

# Mechanism of Medium Pressure Difference Pipe Robot Speed Fluctuation\*

Gaojian Cui<sup>1</sup>, Shengyuan Jiang<sup>1,2,3</sup>, Wenfei Wang<sup>3</sup>, Jianyong Li<sup>2</sup>, Yufeng Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin

<sup>3</sup>College of Electromechanical Engineering, Harbin University of Technology, Harbin

Email: gaojiancui@126.com

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2012; revised: Jun. 8<sup>th</sup>, 2012; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Medium pressure type pipe robot speed fluctuation mechanism is studied. By analyzing the external factors that impact robot speed fluctuations, we consider that the causes of speed fluctuation are Frictional resistance mutations. Compression effect of Fluids medium and the reaction of robot speed. According to the different between the motion state of pipe robot and frictional resistance mutation trend, we divide the speed fluctuation into three cases, make out the Stress Analysis and simplify mechanical model, and make numerical simulation by using Matlab to determine the speed fluctuations law on different parameters.

**Keywords:** Pipe Robot; Medium Pressure; Speed Fluctuation; Mechanism

## 介质压差式管道机器人速度波动机理研究\*

崔高健<sup>1</sup>, 姜生元<sup>1,2,3</sup>, 王文飞<sup>3</sup>, 李建永<sup>2</sup>, 张玉峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学机电工程学院, 长春

<sup>2</sup>北华大学机械工程学院, 吉林

<sup>3</sup>哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨

Email: gaojiancui@126.com

收稿日期: 2012年6月5日; 修回日期: 2012年6月8日; 录用日期: 2012年6月18日

**摘要:** 对介质压差式管道机器人速度波动机理进行了研究。分析了影响机器人速度波动的外部因素, 认为摩擦阻力突变、流体介质的压缩效应和机器人速度的反作用是速度波动产生的原因。根据管道机器人运动状态和摩擦阻力突变趋势的不同, 将速度波动现象分为三种情况, 并分别进行了受力分析和力学模型的简化, 应用MATLAB软件进行数值仿真分析, 确定了不同参数对速度波动的影响规律。

**关键词:** 管道机器人; 介质压差; 速度波动; 机理

### 1. 引言

由于油气管道的迅速发展和管道运行事故的频繁发生, 引起了人们对管道检测和维护的高度重视。管道机器人作为一种理想的管道检测和维护设备, 广泛地应用于管道的清洗、检测、维修、焊接等领域, 对延长管道使用寿命, 降低安全事故风险具有重要意

义<sup>[1-5]</sup>。介质压差式管道机器人依靠首尾两端流体介质的压力差实现自驱动, 避免了拖曳电缆线和携带蓄电池的不足, 具有能源自给的特点, 使机器人一次性完成几百甚至上千公里的检测作业任务成为可能。

然而, 对于长距离输送管道, 流体介质的压力、流量发生变化, 管道不同位置的摩擦特性也存在差异, 使得机器人经常发生速度波动现象。速度波动会带来一系列的问题, 如检测装置测量数据不准确, 机

\*基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20100517)。

机器人本体和管道元件损伤等。为了实现对机器人速度的控制，有必要对机器人速度波动机理进行研究。

## 2. 管道机器人速度波动产生的原因

保证机器人运动的前提条件是其驱动力不小于运行阻力。驱动力主要由机器人首尾两端流体介质压力差决定，运行阻力主要取决于机器人密封圈与管道内壁的摩擦力。机器人产生速度波动的主要原因是驱动力和运行阻力的变化。

### 2.1. 管道摩擦阻力突变

介质压差式管道机器人主要通过密封圈与管道内壁接触，摩擦力的来源包括两部分：1) 由密封圈与管道内壁的过盈配合所产生的压力；2) 机器人自身重力所产生的压力<sup>[6]</sup>。理想状态下，管道内壁各区域物理性质完全相同，摩擦力保持不变。但事实上，管道内壁不同区域的表面粗糙度存在差异，这种差异在管道缺陷和管道连接处尤为明显，当机器人经过这些区域时，摩擦阻力会发生瞬时突变。此外，机器人遇到结蜡和泥沙等杂质时，也会产生摩擦阻力突变。

