

管道机器人弯管运动转体原因分析

李庆凯, 唐德威, 姜生元, 邓宗全

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨)

摘要: 为避免管道机器人弯管内运行时发生转体现象而影响管内任务的执行,对机器人转体的原因进行了深入研究.以建立的管道机器人弯管运行的位姿模型为基础,对机器人的受力状况进行了分析,建立了机器人过弯时的转体力矩模型.通过对转体力矩的分析,揭示了管道机器人弯管运行时发生转体的根本原因,并指出了管道机器人弯管运行的最佳姿态角.理论计算表明:当机器人以最佳姿态角运行时,机器人转体力矩几乎为0,不发生转体;当机器人以其他姿态角运行时,将出现一个不为0的转体力矩,该力矩使机器人向平衡姿态角方向转体,直至机器人姿态稳定为止.在实际应用时,使机器人在平衡姿态角运行为最佳.仿真结果与理论计算基本一致,该研究为弯管内的姿态稳定运行提供了一定的理论依据.

关键词: 管道机器人;弯管运行;位姿模型;转体分析

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0019-05

Body-Twist of Pipeline Robot in Elbow

LI Qingkai, TANG Dewei, JIANG Shengyuan, DENG Zongquan

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To avoid body-twist affecting the task execution, the mechanism of body-twist when the robot moved in elbow was investigated. Following the pose model of the robot in elbow, the mechanical status of the robot was analyzed, the model of the body-twist torque was established, the essentiality of body-twist was revealed, and the best posture angle of the robot moving in elbow was indicated. The theoretical evaluation shows that the body-twist torque almost disappears and the body-twist afterwards is removed when the robot moving at the best posture angle. While the robot moves at the other posture angle, a nonzero body-twist torque appears which compels the robot to rotate to the balanced posture angle until the robot posture gets stable. The simulation results coincide well with the theoretical analysis.

Keywords: pipeline robot; movement in elbow; pose model; body-twist analysis

随着社会和经济的发展,管道机器人在石油、天然气和城市水管道的检测、维护等方面得到越来越广泛的应用^[1-2].目前,国内外多家单位展开了管道机器人移动载体以及相关的检测、维护等装置的研究^[3-7].

与在直管中运行相比,当机器人在弯管内运行

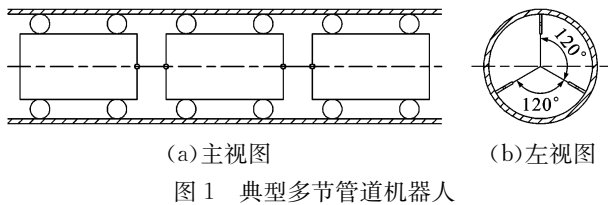
时,由于弯管几何条件的约束,机器人的姿态角发生明显的变化,即在绕机器人轴线方向产生了一定的转体力矩.在工程应用时,由于检测、维护等特定需要,要求机器人在运行时保持姿态角基本不变,因此转体力矩的产生对机器人在管道内的稳定运行较为不利;同时,转体力矩使行走轮保持架产生一定程度

的变形,且加剧了行走轮的磨损.本文从理论上对管道机器人弯管运行的转体原因进行深入研究,通过建立多节管道机器人在弯管内运行的位姿模型,对机器人弯管运行的受力情况进行分析,建立机器人过弯时的转体力矩模型,指出机器人弯管运行不发生转体的最佳姿态角,并以末端节机器人为例进行相应的实例计算和仿真验证.

1 弯管运动位姿分析

1.1 多节管道机器人形式简介

在工程实际应用中,由于单节机器人容量的限制,需要使用虎克铰将多节机器人相串联以搭载多种检测、施工等设备,如图1所示.图1为管道机器人常用的一种结构形式,其中行走轮采用弹性支撑,使得机器人在管道内运行时在径向上有一定的适应性^[8-10].



(a)主视图

(b)左视图

图1 典型多节管道机器人

1.2 位姿模型的建立

假设弯管为 180° 管,坐标系原点设置于管道曲率中心, xy 平面与管道对称截面重合,管道内径为 D ,弯管曲率半径为 R ,弯管采用参数 λ, ϕ 表示($0 \leq \lambda \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$),如图2所示.

