

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.002

# 集箱焊瘤打磨机器人的结构与位姿分析

徐子力, 韩丽楠, 张伟森, 陈 龙  
(上海大学 精密机械系, 上海 200072)

**摘要:** 针对集箱内壁焊瘤打磨作业存在安全性与高效性不足的问题, 研制出了一种新型的轮式驱动集箱焊瘤打磨机器人。首先介绍了集箱焊瘤打磨机器人的结构组成和工作原理, 根据机器人在集箱内壁中的通过性具体要求, 分析了集箱焊瘤打磨机器人在集箱内壁复杂环境中的越障性能, 及摩擦力与轮子直径对机器人越障能力的影响; 然后通过建立机器人在集箱内壁面上的运动学模型, 分析了机器人的位姿与各轮子的运动轨迹; 最后对样机进行了试验。试验及研究结果表明: 该焊瘤打磨机器人响应速度快, 行走能力也达到了设计要求。

**关键词:** 打磨机器人; 圆形集箱或管道; 越障通过性; 位姿

**中图分类号:** TH122; TP242 文献标志码: A

**文章编号:** 1001-4551(2014)04-0414-06

## Construction design and position analysis of wheeled polishing robot

XV Zi-li, HAN Li-nan, ZHANG Wei-sen, CHEN Long

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Aiming at the safety and efficiency issues of grinding operations in boiler header, a new type of wheel-drive robot was developed. The construction and working principle of the robot was introduced. According to wheel pipe robot specific requirements, the influence of the wheel diameter and friction to the performance of overcoming obstacles in the complex environment of the inner wall header was discussed. A kinematic model of the robot was established to analyze the pose and motion trajectory of each wheel. Meanwhile, experimental study on the moving performance was carried out on the prototype. The results indicate that the wheeled polishing robot has fast response and good moving ability, experimental data meet the design requirements.

**Key words:** polishing robot; circular header or pipe; trafficability; pose

## 0 引 言

集箱是锅炉工质混合、保证工质均匀加热的管件。在各种型号或等级的锅炉中, 集箱的结构基本相似, 大多是由筒体、端盖、大小管接头、三通、弯头和附件等零件组成。集箱筒体全部采用大直径无缝钢管焊接而成, 电站锅炉中集箱的筒体直径范围一般为 $\Phi 89$  mm~ $\Phi 914$  mm, 壁厚范围为7 mm~150 mm, 最大长度约23 m。在集箱制造过程中, 集箱内壁环焊缝处焊瘤打磨采用人工作业, 存在着劳动强度大、工作环境恶劣和打磨质量控制困难等问题。本研究拟采用先进的机器人技术, 研制集箱焊瘤打磨机器人以代替人工进行集箱内壁环焊缝打磨作业。

近年来, 国内外学者均对管道内的移动机器人开展了相关研究, 其中, 维也纳大学的 Luis A. Mateos 等<sup>[1]</sup>开发出用于检测自来水管道的轮式管道机器人。日本 Gunma 大学的 Kosuke Nagaya 等人<sup>[2]</sup>研制出一种磁履带式机器人, 其爬行于管道内壁的“天花板”上, 使用无线电控制机器人的运动。韩国 Se-gon Roh 等人<sup>[3]</sup>对多关节轮式管道机器人及微型差动驱动的轮式管道机器人进行研究, 研制出了 MRINSPECT 系列管道机器人。神奈川大学的 Kaname Sato 等人<sup>[4]</sup>研制了尺蠖式管道爬行机器人, 能够通过调整一系列关节适应不同直径的管道。Sari Yabe 等人<sup>[5]</sup>开发了一种弹簧轮式管道机器人, 通过弹簧的变形实现适应不同直径管道的功能。国内沈阳航空航天大学叶长龙等<sup>[6]</sup>针对空调管道系统, 研发了一个能够在垂直管道爬行的管道

