

文章编号: 1000-8241(2016)03-0306-05

# 管道内检测器里程轮打滑原因

臧延旭<sup>1</sup> 邱城<sup>2</sup> 胡铁华<sup>2</sup> 杨寒<sup>1</sup>

1. 中油管道检测技术有限责任公司; 2. 机械科学研究总院

**摘要:** 管道内检测器常采用里程轮定位的方法对管道缺陷进行轴向定位,但实际使用过程中,里程轮存在“打滑”现象,造成里程丢失,导致定位不准。为了提高管道内检测器的定位精度,分析了管道内检测器里程轮打滑的原因,建立了滚轮转动的力矩方程,探讨了各参数对轮体打滑的影响,并利用现有滚动摩擦模型进行了验证。建模分析结果表明:当检测器加速度过快时,滚轮自身加速能力有限而导致里程轮打滑丢失里程数据。通过在检测器上搭载速度控制系统,可调节检测器运行速度区间,避免检测器运行时出现过大的加速度;通过增大弹簧刚度、减小轮体的直径和宽度、轮体外圆滚花和局部热处理等方法,可以提高里程轮自身适应检测器加速度的能力。(图3,参12)

**关键词:** 管道; 内检测; 检测器; 里程轮; 打滑; 滚动

中图分类号: TP242

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.03.014

## Causes of slippage of odometer wheels in pipeline inline detectors

ZANG Yanxu<sup>1</sup>, QIU Cheng<sup>2</sup>, HU Tiehua<sup>2</sup>, YANG Han<sup>1</sup>

1. China Petroleum Pipeline Inspection Technologies Co. Ltd.; 2. China Academy of Machinery Science &amp; Technology

**Abstract:** Odometer wheels are often used in inline detectors for axial positioning of defects in pipelines. In practical application, “slippage” of odometer wheels may lead to inaccurate positioning due to losses in metering. To enhance the positioning accuracy of pipeline inline detectors, root causes for slippage are analyzed. A moment equation is established for rotation of rolling wheels to identify impacts of parameters on such slippage. In addition, existing rolling friction models are used for verification. Modeling analysis results show that limited accelerating capacities of rolling wheels may lead to slippage of odometer wheel in case of excessive acceleration of detectors, thereby producing inaccurate mileage metered. Incorporation of velocity control system on detectors may effectively regulate running speeds of detectors to eliminate possibility of excessive acceleration. In addition, enhancement in spring rigidity, reduction in diameters and widths of wheels, knurling on external surface of wheel, regional heat processing and other techniques are also available to enhance capacities of odometer wheel to cope with acceleration of detectors. (3 Figures, 12 References)

**Key words:** pipeline, inline inspection, detector, odometer wheel, slippage, rolling

我国于2000年颁布法令,要求油气管道主干线每3~5年必须进行一次检测作业,以评价、维护管道安全。目前,利用管道内检测器可有效检测出管道内存在的腐蚀或变形等缺陷<sup>[1-2]</sup>,其利用自身携带的检测设备检测管道内外壁,当发现管道出现腐蚀或变形缺陷时,记录下当前缺陷在管道的轴向位置,以便迅速进行定位查找,排除故障。目前常采用里程轮定位的方法定位缺陷所在位置<sup>[3-9]</sup>。

里程轮定位原理:检测器在管道内运行时,里程轮紧贴管壁随着设备的运行而滚动,里程轮每滚动一周

发射出一定数量的脉冲,里程轮臂上安装脉冲采集单元,实时采集里程轮发射的脉冲数,根据测量的脉冲数即可计算出里程轮滚过的距离<sup>[5]</sup>。但实际使用过程中,由于里程轮经常出现打滑现象而使里程丢失,最终导致缺陷点定位不准而影响检测的最终效果。现场应用表明,里程轮打滑与清管情况、弹簧力大小、里程轮踏面花纹、里程轮磨损情况等有关,但未对里程轮打滑的机理及其原因进行深入分析<sup>[3]</sup>。鉴于此,建立了里程轮运动模型,以探讨里程轮打滑的机理及原因,为今后里程轮的设计工作奠定基础。

### 1 基于古典滚动摩擦定理的模型

将里程轮在管道内的滚动模型进行简化(图 1), 刚性圆柱在一非刚性体平面上受法向力  $N$  和切向力  $F$  的作用而发生滚动, 可以得出:

$$\mu = \frac{FR_0}{N} \tag{1}$$

$$M_0 = FR_0 = N\mu \tag{2}$$

式中:  $R_0$  为圆柱体半径, m;  $F$  为切向力, N;  $N$  为法向力, N;  $\mu$  为滚动摩擦因数, m;  $M_0$  为滚动力矩, N·m。

