

文章编号: 1002-0446(2000)06-0506-08

国外微型管内机器人的发展*

张永顺

(浙江大学机械电子控制工程研究所 310027)

摘要: 本文首先论述了微型管道机器人的发展背景及与传统管内机器人的区别, 然后对几种典型常规小管径管道机器人和国外几种典型微驱动式管内微型机器人工作原理对比分析, 指出了目前管内微型机器人研究中所面临的主要问题, 并对实现微管内机器人实用化的关键技术及研究发展方向进行了探讨。

关键词: 微驱动器; 微型管内机器人

中图分类号: TP24 文献标识码: B

1 引言

在工业、核工业、石油天然气等领域中, 管道作为一种有效的物料输送手段而得到广泛应用, 为了提高这些管道的寿命, 防止泄露等事故的发生, 管道机器人作为满足高效准确的故障诊断、检测及维修的手段应运而生, 其广泛地应用于管道的探伤、补口、维修、焊接等诸多领域。

目前, 国内外管道机器人的研究成果已经很多, 可是对生物体内狭小空间内的检查诊断, 工业上热交换器及核电站微小管道空间内的检测、维修尚属空白, 并极具吸引力。因此相继成为国内外研究的热点^[1-3]。微管道机器人是基于狭小空间内的应用背景提出的, 其环境特点是在狭小的管状通道或缝隙内行走进行检测、维修等作业, 图 1(a) 是在人体内检查诊断的构想图, 系生物医学领域的应用; 图 1(b) 是在热交换器弯曲管道内进行检测、维修时的构想图, 系工业领域的应用。

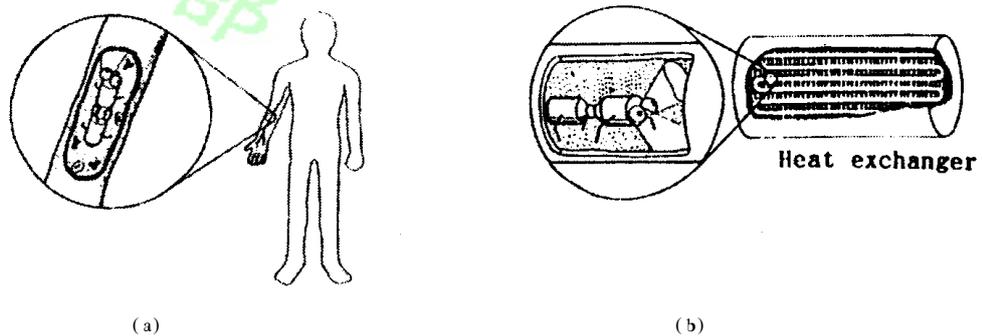


图 1 微管道机器人的应用构想图

由于与常规条件下管内作业环境有明显的不同, 即相对微观与宏观的区别, 而且其行走方

* 收稿日期: 2000-01-07

基金项目 中国博士后基金资助项目。

式及结构原理与常规管道机器人不同, 因此微管道机器人属于微机器人的范畴. 归属于微电子机械系统(MEMS)的微机器人主要针对生物及医学领域提出的, 例如可用来操作人体血球、细胞、诊断、注药和修补等; 同时微机器人还在军事上具有应用价值, 例如用来进行军事侦察, 具有不易被发现的优点, 并将侦察到的信息发回到指挥部门.

由于微管道机器人属于 MEMS 的范畴^[5], 其微型化过程的行走方式及结构构成与常规管道机器人必然不同, 常规管道机器人的行走方式主要有轮式、履带式 and 蠕动式, 其中轮式和蠕动式行走方式易于小型化, 国内外学者在按宏观技术进行管道机器人微型化的过程中, 已经受到了常规技术手段的限制. 由于空间的限制和相对控制精度的要求, 常规管道机器人按比例缩小是不可行的, 即由于常规管道机器人结构复杂, 很难微型化, 理论上可以按比例缩小, 但机械传动的间隙是受传统加工精度影响的, 采用传统加工精度制造的微型传动链的累积误差相对微管道机器人的控制精度要求和狭小的作业空间来说是不能接受的, 况且目前还不能完全实现复杂的微细加工. 有鉴于此, 微管道机器人的行走方式应另辟蹊径. 目前随着微电子机械技术的发展和晶体压电效应和超磁致伸缩材料磁-机耦合技术应用的发展, 使新型微电-机械转换器, 即微驱动器的出现和应用成为现实. 从目前国外微管道机器人的研制情况来看, 微管道机器人的发展与微机械电子技术、超精密加工技术的发展, 与以功能材料、智能材料为基础的微驱动器的研制开发成果是密切相关的^[1-3], 因此微驱动器的研究成果已成为微管道机器人重要发展基础.