### 2.2. 流体介质的压缩效应

实际流体都是可压缩的，当不计温度效应时，压强的变化会引起流体体积和密度的变化。对于长距离管道，液体介质的压缩性不可忽略。管内流体介质在压力作用下的情况与弹簧很相似，外力增大，体积减小，外力减小，体积增大。因此，流体的压缩效应会导致机器人首尾两端压力差发生变化。

### 2.3. 机器人速度的反作用

摩擦阻力突变和流体介质的压缩效应会影响机器人的速度，与此同时，机器人速度的变化也会反作用于摩擦力和流体压力。介质压差式管道机器人的密封圈多采用橡胶材料，橡胶摩擦机理复杂，摩擦系数受法向压力、相对滑动速度、温度等多种因素的影响<sup>[7]</sup>。大量实验表明，摩擦副相对速度的变化会引起摩擦阻力的变化。除此之外，当机器人产生速度波动时，一端流体被压缩，另一端流体膨胀，流体介质体积的改变必然会引起两端流体压力差的变化。因此，机器人的速度对摩擦阻力和流体压力差具有反作用。

## 2.4. 管道机器人速度波动过程描述

速度波动现象与摩擦阻力突变、流体压缩效应和机器人速度变化有关。为了更好地描述速度波动现象，首先定义管道缺陷处、管道连接处和管道杂质附着处为阻力突变区。假设机器人密封良好，无流体泄露，初始时刻，管道机器人以相同的速度随流体介质流动。

从机器人进入阻力突变区的那一刻起，摩擦阻力瞬间增大，机器人速度突然减小。由于流体介质流速不变，位于机器人后方的流体介质会被压缩，前面的流体介质会发生膨胀，机器人两端压力差增大。如果阻力突变区的摩擦阻力很大，流体压力短时间内无法增大到与摩擦阻力相等的水平，机器人会发生卡滞，直到流体压力与摩擦阻力相等时，管道机器人才开始运动。

相反，从机器人离开阻力突变区的那一时刻起，机器人两端压差减小。当流体压力减小到与摩擦阻力相等时，机器人所受合外力为零，但由于惯性作用，机器人还要继续向前运动。此后，流体压力小于摩擦阻力，机器人开始减速，如果流体压力下降较快，不足以维持机器人运动，机器人会停止运动，直到流体压力与摩擦阻力相等时，管道机器人才开始运动。

通常情况下，管道机器人的速度波动要经过以下过程，“进入(离开)阻力突变区 - 机器人速度减小(增大) - 流体压力差增大(减小) - 机器人速度增大(减小)”，上述过程不断重复，就形成了管道机器人时走时停或时快时慢的速度波动现象。

## 3. 管道机器人速度波动的数学模型

介质压差式管道机器人依靠首尾两端的流体压力差实现自驱动，如图 1(a)所示。当管道机器人匀速运动时，驱动力  $F_{\text{fluid}}$  大小为：

$$F_{\text{fluid}} = (P_1 - P_2) \cdot A \quad (1)$$

式中：  $P_1$  ——上游流体压强；

$P_2$  ——下游流体压强；

$A$  ——有效作用面积。

假设流体驱动式管道机器人密封性良好，由于流体介质具有可压缩性，当活塞与管道机器人产生相对运动时，二者之间流体介质的体积会发生变化，进而

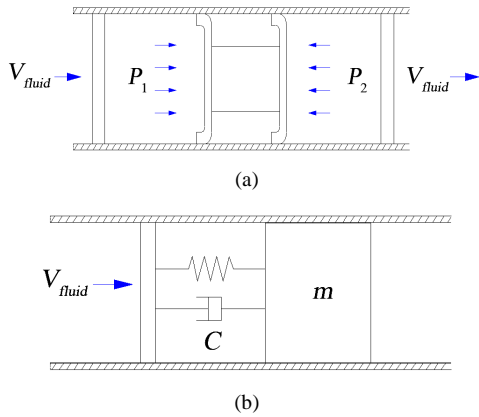


Figure 1. Speed fluctuation dynamic model  
图 1. 速度波动力学模型

导致两端流体压力差发生变化。此外，流体介质还具有一定的粘性，流体介质与管壁的相对运动，流体介质内部的分层流动都会产生阻尼力。因此，活塞与管道机器人之间的流体介质可以简化成一个弹性件和一个阻尼器，管道机器人可抽象为一个质量块。如图 1(b)所示。