收稿日期: 2013-11-11

作者简介: 徐子力(1971-), 男, 四川攀枝花人, 讲师, 主要从事特种机器人方面的研究. E-mail:zilixu@163.com

清洁机器人。哈尔滨工业大学的邓宗全等人<sup>[7]</sup>针对海底管道系统开发出了六轮驱动的轮式管道机器人。

在参考借鉴上述各类管道机器人运动原理与结构的基础上,针对集箱结构特点和打磨作业需求,上海电气集团与上海大学联合研制出集箱焊瘤打磨机器人,将其应用于集箱焊瘤打磨作业。本研究首先对集箱焊瘤打磨机器人工作原理和结构进行分析;其次,对机器人在集箱内的越障性能进行讨论;最后,推导出机器人轮子在集箱内壁表面的位姿约束方程,并求出轮心速度以及轮子与集箱内壁接触点位置,为机器人在集箱内的运动控制提供必要基础。

## 1 集箱焊瘤打磨机器人结构设计

### 1.1 机器人功能需求描述

集箱本体结构复杂,内壁空间分布各类管接头、三通、弯头和孔洞等,并且内壁上存在V形焊接坡口和孔洞。集箱内壁焊缝打磨时,可以水平放置在滚轮架上,通过滚轮架调整其位姿。集箱内壁焊缝打磨机器人的主要功能需求如下:

(1) 机器人可适用内径 $\Phi 550\text{ mm} \sim \Phi 714\text{ mm}$ 的集箱,在集箱内具备良好的移动、定位和越障性能;

(2) 机器人具备视觉反馈及监控打磨过程、自动补偿砂轮磨损和管壁偏心等功能;

(3) 机器人能够在集箱焊缝处完成定点、局部范围以及整个环焊缝遍历等多种焊瘤打磨作业模式。

### 1.2 机器人的结构与工作原理

为使机器人能够实现在集箱中快速移动,定位及焊瘤打磨等功能,本研究采用模块化思想设计的机器人实物样机如图1所示。

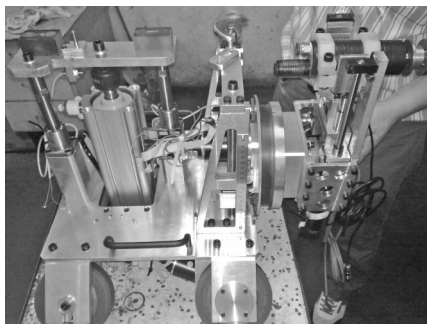


图1 集箱焊瘤打磨机器人样机

集箱内壁焊瘤打磨机器人可以按功能划分为6个功能模块,机器人的机构组成如图2所示。各模块可整体安装和拆卸,便于机器人推广其他工程应用。机器人配有CCD相机,能够对打磨点和打磨后的焊缝表面进行检测。

管道内移动机器人按照移动方式分类,主要有:

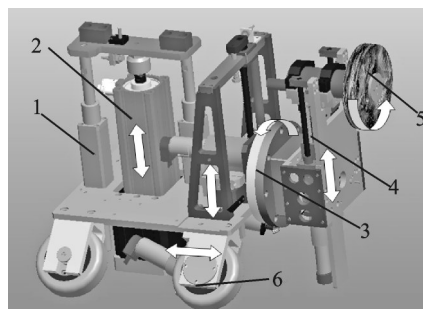


图2 机器人的结构组成

1—机器人本体;2—支撑模块;3—周向旋转模块;4—径向调整模块;5—打磨模块;6—行走模块

活塞移动式、滚轮移动式、履带移动式、足腿移动式、弹簧支撑移动式、蠕动移动式等<sup>[8-12]</sup>。依据集箱的结构特点和作业任务需求,集箱内壁焊瘤打磨机器人采用左、右前轮单独驱动的四轮移动方式,其中左轮和右轮与水平面成 $45^\circ$ 夹角,较好地解决了机器人快速移动,在集箱内移动时走偏进行纠偏和稳定定位的需求;由于集箱内壁圆度存在较大偏差,并且集箱内壁作业环境复杂,选择气缸顶升夹紧方案,使得机器人的4个轮子连同气缸夹紧块与集箱内壁接触,形成一个稳定的三点支撑,为打磨作业提供稳固的支撑平台;周向旋转模块和径向调整模块共同作用,调整机器人打磨模块中的砂轮机所处的位姿,使得砂轮外圆表面与环焊缝保持内切,进而可以在环焊缝圆周方向任意位置进行打磨;径向调整模块分为手动粗调整和自动调整两个部分,机器人进入集箱前,通过手动粗调整,使机器人周向旋转模块回转中心与集箱轴线基本重合。机器人在集箱内定位夹紧后,通过径向自动调整功能,使砂轮外圆表面工作时始终与需打磨的焊缝内切,并使正压力保持在一定范围内。径向自动调整模块可以自动补偿砂轮磨损和集箱管径偏心引起的砂轮位姿径向调整要求,同时减少或避免砂轮发生过磨现象,保证打磨的质量;打磨模块采用安全可靠的气动砂轮机。

集箱焊瘤打磨机器人工作流程如下:

(1) 通过手动调整模块粗调,使旋转模块回转中心与集箱轴线共线,并且锁定;

(2) 借助CCD反馈图像,人工控制行走模块驱动机器人运动至目标位置;

(3) 气缸顶升,实现机器人在集箱内的定位夹紧;

(4) 旋转模块带动CCD围绕环焊缝回转扫描,通过反馈图像判断集箱焊缝情况以及待打磨区域。打磨模块进行打磨时,CCD可以对打磨情况实施监控;

(5) 打磨模块工作时,借助周向旋转模块和径向调整模块调整砂轮机位姿,实施各种打磨作业模式;

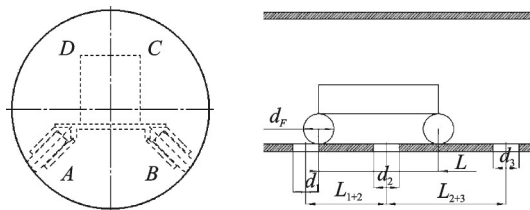
(6) 打磨作业完成后,气缸下降,解除定位夹紧;

(7) 行走模块驱动机器人继续作业或退出集箱。

## 2 机器人在集箱中的越障能力分析

### 2.1 集箱中孔洞分布情况和越障性能

集箱管壁分布有大量的空洞和V形焊接坡口,结构较为复杂,相对于孔洞类障碍而言,机器人容易通过V形坡口,故本研究只针对孔洞讨论机器人的越障性能。将集箱水平放置在滚轮架上,孔洞可能出现在如图3(a)所示的A, B, C和D等4个区域。通过调整滚轮架,使集箱内孔洞分布较少的A, B两个区域处于如图3(a)所示的相对低位。集箱内壁孔洞沿轴向分布情况如图3(b)所示。机器人在集箱内要具备良好的移动性能和越障能力,则机器人的尺寸将有一定的限制。



(a) 集箱孔洞位置分布图 (b) 轴线方向孔洞分布示意图

图3 集箱、轴线方向孔洞分布示意图

### 2.2 越障能力分析

假设在A, B两个区域内,沿着集箱轴线方向,机器人车轮运动轨迹上分布有n个孔洞,其直径分别为 $d_1, d_2, d_3 \dots d_i$ 。

$$\begin{cases} 0 < d_i < d_r \\ L + d_r \neq L'_{i+j} + \frac{d_i}{2} + \frac{d_j}{2} \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots, i \neq j) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L'_{i+j}$ —第i个孔洞与第j个孔洞中心之间的距离,  $d_r$ —机器人轮子直径,  $L$ —前轮轮心与后轮轮心之间的距离。

当机器人的结构满足式(1)时,轮子的直径越大,越障性能越好。

机器人上移动坐标的建立如图4所示。当机器人驱动轮陷入孔洞,可能产生打滑现象,即使加大驱动力,机器人也不会越过孔洞,而是原地打滑。此时,机器人的越障性能与轮子的正压力、驱动轮的直径和摩擦系数有关,提高摩擦系数比较困难,比较可行的方