2 常规小管径管道机器人的发展

一般小管径管道机器人是指作业管径小于 80mm 的机器人, 研究经验表明由于受管径空间和机器人结构的限制, 小管径管道机器人的研制难度更大.

2.1 轮式小管径管内移动机器人^[1]

如图 2 所示为日本学者福田敏男, 细贝英夫 1986 年研制的可以通过“L”形无圆弧过渡的

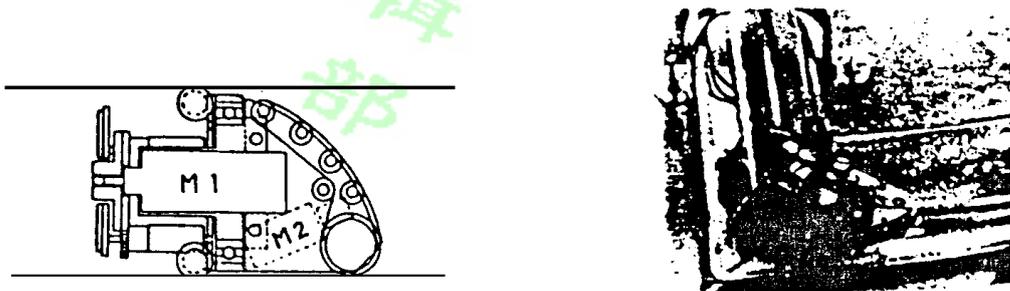


图 2 轮式小管径管内移动机器人^[1]

管内移动机器人^[42]. 从转弯的难易程度考虑“L”型垂直管要比“圆型”弯管复杂. 该机器人行走机构分别由头部和本体两部分组成, 头部和本体部分可以相对回转. 当机器人在直管内行走时, 本体上的电动机 M_1 通过减速装置带动本体上的驱动轮转动, 使机器人沿直管行走. 当通过 90 度弯管时, 电动机 M_2 驱动头部作姿态调整, 同时驱动头部履带, 引导机器人通过弯管. 该机器人巧妙之处在于使用二台电机完成了三种运动, 由于该机器人的应用管径较小, 所以采用三台电机来完成三种运动是受空间限制的, 因此我们得到的启示是在管道机器人结构上尽

量采用“一电机多驱动功能”的设计. 这样可以使结构简单紧凑, 解决功能的实现与管道空间限制之间的矛盾. 该机器人的缺点是不可以逆行, 只有沿前进方向的转弯功能. 该机器人的技术指标为:

适应管径: $\varnothing 50\text{mm}$; 行走速度: 8.1mm/s ; 转弯性能: 可以通过 90° 直角弯管; 机器人重量: 240g ; 机器人长度: 76mm . 该机器人成功地通过了“L”型弯管.

2.2 小管径蠕动式管内移动机器人^[2]

图 3 为哈工大机器人所于殿勇等人研制的“蠕动式管内移动机器人”样机, 该机器人结构新颖, 牵引力大, 其结构采用四个步进电机, 二个电机用于实现适宜管径变化, 另二个电机用于实现蠕动行走, 可实现三通管内转弯功能, 它首次将超越行原理应用于管道机器人行走机构上, 该结构紧凑, 使小型化成为可能. 其技术参数:

适应管径: $\varnothing 80 \sim \varnothing 110\text{mm}$; 行走速度: 1.5m/min ; 爬坡: 可垂直上、下走; 拖动力: 9N ; 自重: 3.5kg .

