

DOI: 10.3901/JME.2014.17.008

基于螺旋轮倾角可控的管内 机器人能量优化控制策略*

李 特^{1,2} 马书根^{1,3} 李 斌¹ 王明辉¹ 王越超¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 立命馆大学机器人系 滋贺 525-8577 日本)

摘要: 针对现有的螺旋驱动管内机器人由于弹性臂末端螺旋轮倾角固定所导致的负载能力不可调和能耗调节能力有限的问题,提出一种螺旋轮倾角可控的螺旋驱动管内机器人。螺旋轮倾角可控使机器人在电动机性能约束下具有更大范围的环境适应性和更强的能耗优化能力。基于动力学模型和能耗模型,通过能量优化分析,提出定点作业能量最优控制策略和考虑速度约束的恒速巡检能量次优控制策略。仿真结果表明这两种控制策略能够分别根据负载外力的不同调整螺旋轮倾角及电动机角速度,使机器人运动相同距离的能耗低于螺旋轮倾角固定的机器人能耗。在三种不同负载外力的实际管道环境中,试验验证了两种控制策略能量优化的有效性。

关键词: 螺旋驱动; 管内机器人; 能量优化; 螺旋轮倾角可控

中图分类号: TP242

Control Strategies of Energy Optimization for an In-pipe Robot with Inclining-angle-adjustable Screw Rollers

LI Te^{1,2} MA Shugen^{1,3} LI Bin¹ WANG Minghui¹ WANG Yuechao¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Department of Robotics, Ritsumeikan University, Shiga-ken 525-8577, Japan)

Abstract: In the existing in-pipe robots based on screw drive, the inclining angle of rollers tipped on the elastic arms is usually invariable. The roller with an unchangeable inclining angle is an obstacle for changing load capacity and optimizing energy consumption of the robot. Therefore, a screw drive in-pipe robot with inclining-angle-adjustable rollers is proposed. While considering the constraint of motor performance, the adjustable inclining angle enhances large-scale environmental adaptability and the ability of optimizing energy consumption. The optimization of energy consumption is then discussed based on dynamic analysis and the model of energy consumption. Two control strategies of energy optimization: An energy optimization of point-approaching task and an energy suboptimization of inspection with constant traveling speed are proposed. The simulation results show that the two control strategies can respectively change the inclining angle and the motor speed based on the load. The energy consumption for a same distance is less than that of a robot without inclining-angle-adjustable rollers. In real pipelines with three different loads, the experiments verified the validity of the proposed control strategies.

Key words: screw drive; in-pipe robot; energy optimization; adjustable inclining angle of rollers

0 前言

随着城市化进程的推进,管道成为石油、天然

气等能源的主要运输手段,并广泛应用于城市排水、供暖等系统。然而随着使用年限的增加,管道会出现老化、腐蚀、裂缝等自然或人为地损坏。如果不能及时发现并进行维修,可能会带来巨大的经济损失和环境破坏。因此,管道的缺陷检测与定期维护显得尤其重要。由于管道内部空间狭小以及可能存

* 国家自然科学基金资助项目(61273345)。20130917 收到初稿,20140512 收到修改稿

在对人体有害的物质, 人工检测方法非常耗时。为了提高管道探查效率并降低维护成本, 研究人员开发了各种各样的管内机器人。根据移动机构的不同主要分为 9 类: pig 式^[1]、内窥镜式^[2]、直接驱动轮式^[3-4]、螺旋驱动式^[5-7]、履带式^[8]、腿式^[9]、尺蠖式^[10], 弹力支撑式^[11]和仿蛇式^[12]。

在众多移动机构中, 螺旋驱动方式具有易于微型化和能耗低的优点。目前, 有关螺旋驱动管内机器人的研究已经取得了很多成果, 例如: IWASHINA 等^[13]开发的适用于 20 mm 管径的螺旋驱动原理的微型管内机器人; HIROSE 等^[14]设计的应用于 50 mm 管径的螺旋驱动管内机器人 THES-I; HORODINCA 等^[15]研制了适应 40、70 及 170 mm 管径的多款螺旋驱动管内移动机器人, 具有自带电源和无线通信能力, 并能够在弯管和竖管内运动。钱晋武等^[16]利用螺旋驱动原理开发了管道涡流检测机器人。以上研究的一个共同点是螺旋驱动机构上的螺旋轮倾角固定。因此, 在电动机性能和管壁对滚轮的最大静摩擦力确定时, 只能调节机器人的移动速度而无法调节其最大负载能力; 在不同轴向负载外力下, 只能调节电动机输出转矩, 无法保证电动机总是以较高的效率工作, 能耗较大。

为解决最大负载能力无法调节的问题, LI 等^[17]设计一种速度自适应螺旋驱动管内机器人。利用速度调节机构根据负载外力被动地改变螺旋轮倾角, 从而调节速度和最大负载能力, 但其仅具有单一方向的环境适应性且无法保证能耗最优。

本文从能耗分析出发并兼顾最大负载能力适应性, 在螺旋驱动移动机构的基础上提出了主动控制螺旋轮倾角的概念, 建立了动力学模型。考虑管内机器人常用的两种工作方式, 即定点作业和恒速巡检作业, 本文提出了定点作业能量最优控制策略和恒速巡检能量次优控制策略。

1 机器人模型与能耗分析

机器人环境适应能力与能耗是管内机器人设计需要考虑的两个问题。本节首先建立螺旋轮倾角固定的机器人模型与能耗模型, 然后分析螺旋轮倾角可控对最大负载能力和能耗的影响, 从而提出螺旋轮倾角可控的螺旋驱动管内机器人。

