

文章编号 1004-924X(2003)04-0326-07

管内移动微型机器人研究与发展现状

孙立宁,刘品宽,吴善强,刘 涛

(哈尔滨工业大学 机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:管内移动微型机器人是微型机器人领域的一个重要的方向,其主要包括用于发电、化工、制冷等行业中的细小管道检测的刚性管内移动的微型机器人,以及能进入人肠道的内窥镜的柔性管内移动的微型机器人。将微型机器人的研究方向与内容进行总结,介绍管内移动微型机器人的国内外研究发展现状,讨论管内移动微型机器人的研究内容与方向。

关键词:微型机器人;管内移动;内窥镜

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A

Status and development of in-pipe micro robots

SUN Li-ning, LIU Pin-kuan, WU Shan-qiang, LIU Tao

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The in-pipe micro robot is an important research area in the field of micro-robot. It consists of two aspects. one is to walk in the hard pipe, which is widely used in many fields of the chemical engineering, nuclear power plant and refrigeration. The other is to walk in the flexible pipe, which is applied in the field of medical treatment, etc. The paper summarizes the research areas and direction of microrobotics, introduces the status in domestic and overseas fields of the in-pipe micro robot.

Key words: micro robots; in-pipe; endoscopes

1 引言

机器人是一种自动的、具有编程能力的多功能机械手。作为一种通用作业装备,机器人技术是机械、电子、自动化及信息处理技术的融合,在许多领域得到了日益广泛的应用。随着 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 技术的发展,微机器人技术应运而生。微机器人技术(Micro-Robotics)成为机电系统研究的一个重要的方向与内容^[1-2]。微机器人的研究方向

归纳为三个方面:(1)微操作机器人技术^[3];(2)微定位机器人技术^[4];(3)微型机器人技术^[2-5]。微型机器人是指集成微型作业工具、各种微型传感器,具有通用编程能力的小型移动机构。微型机器人系统是由微驱动器、控制系统、执行器与传感器组成,按照机器人的尺寸大小来分类,微型机器人可以分成 3 类^[2]:(1)迷你型机器人(Miniature Robot)是外形尺寸在 10~100 mm 范围的机器人,这类机器人的机构是采用传统工艺制造的小型零件集成的,该机器人产生力与人

收稿日期:2003-03-12;修订日期:2003-06-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50175019);哈尔滨工业大学校基金(HIT. 2000. 60)

做精细作业的力比较接近,而且应用广泛,因此,该机器人成为当前研究的热点课题。(2)微型机器人(Micro-robot)是外形尺寸在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围的机器人,该机器人是将微驱动器、微传感器和信号处理电路集成在一块硅片上,采用微加工的方法制造。(3)纳米机器人(Nano-robot)是外形尺寸在 $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ 的范围内的机器人,类似一个生物细胞。

微型机器人,体积小、耗能低,能进入一般机械系统无法进入的狭窄作业空间,能方便地进行精细操作,方便与 MEMS 器件集成与接口,因此,微型机器人系统在现代科技领域有着广泛的应用前景。管内移动微型机器人是微型机器人领域的一个重要的方向,其主要包括用于发电、化工、制冷等行业中的细小管道检测的刚性管内移动的微型机器人,以及能进入人的肠道的机器人式内窥镜的柔性管内移动的微型机器人。

2 国内外研究现状

微型机器人的研究与微机械或微机电系统的研究紧密相连的,美国国家自然科学基金会(NSF)将 MEMS 技术列为优先支持的项目,美国国防部先进研究计划署(DARPA)也制定有关 MEMS 的研究发展计划,将惯性传感器作为研究重点。在欧洲,尤其是德国和法国, MEMS 技术作为前沿高科技,得到欧盟组织的大力支持,将全微分析系统和芯片实验室作为研究重点。尤其在日本,微机械研究始于 1991 年由通产省资助的“十年计划”,并被定为工业科技的前沿项目之一。这项计划共投资 250 亿日元,24 家企业、2 大基金和 3 个国家实验室参与。共拟定三个研究方向:电厂高级维护系统、微型工厂及医疗用机械。重点发展能进入狭小空间作业的微型机器人、能进入人体内腔的医疗微型机器人,以及微型工厂^[6]。下面将介绍刚性管内移动和柔性管内移动的微型机器人国内外研究发展现状。

2.1 刚性管内移动微型机器人国外研究现状

1994 年日本东京工业大学的 Iwao Hayashi 等研制了仿蚯蚓运动的管内微型机器人^[7]。该机器人由三个驱动单元组成,每个单元由一个柔性微型驱动器(FAM)和 4 个铰链机构组成,气囊驱动。机器人的直径 25 mm,长度 85 mm,最大

