

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.011

压力容器检测机器人构型设计与工作空间分析*

肖 华,张 辉,靳静娟

(武汉大学 动力与机械学院,湖北 武汉 430072)

摘要:针对一种压力容器无损检测任务中人员安全的问题,对压力容器入口狭小、内部空间大、内部环境恶劣的特点进行了分析,对机器人的奇异性、负载能力、工作空间、安装方式和时间进行了研究,基于“臂腕分离”原则提出了一种六自由度串联机器人构型;利用 Matlab 软件对机器人的工作空间进行了仿真,通过三维建模描述了其工作过程,同时还利用机器人实体样机实验对机器人的负载性、安装方式和时间、工作空间进行了测试。研究表明,机器人的构型设计符合工作空间的要求,该机器人可以负载 20 kg 仪器顺利地完成任务,单个人可以安全地完成安装任务,并且将安装时间缩短到半个小时以内。该机器人的成功研制可以保障人员安全,这种构型方法为该类机器人的设计提供了参考依据。

关键词:压力容器;机器人;构型设计;工作空间

中图分类号:TH49;TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1071-05

Configuration design and workspace analysis of a pressure vessel inspection robot

XIAO Hua, ZHANG Hui, JIN Jing-juan

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aimed at the artificial safety problems in the non-destructive testing tasks of a kind of pressure vessel, the features (narrow entrance, large interior space, the bad internal environment) of the pressure vessel were analyzed and the singularity, load capacity, workspace, the way and time of installation of the robot were studied. A kind of robot with 6 degrees of freedom was designed by arm-wrist separateness principle. The calculation and simulation were executed by Matlab software for the workspace of the robot and the process of its working was described through three-dimensional modeling. The load capacity, workspace, the way and time of installation of the robot were tested by the physical prototype experiment. The results indicate that the configuration of the robot meets the requirements of the workspace. The robot can successfully complete the inspection tasks with 20 kg instruments, and a single person can complete the installation tasks safely and the time of installation is less than half an hour. The robot successfully designed can ensure the safety of personnel. This configuration method provides a reference for the design of such robots.

Key words: pressure vessel; robot; configuration design; workspace

0 引 言

压力容器是一种被广泛应用于石化、核能等领域的设备,在使用时,有相当一部分压力容器处于腐蚀、非常温和高压的工作状态^[1],为保障安全生产,需要对这些容器的关键位置进行定期检查。由于压力容器内部环境恶劣,用机器人携带检测仪器代替工作人员

进入容器内部完成检查任务成为一种更为安全、有效的方式,研究者们也一直致力于此类机器人的研究。

美国 ZETEC 公司针对核电站蒸汽发生器的检修工作而研发了两个系列的机器人——ZR 和 SM 系列^[2];美国西屋公司研制的用于蒸汽发生器检测的机器人 ROSA-III C 和法国阿海珐公司的 COBRA 机器人都为固定基座式^[3];国内借鉴国外经验,哈尔滨工程

收稿日期:2015-03-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2042012kf2009)

作者简介:肖 华(1960-),男,湖南衡阳人,副教授,硕士生导师,主要从事机械制造自动化方面的研究. E-mail:hxiao2000@126.com

大学和某研究所合作,在国内首次自主研发了一个能完成多项蒸汽发生器内部检修任务的机器人样机^[4]。国内外对于机器人构型设计的主要方法为经验法和拓扑分析法^[5],但对该类密闭容器检测机器人还没有形成特定的构型设计方法;该类机器人存在重量较大,搬运不方便,安装时间长的问题;人工需要进入容器内部对机器人进行安装,容器内部的辐射对人工的健康是极其不利的。

本研究对检测机器人相关要求进行分析,提出相关构型设计的要求,并通过实验对其进行验证,可为压力容器检测机器人的构型设计提供一定的理论参考。

1 机器人构型设计

1.1 机器人相关要求分析

压力容器的内部空间为若干段曲面组合而成,待检查的管道与人孔有一定的距离(容器外部示意图如图 1 所示,图中中间的孔为人孔,两侧的孔为待检管道)。容器的人孔是为了便于机器人定位(将机器人的基座固定在人孔空口的法兰面上),但人孔的直径通常较小,所以要求该类机器人的体积要小;由于容器内部空间很大,机器人要有足够大的检测范围,所以需要较大的工作空间,机器人要有良好的伸展性;同时人孔和待测管道之间的距离较远,要求机器人末端能携带 20 kg 的仪器运送至待测管道完成检查作业;机器人在工作过程中,机器人杆件变形要在合理范围以内,不能与容器内壁产生碰撞。