1.1 螺旋驱动机器人模型

考虑机器人能耗问题, 首先需要分析其运动特性。如图 1 所示, 螺旋驱动管内机器人一般由旋转体单元和保持体单元两部分组成。互成 120° 的弹性支撑臂使机器人具有一定的管径适应性, 并能够

保持运动稳定性。

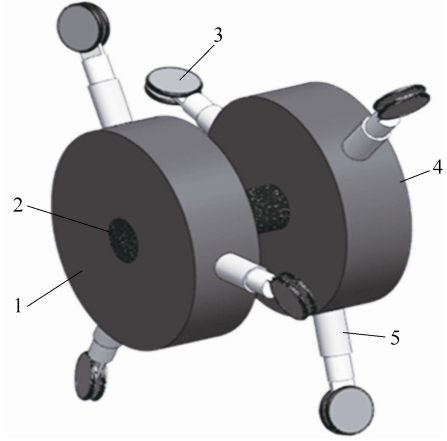


图 1 螺旋驱动机器人

1. 旋转体 2. 传动轴 3. 被动滚轮 4. 保持体 5. 弹性支撑臂

下面建立机器人的运动模型, 图 2a 中的 R 和 r 分别表示管道半径和被动滚轮半径。当旋转体以角速度 $\dot{\theta}$ 旋转且螺旋轮倾角为 α 时, 机器人以速度 \dot{X}_r 前进。受弹性臂和管壁的约束, 被动滚轮相对于弹性臂以角速度 $\dot{\phi}$ 滚动。如图 2b 所示, 将滚轮与管壁的接触点处线速度分解可得机器人的运动学关系式(1)和式(2)

$$R\dot{\theta} - r\dot{\phi} \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\dot{X}_r - r\dot{\phi} \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

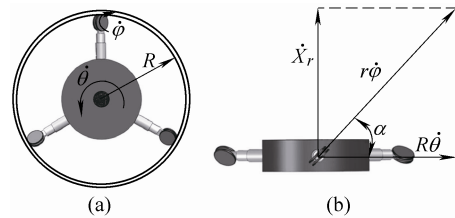


图 2 螺旋驱动机器人运动分析

消去式(1)和式(2)中的 $\dot{\phi}$ 可得机器人前进速度 \dot{X}_r 与旋转体角速度 $\dot{\theta}$ 的关系式

$$\dot{X}_r = R\dot{\theta} \tan \alpha \quad (3)$$

下面对机器人在直管道中的运动进行受力分析, 忽略由于重力引起的弹性臂伸缩长度差异, 保持体姿态固定。如图 3 所示, 将由摩擦阻力等因素引起的轴向负载外力等效作用在机器人中心, 记为 F_a 。电动机输出转矩经过减速箱、行星轮系传动到旋转体, 折算后的转矩记为 τ 。根据机器人受力平衡分析可得到转矩

$$\tau = n_a R (f_n \sin \alpha + f_t \cos \alpha) \quad (4)$$

和轴向负载外力

$$F_a = n_a (f_n \cos \alpha - f_t \sin \alpha) \quad (5)$$

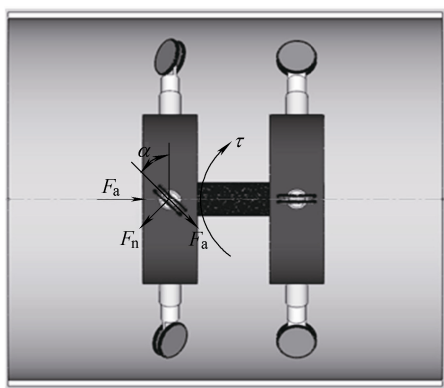


图 3 螺旋驱动机器人受力分析

式中 n_a ——旋转体上弹性臂个数;
 f_n ——管道内壁对滚轮的法向静摩擦力;
 f_t ——管道内壁对滚轮的切向滚动摩擦力。

由于滚动摩擦力很小,在后面的分析中忽略。

根据力平衡关系可以得到机器人最大负载能力与螺旋轮倾角的关系。最大负载能力受电动机额定转矩和最大静摩擦力共同约束。图 4 中两条曲线分别为最大静摩擦力约束下的负载能力曲线,和额定转矩约束下的负载能力曲线,实线表示机器人实际的最大负载能力。在 A 点左侧,负载能力取实线所对应的值,如取虚线值则机器人打滑;在 A 点右侧,负载能力取实线所对应的值,如取虚线值,则电动机工作在超载状态下。

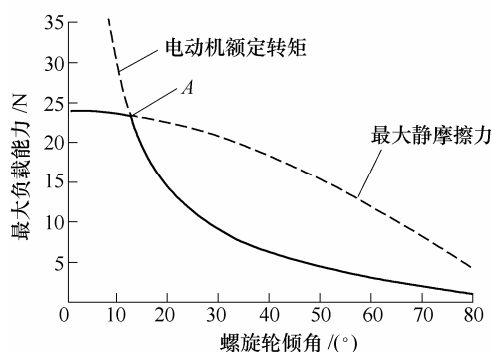


图 4 机器人负载能力分析

当螺旋轮倾角固定,则负载能力确定。如果螺旋轮倾角可控,则负载能力可调。螺旋轮倾角可控有利于机器人适应大范围负载外力环境,并使电动机运行在效率较高的工作点上。

1.2 能耗分析

本节从能耗角度分析螺旋轮倾角可控对能量优化的重要性。机器人的能耗关系如式(6)所示, $u(t)$ 、 $i_a(t)$ 分别表示电动机两端电压随时间的函数和电枢电流随时间的函数, t_f 为运行时间

$$W(t) = \int_0^{t_f} u(t) i_a(t) dt \quad (6)$$

当机器人匀速运动且负载外力恒定时,认为电动机输出转矩、角速度稳定。机器人的启动和制动时间相比匀速阶段十分短暂,不予考虑。根据式(6)有能耗关系式

$$W(U, i_a, \dot{X}_r, s) = U i_a s / \dot{X}_r \quad (7)$$

式中 U ——电枢两端电压;

i_a ——电枢电流;

s ——运动距离。

下面将能耗关系式(7)化简为以控制量 ω_m 和 α 为变量的函数。图 5 中是考虑机械摩擦损耗与风损等,但忽略电感影响的电动机等效模型^[18]

$$\begin{cases} U = R_a i_a + E \\ i_a = i_b + i_m = E / R_b + i_m \\ E = K_v \omega_m \\ i_m = T_m / K_m \end{cases} \quad (8)$$