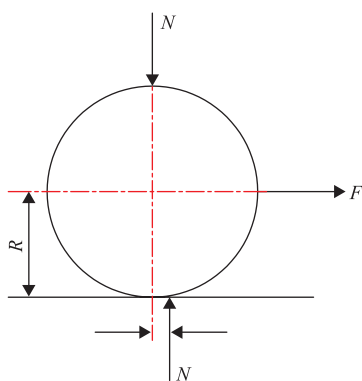


图 1 里程轮滚动摩擦模型

一般里程轮利用弹簧将滚轮压在管壁上(图 2)<sup>[3]</sup>, 随检测器的运动而滚动, 假定里程轮滚动过程中没有能量损失, 里程轮处于纯滚动状态(没有相对滑动), 则有:

$$M_0 = J\alpha, J = mR^2 \tag{3}$$

式中:  $J$  为滚轮转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;  $m$  为滚轮质量, kg;  $R$  为滚轮半径, m;  $\alpha$  为滚轮角加速度,  $\text{rad}/\text{s}^2$ 。

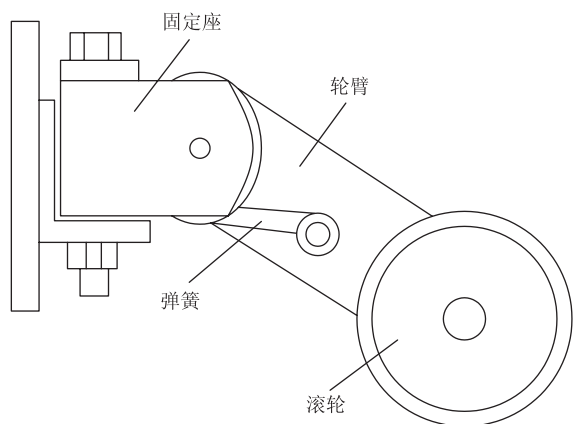


图 2 里程轮结构示意图

检测器在管道内运行时, 首先进入管道发球筒, 在介质压差作用下推动检测器加速运行, 直至达到介质流速而匀速运动, 其运动状态方程为:

$$M \frac{dv}{dt} = F_Q - F_Z \tag{4}$$

式中:  $M$  为检测器质量, kg;  $v$  为检测器运行速度, m/s;  $F_Q$  为驱动力大小, N, 与检测器前后压差、受力面积有关;  $F_Z$  为阻力大小, N, 主要取决于检测器与管壁的摩擦阻力。

达到匀速运动是一种理想的状态, 实际输送流体具有压缩性(尤其是天然气), 在可压缩性介质条件下, 检测器运行过程中会产生“振动”现象。即当检测器速度低于介质速度时, 检测器后端介质不断“堆积”, 导致检测器前后压差增大, 使得驱动力增加而使检测器加速。当检测器达到介质速度时, 由于检测器驱动力仍大于阻力, 检测器将继续加速运行。检测器速度高于介质速度会使检测器前端介质“堆积”, 导致前后压差减小, 驱动力降低而使检测器减速运行。当检测器速度降至介质速度时, 由于检测器驱动力仍小于阻力, 检测器将进一步减速运行。减速后由于检测器后端介质“堆积”, 导致检测器压差增大而加速运行, 由此造成检测器产生“振动”现象。

以上“振动”现象将导致里程轮时而加速时而减速, 更严重时会导致检测器停止, 经过长时间憋压后再重新启动。一般在检测器上搭载速度控制系统对速度调节有积极的作用, 但由于速度控制系统动作需要一定的时间, 因此“振动”现象无法完全消除。

里程轮能否适应反复的加速、减速, 尤其能否适应停球憋压加速启动时速度的变化, 取决于里程轮的自身特性(图 3), 即取决于滚轮质量  $m$ , 半径  $R$  和滚动力矩  $M_0$ ,  $M_0$  取决于里程轮的结构形式(与弹簧提供的力矩  $M_1$ 、法向力  $N$  和力臂  $L$  等有关)。里程轮弹簧给予的力矩  $M_1$  值是可变的, 随着角度  $A$  的变化而变化(图 3)。  $A$  值达到最小值时, 弹簧给予的力值越大, 对应的法向力  $N$  越大。