#### 4. 管道机器人受力分析

介质压差式管道机器人的速度波动现象是流体压力、阻尼力、摩擦力共同作用的结果。

##### 4.1. 摩擦力

古典摩擦定律认为：摩擦力的大小取决于材料的性质，与滑动速度无关。然而，对于大多数材料来说，随着滑动速度的增加，摩擦系数会降低，且两者的关系与接触面法向压力的大小有关。滑动速度之所以影响摩擦系数，是因为摩擦副的相对滑动会引起表面层发热、变形、化学变化和磨损等<sup>[8]</sup>。

流体驱动式管道机器人本身质量较大，此外，为了保证密封性，密封圈与管道内壁是过盈配合，法向压力较大。因此，可把密封圈与管道内壁的摩擦归结为摩擦系数随滑动速度增大而降低的情况，于是，滑动摩擦系数  $f_{摩擦}$  可表示为<sup>[9]</sup>：

$$f_{摩擦} = f_0 - k \cdot V_{滑} \quad (2)$$

式中： $k$ ——摩擦系数；

$f_0$ ——初始滑动摩擦系数；

$V_{滑}$ ——滑动速度。

管道机器人所受滑动摩擦力  $F_{摩擦}$  可表示为：

$$F_{摩擦} = F_0 - \alpha \cdot \dot{x} \quad (3)$$

式中： $F_0$ ——初始滑动摩擦力；

$\alpha$ ——速度影响系数；

$\dot{x}$ ——管道机器人运动速度。

##### 4.2. 流体压力

由于流体只能受压，不能受拉，所以，上述力学模型中的流体介质应处于压缩状态。在发生速度波动之前，无论机器人(模型中用质量块表示)是静止还是匀速运动，流体介质都有一定的压缩量，我们称之为流体基础压缩变形量，记为  $x_b$ 。质量块的位移用  $x$  表示，流体介质流速为  $v$ ，则流体压力  $F_{弹}$  可表示为：

$$F_{弹} = K \cdot (x_b - x + v \cdot t) \quad (4)$$

式中： $x_b$ ——流体基础压缩变形量；

$x$ ——管道机器人的位移；

$v$ ——流体介质流速；

$t$ ——时间。

##### 4.3. 阻尼力

阻尼力  $F_{阻尼}$  的大小与相对速度有关，模型中质量块和活塞的相对运动速度可表示  $(\dot{x} - v)$ 。由于流体阻尼产生的机理复杂，很难精确描述阻尼力，为了便于计算，假设阻尼力与相对速度成线性关系，可将阻尼力  $F_{阻尼}$  表示为：

$$F_{阻尼} = c \cdot (\dot{x} - v) \quad (5)$$

##### 4.4. 速度波动现象的动力学分析

由上述受力分析可知，管道机器人速度波动现象的动力学方程可表示为：

$$m \cdot \ddot{x} + F_{摩擦} + F_{阻尼} - F_{弹} = 0 \quad (6)$$

##### 4.5. 管道机器人速度波动三种情况

###### 4.5.1. 运动时摩擦阻力突然增大的情况

设摩擦阻力突变值为  $\Delta F$ ，令  $\Delta F > 0$ ，则初始时刻  $F_{摩擦} = F_0 - \alpha \cdot \dot{x} + \Delta F$ 。

于是，动力学方程可表示为：

$$m \cdot \ddot{x} + (F_0 - \alpha \cdot \dot{x} + \Delta F) + c \cdot (\dot{x} - v) - K \cdot (x_b - x + vt) = 0 \quad (7)$$