式中 E ——反电动势;

R_a ——电枢电阻;

T_m ——输出转矩;

ω_m ——角速度;

K_v ——速度常数;

K_m ——转矩常数。

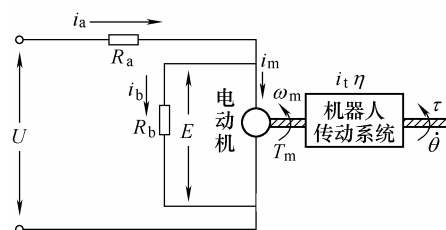


图 5 直流电动机等效模型

在转子绕组两端并联等效电阻 R_b , 等效由机械摩擦和风损引起的能耗。 R_b 可以根据下式获得

$$R_b = \frac{E}{i_b} = \frac{K_v \omega_e R_a}{U_e - K_v \omega_e - R_a T_e / K_m}$$

式中, U_e , ω_e , T_e 分别是额定电压、角速度、转矩。

在图 5 中, i_t 是传动机构的总传动比, η 是整个传动机构的效率。因此有如下关系式

$$\omega_m = i_t \dot{\theta} \quad (9)$$

$$\tau = i_t \eta T_m \quad (10)$$

根据式(4)、(5), 当忽略滚动摩擦力 f_{ti} 时, 可得 F_a 和 τ 的关系式

$$\tau = F_a R \tan \alpha \quad (11)$$

当负载外力 F_a 恒定且运动路程 s 取为 1 时, 将

式(3)、(8)~(11)代入能耗关系式(7), 可得以 ω_m 和 α 为变量的能量优化目标函数

$$\min W(\omega_m, \alpha) = \min \left(\frac{a_1 \omega_m}{\tan \alpha} + \frac{b_1 F_a^2 \tan \alpha}{\omega_m} + c_1 F_{re} \right) \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{(R_a + R_b) K_v^2 i_t}{R_b^2 R}$$

$$b_1 = \frac{R_a R}{K_m^2 i_t \eta^2}$$

$$c_1 = \frac{(2R_a + R_b) K_v}{R_b K_m \eta}$$

约束条件

$$0 < \omega_m \leq \left(U_c - \frac{RR_a F_a \tan \alpha}{K_m i_t \eta} \right) \frac{R_b}{(R_a + R_b) K_v}$$

$$0 < \alpha \leq \arctan \left(\frac{T_c i_t \eta}{R F_a} \right) \quad (13)$$

当 α 不变时, 通过目标函数式(12)可以看出, 某一负载外力下的机器人能耗仅与角速度 ω_m 有关, 且当 $\omega_m = \sqrt{b_1/a_1} F_a \tan \alpha$ 时能耗最优, 与 F_a 成正比关系。在式(14)约束下, 输出转矩 T_m 与 F_a 成正比关系, 且限制在 T_c 以内。当 F_a 增大, 为使机器人受力平衡且能耗最优, T_m 和 ω_m 需要同时增大。但受到约束式(13)的限制, 必须使电动机工作在 U_c 以内, 因此当 F_a 增加到某一值, 将很难满足受力平衡或能耗最优。

如果 α 可控, 当 F_a 变化时, 可以通过同时调节 α 和 ω_m 使机器人满足受力平衡和能耗最优。再结合第 1.1 节的分析, 调节 α 可以调节负载能力。因此, 本文提出了旋转体上弹性臂末端螺旋轮倾角可控的螺旋驱动管内机器人。通过控制螺旋轮倾角 α 可有效提高负载能力。3 个滚轮的倾斜角度通过联动机构由同一小功率电动机驱动。

2 基于能量优化的控制策略

2.1 基于螺旋轮倾角可控的动力学模型

针对螺旋轮倾角可控的螺旋驱动管内机器人, 建立动力学模型。利用动力学模型获得负载外力关系是能量优化控制策略的基础。

由于弹性支撑臂上的滚轮受管道内壁作用力的约束, 滚轮只在其切线方向上有速度, 而在法向上速度和为零(机器人不打滑)。因此, 螺旋驱动方

式的管道机器人可以看成是一个非完整理想约束系统。下面利用拉格朗日方法建立其动力学方程。

如图 6 所示, 确定机器人的广义坐标如下: $q_1 = X_r$, $q_2 = \theta$, $q_3 = \varphi$, $q_4 = \alpha$; 因此广义速度为: $\dot{q}_1 = \dot{X}_r$, $\dot{q}_2 = \dot{\theta}$, $\dot{q}_3 = \dot{\varphi}$, $\dot{q}_4 = \dot{\alpha}$ 。机器人本体总质量 m (不包含旋转体的 3 组滚轮), 滚轮质量 m_w , 旋转体转动惯量 I , 滚轮绕弹性支撑臂的转动惯量 I_r , 驱动转矩 τ_r , 滚轮绕轴的转动惯量 I_w 。忽略重力对机器人的影响, 构件之间的摩擦以及滚轮和管道内壁之间的滚动摩擦力等。