图 1 容器外部示意图

目前,大部分机器人都是先在容器外面将各个关节全部伸展开,然后人员将机器人末端从人孔伸入到容器内部,另外的人员需要进入容器内抓住机器人末端协助外面的人员进行机器人的安装^[2-3]。该类机器人重量一般在 50 kg ~ 70 kg 左右,安装时需要多个人搬运,人工还要进入容器内部协助安装,安装时间在两个小时左右,费时又费力,而且在恶劣环境中工作是极其不安全的,所以要求机器人重量在 50 kg 以下,要便于单个人搬运,安装时间要缩短,要保障人工的安全。

该检测机器人的构型设计采用“臂腕分离”原则,

机器人的臂部和腕部将分开研究^[6]。

1.2 机器人臂部构型的奇异性

机器人构型设计时,一般应避免设计的机器人具有结构奇异性,以防止无效的关节驱动增加到结构设计中。机器人在奇异位置附近时可控性很差,需要在运动规划中加以考虑。王才东^[7]通过分析计算机器人臂部的雅克比矩阵,得出了 20 类非奇异性的臂部结构,机器人的臂部结构可以从中选取。

1.3 机器人臂部构型的负载能力特性

笔者研究的机器人选择基座安装方式,安装在人孔的法兰盘上,机器人要将仪器运到待测管道内部,根据容器结构特点,选择臂部第一个关节为转动关节。由于机器人负载较大,需要良好的负载能力和刚度,笔者根据机器人设计的相关原则^[8],让第 1 关节的轴线与重力方向平行,第 1 关节驱动器就无需承担末端负载力;考虑到人孔的几何约束以及机器人的实际体积,机器人的关节在通过人孔时,沿人孔轴线方向移动进入容器较为合适,第 2 个关节为移动关节;在臂部结构进入容器后再利用旋转关节将小臂伸展开。该设计选择第 1 关节和第 2 关节轴线共线,为增大机器人负载能力,第 3 关节轴线和第 1 关节轴线之间的距离尽量小。

1.4 机器人工作空间分析

该检测机器人在一个 1/4 圆球容器中工作,同时机器人检测的是一个管道,考虑到需要让机器人的工作空间可以覆盖足够的区域,选择圆柱形的工作空间比较有利于任务的完成。刘成良^[9]通过对机器人臂部提出了若干种备选构型,从中确定 $R//P \perp R$ 构型为臂部构型。其中: R —转动副; P —移动副; $//$ —两运动副的轴线平行(包含重合情况); \perp —两运动副轴线垂直相交。

1.5 机器人腕部构型分析

末端检测仪器只需要两个方向调整姿态,故腕部的旋转关节为 $R \perp R$,但是考虑到管道与人孔距离的不同,本研究在 3、4 关节之间增加一个移动副,增加了机械臂的伸展范围,并没有改变原来的 3、4 关节之间的空间配置关系。当进入容器时,小臂处于最短状态,当关节 3 带动小臂转到预定角度时,小臂再伸长至所需长度。

本研究通过对检测机器人具体要求分析,从机器人臂部构型的奇异性、负载能力、工作空间等多个角度考虑,最后确定此检测机器人为 6 个自由度,构型为 $R//P \perp R \perp P \perp R \perp R$,快速转换接头如图 2 所示。

1.6 机器人设计分析

本研究设计的机器人在不影响机器人刚度的情况

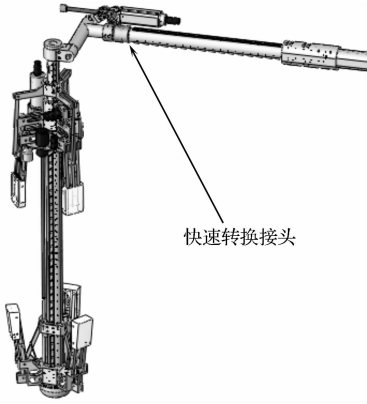


图 2 快速转换接头

下,部分材料采用了铝合金,将机器人的重量减少到了 50 kg 以下;该机器人的第 2 个关节和第 5 个关节都为移动副,增大了机器人的伸展性,使得机器人在初始状态时的体积小,可以顺利通过人孔,进入容器内部后可以伸展检测远距离的管道。

