

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.002

一种核管道机器人结构与驱动力分析*

韩 猛, 赵 峰, 桑 迪, 翟科栋, 王 鼎, 周 军*

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对人工方式进行核电管道检测与维护存在效率低的问题, 将管道机器人技术应用到核电站管道维护中, 代替人工进行现场故障监测、异物探测和清理。设计了直径为 300 mm 的管道机器人的机械结构, 分析了机器人在管道中的受力情况以及驱动特性。同时设计了一种全新的单电机全驱动机构, 这种设计使机器人整体结构更为紧凑, 提高了机器人行进速度以及驱动负载能力。并利用 ADAMS 动力学仿真软件对机器人驱动特性进行了研究和分析。结果表明, 机器人的驱动能力能够满足实际作业需求, 并且其驱动能力与摩擦系数、斜坡度有关; 其中驱动力与摩擦系数成正比, 即摩擦系数越大机器人的驱动力越大; 驱动力与斜坡度成反比, 即斜坡度越大驱动力越小。该研究结果可为后续机器人优化设计提供理论依据。

关键词: 管道机器人; 驱动力; ADAMS; 结构设计

中图分类号: TH122; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)07-0696-06

Structural design and driving force analysis of the nuclear pipeline robot

HAN Meng, ZHAO Feng, SANG Di, ZHAI Ke-dong, WANG Ding, ZHOU Jun

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Aiming at the problems of the low efficiency of nuclear power pipeline detection and maintenance in artificial way, the pipeline robot technology was applied to plant pipeline maintenance to complete on-site fault monitoring, foreign matter detecting and clearing instead of manual work. The mechanical structure of a 300 mm-diameter pipe robot was designed, and the force situation of the robot in the pipeline and driving characteristics was analyzed. A new kind of all-wheel-drive mechanism with single motor was designed, which makes the overall structure of the pipe robot compact, and improves the speed and driving load capacity of the robot. ADAMS simulation software was used to research and analyze the driving characteristics of the robot. The results indicate that the demand of practical work could be met by the driving ability of the designed robot, and that the driving ability is related to the friction coefficient, slope degree; specifically, the driving force is proportional to the coefficient of friction, that is, the bigger the coefficient of friction, the bigger driving force of the robot; while the driving force is inversely proportional to the slope degree, that is, the bigger the slope, the smaller the driving force. Due to the results, the theoretical basis for subsequent robot optimization design can be provided.

Key words: pipeline robot; driving force; ADAMS; structure design

0 引 言

进入 21 世纪以来, 随着我国核电技术的不断进

步, 核电行业得到飞速地发展。在核电站中, 管道是实现核液体循环、蒸汽循环、动力传输等功能的载体, 是核电运营和生产必不可少的主要输送设备之一。然而管道在使用的过程中, 需要经常进行质量检测 and 维

收稿日期: 2016-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375268); 山东大学自主创新基金资助项目(2012ZD009)

作者简介: 韩猛(1989-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事管道机器人方面的研究. E-mail: 1052895914@qq.com

通信联系人: 周军, 男, 副教授, 博士生导师. E-mail: zhoujun@sdu.edu.cn

修、异物探查与清理。目前主要通过人工的方法来进行操作,采用的流程是先停掉相关设备,然后拆开阀门或者管道,进行排查以确定异物在管道内的具体位置。而且,如果遇到需要拆开管道的情况,切割焊接过程极其繁琐,操作人员处于辐射、高温、粉尘、狭小空间等操作环境,工作条件恶劣、工作效率低。执行完上述操作之后,还需要通过很多实验以验证焊接后的管道是否满足核电安全运行的要求。因此迫切需要一种能适应核电站特殊环境的管道机器人代替工作人员进行现场故障监测、异物探测和清理,从而大幅度地提高检修水平和事故处理效率,降低辐射对工作人员的危害。