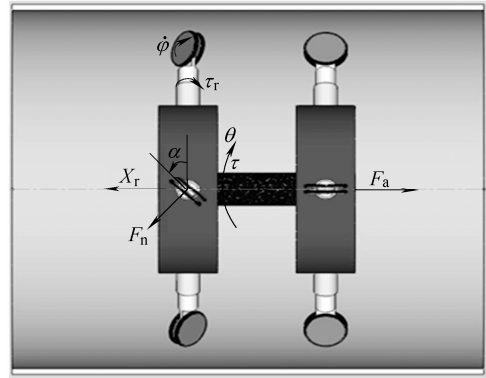


图 6 广义坐标示意图

假设通过管道轴线的水平面的重力势能为零, 则机器人总体势能近似为零。机器人系统拉氏函数表示为

$$L = \frac{1}{2} m \dot{X}_r^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_r \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} n_a m_w \dot{X}_r^2 + \frac{1}{2} n_a m_w l^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} n_a I_w \dot{\varphi}^2 \quad (14)$$

式中, $l = R - r$ 。因此, 机器人系统的 Routh 方程可表示为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k + \sum_{s=1}^2 \lambda_s c_{sk} \quad (15)$$

$$k = 1, 2, 3, 4$$

式中, $Q_1 = -F_a$, $Q_2 = \tau$, $Q_3 = 0$, $Q_4 = \tau_r$ 。由运动学关系, 可知速度约束条件为

$$\begin{cases} \dot{X}_r \cos \alpha - R \dot{\theta} \sin \alpha = 0 \\ -R \dot{\theta} + r \dot{\varphi} \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (16)$$

对 Routh 方程式(15)和式(16)组成的方程组求解, 可得负载外力与转矩 τ 等变量的关系

$$F_a = \frac{\tau}{R \tan \alpha} - \frac{(a_2 r^2 + c_2) R}{\cos^2 \alpha} \dot{\alpha} \dot{\theta} - \frac{c_2 R^2 + b_2 r^2 + a_2 R^2 r^2 \sin^2 \alpha}{R r^2 \sin \alpha \cos \alpha} \ddot{\theta} \quad (17)$$

式中, $a_2 = m + n_a m_w$, $b_2 = I + n_a m_w l^2$, $c_2 = n_a I_w$ 。利用负载外力关系式(17)和机器人传动关系式(9)、式(10), 可以根据传感器测得的电动机角速度、转矩值计算负载外力的大小。

2.2 定点作业能量最优控制策略

定点作业是指控制机器人移动一段距离到达某一需要维修的地点进行作业。在这种方式下, 途经的管道部分已经被探测过而不需要再次探查, 机器人可以快速通过。另外野外作业时能量有限, 机器人如以较低能耗运动, 则意味着能够完成更远更复杂的任务。

由于管道环境相对稳定, 不需要频繁的调节螺旋轮倾角, 而且驱动螺旋轮倾角所需要的功率与驱动旋转体的功率相比要小得多, 几乎可以忽略不计, 因此在本文的能耗分析中不考虑这部分能耗。

下面根据能量优化目标函数式(12)求最小能耗。这是一个二元函数求极值的问题, 不难求得当 ω_m 和 α 满足关系式(18)时, 机器人能耗最优

$$\omega_m = \sqrt{b_1 / a_1} F_a \tan \alpha \quad (18)$$

下面研究在机器人能耗最小的前提下, 如何使机器人具有最快的移动速度。根据式(3)、式(9)和式(18)可以得到移动速度关系

$$\dot{X}_r = \sqrt{b_1 / a_1} R \tan^2 \alpha F_a / i_t \quad (19)$$

根据式(19), \dot{X}_r 随 α 单调递增。将式(18)代入约束条件式(13)可得 α 取值范围

$$0 < \alpha \leq \arctan \frac{K_m i_t \eta U_e}{\left(R_a + \sqrt{R_a(R_a + R_b)}\right) R F_a} \quad (20)$$

为使机器人能耗最优的前提下, 移动速度最快, α 取最大值

$$\alpha = \arctan \frac{K_m i_t \eta U_e}{\left(R_a + \sqrt{R_a(R_a + R_b)}\right) R F_a} \quad (21)$$

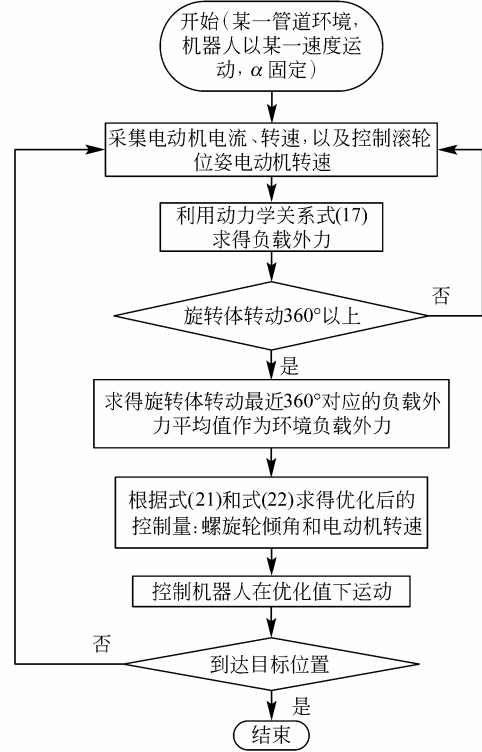
将式(21)代入式(18)可得 ω_m

$$\omega_m = \frac{R_b U_e}{K_v \left(\sqrt{R_a(R_a + R_b)} + R_a + R_b\right)} \quad (22)$$