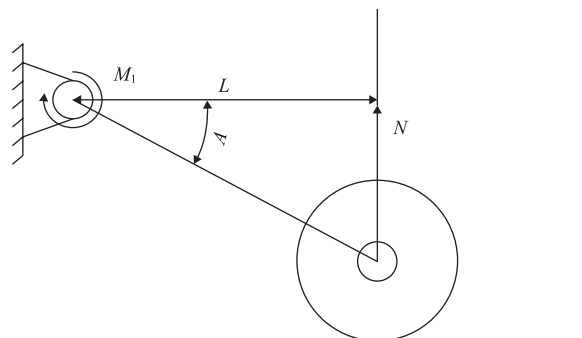


图 3 里程轮受力示意图

利用式(3)得出:

$$M_0 = J\alpha = mR^2\alpha = \frac{mR^2\Delta v}{\Delta t R} = \frac{mR\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

由式(5)可知,由于里程轮弹簧结构给予的力矩  $M_1$  最大值有限,即  $N$  值存在对应的最大值,提供给滚轮的动力矩  $M_0$  是有限的,因此当检测器加速度过大时,滚轮自身加速能力有限而导致里程轮打滑丢失里程数据。

综上,影响里程轮打滑的因素包括滚轮自身结构(质量  $m$ 、半径  $R$ )和里程轮结构(弹簧力  $M_1$ 、里程轮臂长  $L_0$ 、夹角  $A$ ),结合式(1)~式(5)推导得:

$$\mu = \frac{M_1}{L_0 \cos A} = \rho \pi R^3 h \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为滚轮材料密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $h$  为滚轮厚度,  $\text{m}$ 。

当  $M_1$  一定时,里程轮结构应设计成臂长  $L_0$  尽量短、夹角  $A$  尽量大的结构,同时需要考虑检测器的通过能力和里程轮的安装尺寸要求。滚轮可选用密度小的材料,半径和厚度尽量小,但设计时还要考虑滚轮的耐磨性,以及轴承选型和转速的要求。特别应该考虑滚轮的磨损情况,一般滚轮直径误差在  $\pm 1.5 \text{ mm}$  范围内,否则应该更换滚轮,避免由于磨损导致轮体直径减小,最终影响缺陷的精确定位<sup>[3]</sup>。而轮体半径  $R$  越小,在距离一定的条件下滚轮转动的圈数越多,磨损越严重。

进一步分析可知,式(3)、式(6)存在矛盾,若要滚轮具有足够的加速能力,其转动惯量  $J$  ( $R$  越小则  $J$  越小)和角加速度  $\alpha$  应尽量小,但  $\alpha$  又与半径  $R$  有关,即速度一定的条件下,  $R$  越大则  $\alpha$  越小。但就影响程度而言,  $M_0 \propto R^3$ ,  $\alpha \propto 1/R$ ,设计时  $R$  应取较小值。

$\mu$  的大小主要取决于相互接触物体的材料性质和表面状况,如粗糙度、硬度、温度和湿度等,一般通过试验测定。目前为了改善滚动摩擦因数,常用方法有:①进行管道清管作业,将管壁上的蜡、金属粉末等杂质清理干净,改善接触面情况;②进行滚轮外表面滚花处理,改善轮体外表面的粗糙度。

## 2 基于现代摩擦学理论的模型

古典滚动摩擦定理认为:圆柱体与平面接触属于点或线接触,此时滚动圆柱头与平面接触点即为瞬心,其相对速度为零。但实际接触过程中,接触部位在法

向力的作用下不再是点或线接触,而会由于接触部位发生变形变成平面或者曲面接触,这与古典滚动摩擦定理的定义不同,同时古典滚动模型没有考虑接触物体的机械性质及接触区的性质,因此建立了基于现代摩擦学理论的滚动摩擦模型,研究认为在法向载荷  $N$  的作用下,点线接触由于变形(弹性变形或塑性变形)而构成一个微小的接触平面。在弹性变形范围内这一面积的大小、接触区宽度及压力可由赫兹公式计算得出<sup>[10-12]</sup>:

$$A_0 = 2bl \quad (7)$$

$$b = \left[ \frac{4NR_0}{\pi l} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$p = \frac{2N}{\pi bl} \left[ 1 - \left( \frac{x}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中:  $A_0$  为接触区面积,  $\text{m}^2$ ;  $b$  为接触区半宽,  $\text{m}$ ;  $l$  为圆柱体轴向长度,  $\text{m}$ ;  $R_0$  为圆柱体半径,  $\text{m}$ ;  $x$  为离接触区法线处的任意距离,  $\text{m}$ ;  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  为两接触体的泊松比;  $E_1$ 、 $E_2$  为两接触体的弹性模量,  $\text{GPa}$ ;  $p$  为接触区压力,  $\text{MPa}$ 。