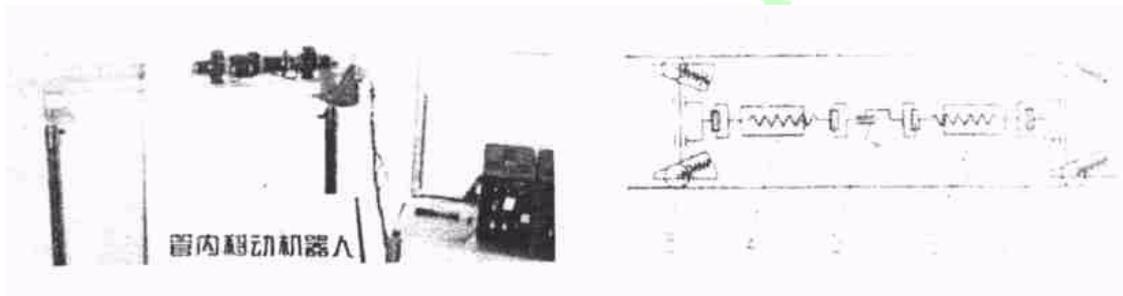


图 3 小管径蠕动式管内移动机器人^[2]

2.3 轮式微型管内移动机器人

日本 TOKYO—Toshiba 公司于 1997 年研制了一台轮式微型管内移动机器人, 如图 4 所示, 前部带一部微 CCD 摄像机, 能分辨管内异物并用微机械手实现清理. 胶管连接可过弯管, 适应管径: $\varnothing 25\text{mm}$; 行走速度: 0.36m/min ; 自重: 16g . 该机器人尽管采用常规的轮式行走方式, 但从前二例的研制过程可以发现, 用一般的电机和传动结构是无法实现的, 该机器人的研制成功是模块化、集成化的微机械电子技术发展的结晶. 因此其属于微型管内移动机器人. 该机器人采用多轮驱动是为了增加牵引力, 由于轮径太小, 越障能力非常有限, 而且结构复杂.

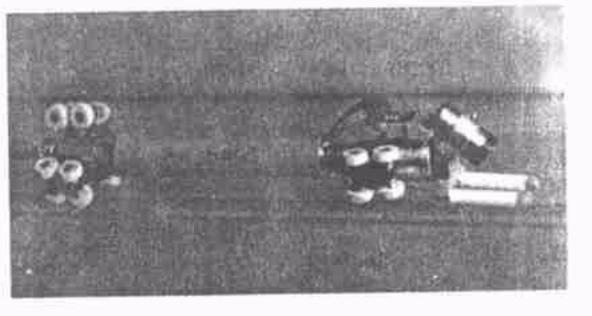


图 4 轮式微型管内移动机器人

3 国外微驱动式微型管内机器人的发展现状

为了使微型机器人结构简化, 进一步提高微型机器人的可靠性, 国外学者一直在探索新的途径和方法, 随着压电陶瓷及超磁致伸缩材料(GMM)的微驱动器技术的发展和成熟, 使之应用于微管内移动机器人成为可能. 国外主要开发了以下几种典型的微驱动式微型管内道机器

人.

3.1 冲击驱动式微管内移动机器人^[3]

机器人的外观如图 5 所示, 该机器人采用压电晶体作微驱动器, 压电微驱动器工作原理采用压电材料的逆压电效应, 具有体积小, 动态响应频率宽, 速度快的优点, 驱动器的不足是输出位移小, 输入与输出具有滞回非线性特征, 但利用其动态响应快, 力输出大的特点便实现了微管道机器人的冲击式行走.



图 5 冲击驱动式机器人外观图

3.1.1 行走原理

行走原理如图 6 所示, 机器人本体由支撑爪弹性支撑, 本体前通过压电晶体单元连接一惯性质量块. 缓慢驱动压电晶体单元带动惯性质量伸长一定距离, 快速驱动压电晶体单元带动惯性质量返回, 由于返回加速度大, 惯性质量惯性力大于支撑爪的静摩擦力, 结果使本体右移一段距离; 反之, 慢速返回, 快速伸开, 便实现了左行. 实现以上运动的驱动电压如图 7 所示.