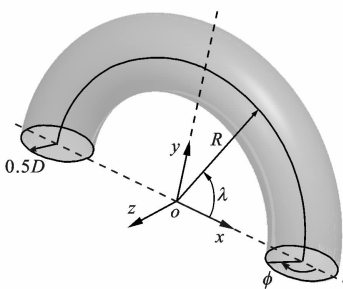
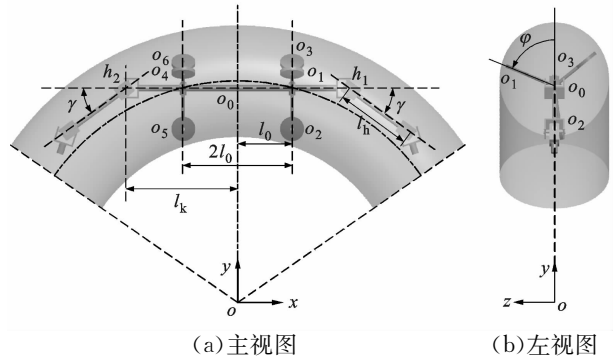


图2 弯管的参数化表示

管道的参数化方程为

$$\mathbf{r}(\lambda, \phi) = \begin{cases} (R + 0.5D\cos\phi)\cos\lambda \\ (R + 0.5D\cos\phi)\sin\lambda \\ 0.5D\sin\phi \end{cases} \quad (1)$$

为便于分析,假设机器人前后节单元均在弯管中运行,且机器人、虎克铰的轴线与 xy 平面平行,行走轮与管壁完全接触(最上侧行走轮与管壁处于临界接触状态).如图3所示,机器人轴对称截面(相应



(a)主视图

(b)左视图

图3 机器人过弯示意图

的前后行走轮轮心相对该截面对称)与 yz 平面重合.

设机器人中心点 o_0 的坐标为 $(0, y_0, z_0)$,行走轮轮心为 o_i ,接触点为 p_i (图中未表示),其中 $i=1, 2, \dots, 6$,轮心到机器人轴线的距离为 l_z .由于机器人相对于 yz 平面的对称性,只需计算一侧的轮心和接触点即可.已知机器人长度(前后行走轮轮心的距离)为 $2l_0$,行走轮半径为 r_p (厚度忽略),虎克铰轴线与机器人轴线在 xy 平面内的夹角为 γ ,机器人中心点 o_0 到虎克铰支座中心点 h_1, h_2 的距离均为 l_k ,机器人的运行姿态角为 ϕ (轮心 o_1 在 yz 面的投影点与 o_0 的连线与 y 轴的夹角),其区间为 $[-180^\circ, 180^\circ]$,且逆时针方向为正,顺时针为负.

由图3可得轮心 o_1, o_2, o_3 的坐标

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} l_0 & l_0 & l_0 \\ y_0 + l_z \cos\phi & y_0 + l_z \cos(\phi + 120^\circ) & y_0 + l_z \cos(\phi + 240^\circ) \\ z_0 + l_z \sin\phi & z_0 + l_z \sin(\phi + 120^\circ) & z_0 + l_z \sin(\phi + 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)可得接触点 $p_i (i=1, 2, 3)$ 的坐标为

$$\mathbf{p}_i = \{(R + 0.5D\cos\phi_i)\cos\lambda_i, (R + 0.5D\cos\phi_i)\sin\lambda_i, 0.5D\sin\phi_i\} \quad (3)$$

接触点 p_i 与相应的行走轮轮心 o_i 的距离为行走轮半径 r_p ,即

$$|\mathbf{r}_{o_1 p_1}| = |\mathbf{r}_{o_2 p_2}| = |\mathbf{r}_{o_3 p_3}| = r_p \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}_{o_i p_i}$ 表示点 o_i 与 p_i 连线的矢量.同时,接触点 p_i 应在相应的行走轮轮面内,即

$$\mathbf{n}_{wi} \cdot \mathbf{r}_{o_i p_i} = 0 \quad (5)$$

式中: \mathbf{n}_{wi} 为行走轮 i 的轮面法矢量, $i=1, 2, 3$.其中,行走轮轮面的法矢量为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}_{w1} &= \{0 \quad -\sin\phi \quad \cos\phi\}^T \\ \mathbf{n}_{w2} &= \{0 \quad -\sin(\phi + 120^\circ) \quad \cos(\phi + 120^\circ)\}^T \\ \mathbf{n}_{w3} &= \{0 \quad -\sin(\phi + 240^\circ) \quad \cos(\phi + 240^\circ)\}^T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于行走轮在管道内作定轴旋转运动,因此接触点 p_i 应在由原点 o 、轮心 o_i 、接触点 p_i 构成的旋转面内,即

$$\mathbf{n}_{ri} \cdot \mathbf{r}_{op_i} = 0 \quad (7)$$

式中: \mathbf{n}_{ri} 为轮 i 的旋转面的法矢量, $i=1, 2, 3$. 旋转面法矢量为

$$\mathbf{n}_{ri} = \{-W_{2,i} \quad W_{1,i} \quad 0\}^T \quad (8)$$

式(4)、式(5)、式(7)共计 9 个方程,为机器人弯管运行的位姿模型,通过求解该位姿模型可得机器人行走轮轮心和接触点的位置坐标.