在不同的负载外力 F_a 下, 使机器人能耗最小且移动速度最快的螺旋轮倾角 α 也不同, 但角速度 ω_m 仅与电动机本身性能参数有关。

控制策略流程如图 7 所示, 在某一环境稳定, 但负载外力未知的管道中, 利用动力学关系求得负载外力, 然后根据式(21)、式(22)给出控制量, 进而控制机器人运动在能量优化状态下。但由于重力原因, 机器人弹性支撑臂并不是完全等长的, 这就导

致了不对称性, 机器人输出转矩也会因此呈现周期性变化。为避免频繁地调节螺旋轮倾角, 从而造成能量损耗及机器人运动的不稳定, 提出将旋转体旋转 360° 的平均负载外力当做当前管道的负载外力。



2.3 恒速巡检作业能量次优控制策略

恒速巡检作业是指机器人以某一适宜观察管道状态的速度 \dot{X}_r 运行, 为操作人员反馈稳定的图像。在 \dot{X}_r 满足要求的前提下, 机器人移动单位距离能耗如能尽可能小, 那么利用有限的能量机器人可以完成更远的巡检距离。

当机器人以速度 \dot{X}_r 运动时, 由运动学关系式(3)和传动关系式(9)可得速度约束条件

$$\omega_m = \dot{X}_r i_t / (R \tan \alpha) \quad (23)$$

将式(23)代入式(12)得以 α 为变量的能量优化目标函数式(24), 同时满足约束条件式(13)

$$\min W(\alpha) = \min \left(\frac{a_1 \dot{X}_r i_t}{R \tan^2 \alpha} + \frac{b_1 F_a^2 \tan^2 \alpha}{\dot{X}_r i_t} + c_1 F_a \right) \quad (24)$$

当满足式(25)时, 目标函数取得最小值

$$\alpha = \alpha_m = \arctan \sqrt{\frac{a_1}{b_1} \frac{\dot{X}_r i_t}{R F_a}} \quad (25)$$

当 $\alpha \in (0, \alpha_m)$ 时, 目标函数单调递减; 当

$\alpha \in (\alpha_m, \pi/2)$ 时, 目标函数单调递增。此时能耗不是最优, 称为“次优状态”。

螺旋轮倾角 α 能否取得最优解 α_m 受约束条件限制。将式(23)代入式(13)并求解。

当 $\Delta = U_e^2 - 4a_3\dot{X}_r F_a \geq 0$ 时, 有解

$$\alpha \in \left(0, \arctan \frac{T_e i_t \eta}{R F_a} \right] \cap \left[\arctan \frac{U_e - \sqrt{U_e^2 - 4a_3\dot{X}_r F_a}}{2b_3 F_a}, \arctan \frac{U_e + \sqrt{U_e^2 - 4a_3\dot{X}_r F_a}}{2b_3 F_a} \right] \quad (26)$$

$$a_3 = \left(\frac{R_a}{R_b} + 1 \right) \frac{R_a K_v}{K_m \eta} \quad b_3 = \frac{R_a R}{K_m i_t \eta}$$

如果无解, 则说明在当前负载外力下, 机器人性能无法满足巡检速度要求。

α 值的选择以满足约束条件, 并使能耗尽可能小为原则。将螺旋轮倾角 α 在约束下的解区间式(26)记为 $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$, 当 $\alpha_m \in [\alpha_1, \alpha_2]$ 时, 取 $\alpha = \alpha_m$; 当 $\alpha_m < \alpha_1$ 时, 取 $\alpha = \alpha_1$; 当 $\alpha_m > \alpha_2$ 时, 取 $\alpha = \alpha_2$ 。第一种情况能够满足能耗最小, 而后两种情况时, 由于电动机性能的限制, 在要求的恒定速度下不能使能耗最小, 是一种次优状态。确定了 α , 就可以利用式(23)求得电动机角速度。

图 8 给出了该控制策略的流程图, 其控制流程与定点作业能量最优控制策略类似。

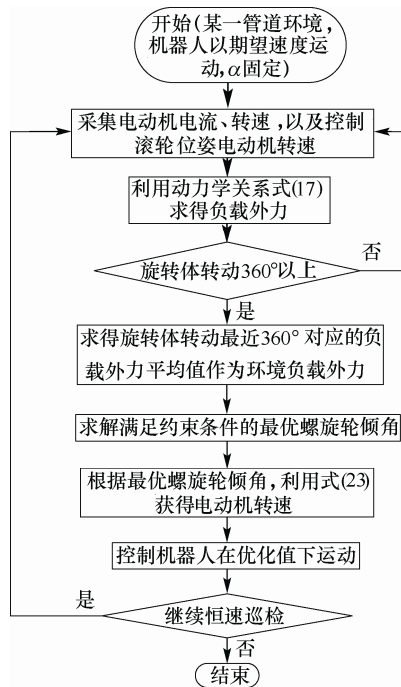


图 8 次优控制策略流程图

该控制策略以机器人移动速度满足要求为前提, 能够使机器人在负载外力变化的情况下保持移动速度不变, 且使能耗最优或次优。

3 仿真分析

在本节中, 分别建立定点作业能量最优控制策略(策略 1)、恒速巡检能量次优控制策略(策略 2)和固定倾斜角速度控制策略(策略 3)的能耗分析仿真系统以验证本文所提控制策略的有效性。表 1 和表 2 给出了机器人主要参数和电动机参数。