式中： $\Delta F$ ——摩擦阻力突变值。

在摩擦阻力增大之前,管道机器人做匀速直线运动,机器人随着流体介质一起运动,与流体介质的流速相等,都为 $v$ ,则有:

$$K \cdot x_b - (F_0 - \alpha \cdot v) = 0 \quad (8)$$

化简得:

$$m\ddot{x} + (c - \alpha) \cdot \dot{x} + K \cdot x = K \cdot v \cdot t + (c - \alpha) \cdot v - \Delta F \quad (9)$$

系统处于欠阻尼状态,阻尼比:

$$\zeta = \frac{c - \alpha}{2\sqrt{K \cdot m}} < 1, \text{ 则方程解的形式为:}$$

$$x = v \cdot t - \frac{\Delta F}{K} + e^{-\frac{c-\alpha}{2m}t} \cdot \left[ C_1 \cdot \cos \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t + C_2 \cdot \sin \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t \right] \quad (10)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$ ——常数。

依据初始条件  $x(0) = 0$ ,  $\dot{x}(0) = v$  即可求出方程的解。

#### 4.5.2. 运动时摩擦阻力突然减小的情况

设摩擦阻力突变值为  $\Delta F$ , 令  $\Delta F > 0$ , 则  $t = 0$  时刻  $F_{\text{摩擦}} = F_0 - \alpha \cdot \dot{x} - \Delta F$ 。于是,动力学方程可表示为:

$$m \cdot \ddot{x} + (F_0 - \alpha \cdot \dot{x} - \Delta F) + c \cdot (\dot{x} - v) - K \cdot (x_b - x + vt) = 0 \quad (11)$$

在摩擦阻力减小之前,管道机器人做匀速直线运动,机器人随着流体介质一起运动,与流体介质的流速相等,都为 $v$ ,则有:

$$K \cdot x_b - (F_0 - \alpha \cdot v) = 0 \quad (12)$$

化简得:

$$m\ddot{x} + (c - \alpha) \cdot \dot{x} + K \cdot x = K \cdot v \cdot t + (c - \alpha) \cdot v + \Delta F \quad (13)$$

系统处于欠阻尼状态,阻尼比  $\zeta = \frac{c - \alpha}{2\sqrt{K \cdot m}} < 1$ , 则方程解的形式为:

$$x = v \cdot t + \frac{\Delta F}{K} + e^{-\frac{c-\alpha}{2m}t} \cdot \left[ C_1 \cdot \cos \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t + C_2 \cdot \sin \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t \right] \quad (14)$$

依据初始条件  $x(0) = 0$ ,  $\dot{x}(0) = v$  即可求出方程的解。

#### 4.5.3. 静止时摩擦阻力突然减小的情况

与前两种情况不同,在静止时摩擦阻力突然减小的情况下,机器人速度波动会伴随静、动摩擦力的瞬间转换过程。设  $t = 0$  时刻管道机器人开始运动,那么,  $t = 0$  时刻的摩擦阻力为:

$$F_s = K \cdot x_b \quad (15)$$

式中:  $F_s$ ——最大静摩擦力。

运动开始,  $F_s$  突然减小,转换为动摩擦力

$$F_{\text{动摩}} = F_0 - \alpha \cdot \dot{x} \quad (16)$$

式中:  $F_0$ ——初始滑动摩擦力。

摩擦阻力突变值为  $\Delta F = F_s - F_{\text{动摩}}$ , ( $t = 0$ ,  $\dot{x}(0) = 0$ ), 于是有:

$$\Delta F = F_s - (F_0 - \alpha \cdot \dot{x}(0)) = F_s - F_0 \quad (17)$$

动力学方程为:

$$m\ddot{x} + (c - \alpha) \cdot \dot{x} + K \cdot x = K \cdot v \cdot t + c \cdot v + \Delta F \quad (18)$$

式(15)、(17)、(18)联立可得:

$$m \cdot \ddot{x} + (c - \alpha) \cdot \dot{x} + K \cdot x = K \cdot v \cdot t + c \cdot v + \Delta F \quad (19)$$

系统处于欠阻尼状态,阻尼比  $\zeta = \frac{c - \alpha}{2\sqrt{K \cdot m}} < 1$ , 则方程解的形式为

$$x = v \cdot t + \frac{\Delta F + \alpha v}{K} + e^{-\frac{c-\alpha}{2m}t} \cdot \left[ C_1 \cdot \cos \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t + C_2 \cdot \sin \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c-\alpha}{2m}\right)^2} t \right] \quad (20)$$