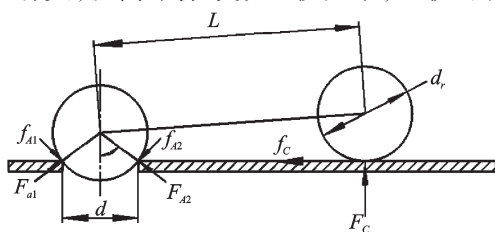


图4 机器人上移动坐标的建立

法是增加轮子的正压力,或者增加轮子的直径。

## 3 打磨机器人在集箱中的位姿描述

宋章军等人<sup>[13]</sup>研究了单个轮子在圆管柱面上的运动描述,并分析了三轮机器人在圆管柱面上的运动学模型。而集箱修磨机器人4个轮子的布置方式不是传统的水平布置或者空间多轮支撑布置,其中4个轮子均为固定轮,且各轮之间的轮心距不变。如果把机器人处理成刚体,轮心为刚体上的点,则轮心的运动特性可以表示机器人的运动特性。

### 3.1 集箱焊瘤打磨机器人单个轮子的纯滚动分析

首先作如下假设:①轮子均简化为圆盘,与集箱内壁为纯滚动点接触;②机器人与集箱都简化为刚体;③集箱内壁是理想的圆,不存在偏心。

单个轮子在集箱内壁中的运动如图5所示,单个轮子在集箱内壁作纯滚动运动,轮心为 $O$ 点,集箱的中心为 $O_1$ 点,左前轮与集箱内壁的接触点为 $Q_1$ 。以集箱轴线向内为 $x$ 轴,与 $x$ 轴垂直且向上的方向为 $z$ 轴,同时与 $x$ 轴和 $z$ 轴垂直的方向为 $y$ 轴,建立绝对坐标系。过接触点 $Q_1$ 作集箱内壁面的切平面和轮缘的切线 $m$ ,切平面的法向量 $Q_1O_1$ 和切线 $m$ 的法线 $Q_1O$ 之间的夹角为 $\beta$ ,切线 $m$ 与集箱内壁面的母线 $l$ 之间的夹角为 $\alpha$ 。 $\alpha$ 确定了接触点运动方向与 $y$ 轴的关系, $\beta$ 表示轮子平面的倾斜度。

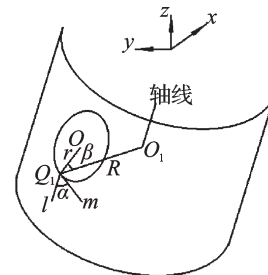


图5 单个轮子在集箱内壁中的运动分析

当轮子以角速度 $\omega$ 在集箱内壁圆面上纯滚动时,其与轮子接触点的集合为:

$$\begin{cases} x_{Q_1} = -\omega \text{tr} \cos \alpha \\ y_{Q_1} = R \cos\left(\frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R}\right) \\ z_{Q_1} = R \sin\left(\frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R}\right) \end{cases} \quad (5)$$

接触点轨迹可用空间曲线表示为:

$$P(t) = \left[ -\omega \text{tr} \cos \alpha \quad R \cos\left(\frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R}\right) \quad R \sin\left(\frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R}\right) \right] \quad (6)$$

以曲线在 $Q_1$ 处的切矢、主法线与副法线为坐标轴建立活动坐标系,即弗朗内特活动标架如图6所示。



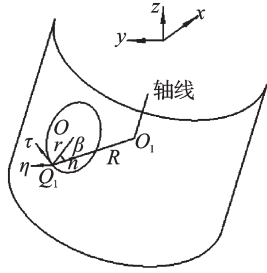


图6 接触点弗朗内特活动标架的建立

可得到空间曲线  $P(t)$  与单位切矢  $\tau$ 、副法矢  $\eta$  和主法矢  $n$  之间的关系式:

$$\tau = \frac{\dot{p}}{|\dot{p}|}, \eta = \frac{\dot{p} \times \ddot{p}}{\|(\dot{p} \times \ddot{p})\|}, n = \frac{(\dot{p} \times \ddot{p}) \times \dot{p}}{\|(\dot{p} \times \ddot{p}) \times \dot{p}\|}。$$

