

核电站蒸汽发生器检修机器人设计及运动学分析

王立权¹, 吴健荣¹, 刘于珑², 唐德栋¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 核动力运行研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 研制了一个用于核电站蒸汽发生器 (SG) 在役检修的机器人. 机器人本体是可两端作业的特殊 6R 串联结构. 在推进装置的协助下, 机器人以 7 轴联动方式从 SG 人孔进入狭小的 1/4 球形水室, 利用一端的胀紧机构吸附在管板上, 另一端联接不同工具设备完成涡流检查、超声检查、堵管、衬管等工作. 首先, 提出新的检修方案和机器人构型; 然后, 考虑避碰和两端作业因素, 从作业空间、运动链解算、总体运动实现三个方面论证了机器人结构方案的可行性; 最后, 对样机进行了现场试验, 试验结果表明机器人已能够满足 SG 检修任务要求.

关键词: 机器人; 构型综合; 运动学; 蒸汽发生器; 在役检修

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Design and Kinematics Analysis of a Robot for Nuclear Steam Generator Servicing

WANG Li-quan¹, WU Jian-rong¹, LIU Yu-long², TANG De-dong¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430074, China)

Abstract: A special robot is developed for in-service maintenance of steam generator (SG) in nuclear plant. It is of a two-end 6R serial chain structure. With the help of propulsion device, the robot with 7-axis can enter the limited quarter-sphere chamber through the manhole of the SG, and fix on the tube-sheet with the distensible mechanism at one end. By attaching different tools at the other end, the robot can provide services such as eddy current inspection, ultrasound inspection, plugging, and setting sleeves. In this paper, the new servicing scheme and robotic configuration are presented firstly. Then, by considering obstacle avoidance and two-end operation factors, the robot's workspace, kinematics solution and compound movement are discussed to confirm the feasibility of the structure scheme. Finally, the robot prototype is tested by field experiment, and the result shows that the robot can meet the requirements of SG maintenance.

Keywords: robot; configuration synthesis; kinematics; steam generator (SG); in-service maintenance

1 引言 (Introduction)

蒸汽发生器是核电站连接一、二回路的重要热交换设备, 也是核电站运行中发生故障最多的设备之一. SG 一次侧在役检修工作有强放射性, 迫切需要机器人代替手工作业^[1]. 但是, 机器人的安装和作业都受 SG 结构限制, 负载能力、精度、可靠性等指标要求很高, 一直是在役检修的瓶颈技术. 美国、法国、德国等先进核电国家的科研机构 and 核电服务公司从 20 世纪 80 年代初开始持续投入大量人力物力合作开发相应机器人, 并以此为平台, 发展并垄断了多频涡流、堵管、衬管、镀镍修补等在役检修技术. 目前, 现场应用的 SG 检修机器人主要有美国 zetec 公司的 SM 和 ZR 系列、Westinghouse 公司的 ROSA 系列和 PEGASYS、法国 Framatome 公司的

ROGER 和 COBRA、德国 Hans Walischmille 公司的 TELBOT^[2~4]. 近年, 印度、韩国也在开展相应机器人技术和配套设备研究^[5,6]. 我国使用的是 20 世纪 90 年代从 zetec 公司引进的 SM 机械手和多频涡流检查装置, 尚没有自主知识产权的检修机器人.

早期开发的机器人, 如 SM 和 ROGER, 都是以 SG 人孔法兰为安装基座的 3 自由度机械手, 自由度少、作业可靠. 但是, 机器人每次安装只能完成一项检修任务, 检修效率和辐照剂量难以满足新形势要求. 20 世纪 90 年代发展起来的 COBRA 和 ROSA 系列机器人采用 5、6 自由度结构, 能够在一次安装后通过更换检修工具完成多项检修任务, 已成为主流机器人. 随着检修手段的多样化和复合化, 能够整合多项检修技术、作业工况良好、兼容性强、具有