2 单节机器人的受力分析

2.1 各作用力的方向矢量计算

机器人在弯管运行时,所受的外力包括受管壁对行走轮的接触力 F_{ni} 、行走轮与管壁的摩擦力 F_{fi} 、前后节机器人的牵引力 F_{qi} 、机器人所受的重力 G (沿 z 轴负向). 由于行走轮与管壁在轮转动方向属于滚动摩擦,且行走轮安装有滚动轴承,因此该方向的摩擦力可忽略不计,只考虑行走轮与管壁的侧向摩擦力. 在实际运行过程中,为了使机器人行走轮的受力均衡,一般使机器人在 $-60^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$ 之间运行. 以姿态角 $-60^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$ 为例进行分析,当机器人匀速运行时,机器人受力如图 4 所示.

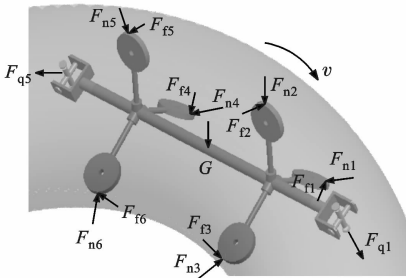


图 4 机器人受力图

根据式(1),可得接触点的法矢量

$$\mathbf{n}_{ni} = \frac{\partial \mathbf{r}(\lambda, \phi)}{\partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}(\lambda, \phi)}{\partial \lambda} / \left(\frac{\partial \mathbf{r}(\lambda, \phi)}{\partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}(\lambda, \phi)}{\partial \lambda} \right) = \begin{Bmatrix} -\cos\lambda\cos\phi \\ -\sin\lambda\cos\phi \\ -\sin\phi \end{Bmatrix} \quad (9)$$

而摩擦力的方向矢量为机器人轴向方向矢量与接触点的法矢量的叉积,轮 1、2、3 摩擦力在 xy 平面的投影的方向为 y 轴正向,轮 4、5、6 摩擦力在 xy 平

面的投影的方向为 y 轴负向,即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}_{f1} &= \mathbf{n}_{n1} \times \mathbf{e}_{x+}; \mathbf{n}_{f2} = \mathbf{n}_{n2} \times \mathbf{e}_{x-}; \mathbf{n}_{f3} = \mathbf{n}_{n3} \times \mathbf{e}_{x+} \\ \mathbf{n}_{f4} &= \mathbf{n}_{n4} \times \mathbf{e}_{x-}; \mathbf{n}_{f5} = \mathbf{n}_{n5} \times \mathbf{e}_{x+}; \mathbf{n}_{f6} = \mathbf{n}_{n6} \times \mathbf{e}_{x-} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{e}_{x+} = \{1 \quad 0 \quad 0\}^T$, $\mathbf{e}_{x-} = \{-1 \quad 0 \quad 0\}^T$.

设两节机器人的中心与坐标原点 o 的连线在 xy 平面的夹角为 θ ,已知虎克铰长度 l_h ,得

$$\begin{aligned} (l_k - y_0 \sin\theta + l_k \cos\theta)^2 + \\ (y_0 - y_0 \cos\theta - l_k \sin\theta)^2 = l_h^2 \end{aligned} \quad (11)$$

根据图 3 可知

$$\gamma = \theta/2 \quad (12)$$

因此,牵引力的方向矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{q1} &= \{\cos\gamma \quad -\sin\gamma \quad 0\}^T \\ \mathbf{n}_{q2} &= \{-\cos\gamma \quad -\sin\gamma \quad 0\}^T \end{aligned} \quad (13)$$

2.2 转体力矩分析

由于重力的方向竖直向下,处于最上侧的行走轮由重力产生的接触力和摩擦力应为 0,即

$$F_{f2} = F_{n2} = 0 \quad (14)$$

机器人在弯管内运行时保持匀速,由于机器人或许有转体现象发生,即机器人在绕 x 轴方向的转矩不为 0,因此机器人的受力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x = 0; \sum F_y = 0; \sum F_z = 0 \\ \sum M_y = 0; \sum M_z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

