

# 基于 CATIA 的管道清洁机器人设计与研究

赵文纯, 何庆中, 张艳玲, 王明超

(四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 针对管道内径为 200mm - 250mm 的管道清洁机器人设计, 提出了基于螺旋推进原理的管道机器人的设计方案, 运用三维建模软件 CATIA 进行实体建模, 并对自适应管道机器人的机械结构进行了设计与研究。同时, 通过 CATIA, Analysis 对管道机器人关节薄弱处进行校核优化, 用以提高机器人运行的可靠性及较好的完成工作目标。

**关键词:** 自适应; 管道机器人; 螺旋推进

**中图分类号:** TE973.6

**文献标识码:** A

## 引言

现代工农业生产及日常生活中使用着众多管道, 如核电厂的蒸汽发生器传热管、冶金、石油、化工、城市采暖供应管、制冷行业的工业管道和煤气管道、采气、储气油井套管等, 这些管道系统的工作环境非常恶劣, 容易发生腐蚀、疲劳破坏等管内潜在缺陷, 进而发展成破损而引起泄漏等事故带来的不安全因素和经济损失。对管道实施监测、诊断、清理和维护是保障管道系统安全、高效运营的有效手段, 使得针对管道内壁质量探测等无损检测技术研究与应用, 成为目前管内探测技术的重要研究方向之一。同时, 管内探测受管道使用环境和空间的限制, 以及管内介质的复杂性, 对其检测维护维修也十分困难。因此, 本文将重点针对石油化工管道、锅炉容器管道、输水输暖工程管道和采气、储气油井管壁的质量检测与维护现状, 研究管内清洁机器人的工作原理和结构系统设计方法, 采用三维结构设计方法和结构优化技术, 进而开发设计管内运动机器人清洁装置, 为研究管内机器人技术打下一定的理论基础。

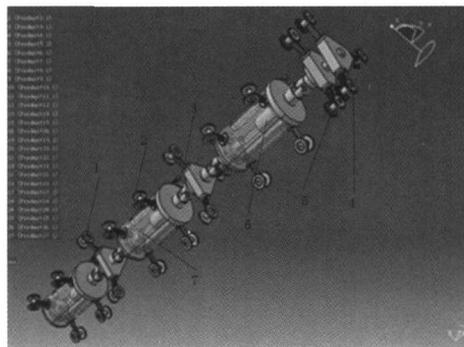
## 1 管内清洁机器人的主要技术性能指标

- 适应管道直径 200mm - 250mm,
- 机器人单关节运行所需牵引力为 60 N。

• 机器人的移动速度可调, 由驱动轮偏转角度和转速决定。

## 2 管内清洁机器人结构设计

为了使管道自适应机器人驱动单元有较大的负载能力、平稳均速移动和较强的管内自适应定位能力, 设计了一种具有管内自适应能力、单节单电机螺旋推进式可组合的驱动系统, 其基于 CATIA 的三维结构设计模型及其组成部分如图 1 所示。



1. 驱动部件; 2. 行走部件; 3. 弹簧支撑; 4. 清洁钢刷;  
5. 清洁滚压轮; 6. 驱动电机; 7. 电机控制块

图 1 管内机器人结构设计示意图

### (1) 行走驱动的工作原理

管内机器人欲在管内平稳、可靠的启停、行走, 必须

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家科技部 863 项目 (2008AA11A134); 四川省自贡市科技重点资助项目 (08C07)

作者简介: 赵文纯 (1984-), 男, 山东日照人, 硕士生, 主要从事机电一体化技术和工业机器人方面的研究。

满足形封闭和力封闭的基本条件,同时需有驱动行走机构<sup>[1]</sup>。如图 1 所示,管道机器人螺旋驱动行走机构的工作原理是当电机启动时,电机轴通过万向节带动螺旋头旋转,使驱动轮沿管壁作螺旋运动,同时机体在保持机构导向轮周向摩擦力的作用下,只能沿管道轴线移动而不能旋转,实现了整个机器人在管道内的运动,通过调整电机电流可调节驱动轮转速,从而调节管内机器人的移动速度;改变电机工作电流极性,可改变机器人的移动方向,使管内机器人在管道内能运动自如。