依据初始条件  $x(0) = 0$ ,  $\dot{x}(0) = 0$  即可求出方程的解。

### 5. 管道机器人速度波动的数值仿真分析

在建立了流体驱动式管道机器人速度波动数学模型之后,为了进一步分析速度波动的影响因素,本课题采用 MATLAB 软件进行数值仿真。仿真按照速度波动现象产生的三种情况分别进行,编程时所采用的初始参数如表 1 所示。

采用四阶龙格-库塔方法所得到的数值仿真结果如图 2 所示。设机器人产生速度波动之前,管道机

Table 1. Simulation initial parameters  
表 1. 数值仿真初始参数值

参数	数值
摩擦阻力突变值 $\Delta F$ (N)	800
速度影响系数 $\alpha$	4
流体介质流速 $v$ (m/s)	5
机器人质量 $m$ (kg)	50
等效刚度 $K$ (N/m)	600
等效阻尼 $c$ (N·s/m)	6

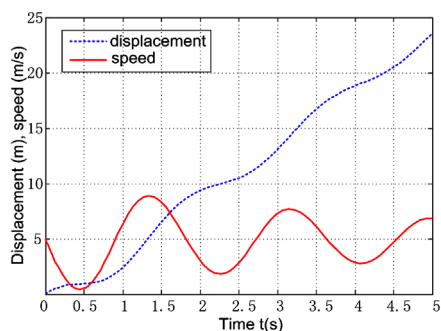


Figure 2. The speed fluctuation curve in case of friction resistance suddenly increase at movement state  
图 2. 运动时摩擦阻力突然增大情况下的速度波动曲线

器人与流体介质流速相同，都为  $v$ ，在  $t=0$  时刻，摩擦阻力突然增大  $\Delta F$ ，机器人速度瞬间降低。之后流体介质体积改变，流体压力差增大，机器人速度开始增大。如此往复，形成周期性的速度波动现象。

如图 3 所示，随着摩擦阻力突变值  $\Delta F$  的增大，机器人速度波动现象越来越明显。如图 4 所示，在速度波动的初始阶段，速度影响系数  $\alpha$  对速度波动的影响很小，经过若干次加速减速之后， $\alpha$  越小，速度波动现象衰减越快。由图 5 所示，流体介质流速  $v$  不同，机器人速度也不一样，但速度不均匀程度变化不大。如图 6 所示，随着质量  $m$  的增大，速度波动现象明显减弱，速度波动曲线的振幅和频率都会降低。但实际情况下，质量  $m$  增大，往往会伴随着  $\Delta F$  和  $\alpha$  的增大，因此质量不是越大越好。由图 7 所示，随着等效刚度  $K$  的增大，速度波动曲线的振幅和频率都有所升高。由图 8 所示，初始阶段的速度波动受等效阻尼  $c$  的影响很小，随着  $c$  增大，速度波动衰减得很快，因此增大阻尼可以减小速度波动。

运动时摩擦阻力突然减小的情况与运动时摩擦阻力突然增大的情况本质上是相同的，都是由于摩擦阻力突变而导致了速度的波动。而静止时摩擦阻力突

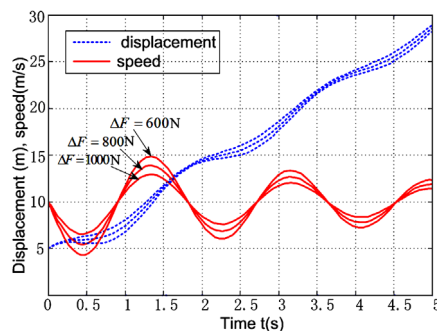


Figure 3. Friction resistance mutation value affects speed fluctuation  
图 3. 摩擦阻力突变值  $\Delta F$  对速度波动的影响