根据各作用力的方向,可得各作用力在 x, y, z 方向的合力

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= \sum_{i=1}^6 F_{ni} (\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{x+}) + \sum_{i=1}^6 F_{fi} (\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 F_{qi} (\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) \\ \sum F_y &= \sum_{i=1}^6 F_{ni} (\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{y+}) + \sum_{i=1}^6 F_{fi} (\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 F_{qi} (\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) \\ \sum F_z &= \sum_{i=1}^6 F_{ni} (\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{z+}) + \sum_{i=1}^6 F_{fi} (\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{z+}) + \\ &\quad \sum_{i=1}^2 F_{qi} (\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{z+}) - G \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{e}_{y+}, \mathbf{e}_{z+}$ 为 y, z 坐标轴的正向单位矢量. 绕坐标轴 y, z 的转矩为

$$\begin{aligned}
 \sum M_y = & \sum_{i=1}^6 z_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{x+}) + \sum_{i=1}^6 z_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) + \\
 & \sum_{i=1}^2 z_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) - \sum_{i=1}^6 x_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{x+}) - \\
 & \sum_{i=1}^6 x_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) - \sum_{i=1}^2 x_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) \\
 \sum M_z = & \sum_{i=1}^6 x_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{y+}) + \sum_{i=1}^6 x_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) + \\
 & \sum_{i=1}^2 x_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) - \sum_{i=1}^6 y_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{x+}) - \\
 & \sum_{i=1}^6 y_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{x+}) - \sum_{i=1}^2 y_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{x+})
 \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$F_{fi} = \mu_i F_{ni} \quad (18)$$

式中: μ_i 为行走轮 i 与管壁的侧向摩擦系数, $i=1, 2, \dots, 6$, 且 $\mu_1 = \mu_4, \mu_2 = \mu_5, \mu_3 = \mu_6$.

在进行多节管道机器人弯管运行的受力分析时, 应从末节开始, 末节机器人共受 $F_{n1}, F_{n3}, F_{n4}, F_{n6}$ 和牵引力 F_{q1} 这 5 个未知量, 将式(16)、式(18)代入式(15), 即可求得末节机器人的受力. 以此类推, 将求得的后一节机器人所受的牵引力作为已知量代入前一节, 进行相同的受力计算, 受篇幅限制, 不作叙述.

机器人绕 x 轴方向的力矩为

$$\begin{aligned}
 \sum M_x = & \sum_{i=1}^6 y_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{z+}) + \\
 & \sum_{i=1}^6 y_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{z+}) + \sum_{i=1}^2 y_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{z+}) + \\
 & y_0 G(\mathbf{e}_{z-} \cdot \mathbf{e}_{z+}) - \sum_{i=1}^6 z_{pi} F_{ni}(\mathbf{n}_{ni} \cdot \mathbf{e}_{y+}) - \\
 & \sum_{i=1}^6 z_{pi} F_{fi}(\mathbf{n}_{fi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) - \sum_{i=1}^2 z_{hi} F_{qi}(\mathbf{n}_{qi} \cdot \mathbf{e}_{y+}) - \\
 & y_0 G(\mathbf{e}_{z-} \cdot \mathbf{e}_{y+})
 \end{aligned} \quad (19)$$

将求得的接触力、摩擦力和牵引力代入式(19), 即可求得机器人匀速运行时转体力矩的大小. 当 $\sum M_x = 0$ 时, 机器人不发生转体; 当 $\sum M_x \neq 0$ 时, 机器人发生转体, 机器人的姿态角在弯管运行过程中发生变化.

3 实例计算和仿真研究

以末节机器人为例进行相应的理论计算和仿真研究, 即机器人只受一个牵引力作用, 且机器人在 $0^\circ \leq \varphi \leq -60^\circ$ 之间运行. 已知弯管参数 $D=310$ mm, $R=975$ mm; 机器人参数 $l_0=160$ mm, $r_p=35$ mm, $G=200$ N.