目前,国内外针对管道机器人的相关研究较多。国外的管道机器人研究起步较早,主要以美、日、德为代表,目前国内外在管道机器人领域主要集中研究新颖的驱动方式以及结构开发。其典型的驱动方式主要有:介质流压差驱动(PIG)、形状记忆合金驱动(SMA)、柔性微执行器(FMA)、履带式、轮式驱动等^[1-2],其中 SMA、FMA 等新式驱动方式一般适应于微型管道,轮式与履带式等传统驱动形式适应于中大型管道,德国 AliveAdria 等^[3]研制的蠕动轮式管道机器人 MAKRO-PLUS,采用轮式驱动,运动平稳,但是采用关节串联,总体尺寸较大,比较笨重;韩国 Young-Sik Kwon 等^[4]研制的管道机器人采用轮压式移动机构,通过伸缩杆变形来控制轮子与管壁的压力,但是这种结构在管道运动中容易失稳;美国的密歇根大学 Grzegorz Granosik 等^[5]研制的蛇形管道机器人,采用履带式驱动,驱动能力较强,由于采用柔性关节来实现机器人位姿变化,控制比较复杂。

国内管道机器人研究虽然起步较晚,但是近年来已投入了大量人力物力进行相关研究,并且取得了一定的成果。比较典型的有哈尔滨工业大学的螺旋驱动式管道机器人^[6]。上海交通大学研制的六轮式管道检测机器人^[7],这种管道机器人由一个电机通过涡轮蜗杆传动同时带动 6 个行走轮在管道爬行,能够在 500 mm 管道中行驶 500 m 左右。但是这种管道机器人在复杂管道环境中运动性能较差。

本研究将管道机器人技术应用到核电站管道维护中,代替人工进行现场故障监测、异物探测和清理。

1 管道机器人性能指标

机器人工作的管道状况如下:管道内径为

300 mm,管道内衬为橡胶材料。针对管道状况,设计的技术指标如表 1 所示。

表 1 管道机器人性能指标

基本参数	性能指标
结构形式	单元模块式
工作空间/mm	适应管径 300
运动速度/(m·s ⁻¹)	不小于 0.1
移动位移/m	不低于 30
有效负载/N	不低于 20

2 单元驱动体结构设计与分析

2.1 驱动方式的选择

笔者研究的管道机器人应用在管径 300 mm 的大中型管道中,要求能够携带执行机构,具有转弯功能,因此本研究设计的机器人单元拟采用轮式驱动方案。轮式移动方式是一种广泛应用的运动方式。实践证明,轮式移动机构具有结构简单、运动平稳、运动效率高优点,因此很多管道机器人采用轮式驱动结构^[8-10]。

2.2 驱动体结构设计

单元驱动体结构示意图如图 1 所示。

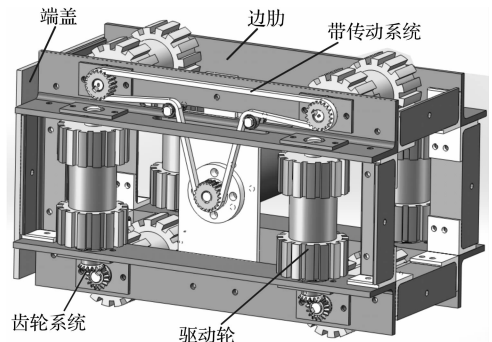


图 1 单元驱动体结构示意图

每个单元驱动模块由端盖、传动装置、边肋、驱动轮等组成。其中传动装置包括带传动与齿轮传动系统。边肋与端盖共同组成机器人单元驱动体的支撑结构。单元体四周均匀布置 2 个完全相同的驱动轮,并且每个驱动轮都具有驱动能力,并且驱动力相同。由于管道内部环境复杂,机器人容易发生倾覆而导致驱动轮与管道壁失去接触,最终使得机器人失去运动能力。并且,当机器人进入狭小空间时,机器人的侧面或者顶面很容易与管道内壁或管道内壁障碍物接触而发生卡死现象,为此,为了让机器人驱动轮与管道内壁始终保持接触并避免卡死现象发生,本研究中机器人的单元驱动体周身设计成和腹