通过哈登伯特-迪娜维特(Hartenberg-Denavit)矩阵把活动坐标转换到绝对坐标,其转换矩阵为:

$$R^{(j)} = \begin{bmatrix} A^{(j)} & d^{(j)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $A^{(j)} = e^{(j)} e^{(j)T} = [\tau, n, \eta] e^{(j)T}$ ,  $d^{(j)} = (x_{o1} \ y_{o1} \ z_{o1})^T$ 。

轮心  $O$  在活动坐标系下的坐标为  $(0, r \cos \beta, r \sin \beta)$ , 则轮心在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} = R^{(j)} \begin{bmatrix} 0 \\ r \cos \beta \\ r \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \beta \sin \alpha - \omega \text{tr} \cos \alpha \\ -r \cos \beta \cos \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) + \\ r \sin \beta \cos \alpha \sin \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) + \\ R \cos \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) \\ r \cos \beta \sin \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) + \\ r \sin \beta \cos \alpha \cos \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) - \\ R \sin \left( \frac{\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)对时间  $t$  进行一次微分,可以得到轮心的速度  $v = (\dot{x}_o \ \dot{y}_o \ \dot{z}_o)$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_o = -\omega r \cos \alpha \\ \dot{y}_o = -\frac{\omega r^2 \sin \alpha \cos \beta}{R} \sin \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) - \\ \frac{\omega r^2 \cos \alpha \sin \alpha \sin \beta}{R} \cos \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) + \\ r \omega \sin \alpha \sin \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) \\ \dot{z}_o = \frac{\omega r^2 \sin \alpha \cos \beta}{R} \cos \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) - \\ \frac{\omega r^2 \cos \alpha \sin \alpha \sin \beta}{R} \sin \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) - \\ r \omega \sin \alpha \cos \left( \frac{-\omega \text{tr} \sin \alpha}{R} \right) \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可看出,已知单个轮子与集箱内壁面接

触点的坐标和姿态角  $\alpha$  和  $\beta$ , 以及纯滚动的角速度  $\omega$ , 可以计算出轮心的速度。由于轮心速度的3个分量与  $\omega$  有关, 提出乘子  $\omega$ , 若已知轮子接触点的坐标和姿态角  $\alpha$  和  $\beta$ , 即可求出轮心的速度方向, 且轮心速度由接触点的坐标和姿态角决定。

可以得到单个轮子的轮心速度大小:

$$\|v\| = \sqrt{\dot{x}_o^2 + \dot{y}_o^2 + \dot{z}_o^2} \quad (10)$$

以上分析是针对单个轮子在集箱中纯滚动时的轮心速度, 虽然假设轮子保持姿态角  $\alpha$  和  $\beta$  不变, 随着时间增加, 在连续纯滚动的前提下, 计算出的轮心速度只与接触点坐标、角速度  $\omega$ , 及姿态角有关系, 与时间  $t$  没有直接关系, 所以, 上述分析结果反映了单个轮子在集箱中的瞬时运动特性。

### 3.2 集箱焊瘤打磨机器人在集箱内的位姿描述

集箱焊瘤打磨机器人在集箱内壁上的位姿可以用机器人上一点的绝对坐标  $(x' \ y' \ z')$  和它的欧拉角描述  $(\psi, \theta, \phi)$ 。机器人上移动坐标的建立如图7所示, 已知左轮心与右轮心之间的距离为  $L_0$ , 前轮轮心与后轮轮心距离为  $L$ , 机器人以  $H$  为原点,  $HE$  为  $x'$  轴,  $HC$  为  $y'$  轴, 垂直于  $HE$  与  $HC$  的为  $z'$  轴, 建立机器人上一点的移动坐标系。在移动坐标系下, 左前轮轮心  $A$  的坐标为  $(L, L_0/2, 0)$ , 右前轮轮心  $B$  的坐标为  $(L, -L_0/2, 0)$ , 左后轮的轮心  $C$  的坐标为  $(0, L_0/2, 0)$ , 右后轮的轮心  $D$  的坐标为  $(0, -L_0/2, 0)$ 。