通用作业平台性质的机器人是当前研究的热点。

我国从 1991 年开始自主建成核电站至今运行 15 年以上,按照国际核电运行经验,即将进入在役检修需求旺盛期。伴随大规模核电计划的开展,未来的在役检修需求更为强劲。研制自主知识产权的检修机器人不仅能够带来巨大的经济效益,还关系到核电行业的长期发展和国家战略安全。借鉴国外经验,哈尔滨工程大学和核动力运行研究所首次在国内合作开展 SG 一次侧检修机器人技术研究,自主研发了一个能在一次安装条件下完成多项检修的机器人平台。机器人采用 6~7 轴模块化的可两端作业的运动链方案,从人孔自动进入 SG 水室,利用脚端的胀紧机构吸附在管板上,手端联接不同工具设备作业;其设计目标兼容了国内多种型号 SG 的主要检修项要求,在提高综合效率、减少辐照剂量、开放性和可维护性方面具有优越性。

2 目标和结构方案 (Target and structure scheme)

2.1 设计目标

SG 一次侧是一个半球形封头,由中间隔板分成两个近似 1/4 球形水室。管板上有数千个管孔,U 型传热管两端胀接在管孔内,使两边水室连通。水室侧下方分别有人孔和一回路管接头。检修时,SG 的人孔可打开用于进入检修,如图 1 所示。机器人的任务是从人孔进入 SG 水室检查所有管孔以及整个水室表面,当发现缺陷时,采取必要的手段进行维修。

检修机器人设计指标包括:负载力 $\geq 270\text{ N}$,重复精度 $\pm 0.5\text{ mm}$,定位精度 $\pm 1\text{ mm}$,臂展适合各 SG 型号要求,能在湿漏、辐射环境下工作,强调安全性和减少操作人员辐照剂量。

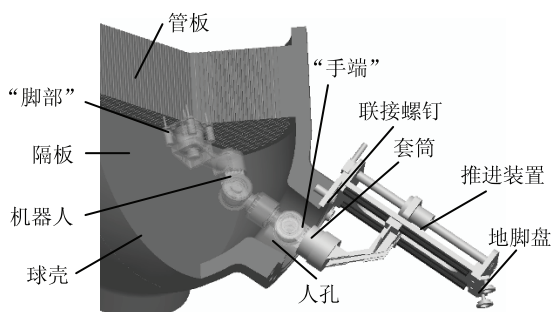


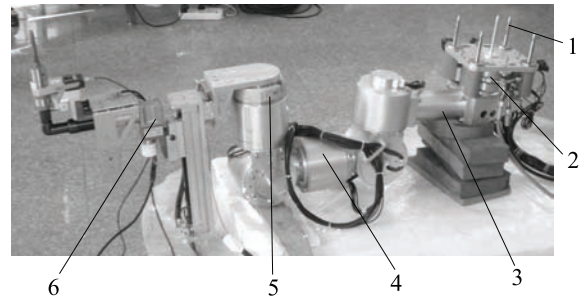
图 1 SG 水室和机器人安装

Fig.1 SG chamber and robot installing

2.2 结构方案

如图 2 所示,机器人主体由“脚部”、6 个转动关节、“释配器”以及连杆以模块化方式组成。更换

大臂和在第 4、5 关节之间增加小臂可使机器人构型参数满足不同型号 SG 的检修需求。“脚部”是一个能使机器人在管板上固定的特殊吸附结构,包含 4 个“胀紧脚趾”和一个“导向脚趾”。“释配器”是机器人快速松开与夹紧检修工具设备的联接机构,它集成在第 6 关节上,称为“手端”。此外,系统还包括一个协助机器人安装和退出的推进装置。



1. 脚趾 2. 一关节 3. 大臂 4. 四关节 5. 手端 6. 堵管工具

图 2 机器人结构组成

Fig.2 Components of the robot

机器人在役检修作业过程分为:安装、检修、退出三个阶段。安装阶段,“手端”插在推进装置套筒内,机器人在推进装置协助下,从人孔进入 SG 水室,4 个“胀紧脚趾”插入管孔后膨胀使机器人安装在管板上,如图 1 所示;检修阶段,“手端”与推进装置分离并快速联接检修工具,“手端”携带工具进入 SG 检修;退出是安装的逆过程。整个作业过程,安装推进装置时仅需拧紧两个联接螺钉和微调地脚盘,检修工具为快拆快装方式,手工作业时间仅有十几秒;其余工作主要在远端计算机上以虚拟主从方式操控完成。