部完全一样的装置来保证有效接触^[11],即机器人单元体四周均匀布置成结构形式一样的驱动轮,并且驱动轮选用聚氨酯材料,表面设计成滚花形式,可以有效提高摩擦力。

为了缩小单元体的结构尺寸,减少总体重量以及简化系统,本研究采用单电机全驱动的方式,即一个电机来驱动单元模块的全部驱动轮^[12]。单元传动结构示意图如图 2 所示。

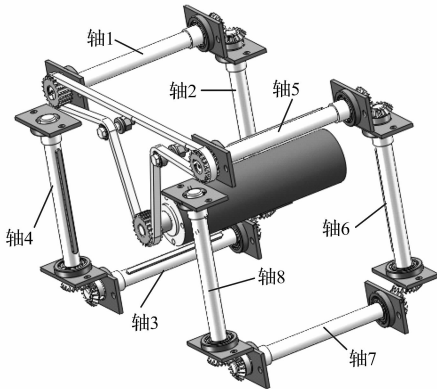


图 2 驱动体传动结构示意图

驱动电机布置在单元体中间,其主轴连接同步带轮,同步带轮通过同步带与轴 1 和轴 5 上的同步带轮相连,这样电机力矩便通过同步带传动同时传递到轴 1 和轴 5 上;各轴之间通过锥齿轮副连接,这样力矩依次按轴 1-轴 2-轴 3-轴 4(轴 5-轴 6-轴 7-轴 8)顺序传递,使四周驱动轮具有相同的驱动力矩。

2.3 单元驱动力分析与计算

管道机器人在理想状况下的受力主要是滚动阻力、外部线缆拖拽力(外力),然而管道的环境与结构复杂多变,还可能受到介质阻力、斜坡阻力、越障阻力、以及转弯阻力等。由于本研究设计的机器人主要应用在质地较硬的管道,受力时驱动轮与管道内壁产生的变形非常小,在行走时可以忽略滚动阻力。越障阻力比较复杂,不容易精确评估,因此对电机选型计算时要预留功率空间来满足越障需求。在计算驱动力过程中,本研究主要对介质阻力、线缆拖拽力以及斜坡阻力进行详细分析与计算。

2.3.1 斜坡阻力分析

机器人在斜坡管道运动时,因自身重力作用,会产生斜坡阻力。其中机器人质量为 m ,管道坡度为 α ,则斜坡阻力 F_x 为:

$$F_x = mgsin\alpha \quad (1)$$

当机器人本体在垂直管道运动时,即 $\alpha = 90^\circ$,此

时斜坡阻力最大,即为机器人自身重力为 mg ,因此 $F_x \leq mg$,其中 $mg = 50 \text{ N}$ 。

2.3.2 介质阻力分析

核电站管道通常会有流动的介质—冷却水。当管道机器人的运动方向同水流的方向相反时,机器人本体会对水流产生一定空间阻塞比,阻碍水的流动,同时,在水流压力作用下,机器人本体会受到水流阻力,即介质阻力,用 F_j 表示。根据流体动力学原理,机器人所受的水流阻力可用下式近似计算^[13]:

$$F_j = \frac{1}{2}cA\rho(v_r + v_w)^2 \quad (2)$$

式中: c —水流阻力系数, A —机器人在水中的阻力横截面积, ρ —水的密度, v_r —机器人行进速度, v_w —水流速度。

假设水流速度 $v_w = 0.5 \text{ m/s}$,管径 $d = 300 \text{ mm}$,水的粘度 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,则代入式(3),计算雷诺系数 R_e :

$$R_e = \frac{dv_w\rho}{\mu} \quad (3)$$

求得 $R_e = 0.3 \times 10^6$,查表,得水流阻力系数 $c = 1.2$ 。已知 $v_r = 0.2 \text{ m/s}$, $A = 0.05 \text{ mm}^2$,代入式(2),计算得介质阻力 $F_j = 14.7 \text{ N}$ 。