运动速度 2.2 mm/s。

1995 年日本 Denso 公司的 T. Idogaki 等研制了基于惯性冲击式驱动原理的微型机器人^[8]。驱动机构由弹性支撑腿、叠堆型压电陶瓷驱动器及惯性质量块组成,如图 1 所示。其运动机理如图 2 所示,首先压电堆驱动器慢速伸张,惯性冲击块的惯性力小于支撑腿与管壁之间的静摩擦力,机器人本体静止。第二步压电驱动器快速收缩,惯性力大于静摩擦力,机器人向前移动一段距离。重复前两步,机器人连续向前运动。该机器人可在直径为 8 mm 的弯管内爬行,机器人的本体直径为 5.5 mm,长 20 mm,质量 1.5 g,当支撑腿与管壁之间夹紧力为 0.21 N,驱动电压为 100 V、频率为 4 KHz 时,行驶速度为 10 mm/s。



图 1 压电驱动管内移动微小型机器人
Fig. 1 Inrpipe micro-robot driven by PZT

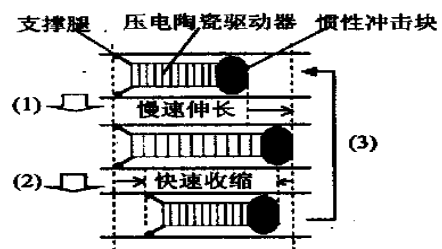


图 2 惯性冲击式运动机理
Fig. 2 Principle of inertial drive motion

叠堆型压电驱动器发热严重,而温度的升高会影响驱动器的性能。1997 年,Denso 公司的 N. Kawahara 等对此进行了改进^[9],以四层双压电膜驱动器取代叠堆压电驱动器,如图 3 所示。双压电膜驱动器的特点是输出位移大,功耗小,发热小。双膜压电膜的位移输出大,但力输出小,因此采用了四层双膜压电片结构。其驱动机理仍采用冲击式驱动原理。该机器人长 17 mm,直径

8 mm,质量 1.6 g。驱动电压为 15 V 或 20 V,以 1 KHz 的频率运行时,这种结构的驱动器的能耗是前一种驱动器的 1/80,速度快 2.5 倍。

1999 年,Denso 公司将机器人改造成无线的方式^[10],能在直径 15 mm 的管内以 10 mm/s 的速度运行。该机器人包括微波能量供给装置、双压电膜驱动器、控制电路组成。能量供给装置包括检波电路及微型接收天线。以 14 GHz 的微波进行能量的无线传送,传送功率为 4 W,接收功率为 200 mW,微波转换为直流电的转化率为 52%。驱动器的能耗只有 50 mW。控制电路包括锯齿波发生器和一个可编程逻辑器件。由外部的光信号控制机器人的运动方向。



图 3 双压电膜驱动管内移动牵引机构

Fig. 3 In-PIPE mini-locomotive mechanism driven by bimorph

同年,该公司对机器人系统进行了进一步的改进^[10],其微波模块采用射频技术(RF),用于机器人的无线能量传输与通讯。机器人的天线能接收两种频率的信号,22 GHz 的微波传送能量,24 GHz 的微波用来通信。驱动器的压电片由四片增加到八片,直径 9.5 mm,长 60 mm,可在直径 10 mm 的管中运动。其系统结构如图 4 所示。

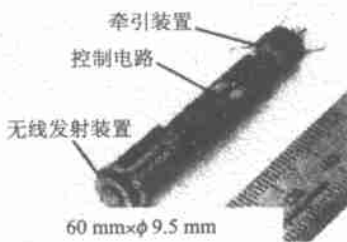


图 4 具有无线能量传输功能的机器人

Fig. 4 In-PIPE micro robot with wireless energy supplied

2000 年,Denso 公司与 Toshiba 和 Sanyo 公司合作,开发小型 CCD 系统,该系统如图 5 所示,包括小型 CCD 摄像机与图像无线传输系统,其直径 8.9 mm,长 25 mm。10 mm 距离内的图像分辨率 20 μm,用于细小管内壁的检测。采用集成电路制造技术(IC),将控制电路做成功能强大、高度集成的单元模块,与机器人机构集成一体^[11]。



