

吊盘稳车机构调平控制策略研究与实验验证

邵杏国,朱真才,曹国华,李一磊

(中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:针对吊盘稳车机构在运行过程中吊盘倾斜和钢丝绳张力分布不均匀的问题,基于吊盘稳车机构逆向运动学模型设计了吊盘姿态调平和钢丝绳张力均衡控制器。该控制器以吊盘位姿和钢丝绳张力作为反馈信息,通过调节4台稳车电机的运行速度实现吊盘在升降过程中姿态调平和张力均衡的目的。控制器的控制性能通过吊盘提升和下放调平控制实验进行检验和验证,实验结果表明:在提升和下放过程中,控制器能够在很短的时间内调平吊盘姿态,均衡钢丝绳张力分布。

关键词:姿态调平;张力均衡;吊盘稳车机构;逆向运动学

中图分类号:TD538

文献标志码:A

Auto-leveling control for sinking winch mechanism and experimental validation

SHAO Xing-guo, ZHU Zhen-cai, CAO Guo-hua, LI Yi-lei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: During the motion of sinking winch mechanism, the platform is prone to tilt and the tension distribution of the cables is not even, which endangers the workers on the platform. An auto-leveling controller was proposed to make the platform keep level and the tension distribution become more even based on the inverse kinematics of sinking winch mechanism. This controller took the pose of the platform and the tensions of cables as the inputs, and outputs the speed variation of the motors to adjust the orientation of the platform and tensions of cables. Two experiments for lifting up and lowering down the platform were performed to validate the performance of the controller. And the experimental results demonstrate that the controller can level the platform and even the tension distribution of the cables effectively.

Key words: orientation-leveling; tension-even; sinking winch mechanism; inverse kinematics

吊盘稳车机构(图1)是立井建井施工过程中的重要的设备,它为工人提供作业平台,同时也是挖掘设备(如液压站、挖岩机等)的安装平台。在建井施工过程中,由于稳车运行不同步和钢丝绳张力分布不均匀导致吊盘在升降过程中很容易发生倾斜。倾斜的吊盘势必会威胁吊盘上作业工人的人身安全,甚至造成重大安全事故^[1]。因此,开展吊盘升降过程中姿态调平和钢丝绳张力均衡控制研究对吊盘稳车机构安全运行具有重大意义。

钢丝绳和天轮的4个切点(悬吊点)构成的矩形完全等同于钢丝绳和吊盘的4个连接点构成的矩形,因此,要使吊盘在升降过程中姿态保持水平和钢丝绳张力均衡,只需要保证4根悬吊钢丝绳长度相等。为了减少吊盘升降过程中钢丝绳长度差,谢志明^[2]采

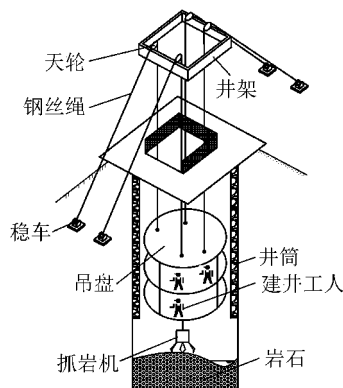


图1 吊盘稳车机构

Fig. 1 Sinking winch mechanism

用稳车集中控制方式代替传统的独立控制方式。这种方式虽在一定程度上改善了稳车运行的同步性,但

要求稳车、驱动电机、减速器和钢丝绳都必须采用相同的规格和型号,缺少灵活性。同时,滚筒上绕绳层数不同,导致滚筒绕绳直径存在偏差,再加上电机转速之间的偏差,使得吊盘在运行过程中依然会发生倾斜。薄忠成^[3]采用变频器对稳车控制系统进行改造,提高了电机调速精度。钱乔国等^[4]除采用变频器实现电机无级调速外,还采用编码器测量4根钢丝绳的收放长度,反馈给控制器以减少钢丝绳长度偏差。这种方法虽然进一步改善了吊盘的调平性能,但还存在两点不足:① 编码器和钢丝绳之间的打滑会导致测量不准确;② 没有测量出钢丝绳的弹性伸长量。易建强等^[5-6]针对一种4绳悬吊机构设计了模糊控制器以调平悬吊平台和均衡钢丝绳张力,然而,模糊控制器的设计过度依赖于操作经验。房怀英^[7]、陈代谢^[8]和盛英^[9]等分别针对各自特殊的应用工况提出了平台调平控制策略,然而,这些策略并不适用于吊盘稳车机构。前人的研究工作虽然改善了稳车运行的同步性,提高了吊盘运行过程中的水平度,但是没有从根本上解决吊盘在升降过程中的倾斜和钢丝绳张力不均匀的问题。为了彻底解决这一问题,本文首先构建了吊盘稳车机构的模拟实验系统,其次给出一种吊盘位姿和钢丝绳张力的检测方法,然后建立吊盘稳车机构逆向运动学模型,最后基于逆向运动学模型设计调平控制器。实验结果表明所设计控制器不仅能调平吊盘姿态,而且能均匀化钢丝绳张力分布。