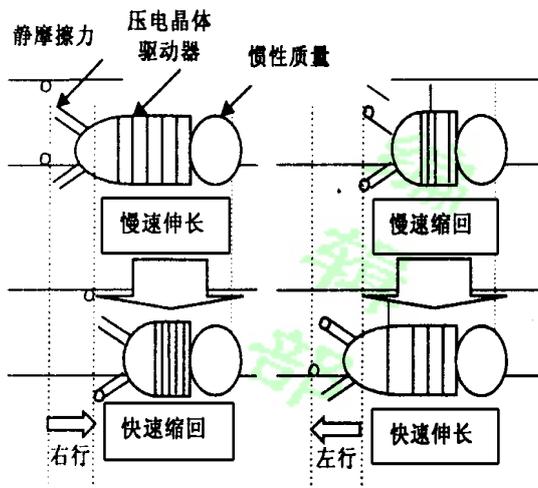


图 6 行走原理图

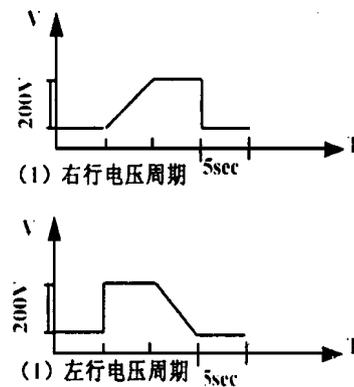


图 7 驱动电压曲线

3.1.2 性能参数

从其性能参数表 1 可以看出, 其功重比为 2.7, 综合性能是不错的, 移动速度 10mm/sec, 也是比较快的, 该结构易微型化, 行走灵活, 可在一定变径和弯曲管道内行走.

表 1 性能参数

长度	直径	重量	驱动器尺寸	惯性质量
20mm	Φ5.5mm	1g	2×3×9mm	0.5g

3.2 超磁致伸缩(GMM)驱动振动式微管内移动机器人^[4]

3.2.1 超磁致伸缩材料(GMM)简介

铁磁材料受外磁场的作用下,沿磁力线方向产生伸缩相对变形的现象称正效应,又称焦耳效应,它是焦耳于1842年发现的,应变可达 40×10^{-6} 。60年代又进行了稀土超磁致伸缩材料(Tb-Dy-Fe)的研究,使磁致伸缩系数达到 10^{-3} 数量级^[5],进而随着单轴晶体的出现,使在小磁场激励下,获得大的超磁致伸缩效应成为可能。当超磁致伸缩材料构成的电-机械能量转换器在磁场激励下,将产生外部位移和力输出^[6],微观来讲是由于磁场-弹性场相互耦合的结果,一般通过对转换器的超磁致伸缩材料预加偏置磁场和予压力,可使位移输出显著增加,超磁致伸缩材料驱动器和压电晶体单元微驱动器的物理特性如表2所示,通过对比可以发现GMA具有力输出和位移输出,动态响应也更快,因此作为微驱动器,超磁致伸缩材料比压电晶体单元具有优越性。

表2 性能参数

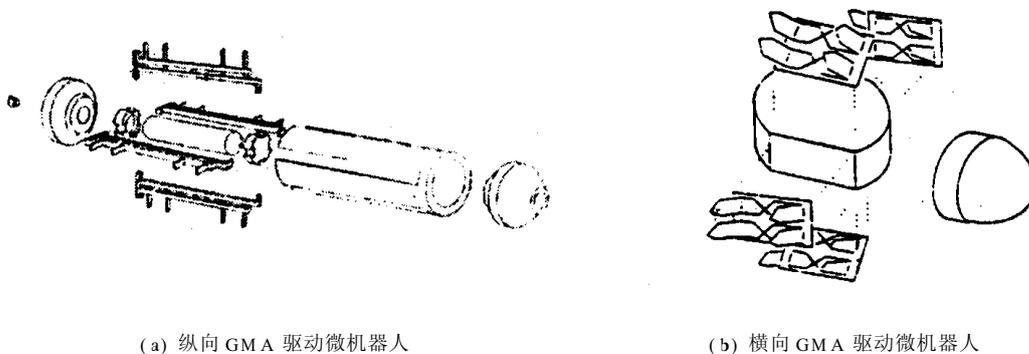
种 类	能量密度(J/m ²)	伸缩系数 $\times 10^{-6}$	响应速度	重量/能量
GMA	2250~36000	1650~2400	nsec~sec	2.0
PZT	670~950	600~1200	sec	7.8

3.2.2 机器人模型

机器人模型的显著特点是无缆方式,即通过管外线圈激励磁场的变化来控制机器人的运动,目前无缆方式只能采用自带电源的方式,通过激励磁场为媒介来传递能量的无缆方式还是非常新颖的,机器人采用无缆方式作业是我们希望的理想目标。研制了二种微机器人模型:

1)纵向GMA驱动微机器人:为了增加轴向位移输出,并充分利用管内轴向空间大的特点将GMA纵向安置,激励磁场也沿管轴方向,该种模型如图8(a)所示,它可在 $\varnothing 21\text{mm}$ 的管内实现正反向行走。

2)横向GMA驱动微机器人:为了使机器人微型化,将GMA驱动器安置为与管轴垂直,即横向,激励磁场也横向作用,由于GMA缩短,因此在一定程度上牺牲了GMA的位移输出,可是机构变得简单,而且在GMA小位移输出时即可行走。该种模型如图8(b)所示。