3.1 实例计算

由于在弯管中各行走轮的速度差异, 相应的行走轮与管壁的侧向摩擦系数也应不同. 采用 Adams 软件中的摩擦系数模型进行计算

$$\mu = \begin{cases} \mu_s, & v = -v_s \\ -\mu_s, & v = v_s \\ 0, & v = 0 \\ \mu_d, & v = -v_d \\ -\mu_d, & v = v_d \\ -\text{sgn}(v)\mu_d, & |v| > v_d \\ -\text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s) \text{sgn}(v), & v_s < |v| < v_d \\ \text{step}(v, -v_s, \mu_s, v_s, -\mu_s), & -v_s < v < v_s \end{cases} \quad (20)$$

式中: μ, μ_s, μ_d 分别为实际摩擦系数、静摩擦系数、动摩擦系数; v, v_s, v_d 分别为实际运动速度、静滑动速度、动滑动速度; step 函数利用三次多项式逼近海赛(Heaviside)阶跃函数, 相应的参数设置为 $v_s=100$ mm/s, $v_d=1\ 000$ mm/s, $\mu_s=0.1, \mu_d=0.3$.

由于机器人绕 z 轴作定轴旋转运动, 因此可得行走轮轮心、机体中心的速比关系

$$\mathbf{v}_{0_0} : \mathbf{v}_{0_1} : \mathbf{v}_{0_2} : \mathbf{v}_{0_3} = \mathbf{r}_{0_0} : \mathbf{r}_{0_1} : \mathbf{r}_{0_2} : \mathbf{r}_{0_3} \quad (21)$$

式中: $r_{0_i} = y_{0_i}; r_{0_i} = (W_{1,i}^2 + W_{2,i}^2)^{1/2}, i=1, 2, 3$.

将已知参数代入位姿模型, 可求得上述速比关系. 另将机器人的本体中心 o_0 的运行速度设置为 200 mm/s, 因此由式(21)可得机器人行走轮的运行速度, 相应的行走轮的侧向速度为

$$v_{ci} = v_{0_i}(\mathbf{n}_{i_i} \cdot \mathbf{n}_{fi}) \quad (22)$$

式中: v_{ci} 为行走轮的侧向速度.

将各行走轮的侧向速度代入式(20), 即可求得不同姿态角下的行走轮与管壁的摩擦系数值, 如图 5 所示.

当末节机器人在弯管中匀速运行时, 联立求解式(15)共计 5 各方程, 可得行走轮与管壁的接触力 $F_{n1}, F_{n2}, F_{n3}, F_{n4}$ 和牵引力 F_{q1} 这 5 个未知量. 相应的

将求得的接触力、摩擦力和牵引力代入式(19),可以求得不同姿态角下机器人的转体力矩,如图 6 所示.

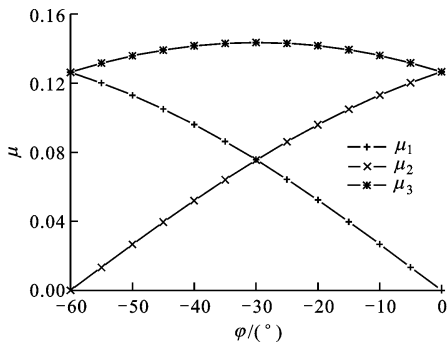


图 5 不同姿态角下行走轮与管壁的侧向摩擦系数

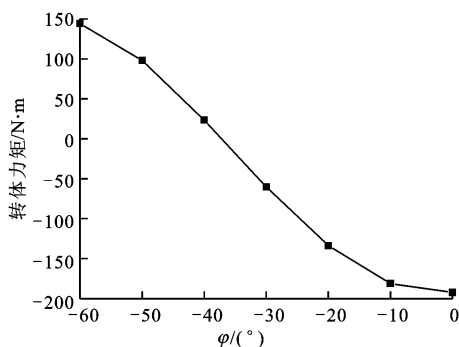


图 6 转体力矩理论计算值

当机器人以 $\varphi \approx -36.863^\circ$ 运行时,机器人转体力矩几乎为 0,即机器人不发生转体,将该姿态角定义为机器人的平衡姿态角 φ_c . 当机器人以非平衡姿态角运行时,在绕自身轴方向产生一个不为 0 的转体力矩,该转体力矩使机器人向平衡姿态角方向转体,直至机器人姿态稳定为止. 因此,在实际应用时,使机器人在平衡姿态角运行为最佳.

3.2 仿真研究

使用 Adams 软件进行相应的转体仿真研究,如图 7 所示,仿真参数与实例计算设定一致. 为提高仿真的精确度,所有模型均在 Adams 中建立. 利用平行约束副使第一节机器人的运行姿态保持不变,两节机器人使用球铰进行连接,解除对末端机器人姿态的约束,通过改变末端机器人的初始姿态角,进行多组仿真.