特殊的“手脚互换”作业方式使机器人在一次安装后能够完成多项检修工作,提高了检修效率,并且最大程度地减少了工作人员的辐照剂量。

3 构型与作业空间分析 (Configuration and workspace analysis)

3.1 构型分析

若不考虑工具自由度,机器人安装和检修都至少需要 6 个自由度。鉴于检修过程的主体地位,以检修为主、安装为辅,按“臂腕分离”原则确定构型。后三轴相交成“腕”,重点分析“手臂”结构。

由转动关节 R 和移动关节 P 组成的“手臂”有 8 大类:RRR、RRP、RPR、PRR、RPP、PRP、PPR、PPP。核电环境下,电气驱动比液压伺服驱动方便且故障风险小。因此,主要从 RRR 类中选择构型。

D-H 法用 α, a, d, θ 四个参数描述连杆及相邻连

杆位置关系，实际应用中 α 取值有 0° (或 180°) 和 90° 两种。基于 α 、 a 是否为零拓扑分类，可划分 4 类连杆，排除一种退化结构 ($\alpha = 0$ 且 $a = 0$)，两转动关节连接方式有 3 种：垂直相交 \perp ，交叉垂直 \times ，平行 \parallel 。RRR 类共可组合 9 种构型： $R\perp R\perp R$ 、 $R\perp R\times R$ 、 $R\perp R\parallel R$ 、 $R\times R\times R$ 、 $R\times R\perp R$ 、 $R\times R\parallel R$ 、 $R\parallel R\parallel R$ (退化成 2 自由度)、 $R\parallel R\times R$ 、 $R\parallel R\perp R$ 。

以关节负载最小为目标，优选 $R\parallel R\perp R$ 型“手臂”。则机器人总体构型可符号表示为：检修时， $R_1\parallel R_2\perp R_3\perp(R_4\perp R_5\perp R_6)$ ；安装时， $P-R_6\perp R_5\perp(R_4\perp R_3\perp R_2)\parallel R_1$ ， P 由推进装置提供。该构型的主要优点是：检修时，力臂大的第 1、2 关节的驱动件不承担机器人重量和主要作用力，降低了关节力矩要求；安装时，第 2~4 关节形成“腕”结构， $P-R_6\perp R_5\perp(R_4\perp R_3\perp R_2)$ 满足“臂腕分离”原则，是运动学解耦结构。

3.2 作业空间

机器人工作空间主要由“手臂”几何参数决定。第 2、3 关节应尽可能紧凑，以方便机器人从人孔进入 SG，主要确定的参数为大臂 l_1 和小臂 l_2 ，其中 l_1 为第 1、2 关节轴线距离， l_2 为第 3、5 关节轴线距离。

业空间匹配性为目标，采用网格优化法优化连杆尺寸： $l_1 = l_2 = 0.45$ 。当“脚部”在阴影区内任一管孔位置安装，机器人作业范围可覆盖“脚部”以外的整个管板面， $l_3 = 0.2$ 对应小阴影区， $l_3 = 0.4$ 对应大阴影区。

图 3(c) 是取 A 点为安装位置仿真得到的三维工作空间包络面，显然，作业范围可覆盖整个水室区域。图 3(b) 中深色区域是采用基于随机概率的数值方法统计出的可行安装区，该可行安装区表明机器人能在图 3(a) 阴影区中取孔安装，并且避开原位置取到第 2 个孔，保证被“脚部”占据的管孔也得到检修。图 3(d) 为随机选取不同时被“脚部”覆盖的两点 B、C 安装后得到的工作空间包络面，它覆盖了 SG 水室空间。

基于随机概率的数值法求可行安装区的基本原理是：首先随机产生大量的关节变量组合值 $[q_1, q_2, \dots, q_7]$ ， $q_1 \sim q_7$ 对应 6 个关节转角和推进装置位移；利用避碰条件和安装时的姿态约束条件剔除不符合要求的组合值，由运动学正解求出合格组合值对应的安装位置；最后搜索出管板上所有可行的安装孔位置。作者在另一文中对该问题进行了详细的阐述 [7]。

安装位置和工作空间分析的结果表明：手脚互换的特殊作业方式可行，机器人有较多可选安装位置；安装于管板中线附近时，检修范围覆盖“脚部”以外所有区域，一次检修率为 95%~98% (与 SG 半径有关)；增加一次手脚互换的运动过程，能检修被“脚部”遮挡的管孔，达到 100% 的检修率。