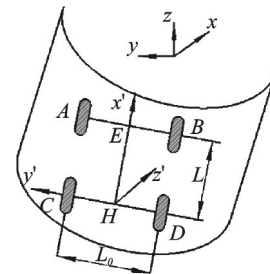


图7 机器人上移动坐标的建立

根据欧拉角定义<sup>[14-15]</sup>, 从移动坐标系  $(x', y', z')$  到绝对坐标系  $(x, y, z)$  的坐标转换矩阵为:

$$D^{(j)} = \begin{bmatrix} R(\psi, \theta, \phi) & d_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $R(\psi, \theta, \phi)$ —欧拉角定义式,  $d_{ij} = [x' \ y' \ z']^T$ , 绝对坐标系的建立与上节相同;  $(x' \ y' \ z')$ —机器人上一点移动坐标系下的坐标, 其在绝对坐标系下的坐标为  $(x, y, z)$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = D^{(j)} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据式(12)可得出左前轮轮心  $A$  在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_A = L \cos \phi \cos \theta - \frac{L_0}{2} \sin \phi \cos \theta + x' \\ y_A = L(\cos \phi \sin \theta \sin \psi) + \\ \quad \frac{L_0}{2}(\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + y' \\ z_A = L(\sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \sin \psi) + \\ \quad \frac{L_0}{2}(\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) + z' \end{cases} \quad (13)$$

同理可以得到右前轮轮心  $B$  在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_B = L \cos \phi \cos \theta + \frac{L_0}{2} \sin \phi \cos \theta + x' \\ y_B = L(\cos \phi \sin \theta \sin \psi) - \\ \quad \frac{L_0}{2}(\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + y' \\ z_B = L(\sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \sin \psi) - \\ \quad \frac{L_0}{2}(\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) + z' \end{cases} \quad (14)$$

左后轮轮心  $C$  在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_C = -\frac{L_0}{2} \sin \phi \cos \theta + x' \\ y_C = \frac{L_0}{2}(\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + y' \\ z_C = \frac{L_0}{2}(\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) + z' \end{cases} \quad (15)$$

右后轮轮心  $D$  在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_D = \frac{L_0}{2} \sin \phi \cos \theta + x' \\ y_D = -\frac{L_0}{2}(\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + y' \\ z_D = -\frac{L_0}{2}(\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) + z' \end{cases} \quad (16)$$

4个轮子的外缘都可以看成是空间曲线,在移动坐标系中,4个轮子的外缘可以用参数方程表示,左前轮外缘表示为:

$$P'(t_1) = \left[ L + r \cos t_1 \quad \frac{L_0}{2} \quad r \sin t_1 \right] \quad (17)$$

右前轮外缘表示为:

$$P'(t_2) = \left[ L + r \cos t_2 \quad -\frac{L_0}{2} \quad r \sin t_2 \right] \quad (18)$$

左后轮外缘表示为:

$$P'(t_3) = \left[ r \cos t_3 \quad \frac{L_0}{2} \quad r \sin t_3 \right] \quad (19)$$

右后轮外缘表示为:

$$P'(t_4) = \left[ r \cos t_4 \quad -\frac{L_0}{2} \quad r \sin t_4 \right] \quad (20)$$

其中,由于集箱焊瘤打磨机器人的4个轮子均为固定轮,没有舵转角,  $t_1, t_2, t_3, t_4$  均为参数,表示基

圆半径与基半径之间的关系,且均属于  $[0, 2\pi]$ 。而根据4个轮子的外缘参数方程表达式可以用式(12)求出4个轮子外缘在绝对坐标系下的参数方程  $P(t_1), P(t_2), P(t_3), P(t_4)$ 。

