

光传输管道清洗机器人控制系统设计与研究

刘 雷,赵吉宾,陈月玲,刘殿海
(中国科学院 沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:在对光传输管道的结构特点进行调研分析基础上,对用于清洗此类管道的机器人控制系统进行了研究。设计了包括视觉系统和机器人行走控制两部分的运动控制系统。视觉系统负责采集数据并对数据进行处理后计算机器人的偏移量和偏移角度;机器人行走控制主要由纠偏控制与舵角控制两部分构成,形成一个以舵角为被控对象的闭环控制系统,基于视觉系统实时获取的偏差信息,通过控制算法进行在线实时纠偏,不断消除位姿偏差达到机器人跟随管道中心线的目的。该机器人运动过程匀速、平稳,结构简单,控制灵活,系统工作稳定,在直线行走过程中,行走 10m 后机器人距离中心偏差 $\leq 1\text{cm}$,其为进一步对光传输管道的污染控制进行研究提供了平台。

关键词:光传输,管道清洗机器人,控制系统

中图分类号:TH16;TP273 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2016)02-0110-03

Research and Design of Optical Transmission Pipeline Cleaning Robot Control System

LIU Lei, ZHAO Ji-bin, CHEN Yue-ling, LIU Dian-hai
(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract Based on the analysis of optical transmission pipeline's structure, it developed a specific cleaning robot for the pipeline. It mainly introduced the cleaning robot control strategy and hardware design. This system is divided into visual system and robot control. Visual system is responsible for collecting data and dealing with data collected after calculating the offset of the robot; walking control is mainly composed of deviation and rudder control, forming a rudder angle as the controlled object of closed loop control system based on visual system, the deviation of real-time access to information through on-line real-time correction control algorithm, to eliminate constantly position deviation to follow the center line. In the process of walk straight, after the robot walking 10m, deviation from the center line is 1cm or less. The robot has simple structure, flexible control, system stability. It provides a platform for further research of optical transmission pipeline's pollution control.

Key Words Optical Transmission; Pipeline Cleaning Robot; Control System

1 引言

大功率激光装置中的大部分透镜和反射镜以及承载这些光学元件的金属框架都暴露在光传输管道内。尽管光传输管道内部的光学元件都经过在百级环境中清洗、装校和运行,但经过打靶后,光传输管道内部的环境会出现恶化的情况。长期使用会导致光学元件表面沉积大量的污染物,表面洁净度急剧劣化并导致光学元件损伤^[1]。笔者所在的课题组针对光传输管道安装完毕后很难将其拆卸进行离线清洗的情况,研制了一种新型光传输管道清洗机器人,用于对光传输管道进行在线洁净处理。这里重点介绍这种新型光传输管道清洗机器人的控制系统,实验表明本控制系统稳定性好,能够控制机器人较好的跟随管道中心线前进后退,具有较快的响应速度。

2 光传输管道清洗机器人总体设计

光传输管道清洗机器人主要由移动平台、吸尘设备以及视觉测量系统构成,为实现机器人在管道内保持高精度的直线行走,经过研究比较后,选择车式移动方式。这种方式驱动与转向机构独立^[2-3],有利于保证机器人在管道内沿管道中心线行走的精度。

管道清洗机器人的控制与一般工业控制不同,由于其体积受到管道直径限制,且金属管道对无线电波有屏蔽作用^[4],所以本设计采用有线遥控方式,机器人的运动载体拖带线缆深入管道进行作业。为了减少车体负重,本设计中将电控系统分为车载电路和控制箱两部分,两者由多芯电缆相连,机器人上只保留一个工业相机和两个线结构光。

来稿日期:2015-08-04

作者简介:刘雷(1988-)男,黑龙江大庆人,硕士研究生,研究实习员,主要研究方向:智能控制,机器人学,新型电力变换器

管道清洗机器人的控制主要分为视觉系统和机器人行走控制两部分。视觉系统负责采集数据,对采集到的数据进行处理后,计算机的偏移量和偏移角度。机器人行走控制主要由纠偏控制与舵角控制两部分构成,形成一个以舵角为被控对象的闭环控制系统。基于视觉系统实时获取的偏差信息,通过控制算法进行在线实时纠偏,不断消除位姿偏差达到机器人跟随管道中心线的目的。

