

Design and analysis of adhesion performance, self-adaptability, and trafficability of micro-pipeline robot with multiple joints

Fanghua Mei Zeguo Li

Avic Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China

Abstract

The demands for pipeline inspection and maintenance have continuously driven the development and iteration of pipeline robotic technologies. After years of research and development, numerous mature robotic products have demonstrated remarkable performance in large-scale pipeline maintenance. However, there remains a significant gap in robotic solutions for small-diameter pipelines below 100mm. Small-diameter pipelines are widely utilized in nuclear industries, where long-term operation frequently leads to issues such as blockages and corrosion. The confined dimensions make manual inspection and maintenance extremely challenging. Focusing on these challenges, this paper presents a detailed structural design for miniature pipeline robots. A passive pipe diameter self-adaptive mechanism is proposed, which innovatively employs shape memory alloy (SMA) wires as the primary connecting components between robotic modules. This design significantly enhances the passability of micro pipeline robots in constrained environments.

Keywords

Micro pipeline robot; Self-adaptive; Shape memory alloy; Passability

多关节微型管道机器人通过性与自适应设计与分析

梅方华 李泽国

中国航空制造技术研究院, 中国·北京 100024

摘要

对于管道的探伤、维修等需求不断推动着管道机器人技术的发展与更迭。经过多年研发,已有许多成熟的机器人产品在大型管道检修领域大放异彩,但对于管径小于100mm的小型管道,这一领域还几乎空白。小型管道在核工业领域得到了广泛的应用,长期使用中管道易出现卡堵、腐蚀等问题。由于其尺寸限制,人工难以对管道进行快速、有效的检修。本文围绕以上两个问题,对机器人的结构进行了详细的设计提出了具有管径被动自适应功能的机器人结构,创新性地使用记忆合金线作为机器人各部分之间的连结结构的主体,提高微型管道机器人的通过性。

关键词

微型管道机器人; 自适应; 记忆合金; 通过性

1 引言

自20世纪50年代提出管道清理器的概念以来,管道机器人技术已经得到了长足的发展,在管道的清理、探伤、维修、焊接等领域发挥了非常重要的作用。管道机器人结构设计的一个关键约束条件为管道尺寸。目前,大型管道机器人(直径大于500mm)受空间尺寸约束较小,应用环境相对简单,其结构与现有成熟的路面履带式机器人与轮式机器人相似。其典型特点为结构简单,通过增加变径结构以适应不同的管道环境;通过模块化设计,以搭载的不同传感模块实现功能组合,能够满足多种功能需求;具有较为成熟的商业应用。

对于中型管道机器人(100~500mm),受结构限制,

其牵引力、抓地力、弯道自适应稳定通行能力成为其设计焦点。尽管驱动方式同样包含轮式、履带式,但形态发生了一定的变化。履带式机器人的形态变化主要体现在非平行履带结构设计,以改善履带和管道的接触面积改善其抓地力、牵引力,提高履带式机器人爬行的稳定性。例子。而轮式机器人的结构形态变化则体现在滚轮结构。为了提供充足的牵引力、抓地力,轮式机器人的滚轮通常分布在机器人主体的一周,通过张紧力与管壁接触,提高摩擦力,进而保证充足的牵引力。例子。轮式机器人结构形态变化的另一种体现为滚轮角度的变化,又称螺旋式机器人。前端的轮以一定角度设置,通过压缩弹簧支撑在管壁上,其通电时,整个机器人能够以螺旋线轨迹在管道内运动。除了上述机器人,中型管道中还出现了以蠕动作为基本运动方式的管道机器人。在运动时,前端放松,后端紧紧支撑在管壁上,中间部分伸长,前端即向前移动。此后,前端支撑,后端放松,中间部分缩回,

【作者简介】梅方华(1988-),男,中国湖北武穴人,博士,从事机器人应用研究。

完成一个周期的前进运动。周期运动往复进行，整个机器人便可以不断前进。

相比于大型管道及中型管道，小型管道结构尺寸已严重约束了管道机器人的结构形式，典型的小型管道系统有核电高温气冷堆核元料输送管道系统。其基本特点如下：管道直径小，且连续变化，变化范围为60~65mm；管道网空间结构复杂，具有大量的弯道结构；元料球在管道网内高速运动过程中，易产生管道附着物堆积，使得管道各向径向尺寸不均匀；大量的维修接口设置在管道侧边。上述特点对小型管道机器人设计提出了新的挑战，主要体现在：

①抓附能力与滑动能力相矛盾。若抓附结构使用滚轮与管壁接触，由于滚轮存在局部自由度，因此机器人抓附管壁时很容易打滑。若使用与管壁有较大重合面的平面结构，虽然能够牢牢抓附管壁，但由于是平面接触，在滑动的过程中，接触面的磨损会比较严重，在长期使用过程中容易出现因磨损导致的抓附失效问题。