1 模拟实验系统

构建的吊盘稳车机构模拟实验系统如图2所示,该系统可分为机械结构和检测控制系统两部分。机械结构部分由井架、稳车、天轮、钢丝绳和吊盘构成,模拟现场的吊盘稳车机构;检测控制系统由传感器、数据采集器、PLC控制柜、变频器控制柜和计算机构成,用于检测系统的运行状态,并对4台稳车电机转速和转向进行有效控制。为了调整吊盘的姿态角和钢丝绳张力,该系统设计了电机点动正反转功能,悬吊钢丝绳长度能够自由调节。同时,该系统还设计了电机联动控制功能,控制4台电机同时正转(或反转)从而提升(或下放)吊盘。

2 位姿和张力的检测

吊盘稳车机构模拟实验系统的运行状态参数包括吊盘位姿和钢丝绳张力,其检测原理如图3所示。在吊盘上选取定点 P ,吊盘的位置可由 P 点的空间坐标表示。点 P 的空间坐标由3个拉线位移传感器测

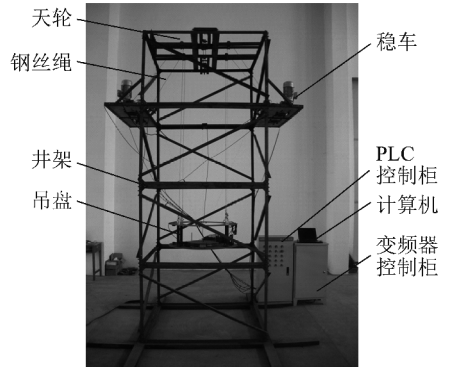


图2 吊盘稳车机构模拟实验系统

量^[10],测量方法是:将3个拉线位移传感器安装在井架的 C_1, C_2 和 C_3 位置;将拉线传感器的伸出线头都连接到 P 点;测出拉线长度 $l_i (i=1, 2, 3)$;点 C_1, C_2 和 C_3 的空间坐标已知,求解非线性方程组 $|C_i P| = l_i (i=1, 2, 3)$ 得到 P 点坐标。吊盘的姿态角可通过微惯性单元直接测出横滚角、俯仰角和偏航角^[11-12]。将拉力传感器连接在吊盘和钢丝绳之间可以测出钢丝绳张力。

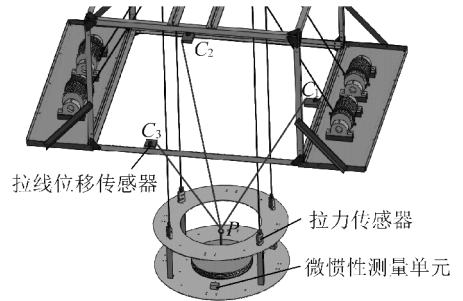


图3 系统状态参数检测原理

Fig. 3 Schematic diagram for measuring the state variables

3 逆向运动学模型

图4是吊盘稳车机构逆向运动学分析的原理。图中的 $A_1 \sim A_4$ 代表天轮和钢丝绳之间悬吊点, $B_1 \sim B_4$ 代表钢丝绳与吊盘间的连接点。在矩形 $A_1 A_2 A_3 A_4$ 的中心定义惯性坐标系 $oxyz$,在定点 P 建立固联在吊盘上的随动坐标系 $PXYZ$ 。这样,吊盘的位置由点 P 在惯性坐标系 $oxyz$ 中的坐标 $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ 表示,吊盘的姿态可以由吊盘绕随动坐标系 $PXYZ$ 的3个轴转动的角度 $\boldsymbol{\theta} = [\alpha, \beta, \varphi]^T$ 表示,其中 α 为横滚角; β 为俯仰角; φ 为偏航角。