3 视觉系统设计

视觉传感装置如图 1 所示。包括一个工业相机和两个线结构光,视觉传感装置安装于车体一侧,两个线结构光平行放置于相机两侧,垂直于车体中轴。

视觉系统的设计主要分为三部分:视觉传感器的标定、对采集的图像进行处理以及计算车载机器人偏移量和偏移角度,下面详细说明视觉系统的工作流程。

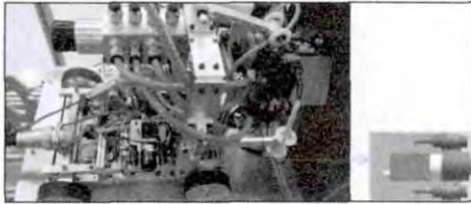


图 1 光传输管道清洗机器人样机

Fig.1 The Prototype of Optical Transmission Pipeline Cleaning Robot

3.1 视觉传感器标定

首先标定相机内参数,通过建立柔性靶标,令其中一个靶标作为基准柔性立体靶标坐标系,以子靶标之间位置关系不变为约束条件,将各子靶标特征点的局部坐标统一到柔性立体靶标坐标系下,建立以重投影误差为最小的目标函数,采用非线性优化方法得到摄像机参数的最优解,然后利用得到的相机内参数分别标定两个线结构光平面,多次移动共面靶标计算不同方向激光条纹直线的消隐点,并对其拟合直线得到光平面的消隐线,完成光平面法向的标定。根据交比不变原理计算共面靶标上标定点间的距离,以其为约束来标定剩余参数。最后定义优化目标函数,以已求得参数为初值进行非线性优化,得到结构光平面参数。

3.2 图像处理方法

利用上述标定的相机进行图像采集以及数字化存储,首先对采集的图像进行高斯平滑处理,减少图像噪声。其中,采用大小为(3×3)的高斯滤波器模板,高斯内核在 X 方向的标准偏差为 1.2,高斯内核在 Y 方向的标准偏差为 0.5。

为了提高图像的清晰度,需要调整图像的对比度以增强管道壁与结构光光条的对比度。由于结构光条纹相对较为明显,使用最大类间方差 OSTU 方法进行全局自适应阈值分割,使得前景和背景两类的类间方差最大,确定最优的灰度分割阈值,提取出感兴趣的前景光条纹区域。

对分割后的图像进行开运算,用来消除光条纹区域周围的杂点,分离出光条纹,平滑光条。为了避免管道中存在水迹、光照、管道表面反光性等干扰,进而提取图像中的轮廓,去除轮廓区域面积较大和较小的区域。

令 $P(x, y)$ 是检测到的轮廓上的像素点,其中 $i=1, 2, 3, \dots, W$,

式中: W —点数; x, y —像素坐标值,遍历所有的点,如果 $x > width/2, P_i = P_i$, 式中: $width$ —图像宽度; P_i —相机右侧结构光发射到管道壁上的点;如果 $x < width/2, P_i = P_i$, 式中: P_i —相机左侧结构光发射到管道壁上的点。

将上述得到的点去畸变,并转换到图像的物理坐标系下,然后通过标定好的两组光平面参数将其分别转换到相机坐标系下;将 P_i 和 P_i 坐标分别取平均值,降低检测误差,得到两个稳定的平均点。

3.3 计算车载机器人偏移量和偏移角度

为了计算车体处于管道中心线基准位置处相机光心离管道壁的距离,已知管道的宽度 W ,将车体放置在管道的中心位置处,利用相机采集到的图像,用图像处理技术检测光条上点相对于相机的三维点坐标,可以得到光心点离管道壁的距离 L 。相机光心点与车体的中心位置横向距离为 $N=W/2L$ 。

然后按照式(1)计算小车的偏转角和相机光心位置处距离基准位置的偏移量。

$$\begin{cases} \theta = \frac{(P1_z - P2_z)}{(P1_x - P2_x)} & P1_x \neq P2_x \\ \theta = 0 & P1_x = P2_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} d = (P2_x + |P2_x| * \tan\theta_1) * \cos\theta_1 - L & P1_z > P2_z \\ d = (P1_x + |P1_x| * \tan\theta_1) * \cos\theta_1 - L & P1_z < P2_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ —小车的偏转角; $P1_x, P1_z$ —相机右侧线结构光平均 x 和 z 坐标值; $P2_x, P2_z$ —相机左侧线结构光平均 x 和 z 坐标值; d —相机光心位置处距基准位置的偏移量; $\theta_1 = \theta * 180/\pi$; L —车体在管道中心线基准位置处相机光心离管道壁的距离。