机器人在集箱中行走的时候,4个轮子与集箱内壁始终保持相切,每个轮子的外缘圆的接触点的切向量为:

$$\vec{\tau} = \frac{dp(t)}{dt} \quad (21)$$

所以,每个接触点的切向量与切平面的法向量垂直,即:

$$\vec{\tau} \times \vec{n} = 0 \quad (22)$$

式中:  $\vec{n}$  — 每个轮子与机箱内壁圆接触点的法向量,  $\vec{n} = (0, -y_Q, -z_Q)$ ;  $(x_Q, -y_Q, -z_Q)$  — 每个接触点  $Q$  在绝对坐标系下的坐标,且满足接触点参数方程  $P(t_1), P(t_2), P(t_3), P(t_4)$ 。

同时,每个轮子与集箱内壁圆接触,接触点在绝对坐标系下满足集箱的端面圆方程:

$$y_Q^2 + z_Q^2 = R^2 \quad (23)$$

每个轮子接触点的切向量与切平面的法向量垂直,同时满足绝对坐标系下的集箱端面圆方程,这两个约束中共含有  $x', y', z', \phi, \psi, \theta, t_1, t_2, t_3$  及  $t_4$  这10个未知数,每个轮子根据式(22)和式(23)可列出约束方程共8个,其中  $t_1, t_2, t_3, t_4$  求解需4个方程,根据相切条件可得到4个约束方程。只要知道其中两个变量,就可以解出剩下的4个。所以,集箱焊瘤打磨机器人在集箱内壁上的位姿用一点坐标和机器人的欧拉角表示时,具有6个广义坐标和4个约束方程,所以机器人整体简化为刚体,前驱时,能够实现沿  $x$  轴方向的水平运动和沿  $y$  轴方向的旋转运动。

## 4 试 验

### 4.1 试验环境

基于模块化设计的机器人样机主要参数如下:机器人工作集箱为普通钢管,内径  $\Phi 660$  mm,外径  $\Phi 830$  mm,

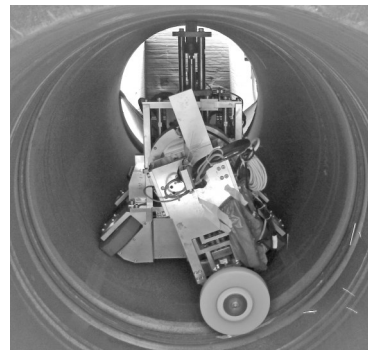


图8 机器人在集箱内实验

轴向长度 6 m, 机器人质量为 55 kg, 最大行进速度为 0.5 m/s。

#### 4.2 行走速度试验

本研究在行走速度测试中, 分别在相同条件下, 设计了低速 5 m/min、中速 10 m/min 和高速 20 m/min 这 3 种实验方案, 通过测量机器人在相同内径的集箱内行走的距离和所用时间, 计算平均速度, 将平均速度和实际设定的速度进行对比来验证机器人性能指标。实验结果表明, 机器人能按照设计要求实现低速、中速和高速的行走, 与设计结果基本相符。

表 1 速度试验数据

行走状态	测量次数	行走距离 /m	行走时间 /s	行走速度 /(m·min <sup>-1</sup> )
低速 行走	1	5	60.12	4.99
	2	5	59.88	5.01
	3	5	60.48	4.96
	平均值	5	60.16	4.99
中速 行走	1	5	30.25	9.92
	2	5	29.82	10.06
	3	5	30.06	9.98
	平均值	5	30.04	9.99
高速 行走	1	5	14.97	20.04
	2	5	14.93	20.01
	3	5	14.9	20.13
	平均值	5	14.93	20.06

本研究通过对机器人的驱动电机发出控制指令, 对机器人的加速、减速、急停、前进、后退等性能作了实验, 验证了机器人的行走性能。实验结果表明, 机器人能够按照控制指令及时准确的实现控制指令要求的动作, 响应速度快, 达到设计的要求指标。