(a) 纵向 GMA 驱动微机器人

(b) 横向 GMA 驱动微机器人

图8 微机器人模型

3.2.3 行走机理

人们早就发现振动可以输送物料, 并将该原理用于输送机上^[8], 该机器人就是利用振动实现行走的. 横向 GMA 驱动微机器人有 16 个振动腿, 在轴向磁场的激励下, GMA 轴向输出位移, 但数量级很小, 因此通过微位移放大装置将 GMA 输出位移放大到振动腿的顶部, 经二级放大后, 放大倍数可达 14, 振动腿压到管壁上并与管壁有一倾角, 倾斜的反方向就是微机器人的行走方向, 改变振动腿的倾斜方向即实现了机器人的反向行走, 其行走原理过程如图 9 所示.

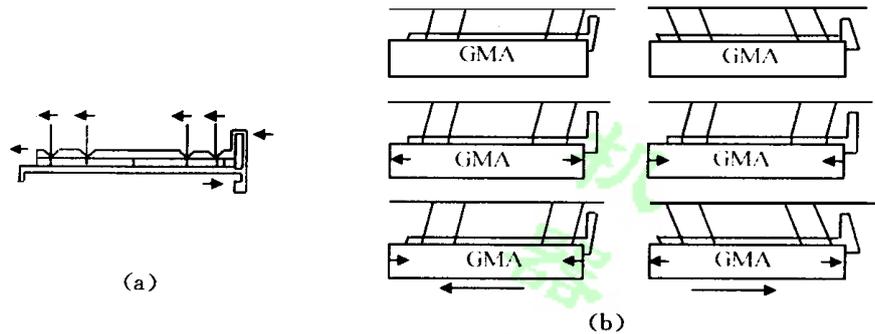


图 9 机器人行走机理

3.2.4 位置及速度的控制

无缆机器人的位置及速度检测是一个难题, 此处采用间接的方法使问题得以解决, 即利用控制导轨和脉冲电机控制管外驱动磁场磁路跟随机器人行走, 机器人的位置就通过管外驱动磁场的磁路运动状态间接测量出来, 其测量系统如图 10 所示.

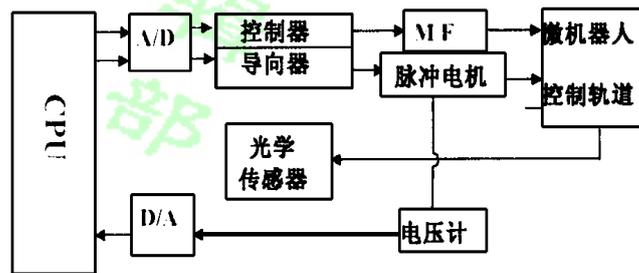


图 10 位置及速度检测系统

4 微管道机器人所面临的问题

从微管道机器人的发展过程来看, 每前进一步, 都和微机械电子技术、超精密加工技术的发展以及和以功能材料、智能材料为基础的微驱动器的研制开发成果是密切相关的. 尽管常规管道机器人有的已经产业化^[9,10], 诸如能源供给问题、通讯问题、通过性问题及自主控制问题都还没有从根本上解决, 毫无疑问, 如果说微小环境下, 管道机器人面临着一场观念性变革的话, 那么以上诸如能源供给问题、通讯问题、通过性问题、自主控制问题才是对微管道机器人的

真正挑战. 正如我们已经认识到的那样, 在常规机器人环境下面临的问题, 在微管道机器人环境下应该用不同的方法来解决; 在常规机器人环境下不是严重的问题, 在微管道机器人环境却显得非常严重, 而且还会遇到一些预想不到的新问题.

4.1 能源供给问题

常规机器人能源供给一般采用有缆方式, 拖缆的摩擦力并未对机器人的行走带来太大的影响, 至少在几百米以内是可以作业的. 可是对微管道机器人来说, 尽管其功重比已经很大, 但微机器人的牵引力与拖缆力相比是不可忽略的, 尤其在弯管环境中, 微机器人很容易因牵引力不足以拖缆而不能行走, 因此目前开发的微管机器人离实用化还有相当的差距.

4.2 可靠性问题

微管道机器人最终目标要实现在生物医学及核电站等重要领域应用, 因此其可靠性显得尤为重要, 因此要求机器人能适应复杂管内环境, 并具备故障排除能力.

