组件,用于不同工艺的擦拭块更换。刷涂拭块放置于渗透剂储存槽中,用于刷子的浸润和刷涂工艺的实施;废拭块容器用于收集擦拭后的拭块。

2 工具设计

根据工艺操作和检测步骤,工具种类分为喷涂

型和接触型两类,主要的设计思路如下。

(1) 复合工具布置:喷涂工具与擦拭工具根据运动仿真的可达性要求采用错位布置,通过机械臂整体的灵活性完成两种工具的转换。

(2) 工具快换方式:复合工具中显像剂喷涂工具仅在显像剂施加这一步操作中使用,通过电磁吸附快换的方式将显像剂喷涂工具装载,并通过电气快插接头实现电缆走线的模块化快插快拔。

(3) 擦拭块快换方式:由于渗透工艺中存在非常多的擦拭过程,可更换的形式能减轻末端工具的设计复杂程度以及减小体积和质量,提高操作便捷性。

(4) 擦拭块复用方式:擦拭块采用可旋转自锁机构,实现擦拭块的四方运用,提高利用率。

(5) 模块化方式:整体工装考虑模块化快装、快换、快接的方式,减小整体质量和体积,保证工艺实施的便捷性和灵活性。

2.1 末端复合工具设计

机械臂末端复合工具由法兰盘、失电型电磁铁、快换擦拭组件、视觉相机组件、快插电气模块及吸附式喷罐按压组件等组成,其结构如图2所示。电磁铁与擦拭组件吸附过程中,首先进行通电,中和电磁铁永磁模块的磁性,然后基于机械臂的运动控制精度,通过定位销,完成电磁铁与擦拭组件的对接,再断电恢复电磁铁磁性,完成吸附对接。

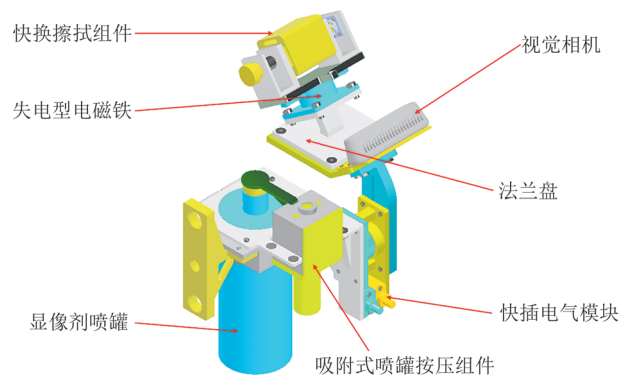


图2 机械臂末端复合工具结构示意图

2.2 显像剂喷罐组件设计

显像剂喷罐组件主要由显像剂喷罐、喷罐夹紧座、按压块、喷嘴周向限位块、喷罐按压驱动组件、磁吸片、快插电气模块等组成,其结构如图3所示。喷罐按压驱动组件中电机的旋转运动转换为导向块的直线运动,从而实现按压动作的伺服可控。

2.3 擦拭块容器设计

擦拭块容器主要由4个擦拭块组件、擦拭块储

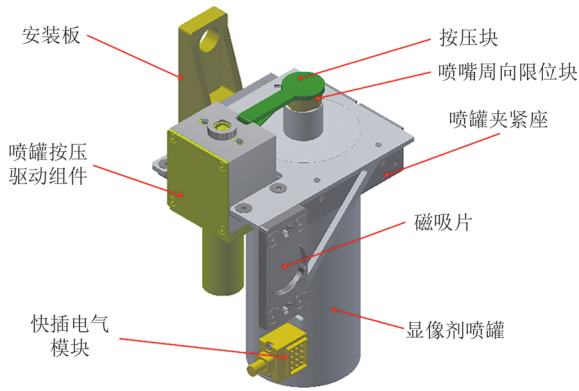


图3 显像剂喷罐组件结构示意图

存槽、擦拭块组件收纳盒、快拧式盖板锁紧结构、保护盖板和拉手组成,其结构如图4所示。执行擦拭块的拾取操作时,机械臂末端的电磁铁靠近并接触擦拭块组件中的磁吸片,在磁吸附的作用下,擦拭块组件离开擦拭块存储盒并吸附于机械臂的末端。