图 5 全自主管内移动微小机器人

Fig. 5 Autonomous in-PIPE micro-robot

1993 年,日本 METTEC 公司的 H. Okamoto 等提出一种针型压电驱动器。1994 年,METTEC 公司的 T. Matsuoka 等对驱动器进行改进和微小化,采用该驱动器研制了微小管内移动机器人样机。驱动器的结构如图 6 所示,由四组压电陶瓷片、弹性金属片及触针组成。驱动器采用压电振动原理,控制金属板的振动,弯曲模式将压电片的振动传到触针上,从而产生 X-Y 平面上的驱动力。基于该驱动机理,研制了管内微小移动机器人样机,如图 7 所示,每四片针型驱动器附在机械体上组成一个单元,共前后两单元。机器人长 49 mm,质量 35 g,能量及信息以有线的方式传送。可在直径 36 mm 的管内前进、后退、旋转及螺旋移动,以 25 V 电压驱动时,最大速度可达 200 mm/s,最大驱动力可达 60 gf。

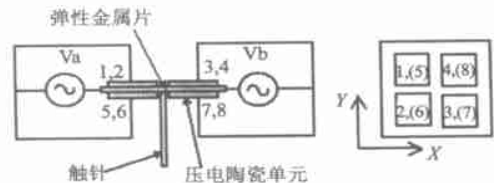


图 6 针式驱动器的驱动方法

Fig. 6 Driving method of pin-type actuator

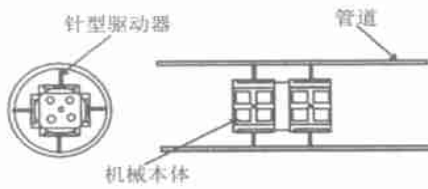


图 7 针式驱动管内移动机器人的结构

Fig. 7 Mechanism of in-pipe mobile machine

1995 年 METTEC 公司的 T. Matsuoka 等对该驱动器进一步小型化^[12]。另外,对管内微机器人进行了改进。将驱动电路和变压电路集成到一起,减少导线数目,增加了机器人的灵活性,机器人的尺寸减小到长 35 mm,质量 28 g,导线由原来的 40 根减少到 8 根。

1994 年,日本东京工业大学的 Iwao Hayashi 等研制了一种基于螺旋驱动原理,能在长 20 m 直径 20 mm 或更细的管内移动的微型机器人^[13]。其运动机理如图 8 所示,橡胶轮的轴线与基座的轴线空间相交成一定侧偏角,等效为螺旋角,电机直接驱动,机器人将在管内以螺旋轨迹前进或后退,其机理等效于螺纹传动。驱动轮的侧偏角的大小对机器人的移动速度和拖动力有直接的影响,侧偏角为 25 时,最大的速度可达 100 mm/s,最大拖动力达 9.5 N,侧偏角为 60 时,速度可达 260 mm/s。1997 年,Iwao Hayashi 等对该机器人进行了改进,可在直径 20 mm、长 20 m 的管内移动,并增加了微型 CCD 摄像机用来对细小管道的内壁进行检测。1999 年,该研究小组与 NEC 公司及 Kantool Gken 公司合作,对螺旋驱动单元进行了改进,使机器人具有越障能力,机器人能顺利通过直径 100 mm 和直径 75 mm 管道的连接处。

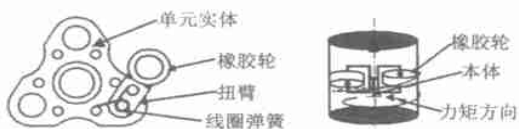


图 8 螺旋驱动机理

Fig. 8 Principles of screw motion

1999 年,日本 Toshiba 公司的 Koichi Suzumori 等开发用于直径 25.4 mm 管道检测的微型机器人^[14]。如图 9 所示,机器人直径 23 mm,长度为 110 mm,质量 16 g,并集成高分辨率的小型

CCD 摄像机和用于微小目标作业的微操作手。机器人的运动速度为 6 mm/s,驱动力为 1 N。其驱动电机为直径 5 mm,长度为 8 mm 的电磁式电机,其最大输出力矩为 0.17 mNm,转速为 48 000 rpm。减速器采用行星齿轮减速机构形式,其减速比为 1 620:1,其直径 5 mm,长度为 7 mm。



图 9 日本东芝管内检测微型机器人

Fig. 9 In-pipe inspection robot of Toshiba

2.2 柔性管内移动微型机器人国外研究现状

具有内窥镜各项功能的微机器人的概念是由日本的 Ikuta 于 1988 年提出的。同年 Ikuta 研究与开发用于大肠检查的小型医用机器人 MEDIWORM,该机器人是一个半自动装置,由操作人员通过一定的人机界面进行交互操作,后来又加入了记忆合金转向装置^[15]。