2.3.3 线缆拖拽力分析

本研究设计的管道机器人主要在直管道与弯管道中工作,所以在分析线缆阻力时,主要对直管道与弯管道两种工况展开分析。在分析计算之前,对管道和线缆做以下几点假设^[14-17]:

- (1) 弯管道部分为水平管道;
- (2) 线缆和机器人在管道内等速运动;
- (3) 线缆与管道内壁均匀接触,没有拱起;
- (4) 忽略线缆轴向伸缩变形,其为理想柔韧体;
- (5) 线缆与弯道的接触形状为理想圆弧线。

直管道中线缆受力状态如图 3(a) 所示。

则 ds 单元线缆受力平衡式如下所示:

$$F + f_1 \cdot dN + \rho g \cdot ds \cdot \sin\alpha = F + dF \quad (4)$$

$$dN = \rho g \cdot ds \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

式中: ρ —单位长度线缆质量。

对式(4)、式(5)化简积分后得:

$$F_2 = \rho g(f_1 \cdot \cos\alpha + \sin\alpha)S + F_1 \quad (6)$$

式(6)为 S 长度线缆在直管道中的阻力公式。由此可知,线缆阻力与管道倾角和线缆长度有关。

弯管道线缆受力状态如图 3(b) 所示,由于是水平管道并且弯管处线缆长度有限,弯管处线缆重量可以忽略,由此得到单元线缆受力平衡式如下:

$$(F + dF) \cos \frac{d\beta}{2} - F \cdot \cos \frac{d\beta}{2} - f_1 \cdot dN = 0 \quad (7)$$

$$dN - (F + dF) \sin \frac{d\beta}{2} - F \cdot \sin \frac{d\beta}{2} = 0 \quad (8)$$

考虑到 $d\beta/2$ 趋向 0 时, $\sin(d\beta/2) \approx d\beta/2$, $\cos(d\beta/2) \approx 1$, 进步化简得, $dF/F = f_1 d\beta$, 两边积分:

$$\int_{F_1}^{F_2} dF/F = \int_0^\beta f_1 d\beta, \text{ 即:} \quad (9)$$

$$F_2 = F_1 e^{f_1 \beta}$$

式(9)为线缆在弯道处的阻力。由此可知, 弯道处线缆拖拽力只与包角大小有关。

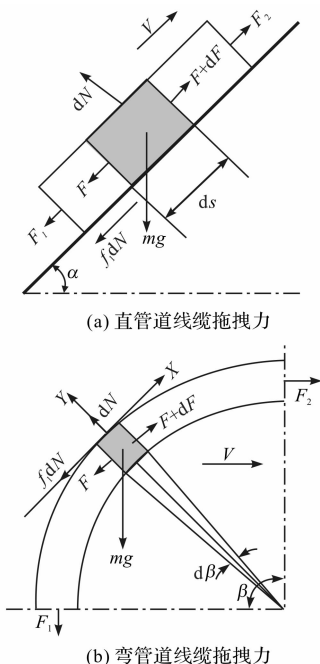


图3 线缆拖拽力分析图

V —线缆前进方向; α —直管道与水平地面的倾角; S —线缆总长度; ds —线缆的一个小单元; dN —管道壁对 ds 单元线缆的支撑力; $F, F + dF$ — ds 单元线缆两端的拉力; F_1, F_2 — S 长度线缆两端的拉力; f_1 —管道壁与线缆之间的动摩擦因数; β —弯管圆弧包角

机器人线缆阻力可以根据式(6)和式(9)分段计算。这里取直管道为水平管道即 $\alpha = 0^\circ$, 线缆长 $S = 30 \text{ m}$, 线缆线密度 $\rho = 1.5 \text{ kg/m}$, 动摩擦因数 $f_1 = 0.3$ 。假设管道有一个弯道, 并且弯道在最远处, 此时求得单元承受的线缆拖拽力 $F_t = 3.6 \text{ N}$ 。