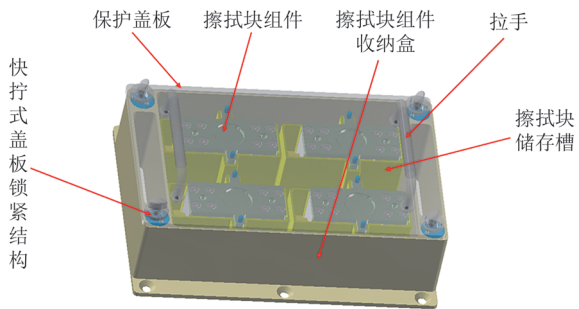


图4 擦拭块存储槽结构示意图

3 机械臂运动学建模与仿真

为了实现机器人代替人工进行检测,采用7自由度机械臂作为搭载工具的主要执行单元,借助其

高自由度的灵活性,实现管道的自动渗透检测,搭载工具的7自由度机械臂实物如图5所示。该机械臂主要适配核电站400 mm以下直径的工艺管道,为了分析机械臂是否具有完成管道表面渗透检测任务的能力,笔者构建7自由度机械臂的运动学模型,通过圆弧的运动轨迹规划,在仿真环境中进行工艺轨迹验证。

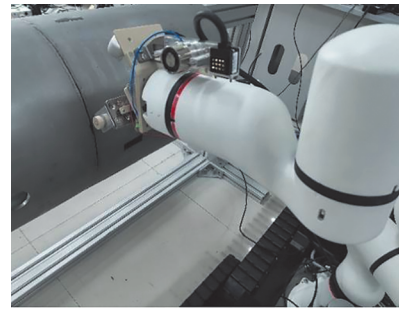


图5 搭载渗透工具的7自由度机械臂实物

3.1 7自由度运动学建模

采用标准DH法,建立机械臂连杆坐标系 $\{X_n, Y_n, Z_n\}$ ($n=0, 1\cdots 7$),其结果如图6所示,其中坐标系 $\{X_0, Y_0, Z_0\}$ 为机械臂的基坐标系,坐标系 $\{X_7, Y_7, Z_7\}$ 为机械臂的法兰坐标系,同时建立机械臂末端工具的坐标系 $\{X_{\text{tool}}, Y_{\text{tool}}, Z_{\text{tool}}\}$ 。7自由度机械臂DH参数如表1所示,其中 A 为坐标系轴 Z_{i-1} 到 Z_i ,沿 X_i 正方向的距离, α 为坐标系轴 Z_{i-1} 到 Z_i ,沿 X_i 正方向的转角, D 为坐标 X_{i-1} 到 X_i ,沿 Z_{i-1} 正方向的距离, θ 为坐标系轴 X_{i-1} 到 X_i ,沿 Z_{i-1} 正方向转角。

末端工具相对于移动平台基座坐标系的位姿满足

$$T_0^{\text{tool}} = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 T_6^{\text{tool}} \quad (1)$$

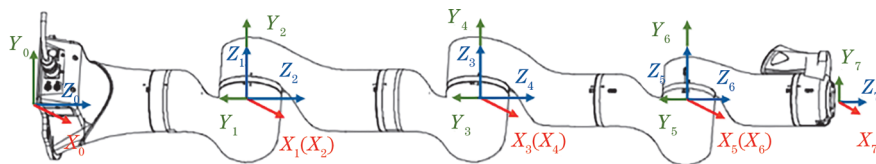


图6 7自由度机械臂坐标系示意

表1 7自由度机械臂DH参数

关节	A/mm	α/rad	D/mm	θ/rad
1	0	$-\pi/2$	341.5	0
2	0	$\pi/2$	0	0
3	0	$-\pi/2$	394.0	0
4	0	$\pi/2$	0	0
5	0	$-\pi/2$	366.0	0
6	0	$\pi/2$	0	0
7	0	0	250.3	0