4.3 速度及位置识别

常规管道机器人一般采用与驱动轮联结的光电码盘形成闭环控制, 并借助于 CCD 实现速度和位置的控制, 目前微管道机器人的速度及位移只能借助于管外激光干涉实验仪器和管外跟随装置间接实现, 还远远没有实现速度及位置的自主识别.

5 微管道机器人发展方向的探讨

有鉴于目前微管道机器人存在的问题, 并要最终实现在线检测这一宗旨, 首先在以下几个方面要有所突破.

(1) 微驱动器: 从微管道机器人的发展来看, 微驱动器技术起着关键作用, 并且是微机器人水平的标志, 因此开发耗能低、结构简单、易于小型化、位移输出和力输出大, 线性控制好, 动态响应快的新型驱动器是未来的研究方向.

(2) 微移动机构: 微移动机构决定微机器人的行走方式, 其发展在一定程度上和微驱动器的发展是相关的, 从目前的行走方式来看, 振动式和冲击式适合于刚性管壁环境下应用; 具有柔弹性的蠕动机构适合于在柔性管壁环境下应用, 因此柔弹性的蠕动机构在生物医学领域有其发展空间. 在这里应该指出为了实现在线作业, 微移动机构不应该将管道横截面全部堵上, 而应该留有一定的空间和疑缝隙以便介质通过^[10].

(3) 高度自治的控制系统: 微管道机器人要完成检测、维修作业, 其自身定位及环境的识别能力是关键, 开发微视觉系统, 提高微图像处理速度, 采用神经网络及人工智能等先进的技术来解决控制系统的高度自治难题是极具吸引力的, 也是最终自主化的关键.

6 结论

目前微管道机器人还处于实验室理论探索时期, 离实用化的距离还很遥远, 只有当微机械电子技术发展到一定程度, 并在微驱动器, 微移动机构以及高度自治的控制系统几方面有所实用化才会变成现实.

参 考 文 献

- 1 Fukuda T, Hosokai H. Study on Inspection Mobile Robot for the Inside of Pipeline (Design Concept and Experimental Evaluation on its Maneuverability and Diagnosability). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1984,

- 52(477): 1584- 1588
- 2 Moving Posture of A Crawling In-pipe Robot In Straight Pipe. The Second Asian Conference on Robotics and Its Application. 1994, 11- 14: 1- 4
 - 3 Takaharu I, Hitoshi K, Nobuyuki O. Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-pipe Micro Inspection Machine. Proc of IEEE 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS'95): 193- 198
 - 4 Toshio F, Hidemichi H. Giant Magnetostrictive Alloy (GMA) Application to Micro Mobile Robot as a Micro Actuator without Power Supply Cables. IEEE Micro Electro Mechanical System: 1991: 210- 215
 - 5 程良伦, 杨宜民. 一种新型管内微机器人的研究. 机器人, 1999, 21(4): 249- 255
 - 6 Clark A E. Ferromagnetic Material. Edited by E P Wohlfarth. North-holland Publishing Company, 1980, 1
 - 7 Frank Claeysen, Nicolas Lhermet. Giant Magnetostrictive Alloy Actuator. Int J of Applied Electromagnetics in Materials, 1994, 5
 - 8 Yamamoto S, Fukushima H. A Study of a Pipe Inside Mover with Elastic Bristles. Transactions of the JSME, 1988, 54 (506): 2471- 2472
 - 9 张永顺. 蠕动式管内移动机器人移动机构的研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1995
 - 10 张永顺. 水泥砂浆衬里补口作业机器人技术及理论的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999

DEVELOPMENT OF MICRO-IN-PIPE MOBILE ROBOT ABROAD

ZHANG Yong-shun

(Institute of Mechatronic Control Engineering, Zhejiang University 310027)

Abstract In this paper, application background of micro-in-pipe and its difference from conventional in-pipe robot are introduced firstly, on the basis of analysis and discussion on working theory about several kinds of small conventional in-pipe robot and micro-in-pipe robot with different micro actuators, the main problems on micro-in-pipe robot research are mentioned, in the meanwhile, the key technology and further research development trend are discussed.

Keywords: Micro actuator, micro-in-pipe robot

作者简介:

张永顺 (1966-), 男, 博士后. 研究领域: 管道机器人, 机器人机电一体化技术, 电-机械转换驱动器在伺服控制系统中的应用等.