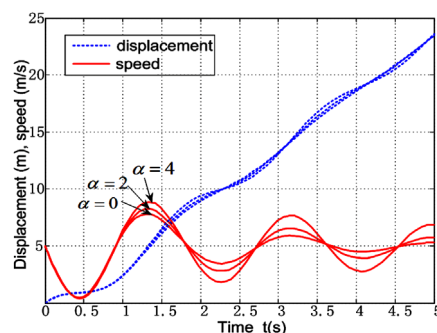


Figure 4. Speed influence coefficient affects speed fluctuation  
图 4. 速度影响系数  $\alpha$  对速度波动的影响

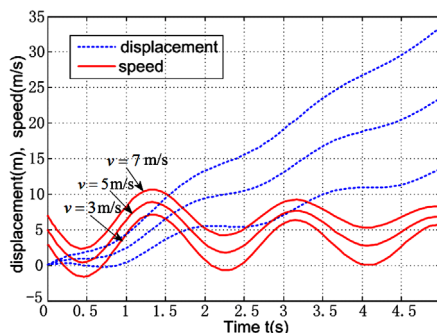


Figure 5. Fluid medium speed affects speed fluctuation  
图 5. 流体介质流速  $v$  对速度波动的影响

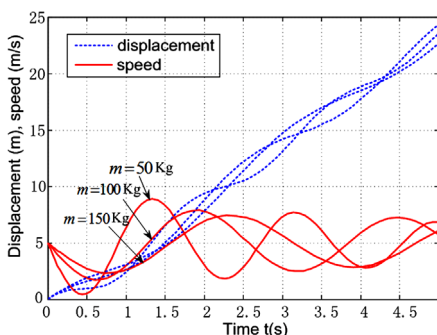


Figure 6. Robot quality affects speed fluctuation  
图 6. 机器人质量  $m$  对速度波动的影响

然减小的情况下，趋势与运动时摩擦阻力突然增大的情况相同。

当三种情况下的速度影响系数  $\alpha$ 、机器人质量  $m$ 、等效刚度  $K$ 、等效阻尼  $c$  和摩擦阻力突变值  $\Delta F$  都相同时，仿真结果如图 9 所示。

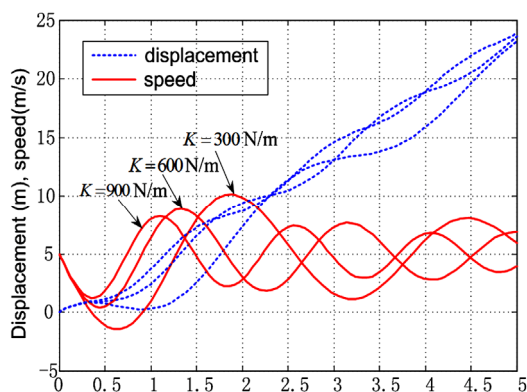


Figure 7. Equivalent stiffness affects speed fluctuation  
图 7. 等效刚度  $K$  对速度波动的影响

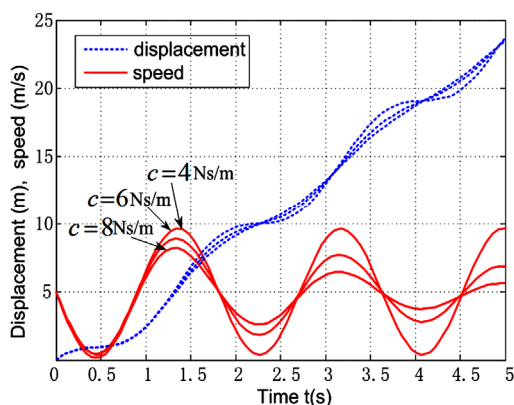


Figure 8. Equivalent damping affects speed fluctuation  
图 8. 等效阻尼  $C$  对速度波动的影响