## 5 结束语

管道机器人在国内外都得到较为广泛和深入地研究和应用, 但在集箱内进行环焊缝焊瘤打磨的机器人还尚未见到其他相关报道。上海大学与上海电气中央研究院联合研制的集箱内壁环焊缝焊瘤打磨机器人样机已经成功实现在集箱内的移动、定位, 调整位姿及焊瘤打磨作业。

(1) 通过对机器人的结构与越障能力分析, 从理论上验证了该机器人在集箱内运动的可行性。

(2) 在研究单个轮子在集箱内壁上的纯滚动分析

的基础上, 对整个机器人在集箱内壁上的位姿进行分析, 为深入研究机器人的运动性能提供了理论基础。

(3) 为进一步提高机器人对集箱复杂结构的适应性和可靠性, 机器人整体结构有待进一步的优化改进。

#### 参考文献 (References):

- [1] MATEOS L A, ZHOU Kai. Towards Efficient Pipe Maintenance: DeWaLoP In-pipe Robot Stability Controller [C]//International Conference on Mechatronics and Automation, Chengdu, China: IEEE, 2012: 1-6.
- [2] NAGAYA K, YOSHINO T. Wireless piping inspection vehicle using magnetic adsorption force [J]. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2012(6): 472-479.
- [3] HABIB M K. Bioinspiration and robotics: walking and climbing robots [M]. I-Tech, Vienna, Austria, EU, 2007.
- [4] SATO K, OHKI T. Development of In-Pipe Robot Capable of Coping with Various Diameters [C]//11th International Conference on Control, Automation and Systems, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea: [s.n.], 2011: 1076-1081.
- [5] YABE S, MASUTA H. New in-pipe Robot Capable of Coping with Various Diameters [C]//12th International Conference on Control, Automation and Systems, ICC. Jeju Island, Korea: [s.n.], 2012: 151-156.
- [6] YE Chang-long, MA Shu-gen. Development of a Pipe Cleaning Robot for Air Conditioning System [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Tianjin, China: [s.n.], 2010: 1525-1529.
- [7] 唐德威, 李庆凯, 邓宗全, 等. 具有差动运动功能的管道机器人设计与分析 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(13): 1-8.
- [8] MATEOS L A, VINCZE M. Developing Water Loss Prevention-DeWaloP-in-pipe Robot System [C]//20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. Bron: [s.n.], 2011: 1-9.
- [9] 陈 军, 陈 涛, 邓宗全. 管内移动机器人的变径机构及力学特性研究 [J]. *机械设计*, 2010, 27(10): 58-61.
- [10] 吴红冲. 三轮腿式管道机器人结构设计及运动学分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学机械学院, 2007.
- [11] 张雁雁, 陈晓明, 张碧野, 等. 细小管道机器人爬行驱动装置 [J]. *机电工程*, 2007, 24(4): 7-9.
- [12] 张有良, 徐 强, 常晓煜. 码垛机械手运动轨迹的研究 [J]. *包装与食品机械*, 2011(3): 20-23.
- [13] 宋章军, 陈 恩. 轮式移动机器人在圆形管道中的运动学建模与分析 [J]. *机器人*, 2006, 28(6): 636-6.
- [14] 张华君, 夏 超, 叶永龙, 等. Staubli 激光切割机器人的标定 [J]. *轻工机械*, 2013, 31(2): 7-11.
- [15] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 2 版, 北京: 清华大学出版社. 2009.

[编辑: 罗向阳]

#### 本文引用格式:

徐子力, 韩丽楠, 张伟森, 等. 集箱焊瘤打磨机器人的结构设计与其位姿分析 [J]. *机电工程*, 2014, 31(4): 414-419.

XV Zi-li, HAN Li-nan, ZHANG Wei-sen, et al. Construction design and position analysis of wheeled polishing robot [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(4): 414-419.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>