②管径自适应各向异性问题。为了提高导向性和尽可能地利用有限的空间，小型管道机器人的运动结构通常与整周管壁都有接触。由于实际管壁内常有附着物，导致管道内径在管道同一横截面不一致，对管道机器人抓附稳定性和运动的稳定性造成重要影响。小型机器人直径通常与管道直径相近，受结构尺寸限制，机器人管道自适应能力较为有限，管道内径不一致影响更为显著，要求该类型机器人管径自适应功能且具有更向异性。

③过弯能力与直线管道自恢复能力相矛盾。管道机器人要求关节的柔性变形能力足够大，以实现大角度的弯折；同时要求刚度足够大，以保持正常的运动姿态。可以看出这一对需求相互矛盾，一般的柔性结构难以同时实现大角度弯折并保持正常工作姿态。

蠕动式管道机器人的运行过程中有一个变径抓附管壁的过程，为管径自适应结构的紧凑化设计提供了天然的设计切入点。基于此，本文提出一种新型多关节小型管道机器人，具有以下创新点：

滚轮与撬片组合式抓附机构。采用轮撬组合结构，通过接触状态切换，保证在抓附状态下翘片与管壁之间的可靠接触；在松弛状态下，滚轮与管壁之间顺畅滑动。

管径自适应各向异性性能增强。利用径向布置三组四杆机构实现抓附与滑动状态切换，并在轮撬结构中嵌入弹簧，以增强四杆机构的管径自适应各向异性，适应管道内壁附着物引起的不均匀的管径变化。

柔性连接结构超大变形能力及优异的自恢复能力。多关节机器人的柔性连接结构创新使用了镍钛记忆合金线。该结构能够实现大角度弯曲，机器人关节变形角度可超过150°，可通过管道两侧维修接口进入管道；同时，进入正常管道区域后，在加载过程中产生的大应变会随着卸载而恢复，管道机器人随着恢复至正常的工作状态。

2 多关节微型管道机器人设计原理

2.1 管径自适应抓附结构构型设计

管道机器人的支撑抓附结构在前进的过程中有两种运行状态。一是紧紧抓附管壁，起到支撑抓附的作用；二是放松并在中部的驱动下向前滑动。若抓附结构使用滚轮与管壁接触，由于滚轮存在局部自由度，因此机器人抓附管壁时很容易打滑。若使用与管壁有较大重合面的平面结构，虽然能够牢牢抓附管壁，但由于是平面接触，在滑动的过程中，接触面的磨损会比较严重，在长期使用过程中容易出现因磨损导致的抓附失效问题。

该结构能够同时满足抓附与滑动的需求，极大提高了空间利用率。放松时，上方与小刚度弹簧连接的滚轮接触管壁，压片与管壁保持一定距离。当滑块上滑时，压片在有一定预紧力的大刚度弹簧的作用下紧紧抓附在管壁上。压片两侧的弧形翘起能够保证压片不出现挂住管壁导致机器人卡死的问题。为了实现对于滑块的精准控制，使用丝杆步进电机驱动滑块的上下移动。整体结构构型设计如下图所示（三组结构互呈120°夹角均布，图中仅绘出其中两组）。

2.2 基于记忆合金的多关节转动副折弯及自恢复原理

实际的管道环境通常是封闭环境，机器人只能从侧方的维修开口放入，这就需要管道机器人对其进入管道时的通过性问题进行针对性设计。大型管道机器人的几何尺寸通常远小于管道直径，因此通常不考虑这个问题。但是目前研发的大多数中小型管道机器人并无折叠能力，其中一些长宽比较大的管道机器人只能从管道的两端开口放入，这严重影响了这一类管道机器人的实用性。

由于抓附结构直径可变，机器人的最小直径显著小于管道直径，并且得益于弯折结构的卓越弯曲性能，机器人能够非常轻易地通过侧方维修开口进入管道内部。

在对镍钛记忆合金线的测试中发现，这一类形状记忆合金能够完美地满足本课题的需求。形状记忆合金（后文简称记忆合金）是通过热弹性与马氏体相变及其逆变而具有形状记忆效应的由两种以上金属元素所构成的材料。这种材料有一个非常重要的特性——超弹性。在外力作用下，记忆合金具有比一般金属大得多的变形恢复能力，即加载过程中产生的大应变会随着卸载而恢复。这一特点完美契合该柔性结构的需求。本课题对直径为0.4/0.6/1/2mm的镍钛记忆合金线分别进行了测试。其中1mm的记忆合金表现最佳，弯折性能优秀，20mm长度即可实现150°的弯折，并且径向承载能力优秀，单侧悬挂5N重物，挠度变化仅5mm，完全满足该结构的需求。