综上, 机器人单元体所受的阻力: $F_x + F_j + F_t = 68.3 \text{ N}$, 考虑到单元承担的额外负载, 最终得到机器人单元阻力为 73.3 N 。设驱动轮的半径为 30 mm , 则驱动轮所需力矩为 2.082 N 。当机器人以 12 m/min 前进时, 则驱动轮以 64 r/min 转速转动。假设同步带的传动效率 $\eta_1 = 0.98$, 齿轮系传动效率 $\eta_2 = 0.96$, 那么从同步

带到机器人驱动轮总传动效率 $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2^2 = 0.98 \times 0.96^2 = 0.90$, 则驱动电机的功率:

$$P = \frac{P_1}{\eta} = \frac{Tn}{9550\eta} = 15.6 \text{ W} \quad (10)$$

式中: P_1 —驱动轮功率。

由于需要预留一定的功率空间来应对突发状况, 现笔者选取中国生产的直流电机 Z42DPN, 额定转速为 3000 r/min , 功率为 25 W , 转矩为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 减速比为 45 , 行走速度约为 0.2 m/s , 远远大于技术指标 0.1 m/s , 能满足技术指标要求。

其单元驱动体的总体设计参数如表 2 所示。

表 2 单元驱动结构参数

参数	指标
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/mm	340 × 224 × 224
驱动轮尺寸(最大直径)/mm	60
设计重量/kg	5

3 管道机器人动力学模型分析

机器人爬行机构整体运动受力分析图如图 4 所示。

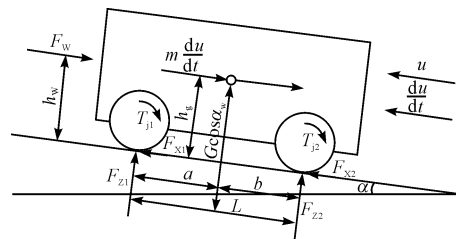


图4 机器人爬行单元整体运动受力分析图

m —机器人爬行单元质量; F_w —外界阻力(包括线缆、水流阻力), 其受力情况已在上一节分析; F_{z1}, F_{z2} —前、后驱动轮的管道法向接触力; F_{x1}, F_{x2} —前后驱动轮的管道切向作用力; L —前后驱动轴距; a, b —前、后驱动轴至爬行单元质心的距离; α —管道坡度; h_g —爬行单元质心高; h_w —外界阻力作用点至管道壁的距离; u —机器人爬行单元的前进速度; mdu/dt —爬行单元惯性力; m_c —前面(或后面)驱动轮的质量; r —驱动轮的半径; μ —管道摩擦系数; T_{j1}, T_{j2} —前、后驱动轮的惯性力偶矩, 其中 $T_{j1} = T_{j2} = \frac{1}{2} m_c r \frac{du}{dt}$

以后驱动轮与管道壁接触中心点进行力矩平衡, 得:

$$F_{z1} L = mgb \cos \alpha - mgh_g \sin \alpha - mh_g \frac{du}{dt} - T_{j1} - T_{j2} - F_w h_w \quad (11)$$

以前驱动轮与管道壁接触中心点进行力矩平衡, 得:

$$F_{z2} L = mgac \cos \alpha + mgh_g \sin \alpha + mh_g \frac{du}{dt} + T_{j1} + T_{j2} + F_w h_w \quad (12)$$

化简式(11,12)得前、后驱动轮的管道法向接触力:

$$F_{z1} = \frac{mgb\cos\alpha - mgh_g\sin\alpha - (mh_g + m_c r) \frac{du}{dt} - F_w h_w}{L} \quad (13)$$

$$F_{z2} = \frac{mgacos\alpha + mgh_g\sin\alpha + (mh_g + m_c r) \frac{du}{dt} + F_w h_w}{L} \quad (14)$$

因管道机器人驱动力由摩擦力提供,则由式(13,14)得到管道机器人的驱动力:

$$F_t = \mu F_{z1} + \mu F_{z2} - mgs\sin\alpha - F_w - \frac{T_{j1}}{r} - \frac{T_{j2}}{r} \quad (15)$$