1995 年,美国加州理工大学的 A. Brett Slatkin 等在 MEDIWORM 的基础上设计了一套机器人内窥镜系统^[16]。该系统以压缩气体为动力源、橡胶气囊为驱动器。其运动机理为仿尺蠖式运动。夹紧驱动器基于充气气球的原理,该原理在硬管内的运动是成功的,但在柔性肠道内和表面粘滑的环境下,其夹紧效果不太理想。2000 年该研究小组对机器人进行改进,还对肠道的动力学模型进行了分析。

1996 年,意大利的 P. Dario 等^[17]和比利时 Leuven 大学的 J. Peirs 等提出了一种有自推进能力的内窥镜,它由本体、控制系统和微小手臂三部分组成。本体包括三个气囊驱动器,其中一个为轴向伸缩的推进驱动器,用来推动微机器人,两个径向伸缩的夹紧驱动器,使得机器人的两端与肠道内壁夹紧,产生摩擦力。机器人的运动是仿尺蠖运动。

1998 年比利时的 J. Peirs 等对该机器人系统进行更深入研究^[18],重点对微机器人的驱动、肠壁夹紧方法和人机交互界面等方面进行研究。但

机器人的前端没有适应肠内环境的转向机构,如图 10 所示为该机器人系统的组成模块图。1999 年该研究小组提出了带转向装置的内窥镜机器人。其运动机理采用尺蠖式运动机理。机器人长 95 mm,直径 15 mm,由三个主要模块和夹紧驱动器组成。伸缩驱动器的长度为 10 mm,行程为 10 mm,采用记忆合金驱动。夹紧驱动器的行程为 15~50 mm,采用气囊的驱动原理。

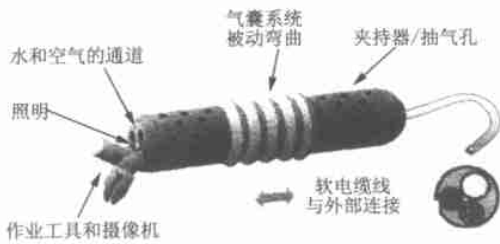


图 10 自推进微型机器人内窥镜

Fig. 10 Self-propelling robotic endoscope

1999 年,新加坡南洋理工大学的 Sanjiv Kumar 等研制了一种新的微机器人内窥镜(MRC)系统^[20],机器人内窥镜是由视觉引导的自治装置,能在人体的肠胃内运动,进行检查、分析和诊断。该研究内容包括建立机器人前端转向的一般微分数学模型,并对机器人的路径规划、基于视觉和触觉传感器的数据融合理论等方面进行研究。并机器人内窥镜系统在模拟肠道的物理环境与动物的肠内进行了试验。

以色列 Given Imaging 公司研制胶囊式自推进胃肠检测机器人系统^[21]。该系统包括无线胶囊机器人、随身图像记录器和计算机工作站,其机器人外形象胶囊式的药丸,如图 11 所示,直径

11 mm,长度 30 mm,内装有无线图像传输电路、微型 CCD 摄像机以及照明系统。胶囊机器人通过口腔进入人的胃肠,依靠胃肠自身的蠕动来驱动机器人运动,将拍摄到的肠胃内壁的图像通过无线通讯的方式传送到人随身携带的图像记录器,然后,图像记录器储存的图像通过电缆线下载到工作站上。医生再对图像进行处理。该胶囊式的机器人已在临床上反复使用,目前已经产品化。



图 11 胶囊式胃肠检测机器人

Fig. 11 Wireless capsule endoscope

2.3 国内研究管内移动微型机器人现状

国内管内移动微型机器人的研究起步较晚,基本上处于跟踪国外先进技术阶段,但渐渐得到了重视,以上海交通大学、上海大学、广东工业大学为代表的院校在国家 863 计划和国家自然科学基金委的资助下,开展了卓有成效的工作,取得了一系列的成果。

上海交通大学在国家 863 计划和国家自然科学基金委的资助下,开展管内移动微型机器人方面的研究。研制了多关节电磁蠕动机器人^[22],微型压电驱动惯性冲击式机器人,以及微型电磁驱动惯性冲击式机器人。其中电磁蠕动机器人由三个驱动单元件、弹性密封膜、前舱组成,其尺寸为 7×60 mm,质量 5 g。可携带光学成像、传像、内部照明装置自动进入微小管道,实现对管内表面状况的成像和图像传输。同时,该研究小组开展全方向蠕动机器人驱动内窥镜系统的研究,采用电磁蠕动机器人,搭载 CCD 摄像机等检测系统进入人体内部完成诊断和精细手术,并且开展对人体肠道环境的数学建模与分析。