实验中以车体前端的舵机中心点为转动控制点,因此需要将上述计算得到的 θ 和 d 转换到舵机的中心点位置处,转换关系如式(2)计算:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \theta_1 \\ d_2 &= d + m * \sin\theta_2 + n * (\cos\theta_2 - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: θ_2 —以舵机中心点为参考点的车体偏移角度; d_2 —以舵机中心点为参考点的偏移量。

4 机器人管道行走控制设计与分析

本设计要求机器人在管道中运行时,能够按理想的速度沿管道中心线精确行走,以避免与管道内壁发生接触,刮伤管道内壁,所以可将机器人管道的控制视为车式移动机器人的路径跟随问题,管道中心线即是所要跟随的路径。

其控制流程如下:首先进行车身的状态检测,通过视觉系统获得该时刻(记为第 i 次)的偏差信息为 d_{ei}, θ_{ei} ,通过驱动电机的反馈信息及内存的存储信息获得此时的速度信息与舵角信息 u_i, ϕ_i ,然后将以上信息作为纠偏控制的输入量,经过纠偏控制算法分析后,得出消除该时刻的偏差,舵机在下一时刻转过的角度,即下一时刻的目标舵角大小 ϕ_{i+1} ,获得下一时刻的目标舵角后,通过控制舵机达到该目标值即完成了一次控制流程。通过在线实时闭环控制,不断消除偏差,使机器人精确跟踪管道中心线。

根据 Ackerman 理论,四轮车式移动机器人的运动学模型可

以简化为二轮自行车模型^[6-7]，在 Frénet 坐标系下建立机器人的运动学模型，如图 2 所示。图中 $\alpha\theta y$ 坐标系—Frénet 标架， XOY —惯性坐标系。

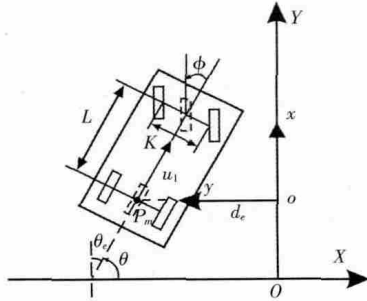


图 2 Frénet 坐标系下的二轮自行车模型

Fig.2 Two Wheel Bike Model in Frénet Coordinate System

机器人运动学模型表达式如下：

$$\begin{cases}
 \dot{x} = u_1 \cos\theta \\
 \dot{y} = u_1 \sin\theta \\
 \dot{\theta} = u_1 \tan\phi/L \\
 \dot{\theta}_e = \dot{\theta} (\theta_e = \theta - \frac{\pi}{2}) \\
 \dot{d}_e = -\dot{x}
 \end{cases} \quad (3)$$

式中 ϕ —转向轮转角 u_1 —驱动轮轴中点的速度，在某一瞬时为不变量 L —前后轮轴距。

为转化为 $\begin{cases} \dot{z}_1 = v_1 \\ \dot{z}_2 = v_1 \cdot z_3 \\ \dot{z}_3 = v_1 \cdot z_4 \\ \dot{z}_4 = v_2 \end{cases}$ 链式形式，取 $\begin{cases} z_1 = y \\ z_2 = d_e \\ z_3 = \tan\phi \\ z_4 = \tan\theta_e \end{cases}$ ，并计算 $z_4 = \tan\phi$

$L \cos^3 \theta_e$ 得，设计如下比例反馈控制律 $v_2 = [-|v_1|k_2 - v_1k_3 - |v_1|k_4] \cdot [z_2 \ z_3 \ z_4]^T$ ，