式中: T_i^{i-1} 表示坐标系 $i-1$ 相对于坐标系 i 的相对位姿变换过程,结合DH参数,满足

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & A_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & A_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & D_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

T_0^{tool} 为关节空间的映射函数,即

$$T_0^{\text{tool}} = F(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \quad (3)$$

根据管道焊缝的检测任务需求,选定直径为400 mm的管道作为操作对象,针对该对象规划多个管道表面作业点,作业点的机械臂工具期望位姿满足法线方向垂直于管道表面的要求,作业点沿管道圆弧表面规划。此时,为保证工具坐标系沿着规划路径运动,机械臂各坐标系需满足

$$\begin{cases} F(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = T_0^{\text{圆心}} T_{\text{圆心}}^{\text{tool}} \\ T_{\text{圆心}}^{\text{tool}} = G(p_x, p_y, p_z) \end{cases} \quad (4)$$

式中: (p_x, p_y, p_z) 为作业点沿管道的轨迹; $T_{\text{圆心}}^{\text{tool}}$ 为在管道圆切面中规划的工具坐标系的行进轨迹,即工具坐标系相对于圆心坐标系的相对位姿; $T_0^{\text{圆心}}$ 为管道圆心坐标系相对于机器人基座坐标系的相对位姿变换,主要通过机械臂打点测量和拟合或者通过视觉深度识别和定位的方式获得。

笔者采用V-REP软件进行动力学仿真,在仿真环境中已知 $T_0^{\text{圆心}}$,基于V-REP的KDL逆运动学求解器可在已知笛卡尔空间末端位姿的情况下对7自由度机械臂的关节空间运动进行求解,其关键问题是获得工具坐标系在圆心坐标系中的运动轨迹表达。

3.2 圆弧轨迹运动规划

首先对工具坐标系在圆心坐标系中的运动进行轨迹规划,可将问题简化为一个二维平面圆弧插补问题,在已知圆心坐标系相对基坐标系位姿关系的前提下,根据渗透检测工艺实施过程中机械臂的可达性,预先设定轨迹在圆心坐标系中的起始点,即 θ_1 和 θ_2 ,依据线性插值的方法,对圆心角进行插补,工具坐标系的原点在圆心坐标系中满足

$$\begin{cases} \theta = \theta_1 + \lambda(\theta_2 - \theta_1) \\ p_x = r \cos \theta \\ p_y = r \sin \theta \\ p_z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为轨迹插值点对应的角度; λ 为归一化因子; r 为圆的轨迹半径; $(\theta_1 - \theta_2)$ 为起始位置的角度增量,记作 $\Delta\theta$ 。

相对位置 (p_x, p_y, p_z) 可通过圆弧角度求得,工具坐标系相对圆心坐标系的姿态则根据角度关系进行约束,工具坐标系的 y 轴始终沿着圆弧法线方向,工具坐标系的 z 轴始终与圆弧坐标系 z 轴方向相同,

工具坐标系的 x 轴可通过叉乘获得,因此关键问题即归一化因子的获得。

针对圆弧插补,采用梯形曲线作为规划运动率,需要预先设定机械臂末端角速度 ω_s 和角加速度 a ,可获得插值点数 N ,即

$$N = P_n \frac{\Delta\theta}{\omega_s} \quad (6)$$

式中: P_n 为插值参数。

对于机械臂的梯形速度曲线进行规划,设机械臂在匀速运动时的线速度为 ω_s ,抛物线段的加减速速度均为 a ,可以计算出加速阶段和减速阶段的时间和位移为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\omega_s}{a} \\ \Omega_1 = \frac{1}{2} a T_1^2 \end{cases} \quad (7)$$