4 运动学分析 (Kinematic analysis)

4.1 运动学建模

手脚互换过程是机器人多运动模型控制和转换过程。首先确定世界坐标系 $\{W\}$ ：原点为 SG 水室的理论球心， x 轴为隔板法向， z 轴为管板法向， y 轴由右手法则确定。再按 D-H 法分别对安装过程和检修过程建模，如图 4 和图 5，对应的 D-H 参数见表 1，连杆变换矩阵为式 (1)。

$${}^i_{i-1}T = \text{rot}(x, \alpha_{i-1})\text{trans}(x, a_{i-1})\text{rot}(z, \theta_i)\text{trans}(z, d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， α, a, d, θ 为连杆参数， $s\theta_i$ 为 $\sin \theta_i$ 的简写， $c\theta_i$

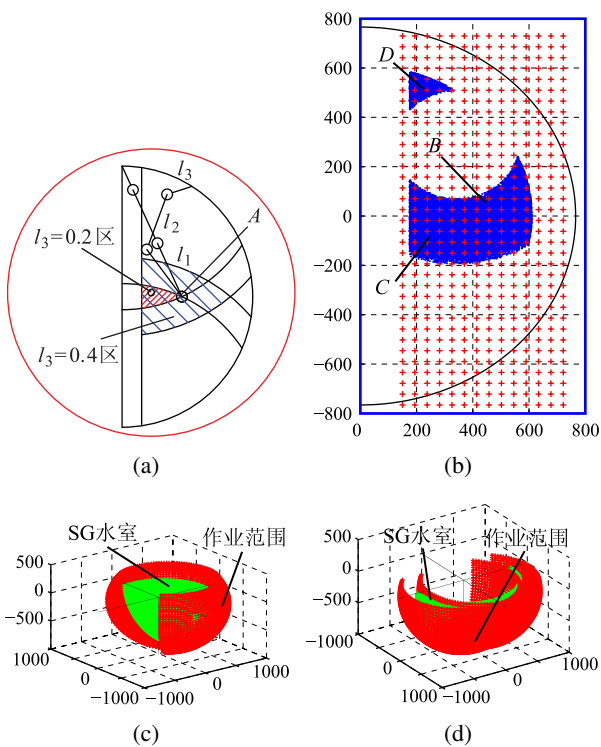


图 3 机器人作业空间
Fig.3 Workspace of the robot

如图 3(a) 所示，俯视图管板平面，机器人可以简化为平面 2R 机构，考虑工具偏心后为 3R 机构。设 SG 半径为 1，工具偏心量 l_3 一般为 0.2~0.4，以作

为 $\cos \theta_i$ 的简写, 其余类似.

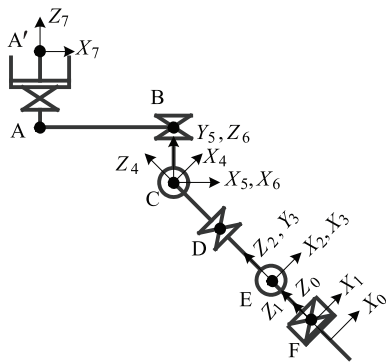


图4 安装过程连杆坐标系

Fig.4 Link-frame during installing

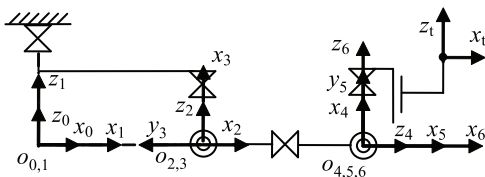


图5 检修过程连杆坐标系

Fig.5 Link-frame during maintenance

机器人运动学核心问题可表述为式 (2), 其中 $q_1 \sim q_n$ 为关节变量, ${}^0_n T$ 为末端执行器参考点位姿. 正解是已知 $q_1 \sim q_n$, 求 ${}^0_n T$; 逆解是已知 ${}^0_n T$, 求 $q_1 \sim q_n$.