得到闭环子系统：

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v_1 & 0 \\ 0 & 0 & v_1 \\ -|v_1|k_2 & -v_1k_3 & -|v_1|k_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据线性系统理论，当参数 k_2, k_3, k_4 满足 Hurwitz 稳定条件，就能使系统在原点处渐进稳定，从而有 $(\theta_e, d_e, \phi) \rightarrow 0$ 。根据变量关系可以求出转向轮转角在任一时刻的大小，经过一定函数关系转换为舵机的舵角后，作为下一次舵角控制的目标控制量。

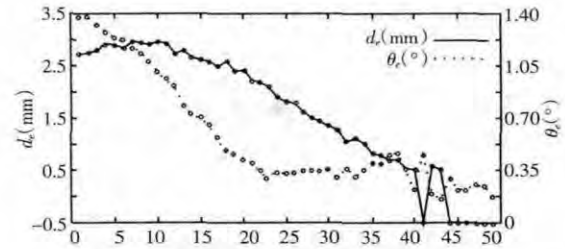
5 实验结果分析

设定机器人前进速度 0.06m/s，后退速度 0.01m/s，根据清洗工艺要求后退时机器人每后退 7cm 停止运行一段时间进行清洗作业，相机采样周期为 100ms，舵机调整周期为 500ms。行进距离为 1m 和 2m 时计算得到的偏移量 d_e 和偏移角度 θ_e ，纵坐标是计算次数，如图 3 所示。

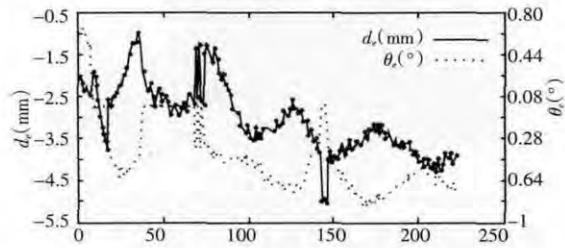
显示在机器人前进过程中 d_e 成下降趋势，如图 3(a)、图 3(b)所示。在后退时机器人每隔 7cm 停一次，局部上显示在后退中 d_e 会在一定范围内波动，如图 3(c)、图 3(d)所示。但从整个过

程上看 d_e 仍成下降趋势，分析图 3 中 θ_e 和 d_e 的变化趋势，其基本一致， θ_e 会在 d_e 变化率较大的地方波动，图 3(c)和图 3(d)显示当 d_e 较小时 θ_e 不变化，前进时的偏移范围不大于 0.2mm，后退时的偏移范围不大于 4mm。

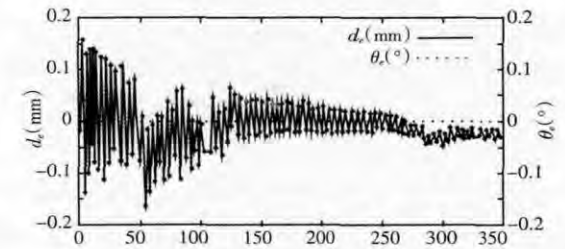
从图 3 中可以看出机器人的位置误差和偏角误差在前进过程中会从初始位置的较大值逐渐变小，后退时由于每次行进距离较小，位置误差和偏角误差在系统允许范围内时舵机不动作，超出允许范围后进行微调。



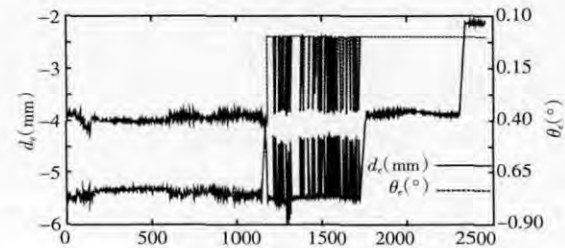
(a)前进 1m 时的 d_e 和 θ_e



(b)前进 2m 时的 d_e 和 θ_e



(c)后退 1m 时的 d_e 和 θ_e



(d)后退 2m 时的 d_e 和 θ_e

图 3 行进距离 1m 和 2m 时的 d_e 和 θ_e

Fig.3 d_e and θ_e for Walking Distance of 1m and 2m

实验表明机器人具备前进、后退、停止、跨越沟槽、转向运动能力，运动过程匀速、平稳，在直线行走过程中机器人距离中心偏差能够达到 ≤ 1 cm 的精度。

6 结论

在进行实际使用和测量过程中，机器人体现出了较高的自适应与越障能力，能够顺利爬越连接处。机器人工作的状态与视频信号在计算机上可以作为文件保存起来，便于日后查看。具备