通过仿真发现,当末节机器人在 $\varphi = -37^\circ$ 左右运行时,机器人无转体现象发生;当以其他姿态角进行仿真时,机器人发生转体,并向平衡姿态角转动,达到平衡姿态角后,机器人不再发生转体,与理论分析基本一致.

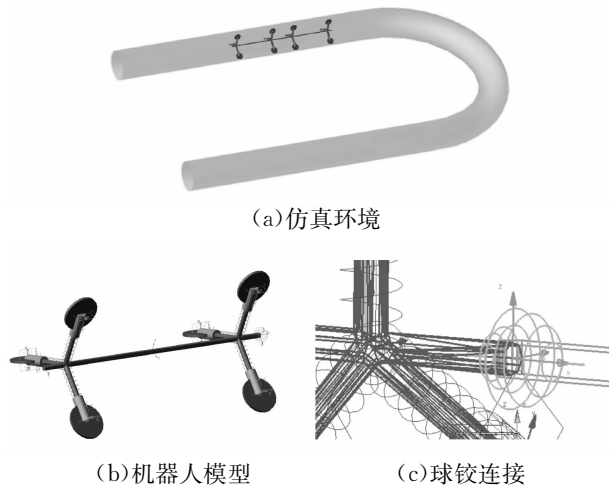


图 7 转体仿真模型

4 结 论

本文通过对管道机器人的弯管运行情况的研究,以建立的多节管道机器人弯管运行的位姿模型为基础,对机器人在弯管运行的受力状况进行分析,得到了机器人在弯管内运行的转体力矩模型. 通过对转体力矩的分析,揭示了管道机器人弯管运行时发生转体的根本原因,并指出了管道机器人弯管运行的最佳姿态角,为机器人弯管的姿态稳定运行提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 周晓,张晓华,邓宗全,等. 管内作业机器人的发展与展望[J]. 机器人,1998,20(6):471-478.
ZHOU Xiao, ZHANG Xiaohua, DENG Zongquan, et al. The development and prospects of robot working in pipeline[J]. Robot, 1998, 20(6): 471-478.
- [2] 王殿君,李润平,黄光明. 管道机器人的研究进展[J]. 机床与液压,2008,36(4):185-187.
WANG Dianjun, LI Runping, HUANG Guangming. Progresses in study of pipeline robot [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(4): 185-187.
- [3] 唐德威,李庆凯,梁涛,等. 三轴差动式管道机器人机械自适应驱动技术[J]. 机械工程学报,2008,44(9): 128-133.
TANG Dewei, LI Qingkai, LIANG Tao, et al. Mechanical self-adaptive drive technology of triaxial differential pipe-robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 128-133.
- [4] 邓宗全,陈军,姜生元,等. 六独立轮驱动管内检测牵引机器人[J]. 机械工程学报,2005,36(4):67-72.
DENG Zongquan, CHEN Jun, JIANG Shengyuan, et al. Traction robot driven by six independent wheels for in-

- spection inside pipeline[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 67-72.
- [5] 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.
- LI Peng,MA Shugen,LI Bin,et al. Design and motion analysis of an in-pipe robot with adaptability to pipe diameters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(1):154-161.
- [6] ROH S G, CHOI H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1):1-17.
- [7] ROH S G, KIM D W, LEE J S, et al. In-pipe robot based on selective drive mechanism[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2009, 7(1):105-112.
- [8] 郭凤,许冯平,邓宗全,等. 管道机器人弯道处驱动力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(8):1264-1266.
- GUO Feng,XU Fengping,DENG Zongquan,et al. Research on driving force of pipeline robot in elbow of pipeline[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2006,38(8):1264-1266.
- [9] 孟浩龙,王菊芬. 管内检测机器人在弯管处的通过性能研究[J]. 中国机械工程,2008,19(13):1531-1535.
- MENG Haolong, WANG Jufen. Research on the movement trace of in-pipe inspection robot through elbow[J]. China Mechanical Engineering,2008,19(13): 1531-1535.
- [10] 许冯平,邓宗全. 管道机器人在弯道处通过性的研究[J]. 机器人,2004,26(2):155-160.
- XU Fengping, DENG Zongquan. Research on traveling-capability of pipeline robot in elbow[J]. Robot, 2004,26(2):155-160.

(编辑 杜秀杰 武红江)