$${}^0_n T = {}^0_n T(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2)$$

表1 机器人连杆参数表

Tab.1 Link parameters of the robot

(a) 安装过程					(b) 检修过程				
i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	d_1	0	1	0°	0	0	θ_1
2	0°	0	h_2	q_2	2	0°	l_1	0	θ_2
3	90°	0	0	q_3	3	90°	0	0	θ_3
4	-90°	0	l_2	q_4	4	90°	0	l_2	θ_4
5	90°	0	0	q_5	5	-90°	0	0	θ_5
6	-90°	0	0	q_6	6	-90°	0	0	θ_6
7	0°	l_1	h_1	q_7	t	0°	l_3	d_t	0

机器人检修过程是臂腕分离的6自由度模型, 若 ${}^0_n T$ 的6个独立变量 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ 完全给定, 可得到唯一或若干组 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$, 是非冗余问题. 当机器人检修管板面时, 由于管孔的轴对称性, γ 可任意给定, 此时有一个冗余自由度.

机器人安装过程是7自由度模型, 若固化第1关节 q_7 并将“脚部”视为工具, 机器人转换成臂腕分离的6自由度模型. “脚趾”插入管孔过程, 前6

个自由度只需满足 x, y, z, α, β 共5个独立变量, 而由第1关节转动补偿独立变量 γ , 此时运动学问题与检修管孔时相似.

4.2 无偏心非冗余状态运动学解

4.2.1 检修过程运动学正解

由矩阵连乘可得出运动学正解:

$${}^0_6 T = {}^0_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4.2.2 检修过程运动学逆解

由 p_z, p_x 和 p_y 可依次求得:

$$\theta_3 = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - (p_z/l_2)^2}, -p_z/l_2)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(b, a) \pm \text{atan2}(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}((p_y - l_1 s_1)/s_3, (p_x - l_1 c_1)/s_3) - \theta_1$$

其中, $a = 2p_x l_1, b = 2p_y l_1, c = p_x^2 + p_y^2 + l_1^2 - s_3^2 l_2^2$, atan2 是双变量反正切函数, s_i 表示 $\sin \theta_i, c_i$ 表示 $\cos \theta_i$.

因为 $({}^3_0 T)^{-1} {}^3_6 T = {}^3_6 T$, 由两边对应元素相等得:

$$\theta_5 = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - a'_y{}^2}, a'_y)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(-a'_z/s_5, -a'_x/s_5)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-a'_y/s_5, n'_y/s_5)$$

其中:

$$a'_x = c_{12} c_3 a_x + s_{12} c_3 a_y + s_3 a_z$$

$$a'_y = -c_{12} s_3 a_x - s_{12} s_3 a_y + c_3 a_z$$

$$a'_z = s_{12} a_x - c_{12} a_y$$

$$o'_y = -c_{12} s_3 o_x - s_{12} s_3 o_y + c_3 o_z$$

$$n'_y = -c_{12} s_3 n_x - s_{12} s_3 n_y + c_3 n_z$$

其中 s_{12} 表示 $\sin(\theta_1 + \theta_2), c_{12}$ 表示 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$.

以上得到多组逆解, 利用角度限位和避碰条件选取唯一一组解.

4.2.3 安装过程运动学解

当固化第1关节 q_7 , 类似地, 可由式 (3) 得到安装过程运动学正解.

逆解结果如下:

$$q_2 = \pm \text{atan2}(p_y, p_x)$$

$$q_3 = \text{atan2}(-p_x/c_2 l_2, \pm \sqrt{1 - (p_x/c_2 l_2)^2})$$

$$q_1 = p_z - c_3 l_2 - h_2$$

$$q_5 = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - a'_z{}^2}, a'_z)$$

$$q_4 = \text{atan2}(a'_y/s_5, a'_x/s_5)$$

$$q_6 = \text{atan2}(o'_z/s_5, -n'_z/s_5)$$

以上由角度限位取唯一一组解, 其中:

$$\begin{aligned} a'_z &= s_2 a_x - c_2 a_y \\ a'_y &= -c_2 s_3 a_x - s_2 s_3 a_y + c_3 a_z \\ a'_x &= c_2 c_3 a_x + s_2 c_3 a_y + s_3 p_z \\ o'_z &= s_2 o_x - c_2 o_y \\ n'_z &= s_2 n_x - c_2 n_y \end{aligned}$$

4.3 有工具偏心和冗余度的运动学解

实际工具作业点与连杆坐标系 $\{6\}$ 存在偏心量, 可用 6T 表示. 若工具自由度数为 0, 则 6T 为常矩阵, 正解可由 ${}^0T = {}^0T_6 {}^6T$ 求得, 逆解则由 ${}^0T ({}^6T)^{-1} = {}^0T$ 转化为无工具偏心的情况求解. 安装过程, 将“导向脚趾”趾尖视为工具作业点, 其求解情况与检修过程类似.