### (2)管内自适应机构的定位原理

由于管道内径在生产制造和使用过程中,因制造误差和锈蚀等缺陷将造成管内径在尺寸大小上存在一定的差异,要保证管内机器人在管内能自动定位并可沿轴向移动,应设计合理管内自适应机构。目前常用的管内自适应机构有弹簧伸缩式和四杆机构支撑式两种<sup>[2]</sup>。由于弹簧伸缩式具有结构简单,占用空间小等特点,本文采用弹簧伸缩式作为管内机器人的自适应机构,三组均匀布置,通过对弹簧预紧计算校核,可以得到符合要求的弹簧伸缩式自适应机构,并对驱动体,行走机构,采用周向排布,保证机器人能在 200mm - 250mm 的管道中有较好的附着力及运动稳定性,以及自适应定位能力。

### (3)清洁体结构设计

管道清洁机器人多工作于服役过程中的管道中,鉴于管道中的腐蚀、垢渍附着情况,单一的刷洗结构无法达到较好清洁效果。本管道机器人将采用先滚压后清扫的清洁模式如图 2 所示。管道机器人清洁体采用齿形滚压体和钢丝刷式清扫结构组成,清洁体同样采用螺旋推进方式。在实际工作过程中,先通过齿形滚压体压爆管道内污垢,再通过清扫钢丝刷对被压松后的污垢进行清扫以达到较好的清洁效果。

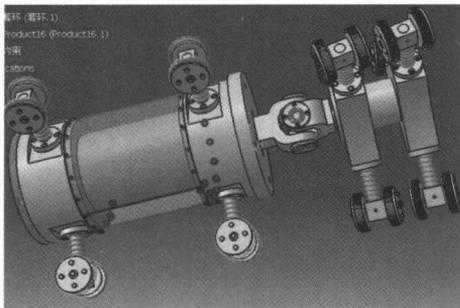


图 2 管道机器人清洁体结构

## 3 结构优化分析

由于管道机器人采用多关节串联式设计,且各关节采用相同设计,鉴于机器人又工作于封闭管道中,要求机器人在运行过程中有较高的可靠性。为便于结构分析计算与优化,仅选取单关节驱动组件关键部件作为分析对象,如图 3 所示管内清洁机器人的结构优化分析,

通过 CATIA 建起三维模型,运用 CATIA Analysis 模块对关键部件进行受力分析与优化。一般步骤如图 4 所示<sup>[3]</sup>。

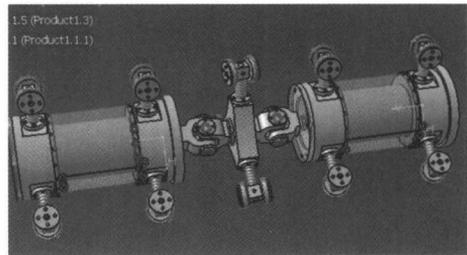


图 3 管道机器人驱动关节示意图

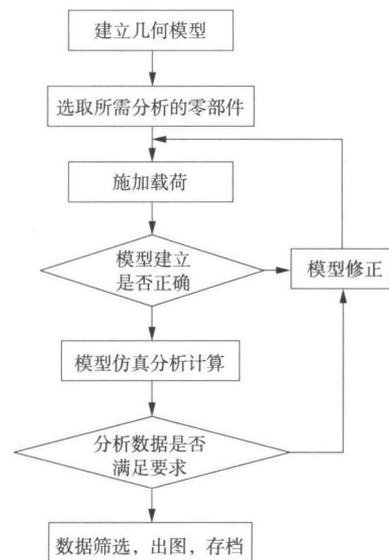


图 4 基于 CATIA 结构优化分析流程

### 3.1 三维建模

利用三维建模软件 CATIA 建立起螺旋推进式管道清洁机器人的三维模型。并对机器人关键零部件进行优化设计<sup>[4]</sup>。

CATIA 可以方便的进行节点和有限元单元生成四、六面体的网格划分、网格分组管理、模型验证、后置处理等分析计算。

模型建立步骤如下:

(1)确定零部件的结构。

(2)根据管内机器人的运行要求确定零件主参数,模型建立时主要考虑运行关节筒体的内外径,筒体厚度,驱动关节尺寸,万向节等。

(3)模型装配建立起管道清洁机器人的三维模型如图 1 所示。

### 3.2 约束条件与载荷的确定

为了保证管内机器人在管道内部的有效定位和稳定移动,管内机器人在管道内部必须具有合理的约束定位条件,存在一定的载荷<sup>[5]</sup>。管道机器人在工作过程中受到管壁的作用,不会发生径向位移,考虑到整机采用