(下转第 116 页)

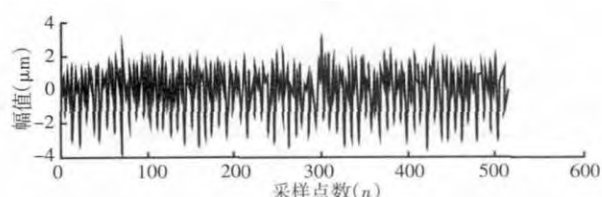


图 10 小波滤波提取粗糙度信息
Fig.10 Wavelet Filter Extracts Roughness Information

表 1 表面粗糙度参数
Tab.1 Surface Roughness Parameters

评定参数	R_p	R_v	R_z	R_q	R_a
小波滤波	3.536	2.681	6.217	0.667	0.786
高斯滤波	3.613	2.687	6.30	0.726	0.790

计算得到高斯滤波计算粗糙度相对误差为 1.25%，而二代小波提取粗糙度的相对误差为 1.75%。相对误差均在 2.5%以内，验证了所采用的方法的正确性。在方法上，高斯滤波较小波滤波更为简便快速，可通过一次有效滤波提取粗糙度信息，摆脱了小波滤波多尺度分解和多次提取的复杂性，大大的提升了滤波速度，在精度上，高斯滤波比小波滤波提取的粗糙度信息的精度有了更好的提升。

5 结论

传统的高斯滤波器设计困难，滤波过程复杂，在稳健高斯滤波算法的基础上建立了滤波的数学模型，得到了粗糙度提取的算法过程。并根据滤波器逼近原理在 MATLAB 仿真下设计了高斯逼近滤波器，与传统的高斯滤波理论相比，数字型滤波器提高了传统高斯滤波器滤波的仿真速度，同时简化了传统高斯滤波的滤波过程，实现了简单快捷的滤波效率。同时对比分析二代小波的滤波方法，结合相关原理和软件实现，对加工零件表面完成了滤波操作，得到了零件表面的粗糙度信息。并二者结果进行标胶分析，验证了理论和软件操作的合理性，高斯滤波在精度和速度上有了很大的提升。

参考文献

[1] ISO 16610-21 Geometrical Product Specifications(GPS)-Filtration-Part 21 Linear Profile Filters: Gaussian Filter[S].Geneva: ISO, 2011.
[2] 王金星.新一代产品几何规范(GPS)不确定度理论及应用研究[D].武汉:华中科技大学, 2006:75-78.

(Wang Jin-xing.Improved Geometrical Products Specification (GPS) Uncertainty Theory and Application [D].Wuhan :Huazhong University of Science and Technology, 2006 :75-78.)
[3] 曾文涵, 谢铁邦, 蒋向前.表面粗糙度的稳健提取方法研究[J].中国机械工程, 2004, 15(2) :127-130.
(Zeng Wen-han, Xie Tei-bang, Jiang Xiang-qian.Research on Method of Surface Roughness [J].China Mechanical Engineering, 2004, 15 (2) : 127-130.)
[4] 李慧芬, 蒋向前, 李柱.高斯滤波稳健性能的研究与改进[J].仪器仪表学报, 2004, 25(5) :633-637.
(Li Hui -fen, Jiang Xiang -qian, Li Zhu.Study and Improvement of Robust Performance of Gaussian Filtering[J].Chinese Journal of Science Instrument, 2004, 25(5) :633-637.)
[5] Liu Sai, Zhou Ming, Wang Yan -jun.Method to extract information of surface roughness in three dimensions of particle reinforced aluminum matrix composites [J].Journal of Harbin Institute of technology, 2012, 44 (3) :40-43.
[6] 艾传智, 杨东军, 赵福令.C/C 复合材料切削表面粗糙度的测量评定与影响因素研究[J].航空精密制造技术, 2005, 41(6) :31-34.
(Ai Chuan-zhi, Yang Dong-jun, Zhao Fu-ling.Study on Measurement and Evaluation of Cutting Surface Roughness of C/C Composite and the Influential Factors [J].Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(6) :31-34.)
[7] 王建军, 徐西鹏, 黄辉.高斯滤波在花岗岩表面粗糙度研究中的应用[J].计量学报, 2006, 27(2) :104-106.
(Wang Jian-jun, Xu Xi-peng, Huang Hui.Application of Gauss Filtering in Study of Roughness to Granite Surface Profile[J].Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(2) :104-106.)
[8] 孔明, 管清岩, 赵军.一种快速稳健高斯回归滤波算法[J].中国机械工程, 2014, 25(6) :776-779.
(Kong Ming, Guan Qing -yan, Zhao Jun.A Fast Algorithm of Robust Gaussian Regression Filter [J].China Mechanical Engineering, 2014, 25 (6) :776-779.)
[9] Seewing J.Linear and robust Gaussian regression filters [J].Journal of Physics: Conference Series, 2005, 13(3) :254-257.
[10] 王筱艳, 汪天富, 李德玉.一种改进的各向异性高斯滤波算法[J].西南民族大学学报, 2007, 33(1) :120-123.
(Wang Xiao-yan, Wang Tian-fu, Li De-yu.Improves bit-allocation algorithm for Anisotropic Gaussian filter[J].Journal Southwest University for Nationalities Natural Science Edition, 2007, 33(1) :120-123.)
[11] Xu Jing-bo, Yuan Yi -bao, Cui Xiao -meng.Rational Approximation Implementation Approach to Determine Gaussian Filtering Mean Line in Surface Roughness Measurement[J].Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(5) :1347-1352.