当末端姿态转角 γ 不确定时: 由上述方法推导的关节变量 q 是 γ 的函数, 即 $q = q(\gamma)$; 而机器人与 SG 水室环境的距离 D 是 q 的函数, 即 $D = D(q)$. 这就是说, 在满足末端位姿需求的同时, 可以通过改变 γ 调整机器人与 SG 水室内壁的距离, 实现避碰. 在虚拟主手软件系统中建立键盘按键消息与 γ 的映射关系, 由操作员在实际操作中根据虚拟机器人在 SG 模型中所处的位置调整 γ , 避免机器人与 SG 水室碰撞. 此外, 还可以由系统自动优选 γ 值^[8,9].

4.4 手脚互换的运动实现

机器人手脚互换过程需多次运动模型转换和坐标标定, 主要过程如下:

(1) 基于预估矩阵 ${}^0T'$ 的安装过程运动模型控制

由结构尺寸估计安装过程基座 $\{0\}$ 与 $\{W\}$ 的相对位置矩阵 ${}^0T'$, 作 $\{W\}$ 至 $\{0\}$ 的坐标变换, 再以 $\{0\}$ 为基座按 6 自由度模型安装机器人, 必要时采用 4.3 节所述 7 自由度模型调整姿态, 规避障碍.

(2) 安装过程运动模型校正

在安装孔附近, 利用摄像头、角度仪、位移传感器校正“导向脚趾”趾尖独立位姿分量 α, β, x, y , 单独调整第 1 关节校正 γ . 根据当前关节变量值 q , 按安装过程运动学模型正解计算趾尖位姿:

$${}^wT'(x', y', z', \alpha', \beta', \gamma) = {}^0T_0' T(q) {}^6T \quad (4)$$

用 $x, y, \alpha, \beta, \gamma$ 将 ${}^wT'$ 修正为 ${}^wT(x, y, z', \alpha, \beta, \gamma)$, 由式(4)将 $\{0\}$ 相对 $\{W\}$ 的位姿矩阵 ${}^0T'$ 修正为 0T .

(3) 校正后的安装过程运动模型控制

按 0T 作 $\{W\}$ 至 $\{0\}$ 的坐标变换, 以 $\{0\}$ 为基座控制趾尖沿 $\{W\}$ 的 z 方向运动直至完全插入管孔. “胀紧脚趾”膨胀后, 安装过程结束.

(4) 检修过程运动模型控制和带工具控制

推进装置与机器人本体分离, 以安装位置为基座 $\{0\}$, 按检修过程 6 自由度模型控制机器人, 挂接检修工具, 标定工具后对管孔进行检修.

机器人退出过程与安装过程大体相反.

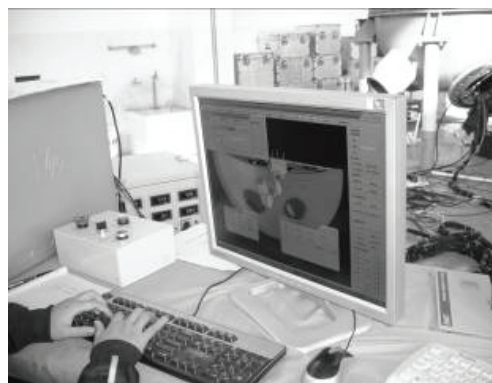
5 试验结果 (Experimental results)

按照 SG 在役检修的实际情况, 研制了某型 SG 水室模型体和机器人样机系统, 建立完整的现场试验平台. 考虑到在役检修工具系统对机器人的指标要求不尽相同, 国内又没有自主产权的产品, 而“堵管”作业对机器人负载能力要求最大、各项综合性指标要求都较高, 因此, 我们选择“堵管”做现场试验. 局部改造国外的手动堵管工具设备使之能与机器人相联, 在试验平台上对系统进行了全面的考核和试验.