螺旋推进式运动模式, 需要约束导向装置使各关节不随驱动体发生旋转, 又由于各导向轮采用的是弹簧柔性支撑, 其中弹性支撑预紧力见表 1<sup>[6]</sup>, 这就需要约束导向轮两个旋转自由度和一个平动自由度, 约束方向及相应约束载荷等如图 5 所示。由于管内机器人清洁端及驱动体采用相同设计, 所以以清洁端为例做相应的载荷约束, 清洁体在运行过程中, 在做周向运动的同时做轴向运动, 需约束两个转动自由度和两个平动自由度<sup>[7]</sup>, 其中所受到的载荷有清洁端输出的扭矩和管壁与齿形滚压轮和钢丝刷市清扫体的摩擦力如图 6 所示。

表 1 各弹簧预紧力及单轮组所受摩擦力

|                  | 与管壁的<br>摩擦系数       | 支撑弹簧<br>预紧力 | 所受的<br>摩擦力                         |
|------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|
| 导向轮              | 0.65 - 0.75        | 500N        | 13N - 15N<br>(单组周向)                |
| 驱动轮              | 0.65 - 0.75        | 1000N       | (650 - 750) cos $\alpha$<br>(单组轴向) |
| 清洁体<br>(滚压轮、钢丝刷) | 0.1 - 0.2<br>(无润滑) | 500N        | (50 - 100)<br>cos $\alpha$ 单组轴向)   |

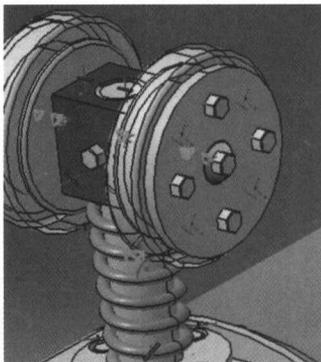


图 5 导向轮自由度及载荷约束

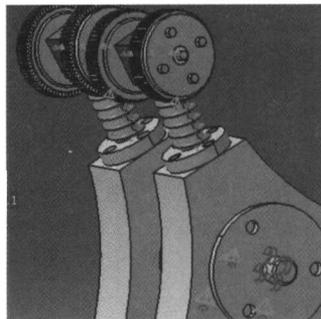
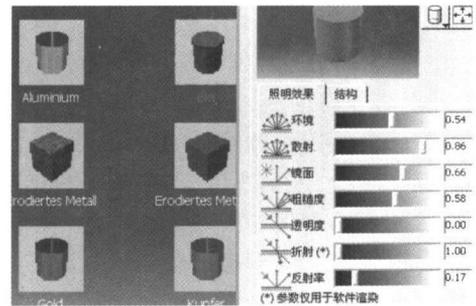


图 6 清洁体自由度及载荷约束

### 3.3 有限元力学性能分析计算

#### (1)材料属性定义

在运用 CATIA 三维建模软件, 对管道机器人建立三维模型, 运用其装配设计模块对相关零部件进行相关约束与载荷定义后, 为便于零部件的静力学分析, 首先需对零部件规定的材料以及其刚度, 密度及其它机械性质等属性加以定义<sup>[8]</sup>, 以便确定模型分析的刚性矩阵与惯性力矩阵。图 7 为零部件类型选择和材料属性参数定义。



(a) 零部件材料类型选取



(b) 材料属性参数定义

图 7 零部件类型选择和材料属性参数定义

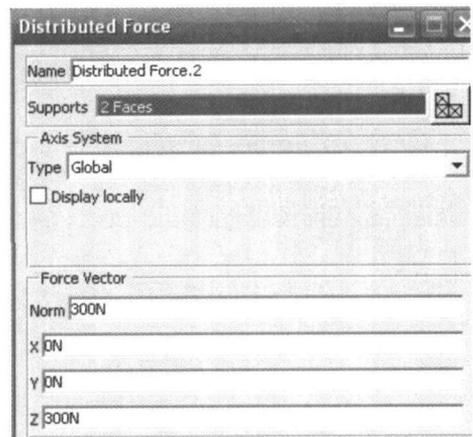
#### (2)约束和载荷定义 (图 8)