3 多关节微型管道机器人样机设计

该机器人一共由头部、中部、尾部三部分组成，其头尾部分的结构完全相同，起着抓附管壁的作用，中部起着提供前进位移和带载的作用。虽然本机器人分头尾两个部

分,但是实际头尾并不固定,只需要对控制程序稍加修改,即可使得该机器人的头尾交换,改变其运动方向。机器人的中部各个构件使用与抓附结构相同的铝合金(AlSi10Mg)加成制成。

4 多关节微型管道机器人爬行试验

4.1 管道自适应能力试验

本机器人最为重要的一项功能就是机器人的管径被动自适应功能。该功能是否可靠直接决定了机器人的实用与否。机器人的管径自适应能力与管道的几何外形有关,而与管道材质无关,因此选用容易观察的树脂管道进行测试,测试的管道一共有两种,用于测试机器人的适应能力是否具有通用性。

首先是对管壁附着物完全对称时的测试实验,该实验选用管径从60~65mm渐变的管道进行试验。

经测试,机器人能够通过该管道,即机器人的自适应功能能够在附着物轴对称分布的管道内前行。然而,这一情况并不具有普遍性,管壁附着物不均匀才是工程中更为常见的情况,因此本实验使用仅两侧具有不规则突起的管道进行了测试。

该管道内壁一共分布有两处完全不均匀的凸起,一处是在管壁开口对侧,一处是在两个限位挡板之间,该凸起在0~2.5mm之间随机连续变化。经测试,机器人在中速/全自适应模式下能够正常通过该段管道。

以上两项实验共同证明了机器人能够在管径在60~65mm间变化的管道内正常行进。管径自适应功能的实现确保该机器人适用于复杂、多变的管道,绕轴线方向均布的两条被动自适应支链为机器人提供了“各向异性”的自适应功能,显著提高了机器人的实用性与可靠性。

4.2 管道通过性能力试验

本实验将之前单独功能测试中所使用的管道进行组合,将机器人放入管道,并观察机器人能否顺利通过全部管道。该实验同时测试机器人的入管、管径被动自适应、过弯能力,以确保该机器人的各项性能之间无干涉,机器人能够完整实现各项预期功能。

经多轮实验测试,该机器人从维修窗口进入管道后,均能以低速全自适应模式顺利通过管径不断变化的直管、弯管,且行进过程中无卡堵、失效现象。当机器人行进至光滑路段时,还可以通过上位机控制机器人以最大速度运行。整个测试过程与机器人在真实管道内运行的情况几乎一致,且多轮测试中均未出现故障,证明了该管道机器人兼具实用性与可靠性。

4.3 管道通过性能力试验

本实验选择树脂管道进行测试。根据课题背景,该管道侧方维修窗口的直径为71mm,如果机器人能够完整通过该窗口,则机器人的进入管道时的通过性能满足设计要求。

这标志着机器人的连接结构有效解决了管道机器人的管内导向性问题与入管通过性问题这一矛盾点。该机器人的长机身保证了机器人在管道内的良好导向性能,连接结构不仅使得机器人能够大角度弯折分段进入管道,还赋予了机器人良好的过弯能力。

4.4 样机爬坡能力

管道机器人在爬坡过程中主要是克服自身重力做功,这一运动过程与管道机器人的带载能力还有抓附结构产生的静摩擦力都有关联。不过由于机器人自重仅491g,机器人在树脂管道内不会因自重而打滑,本实验选用更便于观察的树脂管道进行测试。

本实验将直径为65mm的树脂管道垂直放置于桌面上,机器人从管道端口进入,并由上位机控制运行。在实验过程中,机器人成功实现了竖直方向的爬升与下行,并且能够以最大速度22.87mm/s运行。这一功能的成功实现表明该机器人在管道中有着极强的机动性,机器人强大的爬升能力和全向弯曲的连接结构共同确保了该机器人能够在布局复杂的管道内任意穿行。

5 结论

本文深入分析了制约机器人实用化的几大难点,针对65mm管径的小型工业管道,设计研发了一种能够被动自适应管径变化的蠕动式管道内机器人。该机器人机械结构设计充分考虑了机器人的真实工作场景。在最后,本文对管道机器人的物理样机进行了管道自适应和通过性试验,满足设计要求。

参考文献

- [1] 刘洪斌,冀楠. 蠕动式管道机器人结构与运动特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(08): 1169-1177.
- [2] 王宁. 蠕动式软体管道机器人设计与实现[D]. 沈阳工业大学, 2020.
- [3] Xing, J., Ning, C., Liu, Y. et al. Piezoelectric inertial robot for operating in small pipelines based on stick-slip mechanism: modeling and experiment. *Front. Mech. Eng.* 17, 41 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0697-z>.
- [4] Spruogis B., Bogdevičius M., Matuliaskas A., Mištinis V., Ragulskis L.. Dynamics of a two mass pipe robot with the self-stopping mechanism based on viscous friction[J]. *Mathematical Models in Engineering*, 2020, 6(4).