本研究对该机器人的安装方式进行了创新设计。即机器人先安装在人孔法兰上,然后再进入容器内部伸展,无需人员进入具有辐射的容器内部进行工作,利于人员的安全;在该机器人的第 4 关节和第 5 关节之间添加了一个快速转换接头(如图 2 所示),将该机器人分成了两个部分,每个部分的重量都在 30 kg 以下,很方便一个人安装;先将机器人的第一部分(基座部分)安装在人孔法兰上,然后通过快速转换接头将第二部分(检测机构部分)和第一部分连接在一起,最后连接相关电缆。

2 机器人工作空间研究

2.1 机器人运动学分析

本研究用 D-H 法对机器人进行建模^[10],机器人的连杆坐标系如图 3 所示。D-H 参数表如表 1 所示。

连杆	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i	变量
1		0	θ_1	0	$0^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$
2		0	0	d_2	$0.94 \leq d_2 \leq 3.04$
3		0.13	θ_3	0	$0^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ$
4		0	0	d_4	$1.98 \leq d_4 \leq 3.08$
5		0	θ_5	0	$-180^\circ \leq \theta_5 \leq 0^\circ$
6		0	θ_6	0	$-180^\circ \leq \theta_6 \leq -90^\circ$

为简化模型,参数的长度单位未标明的均为某一单位长度。 T 是一个 4 阶方阵,被称为直角坐标系的齐次坐标变换,它建立了两个坐标系的关系。

根据 D-H 法,表 1 和图 3 中: α —两相邻 Z 轴的角度; a —相邻 Z 轴公垂线的长度; θ —绕 Z 轴旋转角; d —在 Z 轴上的两条相邻 X 轴之间的距离。

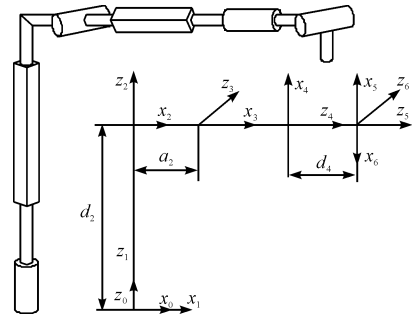


图 3 六自由度机器人构型示意图和 D-H 连杆坐标系

各连杆间的变换矩阵为:

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} S\theta_n & -S\theta_n C\alpha_n & S\theta_n S\alpha_n & \alpha_n C\theta_n \\ S\theta_n & C\theta_n C\alpha_n & -C\theta_n S\alpha_n & \alpha_n S\theta_n \\ 0 & S\alpha_n & C\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $S\theta_n$ — $\sin\theta_n$; $C\theta_n$ — $\cos\theta_n$; $S\alpha_n$ — $\sin\alpha_n$; $C\alpha_n$ — $\cos\alpha_n$ 。

将表 1 中的各参数分别代入式(1),机器人的基座与机器人末端之间的总变换为 0T_6 ,运动学方程^[13]:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & \alpha_x & p_x \\ n_y & o_y & \alpha_y & p_y \\ n_z & o_z & \alpha_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_6(c_1c_3c_5 - s_1s_5) - c_1s_3s_6 & -s_6(c_1c_3c_5 - s_1s_5) - c_1s_2c_6 & c_1c_3c_5 + s_1c_5 & a_2c_1 - d_4c_1s_3 \\ c_6(s_1c_3c_5 + c_1s_5) - s_1s_3s_6 & -s_6(s_1c_3c_5 + c_1s_5) - s_1s_3c_6 & s_1c_3s_5 - c_1c_5 & a_1s_1 - d_4s_1s_3 \\ -s_3c_5c_6 - c_5s_6 & s_3c_5c_6 - c_3c_6 & -s_3s_5 & d_2 - c_3d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: s_1 — $\sin\theta_1$, c_1 — $\cos\theta_1$, 依此类推。

2.2 机器人工作空间求解

通过运用 Matlab 软件可以得到表示机器人工作

空间的点云图^[12],由式(2)可知机器人末端在基础坐标系中的位置向量为:

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2c_1 - d_4c_1s_3 \\ a_2s_1 - d_4s_1s_3 \\ d_2 - c_3d_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