表 1 机器人主要参数

质量 m/kg	滚轮半径 r/mm	总传动比 i_t
1.8	10	300

表 2 旋转驱动电动机参数

参数	数值
额定电压 U_e/V	24
额定转矩 $T_e/(\text{mN}\cdot\text{m})$	2.42
电枢电阻 R_a/Ω	34.2
转矩常数 $K_m/(\text{mN}\cdot\text{m}/\text{A})$	16.3
速度常数 $K_v/[\text{r}/(\text{min}\cdot\text{V})]$	584
减速比	150

在内径 190 mm 的直管道中, 机器人在不同负载外力 F_a 下分别移动 0.8 m。在策略 2 和策略 3 中, 机器人的巡检速度 $\dot{X}_r = 0.083 \text{ m/s}$ 。图 9 给出了螺旋轮倾角 α 、转矩 T_m 、能耗、移动速度 \dot{X}_r 随负载外力 F_a 的变化关系。

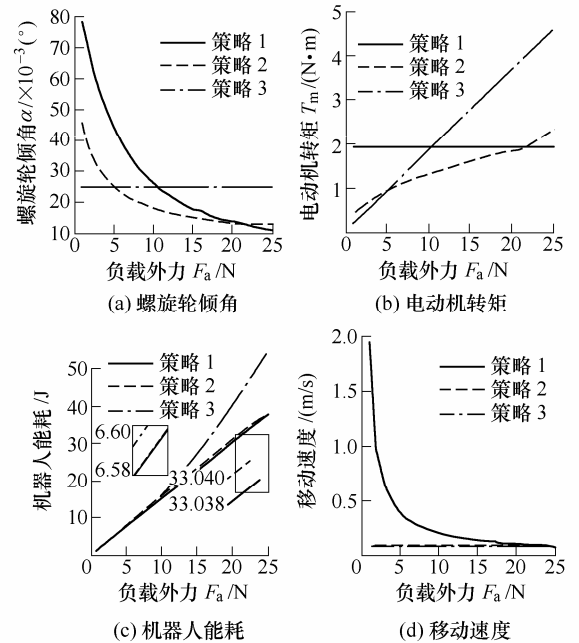


图 9 仿真结果

当负载外力不断增加,如图 9a 所示,策略 1 和策略 2 对应的螺旋轮倾角不断减小,实现了螺旋轮倾角的可控化。策略 3 的螺旋轮倾角始终固定在 25° 不变。

在图 9b 中,策略 1 下的电动机转矩始终在额定转矩以内且保持不变。策略 2 下的转矩则随负载外力的增加不断增大,但始终在额定转矩以内。策略 3 下的转矩则在负载外力大于 13.11 N 之后,超出额定转矩,电动机处于超载状态,说明在策略 3 下($\alpha=25^\circ$)机器人的负载能力仅有 13.11 N。而策略 1 和策略 2 下机器人的负载能力则大大增强。由此可见,螺旋轮倾角可调有利于增加机器人负载能力。

机器人能耗,如图 9c 所示,随负载外力的增大而增加。在负载外力较低(小于 22 N)时,策略 1 和策略 2 能耗相同,机器人能耗最优,而策略 3 的能耗略大。在负载外力大于 22 N 时,策略 1 仍然能够保持机器人能耗最优,而策略 2 为了优先保证机器人的移动速度,只能使机器人能耗次优,策略 3 的能耗依然最大。由此可见,策略 1 总能够保证机器人能耗最优;策略 2 能够在负载外力较小时保证机器人能耗最优,负载外力较大时能耗次优。

如图 9d 所示,策略 1 下机器人移动速度随负载外力的增大而减小,在保证机器人能耗最优的前提下,具有较大的移动速度。策略 2 和策略 3 移动速度始终保持在 0.083 m/s,满足恒速巡检要求。

仿真结果说明:定点作业能量最优控制策略能够在不同负载外力下保持机器人能耗最小,且具有较快的运动速度;恒速巡检能量次优控制策略能够在不同的负载外力下保持机器人移动速度满足设定值,并在此基础上使能耗尽可能小。

在后文的试验中,设计了分别对应负载外力为 8.00 N、10.00 N 和 12.64 N 的下倾斜、水平和上倾斜三种管道环境。在仿真中,首先给出这三种情况下的控制量数值,如表 3 所示。由于试验中螺旋轮倾角和电动机角速度实际调节精度的限制,控制量参数做了取整处理,例如负载外力为 8.00 N 时对应的最优螺旋轮倾角,理论值为 31.255° ,在实际控制中取 31° 。

表 3 控制量

负载外力 F_a/N		8.00	10.00	12.64
策略 1	螺旋轮倾角 $\alpha/(^\circ)$	31	25	21
	角速度 $\omega_m/(\text{rad/s})$	1 171	1 171	1 171
策略 2	螺旋轮倾角 $\alpha/(^\circ)$	20	18	16
	角速度 $\omega_m/(\text{rad/s})$	711	795	894
策略 3	螺旋轮倾角 $\alpha/(^\circ)$	25	25	25
	角速度 $\omega_m/(\text{rad/s})$	562	562	562

从表 4 中可以看出,在控制量取理想值时,策

略 1 和策略 2 都能够使机器人能耗最优,在三种负载外力下能耗相同,而策略 3 的能耗较大。表 5 中的实际能耗结果显示,由于控制量取值精度的影响,策略 1 和策略 2 对应的机器人能耗不再同时最优。在三种负载外力下,策略 1 对应的能耗最小,其次是策略 2,而策略 3 对应的机器人能耗最大。

表 4 理想能耗仿真结果

负载外力 F_a/N	8.00	10.00	12.64
策略 1 能耗/J	12.087 1	15.108 9	19.106 4
策略 2 能耗/J	12.087 1	15.108 9	19.106 4
策略 3 能耗/J	12.468 4	16.167 0	21.315 4