设机械臂末端运动的总位移为 Ω_e ,总时间为

$$T_e = 2T_1 + \frac{\Omega_e - 2\Omega_1}{\omega_s} \quad (8)$$

将位移、速度和加速度进行归一化处理得到上述计算量的归一化参数,即

$$\begin{cases} \Omega_{1\lambda} = \frac{\Omega_1}{\Omega_e} \\ T_{1\lambda} = \frac{T_1}{T_e} \\ T_{2\lambda} = 1 - T_{1\lambda} \\ a_\lambda = \frac{2\Omega_{1\lambda}}{T_{1\lambda}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Omega_{1\lambda}$, $T_{1\lambda}$, $T_{2\lambda}$, a_λ 分别为各参数的归一化值。

结合梯形加速度的位移公式,可以推导出归一化因子 λ 为

$$\lambda = \begin{cases} \frac{1}{2} a_\lambda t^2 & (0 \leq t \leq T_{1\lambda}) \\ \frac{1}{2} a_\lambda T_{1\lambda}^2 + a_\lambda T_{1\lambda}(t - T_{1\lambda}) & (T_{1\lambda} \leq t \leq T_{2\lambda}) \\ \frac{1}{2} a_\lambda T_{1\lambda}^2 + a_\lambda T_{1\lambda}(t - T_{1\lambda}) - \frac{1}{2} a_\lambda (t - T_{2\lambda})^2 & (T_{2\lambda} \leq t \leq 1) \end{cases} \quad (10)$$

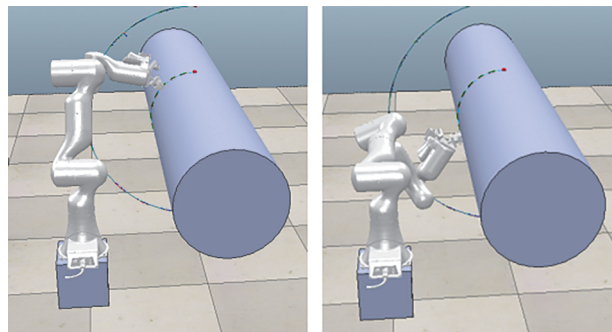
式中: $t = i/N$ (i 取 $0 \sim 1$),每个插值点都有一个 λ 与之对应,结合角度插值公式可获得圆心坐标系中的工具坐标系相对位姿,即 $T_0^{\text{圆心}}$ 。

3.3 仿真分析

在V-REP软件中建立管道和周边相关结构的仿真环境,结合7自由度机械臂的运动学建模和规划的圆弧轨迹,分别仿真模拟了机械臂带着末端工

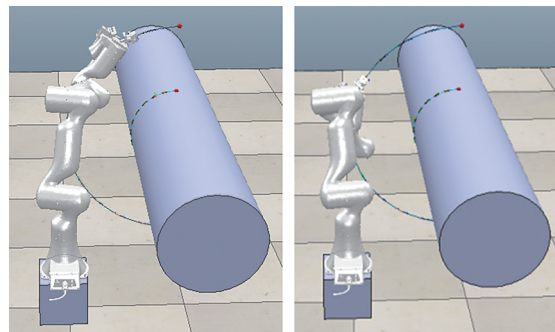
具通过运动轨迹规划实现从圆弧顶点到达圆弧底部的擦拭和喷涂运动,分析了其可达性。结果显示,由于冗余自由度的存在,机械臂能以灵活的姿态实