由式(13,15)知,管道机器人爬行单元在管道运动过程中,后驱动轮对管壁的接触力要大于前驱动轮对管道壁的接触力;由式(15)知其驱动力大小主要与管道斜坡、管道摩擦系数、外界阻力有关。

4 基于 ADMAS 的驱动力仿真实验

本研究采用虚拟样机技术对以上驱动力进行虚拟实验分析,设计了满足表2参数要求的全驱动单元机器人虚拟样机,并创建内径为300的管道环境,管道机器人虚拟样机如图5所示。

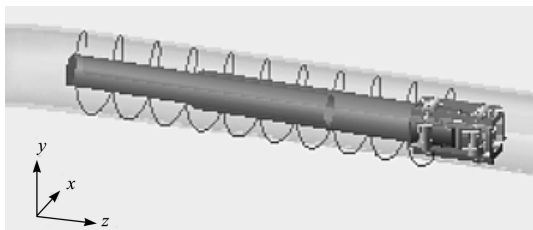


图5 管道机器人虚拟样机图

添加约束后,给驱动轮施加0.1 m/s的驱动,并在管道与机器人之间创建测力弹簧,来测试单元机器人在管道的驱动力。测试参数:测试弹簧刚度系数 $k = 0.5 \text{ N/mm}$,阻尼系数 $R = 0.1 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$;参数变量:摩擦系数 μ 分别取0.5、0.4、0.3;管道坡度 α 分别取 0° 、 5° 、 10° 。

机器人单元在斜坡为 10° 的管道仿真运动的结果如图6所示。

可以看到,管道机器人后驱动轮的接触力要大于前轮的接触力,这与上节理论建模分析相符合,验证了理论建模的正确性。

不同摩擦系数下的直管驱动力曲线图如图7所示。

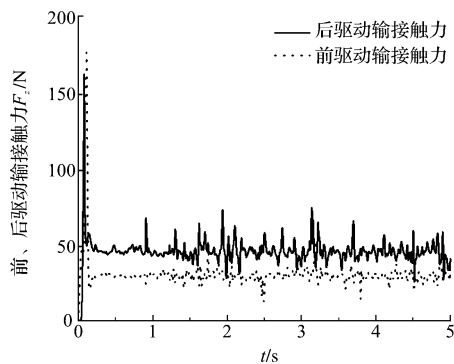


图6 机器人单元前后驱动轮与管壁接触力

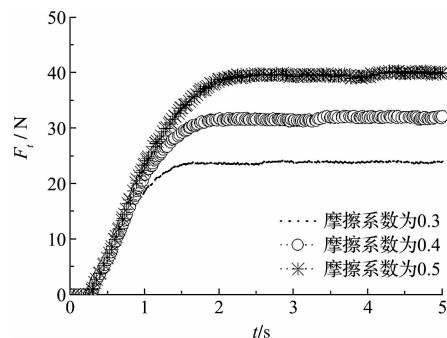


图7 不同摩擦系数下的直管驱动力曲线图

3条曲线分别表示在摩擦系数为0.5、0.4、0.3的水平直管道的驱动力,其大小依次为39.6 N、32 N、23.8 N。

不同斜度的直管驱动力曲线图如图8所示。

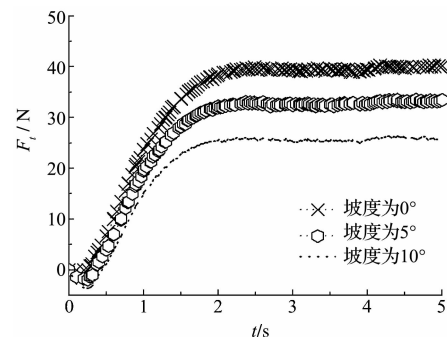


图8 不同斜度的直管驱动力曲线图

图8中3条曲线表示摩擦系数相同的条件下,斜坡度分别为 0° 、 5° 、 10° 的直管道的驱动力,其大小依次为39.6 N、33 N、25.5 N。

从图7、图8中可以得到以下结论:机器人的驱动力与摩擦系数、斜坡度有关。其中驱动力与摩擦系数成正比,即摩擦系数越大机器人的驱动力越大;驱动力与斜坡度成反比,即斜坡度越大驱动力越小。