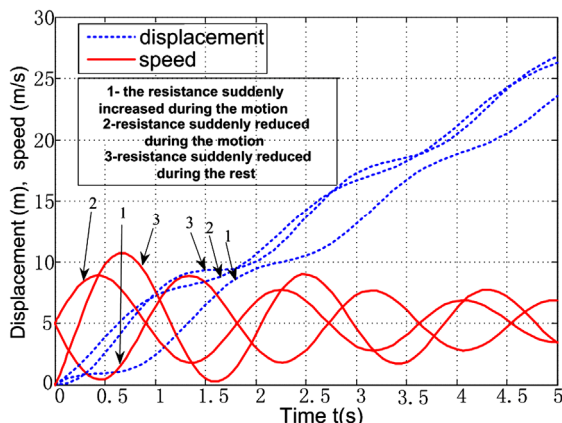


Figure 9. Comparison of three speed fluctuation curve  
图 9. 三种速度波动曲线的比较

静止时摩擦阻力突然减小的情况下，初始阶段速度波动最为明显，机器人可在一瞬间由 0 m/s 加速到 11 m/s，而其他两种情况下的极限速度  $v_{max}$  都小于 8 m/s。由此可见，相同条件下，时走时停的速度波动要比时快时慢的速度波动更为严重。因此，应该尽量避免管道机器人在运行过程中出现停顿。

## 6. 结论

影响速度波动现象的主要因素包括摩擦阻力突变值  $\Delta F$ ，速度影响系数  $\alpha$ ，流体介质流速  $v$ ，机器人质量  $m$ ，等效刚度  $K$  和系统等效阻尼  $c$ 。通过以上分析，可以得出以下结论：

- 1) 摩擦阻力突变值  $\Delta F$  越大，速度波动现象越明显。
- 2)  $\Delta F$  相同的条件下，时走时停的速度波动要比时快时慢的速度波动更严重，应尽力避免管道机器人在运行过程中出现停顿。
- 3) 流体介质流速  $v$  和等效刚度  $K$  不能过小，否则管道机器人可能因压力不足而停止运动。
- 4) 速度影响系数  $\alpha$  越小，等效阻尼  $c$  越大，速度波动现象衰减得越快。
- 5) 质量  $m$  越小，速度波动越明显， $m$  应保持在合理范围内。

等效刚度  $K$  和等效阻尼  $c$  取决于管道的物理环境和流体介质的性质，是系统的固有属性，很难人工调节。对于长距离输送管线，调节流体介质流速  $v$  会增加运行成本，灵活性也不高。此外，管道机器人的质量  $m$  受结构和材料的限制，不能随意改变，而且质量过大增大摩擦阻力。因此，欲避免或者抑制速度波动现象的产生，应该从摩擦阻力突变值  $\Delta F$  和速度影响系数  $\alpha$  入手。

通过上述分析，提出了将振动减摩的宏观力学模型引入到管道机器人领域，建立了基于流体力学的节流调速理论模型。搭建了介质压差式管道机器人驱动特性实验平台，实验结果表明：振动减摩和节流调速可有效地抑制速度波动现象的产生，验证了理论分析的正确性和有效性<sup>[10]</sup>。

## 参考文献 (References)

[1] G. Bright, D. Ferreira. Automated pipe inspection robot. Indus-

- trial Robot, 1997, 24(4): 285-289.
- [2] 邓宗全, 王永福, 张晓华等. 小口径管内补口作业机器人的研究[J]. 机器人, 1997, 19(4): 277-278.
- [3] K. U. Scholl, V. Kepplin, K. Berns, et al. An articulated service robot for autonomous sewer inspection tasks. Proceeding of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999: 1075-1080.
- [4] S. Aoyagi, S. Nakai and K. Maeda. A basic study on a mobile robot for maintaining pipes. International Journal of Japan Society for Precision Engineering, 1991, 25(3): 233-234.
- [5] 谢文彬, 杨建国, 李蓓智等. 管道检测机器人的研制[J]. 机械工程师, 2005, 1: 14-16.
- [6] 李娜, 綦耀光, 刘保余等. 无源管道机器人推进系统的摩擦阻力计算[J]. 现代制造技术与装备, 2010, 1: 30-32.
- [7] 张文刚. 橡胶摩擦与摩擦系数的测定[J]. 世界橡胶工业, 1998, 1(1): 52-55.
- [8] 庞佑霞, 黄伟九. 工程摩擦学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 23.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 241.
- [10] 崔高健, 姜生元, 王文飞. 介质压差式管道机器人振动减摩调速机理研究[J]. 振动与冲击, 2012, in press.