研究认为,滚动摩擦的表面间相对运动的性质是宏观滚动加微观滑移的复合运动,并基于弹性之后建立了滚动摩擦因数的数学模型,得出滚动摩擦因数的计算公式为<sup>[11-12]</sup>:

$$\mu_r = \frac{2\xi}{3\pi R} \left[ \frac{4NR}{\pi l} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中:  $\mu_r$  为计算得出的滚动摩擦因数,  $\text{m}$ ;  $\xi$  为弹性滞后损失因数。

由式(10)可知,  $\mu_r$  与法向力、滚轮几何尺寸和接触体弹性模量有关。具体的影响趋势为:选用的滚轮材料确定后,弹性模量和泊松比即确定,随着法向力的增加,  $\mu_r$  将变大,随着滚轮轴向长度(即厚度)的增加或随着半径的增大,  $\mu_r$  将变小。由式(2)可知,  $\mu_r$  增加有利于驱动力矩  $M_0$  的增加。这与古典滚动摩擦定理模型的分析结果一致,即在里程轮结构确定的前提下,滚轮直径和厚度均应选较小值。

相关研究结果<sup>[10]</sup>也证实,随着正压力、接触宽度和摩擦因数的增加,滚轮打滑率下降,随着滚轮半径的增加,滚轮打滑率上升。

### 3 影响因素

(1) 装配。里程轮的使用环境中多存在粉尘等杂质,滚轮需要用密封圈进行密封,因而增加了阻力。不同型号的密封圈产生的阻力值不同;安装过程中如果发生滚轮偏斜,偏斜的角度越大,打滑越明显。

(2) 滚轮的形状误差。滚轮的形状误差主要是圆柱度误差,一般应采用宽度较小、圆柱度高的滚轮<sup>[10]</sup>。

(3) 管道弯头。管道中经常存在弯头,管道检测器一般携带两个或者更多个里程轮,呈对称或圆周阵列形式安装,经过弯头时不同里程轮滚过的里程是不同的,靠近弯头内侧的距离小,靠近弯头外侧的距离大,根据里程轮算法的不同,经过弯头时可能造成测量里程不准。

### 4 减少里程轮“打滑”的相应措施

(1) 检测器开设泄流孔或搭载速度控制系统,控制设备运行速度区间,尤其要减少设备发生“启动-停止-启动”的几率。

(2) 管道内检测前进行清管作业,清除管道内结蜡、金属粉末等杂质,改善接触面情况。

(3) 增加里程轮用弹簧刚度,提高里程轮弹簧结构给予的力矩  $M_1$ 。

(4) 滚轮中心轮毂采用低密度材料制作,与管壁接触部分采用高强度、高硬度材料制作成圆环套在中心轮毂上,滚轮外表面做滚花处理和表面热处理,以改善轮体外表面的粗糙度和硬度情况,滚轮轮体直径、厚度在满足使用要求下尽量小。

(5) 提高里程轮零件的加工、装配质量,优化里程轮算法,避免设备经过弯头时造成里程测量不准。

### 5 结论

根据古典滚动摩擦定理建立了里程轮滚动模型,指出里程轮的结构形式,包括弹簧力矩值、里程轮臂长、轮臂夹角等均对滚轮的法向压力有影响,在充分考虑轮体磨损、轴承选型及受力、检测器通过能力及安装位置的前提下,滚轮的直径和厚度应尽量选择较小的尺寸。参考基于现代摩擦学理论的滚动摩擦模型,其对滚轮直径和厚度的选择与建立的模型结果一致。同