现圆弧运动。机械臂擦拭动作可达性仿真结果如图7所示,机械臂喷涂动作可达性仿真结果如图8所示。



(a) 位置一 (b) 位置二

图7 机械臂擦拭动作可达性仿真结果



(a) 位置一 (b) 位置二

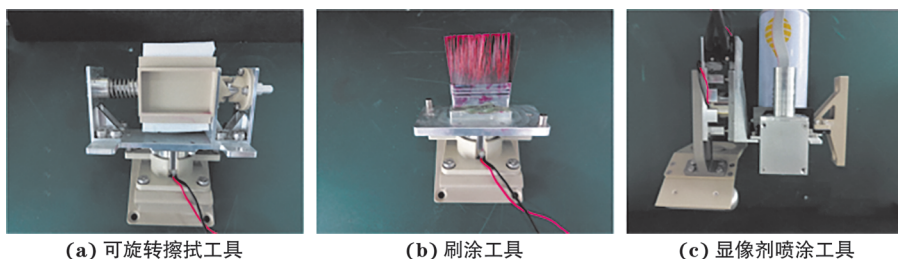
图8 机械臂喷涂动作可达性仿真结果

4 工具与工艺试验

4.1 渗透工艺末端工具

所设计的管道焊缝渗透检测复合工具的实物

如图9所示,该工具可用于预清洗、渗透剂施加、多余渗透剂去除、后清洗作业、显像剂施加,满足机器人进行焊缝渗透检测流程中的多类工艺操作要求。



(a) 可旋转擦拭工具 (b) 刷涂工具 (c) 显像剂喷涂工具

图9 渗透工艺末端工具实物

4.2 管道渗透工艺试验

机械臂搭载渗透工艺工具,针对直径为400 mm管道的下1/4圆弧实施渗透工艺流程各操作任务,试验过程如下。

(1) 预清洗

机械臂末端装载擦拭块工具,控制机械臂与管道之间的距离和角度,首先在海绵不喷清洗剂的情况下同向擦拭两次,然后旋转工具头切换执行面,使用清洗剂将海绵打湿,在该面执行同向湿擦两次,实施过程如图10所示。

(2) 渗透剂施加

在预清洗后管道干燥的前提下,机械臂末端换

装刷子工具头,机械臂刷涂的初始,刷子处于弯曲受力状态,刷子主体轴线沿管道法线方向,刷子弯曲方向沿刷涂反方向,到达该位置需要控制机械臂从上侧沿管道切线方向切入,控制机械臂沿管道表面实施圆弧轨迹运动,执行同向刷涂工艺两次,实施过程如图11所示。