上海大学研制电磁力驱动的步进式管内移动微型机器人,其外形尺寸为 15×30 mm,运动速度为 $4 \sim 8$ mm/s。该机器人结构简单,但发热严重,不利于在狭小空间作业。该研究小组还开展基于双压电膜驱动的惯性冲击原理的微型机器人,该机器人能在直径 20 mm 的管内运动^[22]。该小组还研制不需要软轴驱动的螺旋式小电机驱动的机器人,并搭载电涡流传感器,成功地对核电站的细小管道进行了检测。该小组的钱晋武^[23]等对柔软管道中机器人蠕动机构进行了探讨,提出了一种气体驱动的驱动器装置,并开始医疗用管内机器人方面的研究。

广东工业大学研制一种电磁力驱动的蠕动式微机器人^[24],该机器人由前磁腿、机器人主体、后磁腿、软连接组织和驱动弹簧等构成,适合在直径15~20 mm的管道内运动,头部可携带微型CCD或微操作工具。

浙江大学研制了适合在液体介质内移动的微细管内机器人^[25]。石油大学开展基于蚯蚓蠕动机理的研究,研制了用于电火花弯孔加工的微小机器人^[26]。

3 研究方向与内容

要建立管内移动微小型机器人的研究体系,采用的是从基础研究、单元技术再到系统集成技术这一技术路线。

3.1 基础研究

基础研究包括:(1)微型机构设计方法的研究,新型微型驱动器的理论建模与分析(如,压电陶瓷驱动器,双压电膜驱动器,记忆合金驱动器等新型驱动器的力学分析);(2)微型机器人行走机理的理论研究(如尺蠖式运动机理、惯性冲击式运动机理的建模与有限元模拟计算);(3)微型机器人控制方法的研究。

参考文献:

- [1] 孙立宁,周兆英,龚振邦. MEMS国内外发展状况及我国MEMS发展战略的思考[J]. 机器人技术与应用, 2002, 2: 2-4.
SUN L N, ZHOU Z Y, GONG Z B. Present status of MEMS and China stratagem on MEMS[J]. *Robot Technique and Application*, 2002, 2: 2-4. (in Chinese)
- [2] FATIKOW S, REMBOLD U. Microsystem technology and microrobotics[A]. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* [C]. 1997. 303-361.
- [3] KLOCKE V. Trends in nanomanipulation: from nanometer to micro production line[A]. *8th International Conference on New Actuator* [C]. Bremen, Germany, 2002. 100-105.
- [4] ELMUSTAFA A A, LAGALL Y M G. Flexural hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations[J]. *Precision Engineering*, 2001, 21: 77-81.
- [5] HOLLIS R. Whither microrobots[A]. *IEEE Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science* [C]. 1996. 9-12.
- [6] ISHIKAWA Y, KITAHARA T. Present and future of micromechatronics[A]. *IEEE International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science* [C], 1997. 13-20.
- [7] HA YASHI I, IWATSU KI N. Micro moving robotics[A]. *IEEE International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science* [C]. 1998. 41-50.
- [8] IDOGA KI T, KANA YAMA H, OHYA N. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for on in-pipe micro inspection machine[A]. *IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* [C]. 1995. 193-197.
- [9] KAWAKITA S, ISOGAI T, OHYA N, et al. Multi-layered piezoelectric bimorph actuator[A]. *IEEE International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science* [C]. 1997. 73-77.

3.2 单元技术

单元技术的研究内容包括:(1)新型驱动器的研究(静电旋转与直线驱动马达,叠堆压电驱动器和双压电膜驱动器,超声马达,形状记忆合金驱动器,电磁感应式小型电机,气囊式驱动器等)。(2)基于MEMS工艺方法的新型传感器的研究。(3)微型CCD的研究以及无线图像传输系统的研究。(4)能量无线传输技术的研究(微波能量传输形式和光电子能量传输形式)。(5)小型作业工具的研究等。

3.3 系统集成

根据具体的应用对象,如用于核电站的细小管道检测的微小型机器人系统,用于胃肠道检测的机器人式内窥镜,将成熟的单元技术集成,使机器人系统具有微小型视觉功能,全自主,具备一定搭载能力,并集成微型传感器与作业工具。