表 5 实际能耗仿真结果

负载外力 F_a/N	8.00	10.00	12.64
策略 1 能耗/J	12.064 5	14.865 5	18.887 0
策略 2 能耗/J	12.583 5	15.269 5	19.966 4
策略 3 能耗/J	12.690 0	15.686 7	21.177 5

4 试验结果与分析

为了验证本文所提控制策略的有效性,如图 10 所示,设计了下倾斜、水平、上倾斜三种不同负载外力的试验环境。

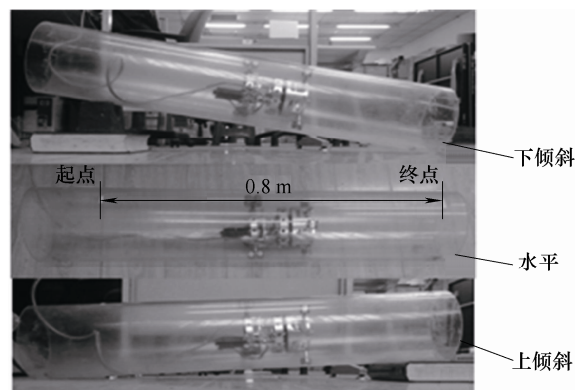


图 10 试验环境设计

在试验中发现,尽管管道环境不变,由于重力引起的机器人结构不对称使机器人的负载阻力实时变化,且具有周期性。在实施本文所提控制策略之前,先让机器人以固定螺旋轮倾角在管道中恒速运动,采集角速度和电流值,对数据进行处理,然后利用动力学公式求得下倾斜、水平、上倾斜三种环境下的平均负载外力分别为 8.00 N、10.00 N 和 12.64 N。根据本文所提的两种控制策略,求得控制量螺旋轮倾角及角速度值(控制量值与表 3 一致)。

策略 1 的试验验证结果如表 6 所示,在下倾斜管道环境中运行 0.8 m,三种策略下机器人产生的能耗如表中第二列所示,显然采用策略 1 时能耗最小,这与仿真结果相符。在水平和上倾斜管道环境

中, 有着同样的试验结果, 这说明策略 1 确实起到了能量优化作用。随着机器人负载外力的增大, 机器人所消耗的能量也随之增大。如图 11a~11c 中横轴所示, 策略 1 总能保证在能量最优的前提下, 运动时间最少, 即机器人具有较快的移动速度。

表 6 机器人能耗试验结果 J

管道环境	下倾斜	水平	上倾斜
策略 1 能耗	9.157 8	16.738 3	25.668 9
策略 2 能耗	13.646 1	18.650 6	26.584 3
策略 3 能耗	14.157 0	18.812 4	28.734 1

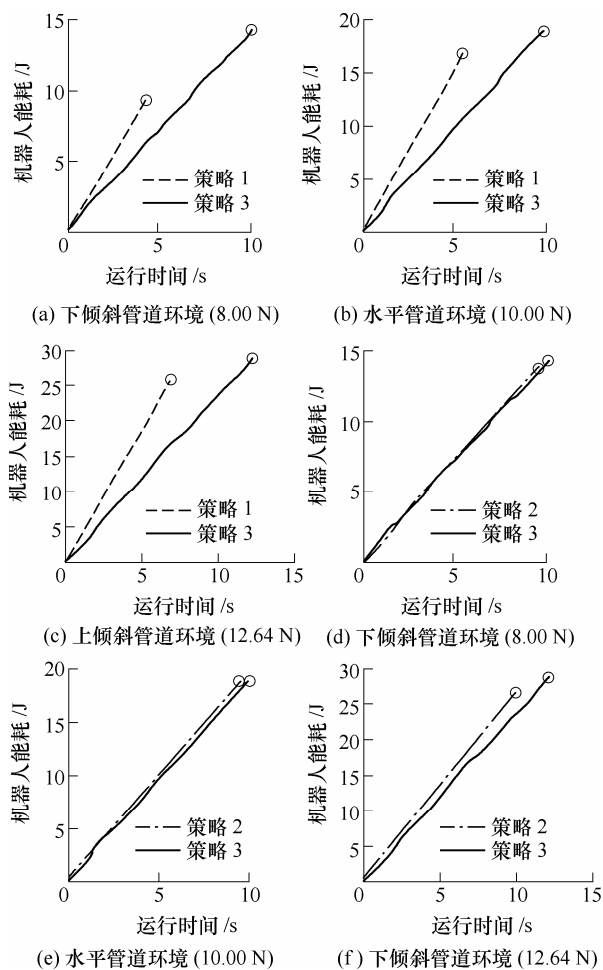


图 11 试验结果

策略 2 的试验验证结果如表 6 所示, 在下倾斜管道环境中, 运行 0.8 m, 采用策略 2 机器人产生的能耗是 13.646 1 J, 采用策略 3 机器人产生的能耗是 14.157 J, 显然策略 2 时能耗小, 但比对应的策略 1 下的能耗 9.157 8 J 大, 这与仿真结果相符。在水平和上倾斜管道环境中, 有着同样的试验结果, 这说明策略 2 确实起到了能量优化作用。从图 11d~11f 可以看出, 策略 2 和策略 3 的运行时间基本相同, 但大于仿真时间。这并不意味着机器人的速度没有达到恒速巡检的要求, 而是由于打滑现象的存在, 实际机器人运动了大于 0.8 m 的路程。

综上所述, 三种管道环境下的试验结果基本验证了本文所提两种优化控制策略的有效性。

5 结论

(1) 本文对螺旋轮倾角固定的螺旋驱动管内机器人建模并进行能耗分析, 提出一种螺旋轮倾角可控的螺旋驱动管内机器人。针对机器人定点作业和恒速巡检作业两种工作方式, 提出了定点作业能量最优控制策略和恒速巡检能量次优控制策略。