结合表 1 及公式(3),本研究运用蒙特卡洛法对机器人的工作空间进行描述^[13],机器人工作空间点云图如图 4 所示。

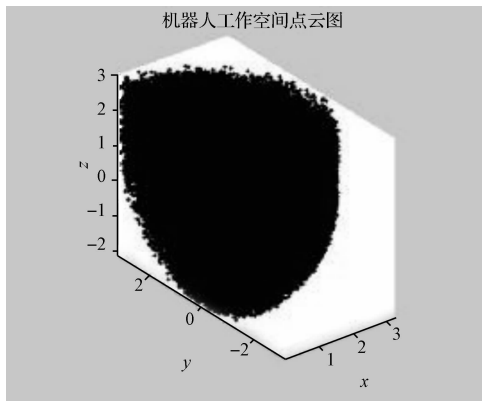


图 4 机器人工作空间点云图

通过在各关节变量变化范围内随机取 250 000 个点所形成的机器人工作空间点云图如图 4 所示。由图 4 可看出,机器人的工作空间无明显空洞,且能较好地覆盖四分之一圆球形的容器内部空间,由此证明了前述容器机器人构型综合方法的合理性。

2.3 仿真实验

对机器人完成了各零部件的设计之后,本研究用三维软件 Solidworks 对其进行了三维建模,机器人携带检查设备进入压力容器中的工作过程如图 5 所示。

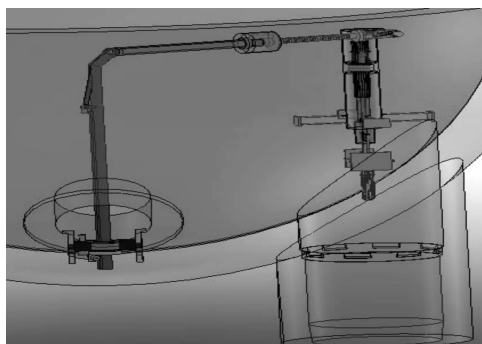


图 5 机器人携带检查设备在容器内部伸展的工作过程

通过软件可以直接测量机器人在工作过程中机器人的避让情况,机器人在第 2 关节伸展位移最大时 Z 轴方向距离容器内壁最短距离为 80.40 mm, Y 轴方向为 1 298.88 mm, X 轴方向为 1 667 mm,各个方向均距离罐体

内壁 40 mm 以上,满足间隔要求。该仿真实验结果验证了上述求解的机器人工作空间能够满足检查任务的要求。

3 机器人样机实验及结果分析

通过对机器人的仿真实验,本研究确定了机器人方案的可行性,并将研制出来的样机负载 20 kg 的设备在实验室 1:1 的压力容器中模拟进行了机器人样机工作实验,机器人末端检测设备上还安装有摄像头,可以通过电脑远程操控,实时观看容器内部检测情况。压力容器机器人在容器内部时的收拢和展开的两个姿态如图 6 所示。

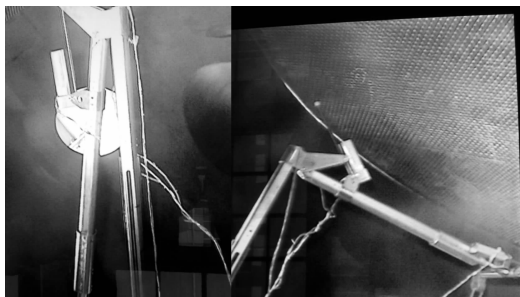


图 6 机器人在容器内部收拢和展开的两个姿态

实验结果表明,一个人可以在 0.5 h 以内完成机器人的安装,验证了机器人安装方式的合理性;该机器人完全能够携带设备顺利进入压力容器内部,并且能够顺利展开到达指定的位置完成检查任务,最后能够顺利退出压力容器,这一结果表明机器人有很好的伸缩性;同时机器人没有产生大的塑性变形,与容器内壁间隔都在合理范围之内,这一结果表明机器人的负载能力和刚度满足要求;在整个工作过程中人工不用进入容器内部,极大地保障了人工的安全;压力容器检测机器人代替了人工完成检测任务是一种更加有效的方式。

4 结束语

本研究对压力容器检测机器人进行分析,提出了一种机器人构型综合方法,通过添加移动副增加了机器人的伸缩性,通过增加快速转换接头和改变机器人安装方式,缩短了机器人的安装时间,最后通过样机实验验证了机器人的可行性,实验结果证明了前述容器机器人构型综合方法的合理性。本研究结果可为压力容器检测机器人的设计研究提供参考和借鉴。

(下转第 1079 页)

本文引用格式:

肖 华,张 辉,靳静娟. 压力容器检测机器人构型设计与工作空间分析[J]. 机电工程,2015,32(8):1071-1074,1079.

XIAO Hua, ZHANG Hui, JIN Jing-juan. Configuration design and workspace analysis of a pressure vessel inspection robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(8):1071-1074,1079.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>