(上接第 112 页)

前进、后退、停止、跨越沟槽、转向运动能力，运动过程匀速、平稳，在直线行走过程中，行走 10m 后机器人距离中心偏差 $\leq 1\text{cm}$ ，具备(35×9)mm 的沟槽跨越能力，可清洗管道长度 $\geq 7\text{m}$ 。整套控制系统较好地实现了协调驱动控制，实现了机器人设计功能，经过实践检验具有较高的可靠性。

参考文献

[1] 苗心向, 袁晓东.高功率激光装置光传输管道污染规律及对光学表面损伤性能的影响[J].强激光与粒子束, 2015, 27(3) :1-6.
(Miao Xin-xiang, Yuan Xiao-dong.Contamination in beampath and laser induced damage of optics in high power laser system[J].High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3) :1-6.)
[2] 刘清友, 李雨佳.主动螺旋驱动式管道机器人[J].机器人, 2014, 36(6) :711-718.
(Liu Qing-you, Li Yu-jia.An Active Helical Drive In-pipe Robot[J].ROBOT, 2014, 36(6) :711-718.)
[3] 张延恒, 冯文龙.柔性蠕动管道机器人的牵引力及软轴结构稳定性分析[J].机器人, 2013, 35(4) :477-483.
(Zhang Yan-heng, Feng Wen-long.Traction Force and Flexible Shaft Stability Analysis of Flexible Squirming Pipe Robot[J].ROBOT, 2013, 35

(4) :477-483.)
[4] 何琴.中央空调管道清洗机器人控制系统设计[J].机电工程, 2011(8) :944-947.
(He Qin.Design of central air conditioning duct cleaning robot control system [J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011 (8) : 944-947.)
[5] 金松, 毛利民, 过玉清.非等径、变截面管道清洗机器人控制系统研究[J].电气传动, 2006(7) :26-29.
(Jin Song, Mao Li-min, Guo Yu-qing.Research of control system of the ventilating duct cleaning robot[J].Electric Drive, 2006 (7) :26-29.)
[6] 谷正气, 李健, 张勇.一种高分辨率可见光遥感影像中车辆目标检测方法[J].测绘通报, 2015(1) :121-123.
(Gu Zheng -qi, Li Jian, Zhang Yong.A novel method to detect vehicle targets in high-resolution remote sensing images[J].Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(1) :121-123.)
[7] 许冯平, 赵志聪.管内机器人管径适应调节机构分析[J].机械设计与制造, 2014(6) :213-216.
(Xu Feng -ping, Zhao Zhi -cong, Zhou Yan.Characteristics analysis of a pipe-diameter adapting and adjusting mechanism for pipe robot[J].Mechanical Design & Manufacture, 2014(6) :213-216.)