现场试验中, 机器人很好地完成了堵管作业, 图 6 为现场试验照片. 机器人样机系统的主要性能和参数如表 2 所示, 它表明机器人可以满足其它检修项的作业要求. 机器人手脚互换的特殊作业方式符合在役检修特点, 操作便捷.



(a) 机器人安装



(b) 虚拟主手

图 6 模拟现场试验

Fig.6 Test in simulated field

表2 机器人综合性能参数

Tab.2 Comprehensive performance of robot

总重量	62.5 kg
末端负载力	≥ 280 N
重复精度	±0.5 mm
定位精度	±1 mm
覆盖区域	理想工具条件下虚拟运行: 100%检修区域; 手动堵管工具改造后实测: 93%以上检修区域
安装时间	约 20 min, 其中手工操作时间约 5 min
其它功能	具备碰撞检测、限位保护、远程复位、自动轨迹规划、人工紧急干预、位置测量等功能

6 结论 (Conclusions)

(1) 根据核电站 SG 一次侧在役检修的特殊要求, 研制了一个全新的以手脚互换方式作业的 6R 机器人。

(2) 确定了机器人可两端作业的串联运动链构型, 通过工作空间和运动模型分析论证了手脚互换特殊作业方式的可行性。

(3) 结合机器人特点, 解决了有障碍约束和姿态约束的工作空间分析、空间结构冗余自由度机器人逆解、统一坐标系下手脚互换运动实现等几个关键技术问题。

进行了现场试验, 测试了机器人样机的各项功能指标, 验证了方案的可行性和优越性。

该机器人的成功研制对我国核电在役检修自主设备能力的提升具有重要意义。机器人的特殊 6R 构型和手脚互换作业方式, 提供了一种新的构型设计思路。

参考文献 (References)

- [1] 丁训慎. 蒸汽发生器的维修技术与工具 [J]. 核电工程与技术, 2004, 17(3): 23~27,35.
- [2] Wälischmiller W, Lee H Y, Hans W, *et al.* Application of the Telbot robot in hazardous environments[J]. Nuclear Plant Journal, 1996, 14(5): 3~6.
- [3] Bastin J J, Nair B. Advances in steam generator service technology[J]. Nuclear Plant Journal, 1997, 15 (5): 34,36,39,40.
- [4] Obrutsky L J, Renaud J, Lakhan R. Steam generator inspections: Faster, cheaper and better, are we there yet? [EB/OL]. <http://www.ndt.net/article/panndt>, 2008-03-30.
- [5] Rastogi A K, Gaur D N, Godbole U. Indigenous development of an integrated system for steam generator eddy current in-service inspection[J]. Nu-Power, 2000, 14(4): 35~37.
- [6] Jeong K, Choi Y, Lee S, *et al.* Tele-operated robotic systems for nuclear power plants in South Korea and lessons learned[A]. 1st Joint Emergency Preparedness and Response/Robotic and Remote Systems Topical Meeting[C]. La Grange Park, IL, USA: American Nuclear Society, 2006. 497~502.
- [7] Wang L Q, Wu J R, Tang D D. Research on workspace of manipulator with complicated constraints[A]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008. 995~999.
- [8] 张智, 朱齐丹, 吴自新. 基于免疫遗传算法的机械手避碰逆解 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 514~518.
Zhang Zhi, Zhu Qi-dan, Wu Zi-xin. Collision free inverse kinematic solution of manipulator based on immune genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 514~518.
- [9] 张立勋, 王克义, 徐生林. 绳索牵引康复机器人控制及仿真研究 [J]. 智能系统学报, 2008, 3(1): 51~56.
Zhang Li-xun, Wang Ke-yi, Xu Sheng-lin. Control and simulation of a wire-driven rehabilitative robot[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(1): 51~56.

作者简介:

王立权 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 仿生机器人技术, 水下机器人作业技术, 水下特种作业装置与系统技术.

吴健荣 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人结构技术, 机器人控制.

刘于珑 (1963-), 男, 研究员. 研究领域: 蒸汽发生器检修、维护、管理, 核电站专用检修工具.