(3) 多余渗透剂去除

在管道表面足够湿润后,机械臂末端装载擦拭块工具,执行与预清洗同样的操作,实施过程如图12所示。

(4) 显像剂喷涂

在多余渗透剂去除工艺完成后,机械臂末端装

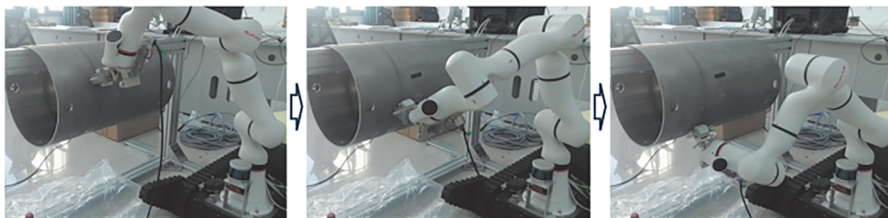


图10 机械臂实施预清洗工艺

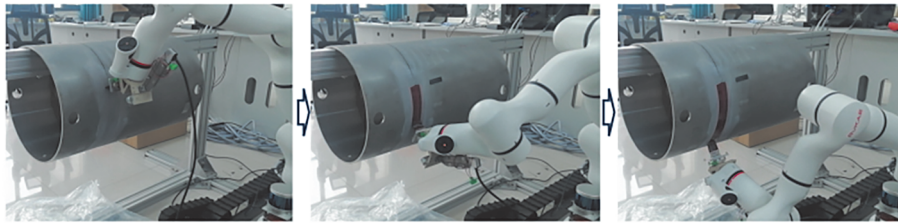


图 11 机械臂实施渗透剂施加工艺

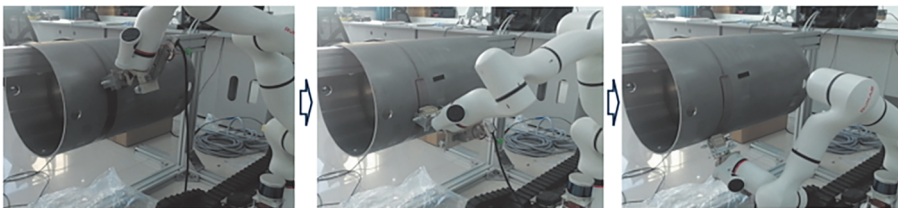


图 12 机械臂实施多余渗透剂去除工艺

载显像剂喷涂组件,此时喷嘴在整个过程中需保持斜向上状态,便于液体喷出。由于喷涂过程中需使机械臂与管道间保持较远的距离,机械臂整体位形变化与擦拭过程不同,故喷涂工艺位置需相对靠后,同样控制机械臂沿管道表面实施圆弧轨迹运动,执

行双向喷涂一次,喷涂过程如图 13 所示。

(5) 显像剂去除

待显像剂干燥后,机械臂末端装载擦拭块工具头,再次执行与预清洗同样的操作,擦拭过程如图 14 所示。

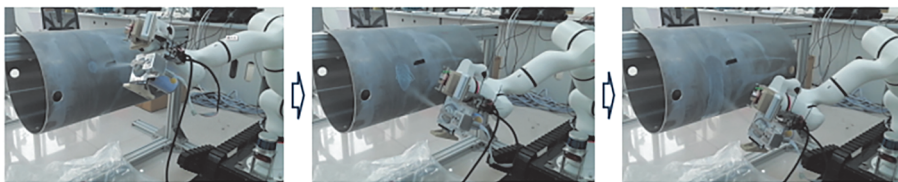


图 13 机械臂实施显像剂喷涂工艺



图 14 机械臂实施显像剂去除工艺

通过机械臂的运动规划与控制,距离和角度等规划参数的优化配置,实现了机械臂携带复合工具实施整个渗透工艺的全流程自动化操作。机器人渗透检测工艺全流程如图 15 所示。

4.3 灵敏度测试

为了验证机械臂自动实施渗透检测的灵敏度,采用标准的 B 型标准试块实施灵敏度测试。在测试前,B 型标准试块已具有显像剂,通过 4 次干擦、渗透剂 4 次刷涂、渗透剂 2 次干擦去除和 3 次湿擦去除、显像剂喷瓶摇晃和显像剂喷涂,完成了机器人实施渗透检测工艺的全流程操作,最终标准试块表面明显显示出小、中、大 3 个缺陷花纹,说明机器人实施

渗透检测工艺具有与人工操作相同的灵敏度。机器人渗透检测的灵敏度测试结果如图 16 所示。

5 结语

面向核电站管道焊缝的检测需求,针对核岛辐照区域不易实施渗透检测的问题,设计了一套复合型管道焊缝渗透检测机器人平台,对机器人系统组成和工具系统进行了介绍。针对工具设计,分别从复合末端工具结构、喷罐组件结构、擦拭块容器结构等几个方面进行了介绍。针对机械臂代替人工操作实施管道渗透检测的工艺能力,通过建立 7 自由度机械臂运动学模型和采用归一化的方法进行圆弧轨