#### (3)应力应变分析计算

运用 CATIA Analysis 模块对关键部件进行受力分析与优化, 单关节驱动组件分析应力应变计算结果如图 9 图 10 所示。

#### (4)提高分析计算结果估计精度有效途径

要得到更精确的数据资料, 仅用系统默认网格划分



(a) 局部载荷施加

| Components | Applied Forces | Reactions    | Residual     | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N)     | 2.8194e-011    | -2.7558e-011 | 6.3616e-013  | 5.5265e-015              |
| Fy (N)     | 1.3991e-009    | -1.4003e-009 | -1.2368e-012 | 1.0744e-014              |
| Fz (N)     | 2.3842e-007    | -2.3842e-007 | -4.2932e-012 | 3.7297e-014              |
| Mx (Nxm)   | 1.7432e-008    | -1.7432e-008 | -1.8570e-015 | 6.8647e-016              |
| My (Nxm)   | 1.6615e-008    | -1.6615e-008 | 1.7860e-014  | 6.6023e-015              |
| Mz (Nxm)   | 4.6483e-011    | -4.6499e-011 | -1.6233e-014 | 6.0008e-015              |

(b) 对受力向质点进行等价转换

图 8 约束条件和载荷定义

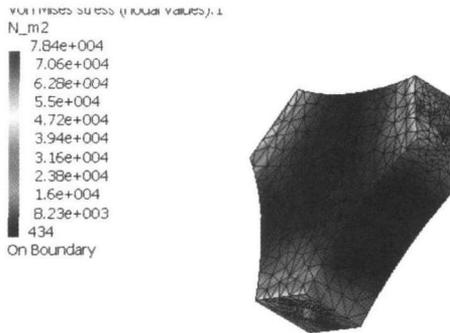


图 9 驱动体受力分析图

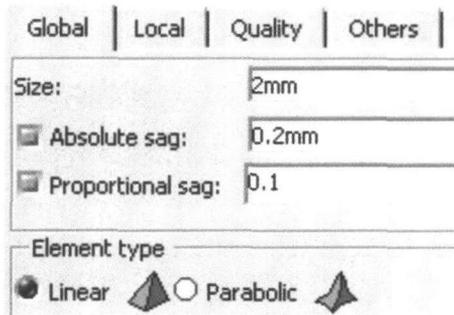


图 11 调整网格形状及大小

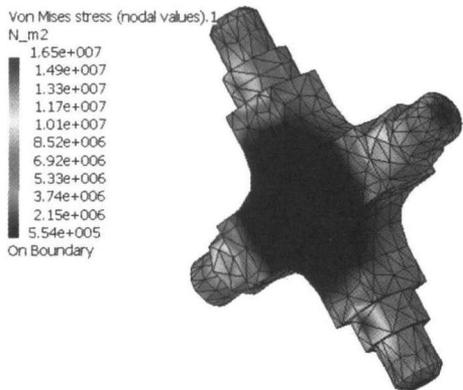


图 10 十字接头受力分析

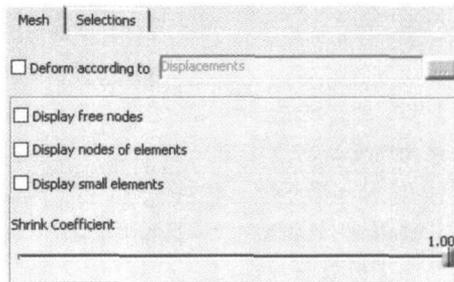


图 12 分析结果显示方式

是不够的, 需要手工划分网格, 调整并细化关键受力部位网格划分的大小 (图 11)。完成网格细分后, 对分析件重新进行计算, 可进一步调整分析模型应力应变的显示方式, 便于观察进行局部放大操作 (图 12)。

### 3.4 分析计算结果评价与结构优化

从图 9 图 10 所示应力应变分析计算结果可看出, 在机器人整机单向动作过程中, 存在受力偏向重力方向, 且驱动体受力是整机中受力情况最恶劣的, 经重复校验在保证水平往返运行稳定可靠的前提下, 对导向槽孔向重力方向偏移 3mm, 并对驱动体弧形侧翼进一步去除部分材料, 使整个驱动体重量下降 35%。

## 4 结束语

本文提出应用于管径在 200mm - 250mm 的管道清洁机器人的设计方案, 并对所设计零部件运用 CATIA 三维软件进行了三维建模和有限元分析, 从静力学角度对整机设计的可行性进行结构优化与验证。通过对机器人虚拟样机设计与校核运算, 极大的缩短设计周期, 提高管道机器人设计的可靠性。并通过物理样机的实地实验, 最终验证了本设计的正确性。