(2) 仿真结果表明: 螺旋轮倾角可控能够调节机器人负载能力, 并有利于能量优化。定点作业能量最优控制策略使机器人在保证能耗最优的同时, 具有尽可能快的移动速度。恒速巡航能量次优控制策略使机器人在保证巡检速度满足要求的同时, 能耗尽可能小。试验结果同样验证了本文所提的两种控制策略对降低能耗的有效性。

参 考 文 献

- [1] HU Z, APPLETON E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig[J]. Robotics, IEEE Transactions on, 2005, 21(5): 781-789.
- [2] LIM H, CHOI J Y, YI B J, et al. Development of semi-automatic inspection system for indoor pipeline [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5-8, 2007, Harbin, China. Harbin: IEEE, 2007: 3640-3645.
- [3] 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.
TANG Dewei, LI Qingkai, JIANG Shengyuan, et al. Design and analysis of a pipeline robot with the function of differential movement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 1-8.
- [4] 高兴华, 姜生元, 任立敏, 等. 三轴差动式管道机器人驱动单元自适应特性实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(3): 419-424.
GAO Xinghua, JIANG Shengyuan, REN Limin, et al. Experimental research on self-adaptability of tri-axis differential in-pipe robot drive unit[J]. Robot, 2010, 32(3): 419-424.
- [5] 李鹏, 马书根, 李斌, 等. 具有轴向和周向探查功能的螺旋驱动管内机器人[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 19-28.
LI Peng, MA Shugen, LI Bin, et al. Screw drive in-pipe robot with axial and circum-directional inspection

- ability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 19-28.
- [6] KAKOGAWA A, MA S. Stiffness design of springs for a screw drive in-pipe robot to pass through curved pipes and vertical straight pipes[J]. Advanced Robotics, 2012, 26(3-4): 253-276.
- [7] NISHIMURA T, KAKOGAWA A, MA S. Improvement of a screw drive in-pipe robot with pathway selection mechanism to pass through T- branches[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2013, 25(2): 340-346.
- [8] KIM J H, SHARMA G, IYENGAR S S. Famer: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration[C]// Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, March 14-17, 2010, Vina del Mar, Chile. Vina del Mar: IEEE, 2010: 517-523.
- [9] NEUBAUER W. A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes[C]// Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on, September 12-16, 1994, Munich, Germany. Munich: IEEE, 1994: 1178-1185.
- [10] OMORI H, HAYAKAWA T, NAKAMURA T. Locomotion and turning patterns of a peristaltic crawling earthworm robot composed of flexible units[C]// Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, September 22-26, 2008, Nice, France. Nice: IEEE, 2008: 1630-1635.
- [11] KIM Y J, YOON K H, PARK Y W. Development of the inpipe robot for various sizes[C]// Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on, July 14-17, 2009, Singapore. Singapore: IEEE, 2009: 1745-1749.
- [12] KUWADA A, ADOMI Y, SUZUMORI K, et al. Snake-like robot negotiating three-dimensional pipelines[C]// Robotics and Biomimetics, 2007. IEEE International Conference on, December 15-18, 2007, Sanya, China. Sanya: ROBIO, 2007: 989-994.
- [13] IWASHINA S, HAYASHI I, IWATSUKI N, et al. Development of in-pipe operation micro robots [C]// Micro Machine and Human Science, Proceedings, 1994 5th International Symposium on, October 2-4, 1994, Nagoya, Japan. Nagoya: IEEE, 1994: 41-45.
- [14] HIROSE S, OHNO H, MITSUI T, et al. Design of in-pipe inspection vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ pipes [C]// Robotics and Automation, Proceedings, 1999 IEEE International Conference on, May 10-15, 1999, Detroit, America. Detroit: IEEE, 1999: 2309-2314.
- [15] HORODINCA M, DOROFTEI I, MIGNON E, et al. A simple architecture for in-pipe inspection robots [C]// Proceedings of the 2002 International Colloquium on Mobile and Autonomous Systems, June 24-27, 2002, Magdeburg, Germany. Magdeburg: 2002: 1-4.
- [16] 钱晋武, 沈林勇, 程维明, 等. 微小管道涡流检测机器人系统研究[J]. 机器人, 2001, 23(2): 127-131.
- QIAN Jinwu, SHEN Linyong, CHENG Weiming, et al. A micro robotic system for pipeline inspection using eddy-current technique[J]. Robot, 2001, 23(2): 127-131.
- [17] LI P, MA S, LI B, et al. Design of a mobile mechanism possessing driving ability and detecting function for in-pipe inspection [C]// Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, May 19-23, 2008, Pasadena, America. Pasadena: IEEE, 2008: 3992-3997.
- [18] MA S, WATANABE M. Time-optimal control of kinematically redundant manipulators with limit heat characteristics of actuators [J]. Advanced Robotics, 2002, 16(8): 735-749.

作者简介: 李特, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为管道机器人、机器人系统。

E-mail: lite@sia.cn

马书根, 男, 1963 年出生, 研究员, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新型机器人设计、蛇形机器人、超冗长机器人机构与控制、灾难救援机器人。

E-mail: shugen@se.ritsume.ac.jp

李斌, 男, 1963 年出生, 研究员。主要研究方向为机器人控制。

E-mail: libin@sia.cn

王明辉(通信作者), 男, 1980 年出生, 副研究员。主要研究方向为机器人系统。

E-mail: mhwang@sia.cn

王越超, 男, 1960 年出生, 研究员。主要研究方向为机器人系统。

E-mail: yewang@sia.cn