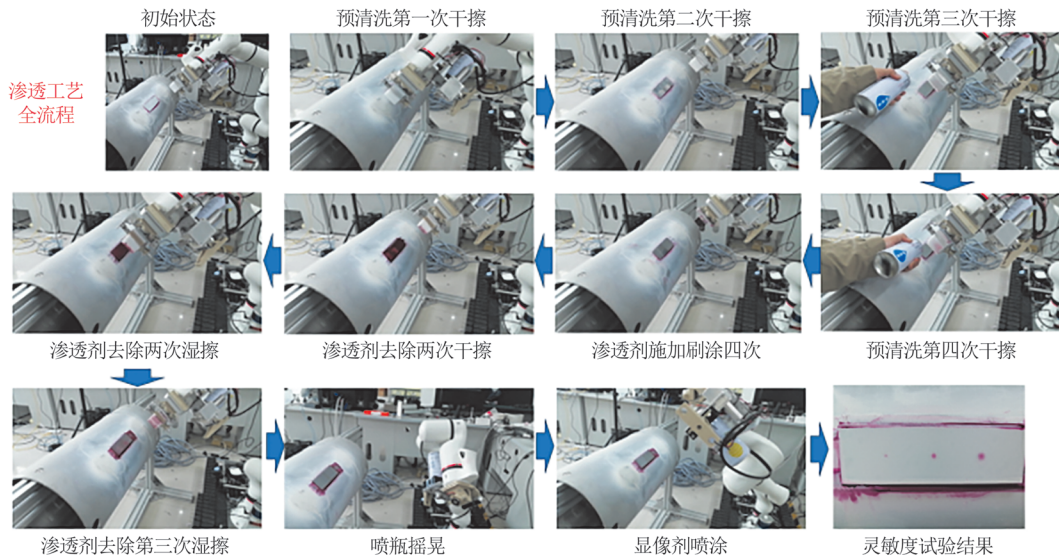


图 15 机器人渗透检测工艺全流程示意

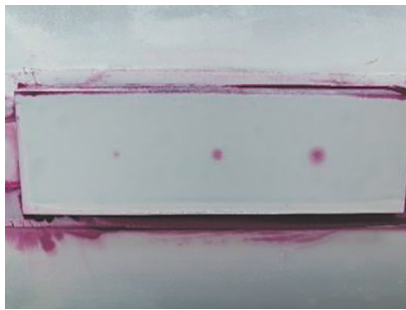


图 16 机器人渗透检测的灵敏度测试结果

迹规划,并在仿真环境中验证了7自由度机械臂具备实施擦拭和喷涂工艺的灵活性和可达性。最后,通过机械臂的运动规划与控制,完成了整个渗透检测工艺流程,同时完成了渗透检测工艺的灵敏度测试,验证了机器人实施渗透检测工艺的可行性,为实现机器人自动渗透检测奠定了基础。

参考文献

[1] DIETRICH A, BUSSMANN K, PETIT F, et al. Whole-body impedance control of wheeled mobile manipulators[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(3): 505-517.
[2] BISCHOFF R, HUGGENBERGER U, PRASSLER E. KUKA youBot-a mobile manipulator for research and education[C]//2011 IEEE International Conference on

Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011.
[3] VARELA-ALDÁS J, ANDALUZ V H, CHICAIZA F A. Modelling and control of a mobile manipulator for trajectory tracking[C]//2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). Quito, Ecuador: IEEE, 2018.
[4] SONG T, XI F J, GUO S, et al. Optimization of a mobile platform for a wheeled manipulator[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8(6): 061007.
[5] 陈飞,王振华,陈国栋,等.基于ROS的移动操作臂运动规划研究[J].*煤矿机械*,2018,39(6):36-38.
[6] 吴华昶.面向爬行焊接的移动操作臂协同规划与控制[D].广州:广东工业大学,2022.
[7] SONG T, XI F J, GUO S, et al. Slip analysis for a wheeled mobile manipulator[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2018, 140(2): 021005.
[8] MA C Y, GAO H B, DING L, et al. Optimal energy consumption for mobile manipulators executing door-opening task[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: 8987953.
[9] 庞剑坤.搭载机械臂的轮式移动机器人运动控制及视觉抓取算法研究[D].广州:华南理工大学,2020.
[10] 丁晓军.室内轮式移动操作机器人动态运动规划方法研究[D].武汉:华中科技大学,2020.