## 参考文献:

- [1] 钱晋宇, 章亚男, 孙麟治, 等. 螺旋轮驱动的细小管内移动机器人研究 [J]. 光学精密工程, 1999, (8): 64-88
- [2] 孙立夫, 刘品宽, 吴善强, 等. 管内移动微型机器人研究与发展现状 [J]. 光学精密工程, 2003, (8): 316-352
- [3] 徐小云, 颜国正, 国清, 等. 管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 50-65
- [4] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999
- [5] Goto H. Development of a scanning type miniature two-dimensional image sensor [J]. Journal of Precision Engineering, 1997, 63(2): 208-232
- [6] 米智楠, 龚振邦, 钱晋武, 等. 一种无损检测的新型机器人 [J]. 无损检测, 2000, 22(11): 485-491
- [7] Suzumori K, Miyagawa T, Kimura M, et al. Micro inspection robot for in-pipes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(3): 285-298
- [8] Halpenny D R, Kane D M. A quantitative analysis of single pulse ultraviolet dry laser cleaning [J]. Appl Phys, 1999, 86(12): 6642-6645

(下转第 359 页)

击次数和频率结构,判断机械运行状态。

(2)故障特征明显,具有直观诊断性。

(3)本文所提出的方法为机械振动微弱非平稳时变信号的分析提供了方便可行的手段。

#### 参考文献:

- [1] 钱淑华,王新晴,李焕良.二次型时频分布在机械故障诊断中的应用[J].西南交通大学学报,2003,5(38):578-580
- [2] 马瑞恒,王新晴.基于一种新的时频分布的机械故障诊断[J].振动与冲击,2003,3(22):68-74
- [3] Boashash B Mesbah M. Signal enhancement by time-frequency peak filtering[J]. IEEE Trans Signal Process 2004, 52(4): 929-937.

- [4] Rankinea L, Mesbaha M, Boashasha B. IF estimation for multicomponent signals using image processing techniques in the time-frequency domain[J]. Signal Processing 2007, 87(2): 1234-1250
- [5] 曾庆虎,邱静,刘冠军,等.基于小波相关滤波-包络分析的早期故障特征提取方法[J].仪器仪表学报,2008,4(29):729-733.
- [6] 王洋,马瑞恒,王新晴.小波除噪、时频分布及气密性诊断[J].内燃机学报,2003,4(21):276-280
- [7] Hussain Z, Boashash B. Adaptive instantaneous frequency-estimation of multicomponent FM signals using quadratic time-frequency distributions[J]. IEEE Trans Signal Process 2002, 50(8): 1866-187.

## Rolling Bearing Incipient Fault Diagnosis Based on TFPT and Modified B-distribution

YANG Ping

(1. Sichuan University of Science & Engineering Zigong 643000 China)

**Abstract** Noise is the biggest obstacle that makes the incipient fault diagnosis results of gear and rolling element bearing uncorrected, an approach to the extraction of weak fault features from vibration noise based on a fresh TFPP (time frequency peak filter) and MBD (modified B distribution) has been proposed. firstly, the weak fault information features are picked up from the vibration noise using the denoising characteristic of TFPT as the preprocessing of the MBD analysis, the denoised vibration is analyzed by MBD to distinguish fault features, the diagnosis model is presented based on TFPT and TFD. The simulation signal and diagnosing example analysis results show that the proposed method is more effective than the method of direct MBD analysis in extracting weak fault against the background of strong noise.

**Key words** fault signal TFPP, TFD; fault diagnosis

(上接第 351 页)

## Design and Research of In-pipe Cleaning Robot Based on CATIA

ZHAO Wen-chun, HE Qing-zhong, ZHANG Yan-ling, WANG Ming-chao

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract** The purpose of this work is to develop an in-pipe robot for cleaning in pipelines with diameters of 200mm-250mm. Basing on the screw locomotion and holding mechanisms, which will make the wheel pipe-robot adapt to the pipe environment automatically, a self-adaptive pipe-robot is designed and studied. The 3D model of the pipe-robot had been made on three-dimensional modeling software-CATIA. Meanwhile, CATIA analysis had been used in the checking key parts of the in-pipe robot, which could give a strong support to operation reliability and get a better design objectives.

**Key words** selfadaptability, pipe-robot, screw locomotion