5 结束语

本研究设计了一种新的轮式管道机器人本体结

构,同时设计了一种新颖的驱动机构,通过结合锥齿轮传动与同步带传动,实现单电机全驱动,使得机器人整体结构紧凑,同时提高了机器人行进速度以及驱动负载能力。并且详细分析了机器人单元在管道环境中的受力情况,为分析机器人单元的驱动特性奠定了理论基础。最后利用 ADAMS 对机器人单元的驱动特性进行了仿真实验和分析。

仿真结果表明,该机器人驱动能力能够满足实际情况要求,并且得出驱动能力与摩擦系数、斜坡度有关;其中驱动力与摩擦系数成正比,即摩擦系数越大机器人的驱动力越大;驱动力与斜坡度成反比,即斜坡度越大驱动力越小。该研究结果为后续机器人优化设计提供理论依据,同时为接下来机器人样机的开发以及样机实验奠定基础。

参考文献(References):

[1] 李 鹏,马书根,李 斌,等.具有自适应能力管道机器人的设计与运动分析[J].机械工程学报,2009,45(1):154-161.

[2] 王辰忠,王 挺,刘 君,等.差动式自适应管道机器人的设计与运动分析研究[J].机电工程,2016,33(4):395-400.

[3] ADRIA O, STREICH H, HERTZBERG J. Dynamic replanning in uncertain environments for a sewer inspection robot [J]. *Intl Journal of Advanced Robotic Systems*, 2004, 1(1):33-38.

[4] KWON Y S, LEE B, WHANG I C, et al. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains[J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, 47(10):5141-5146.

[5] GRANOSIK G, BORENSTEIN J, HANSEN M G. Serpentine robots for industrial inspection and surveillance[J]. *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*, 2006, 32(2):1337-1379.

[6] 邓宗全,孙序梁,刘成林.管内行走机器人机构的研究[J].机器人,1989,3(6):45-47.

[7] 张云伟,颜国正,丁国清,等.煤气管道机器人管径适应调节机构分析[J].上海交通大学学报,2005,39(6):950-954.

[8] 唐德威,李庆凯,姜生元,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.

[9] KAWAGUCHI Y, YOSHIDA I, KURMATANI H, et al. Development of an in-pipe inspection robot for iron pipes [J]. *Journal of Robotics Society of Japan*, 1996, 14(1):137-143.

[10] TSUBOUCHI T, TAKAKI S, KAWAGUCHI Y, et al. A straight pipe observation from the inside by laser spot array and a TV camera[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Takamatsu: IEEE, 2000.

[11] 赵华鹤.类蛇形多关节搜救救援机器人研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学机械工程学院,2013.

[12] 张云伟.煤气管道检测机器人系统及其运动控制技术研究[D].上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2007.

[13] 杜广生.工程流体力学[M].北京:中国电力出版社,2007.

[14] 姜生元,陈 明,邓宗全,等.管内拖缆作业机器人拖线力计算方法研究[J].管道技术与装备,1999(5):39-41.

[15] 王佳佳,刘满禄,张 婧,等.基于 ADAMS 的六轮自适应越障机器人的设计与研究[J].机械,2014,42(5):61-65.

[16] 郭小宝,赵 振,陈落根.基于能量法的重载码垛机器人重力平衡分析与设计[J].包装与食品机械,2015(6):43-46.

[17] 王明盛.基于 ADAMS 的管道机器人机构设计与仿真分析[D].四川:西南科技大学机械工程学院,2010.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

韩 猛,赵 峰,桑 迪,等.一种核管道机器人结构设计与驱动力分析[J].机电工程,2017,34(7):696-701.

HAN Meng, ZHAO Feng, SANG Di, et al. Structural design and driving force analysis of the nuclear pipeline robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(7):696-701.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>