时,讨论了装配、加工形状公差及管道弯头情况对里程检测精度的影响。提出的模型可为里程轮结构设计提供理论支持,但最终结构的确定还应从大量实验和现场应用中得出。

#### 参考文献:

- [1] 宋小春,黄松岭,赵伟.天然气长输管道裂纹的无损检测方法[J].天然气工业,2006,26(7):103-106.  
SONG X C, HUANG S L, ZHAO W. Nondestructive testing technique for cracks in long distance natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 103-106.
- [2] 黄松岭,叶朝峰,王坤,等.天然气管道裂纹电磁超声检测器研制[J].无损检测,2009,31(10):827-829.  
HUANG S L, YE C F, WANG K, et al. Development of oil and gas pipeline crack detector based on EMAT[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(10): 827-829.
- [3] 陈建军,匙胜利.浅析影响管道漏磁腐蚀检测器定位精度的因素[J].管道技术与设备,2002(6):42-43.  
CHEN J J, CHI S L. Analysis of factors affecting the positing accuracy of the pipeline magnetic flux leakage inspection tool[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2002(6): 42-43.
- [4] 沈跃.智能清管器检测管道缺陷的定位算法研究[J].科学技术与工程,2008,8(20):5603-5607.  
SHEN Y. Research on flaw location algorithms of the smart PIG for pipeline inspection[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(20): 5603-5607.
- [5] 许红,李著信,苏毅,等.管道内检测机器人定位技术研究现状与展望[J].机床与液压,2013,41(9):172-175.  
XU H, LI Z X, SU Y, et al. Research status and prospect of pipeline inspection robot localization technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(9): 172-175.
- [6] 宋志东,靳世久,李一博,等.管道内检测器里程轮信号优选算法的设计与实现[J].管道技术与设备,2006(3):12-13.  
SONG Z D, JIN S J, LI Y B, et al. Design and implementation of algorithms of selecting PIG odometer wheels signals[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2006(3): 12-13.
- [7] 王黎,李著信,苏毅,等.管道检测机器人加速度定位方法[J].中国科技论文在线,2008,3(8):580-586.  
WANG L, LI Z X, SU Y, et al. Localization technique of pipeline

robot based on the method of acceleration[J]. Science Paper Online, 2008, 3(8): 580-586.

[8] 徐云, 戴波, 谢祖荣, 等. 低频电磁波在管道内检测外定位的应用[J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 18(2): 35-40.  
XU Y, DAI B, XIE Z R, et al. Application of low-frequency electromagnetic wave on outer orientation problems in in-line pipeline inspection[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2010, 18(2): 35-40.

[9] 王黎, 李著信, 刘书俊. 管道检测机器人管内定位技术的研究现状[J]. 中国储运, 2011(8): 117-119.  
WANG L, LI Z X, LIU S J. Research study of pipe internal positing technology for pipeline inspection robot[J]. China Storage & Transport, 2011(8): 117-119.

[10] 王建利, 李真, 张国雄. 滚动摩擦副打滑理论的研究[J]. 机械工程学报, 1997, 33(3): 21-26.  
WANG J L, LI Z, ZHANG G X. Study on the theory of rolling friction pair[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(3): 21-26.

[11] 汪志城. 滚动摩擦机理和滚动摩擦系数[J]. 上海机械学院学报, 1993, 15(4): 35-43.  
WANG Z C. A mechanism of rolling friction and the coefficient of rolling friction[J]. Journal of Shanghai Institute Mechanical Engineering, 1993, 15(4): 35-43.

[12] 黄雪兵, 蒋小平, 夏光琼, 等. 橡胶轮胎与硬质地面的滚动摩擦研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(4): 34-37.  
HUANG X B, JIANG X P, XIA G Q, et al. Study of the rolling frictions between the rubber tire and hard road surface[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2009, 34(4): 34-37.

(收稿日期: 2015-03-17; 修回日期: 2015-06-30; 编辑: 杜娟)

**作者简介:** 臧延旭, 男, 工程师, 1983年生, 2010年毕业于中国地质大学(北京)机械工程专业, 现主要从事管道清管器、内检测器的研发工作。地址: 河北省廊坊市广阳区爱民东道166号, 065000。电话: 15127661024, Email: zangyanxu@126.com

## 下 期 要 目

海底油气输送用双金属复合管研发现状与展望  
.....魏斌, 等

基于 OLGA 深水混输管道及井筒内水合物风险分析  
.....魏文倩, 等

大型 LNG 储罐罐壁隔热层保冷性能  
.....曹学文, 等

LNG 接收站 BOG 处理工艺优化及能耗分析  
.....薛倩, 等

冻土区保温管道补口结构的保温性能  
.....蒋林林, 等

浸没燃烧式 LNG 气化器水浴气化传热计算  
.....康凤立, 等

LNG 卸料管道穿堤布置方案的设计  
.....彭延建, 等

LNG 储罐膨胀珍珠岩填充技术及施工质量控制  
.....甄洁

不同喷嘴结构油罐旋转喷射搅拌器数值模拟  
.....皮嘉立, 等

适用于硬质黏土的淹没射流物理模型  
.....唐立志, 等