4 结束语

对管内移动微型机器人的国内外研究现状进行了综述,对管内移动微型机器人的研究内容与研究方向进行总结。

- [10] SHIBATO T, SASAYA T, KAWAHARA N. Micro wave energy supply system for in-pipe micromachine[A]. *IEEE International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science* [C]. 1998.237-242.
- [11] TSURUTA K, SASAGA T, SHIBATO T, *et al.* Control circuit in an in-pipe wireless micro inspection robot[A]. *IEEE International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science* [C]. 2000.59-64.
- [12] MATSUOKA T, ASANO M, MITSUISHI S, *et al.* Improvement of micro machine with piezoelectric driving force actuator[A]. *IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* [C]. Nagoya, Japan. 1995. 211-217.
- [13] HAYASHI I, IWATSUKI N, IWASHINA S. The Running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe[A]. *IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* [C]. Nagoya, Japan. 1995:225-228.
- [14] SUZUMORI K, MIYAGAWA T, KIMURA M, *et al.* Micro inspection robot for 1-in pipes[A]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [C]. 1999,4(3):286-292.
- [15] IKUTA K, TSUKAMOTO M, HIROSE S. Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope[A]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Philadelphia, USA. 1997.427-430.
- [16] HOEGHD, SLATKIN AB, BURDICKJ. Biomechanical modeling of the small intestine as required for the design and operation of a robotic endoscope[A]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. San Francisco, USA. 2000,4:1599-1606.
- [17] DARIO P, CARROZZA MC, LENCIONI L, MAGNANIB, *et al.* A micro robotic system for colonoscopy[A]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Albuquerque, New Mexico. 1997,4:1567-1572.
- [18] PEIRSJ, REYNAERTS D, VAN BRUSSEL H. Design of miniature parallel manipulators for integration in a self-propelling endoscope[J]. *Sensors and Actuators*, 2000,B85:409-417.
- [19] KUMAR S, KASSIM IM, ASARI V. Design of a vision-guided microrobotic colonoscopy system [J]. *Advanced Robotics*, 2000,14(2):87-104.
- [20] IDDAN G, MERON G, GLUKHOVSKY A, *et al.* Wireless capsule endoscopy[J]. *Nature*,2000,25(5):405-417.
- [21] 陈寅, 颜国正, 戎荣, 等. 电磁驱动微小型机器人控制系统的研究[J]. *光学精密工程*, 1998,6(4):70-74.
CHEN Y, YAN GZ, RONG R, *et al.* Study of electromagnetic driving micro robot control system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998,6(4):70-74. (in Chinese)
- [22] 罗怡, 龚振邦, 孙麟治, 等. 双压电薄膜微机器人驱动器的模态分析[J]. *高技术通讯*. 2001,3:85-87.
LUO Y, GONG ZB, SUN LZ, *et al.* The modal analysis of PZT bimorph actuator for micro robot [J]. *High Technology Letters*. 2001,3:85-87. (in Chinese)
- [23] 钱晋武, 章亚男, 沈林勇, 等. 微小管道探测机器人系统[J]. *高技术通讯*, 2001,2:92-94.
QIAN JW, ZHANG YN, SHEN LY, *et al.* Robotic system for micro pipe inspection[J]. *High Technology Letters*. 2001,2:92-94. (in Chinese)
- [24] 程良伦, 杨宜民. 一种新型管道内微机器人的研究[J]. *机器人*. 1999,21(4):249-255.
CHENGL L, YANG YM. Study on a new kind of micro robot in fine pipe[J]. *Robot*, 1999,21(4):249-255. (in Chinese)
- [25] 周银生, 李立新, 赵东福. 一种新型的微型机器人[J]. *机械工程学报*. 2001,37(1):11-13.
ZHOU YS, LIL X, ZHAO DF. New kind of micro-robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2001,37(1):11-13. (in Chinese)
- [26] 贾宝贤, 刘永红, 杨毅. 仿蚯蚓机器人蠕动装置的研究[J]. *机器人*. 2000,22(5):416-418.
JIA BX, LIU YH, YANG Y. A study of a crawling device in imitated earthworm robot[J]. *Robot*, 2000,22(5):416-418. (in Chinese)

作者简介:孙立宁(1964-),男,黑龙江人,教授、博士生导师,主要研究方向:微操作机器人、微驱动技术、机器人学,现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长,哈尔滨工业大学机电工程学院副院长,国家 863 计划机器人主题 MEMS 专题专家组组长。