当吊盘处于位姿 $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 时,点 $B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 在惯性坐标系 $oxyz$ 中的坐标 $\mathbf{x}_{Bi} = [x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}]^T$ 为

$$\mathbf{x}_{Bi} = \mathbf{x} + \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{X}_{Bi}$$

其中, $\mathbf{X}_{Bi} = [X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}]^T$ 为点 B_i 在随动坐标系 $PXYZ$ 中坐标; $\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ 为随动坐标系 $PXYZ$ 相对惯性

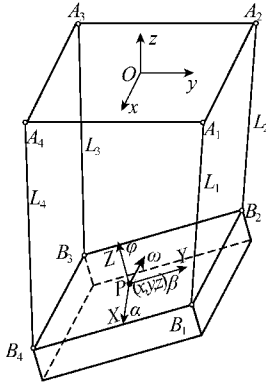


图 4 逆向运动学分析原理

Fig. 4 Schematic diagram for inverse kinematics analysis

坐标系 $oxyz$ 的旋转变换矩阵, $R(\theta)$ 可表示为

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} C_\beta C_\varphi & -C_\beta S_\varphi & S_\beta \\ S_\alpha S_\beta C_\varphi + C_\alpha S_\varphi & -S_\alpha S_\beta S_\varphi + C_\alpha C_\varphi & -S_\alpha C_\beta \\ -C_\alpha S_\beta C_\varphi + S_\alpha S_\varphi & C_\alpha S_\beta S_\varphi + S_\alpha C_\varphi & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix}$$

其中, $C_{(\)}$ 表示余弦运算; $S_{(\)}$ 表示正弦运算。

至此,点 A_i 到点 B_i 的距离 $L_{A_i B_i}$ 可表示为

$$L_{A_i B_i}(\mathbf{x}, \theta) = \|\mathbf{x}_{A_i} - \mathbf{x} - R(\theta) \cdot \mathbf{x}_{B_i}\|$$

式中, \mathbf{x}_{A_i} 为点 A_i 在惯性坐标系 $oxyz$ 中的坐标。

吊盘稳车机构的逆向运动学模型建立了吊盘的位姿 (\mathbf{x}, θ) 与钢丝绳长度 $L_i (i=1, 2, 3, 4)$ 之间的关系。当吊盘在空间某一位姿 (\mathbf{x}, θ) 保持静态平衡时,若第 i 根钢丝绳张力 $F_i > 0$ (钢丝绳张紧),则钢丝绳长度 $L_i > L_{A_i B_i}$; 若 $F_i = 0$ (钢丝绳松弛),则钢丝绳长度 $L_i < L_{A_i B_i}$ 。综上,吊盘稳车机构的逆向运动学模型为

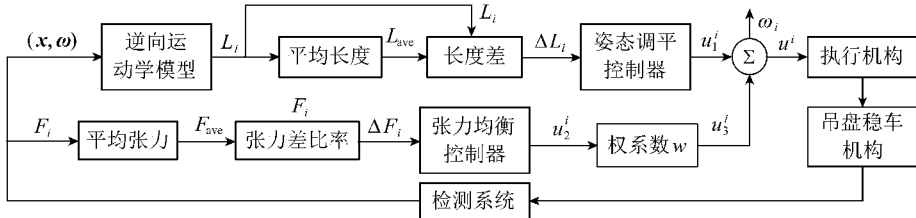


图 5 吊盘提升过程调平控制器结构

Fig. 5 Structure of leveling controller when lifting up the platform

假设所有钢丝绳都处于张紧状态,在检测出吊盘位姿 (\mathbf{x}, θ) 的条件下,由逆向运动学模型可以计算钢丝绳长度 $L_i (i=1, 2, 3, 4)$, 计算钢丝绳平均长度

$$L_{ave} = (\sum_{i=1}^4 L_i) / 4 \text{ 及钢丝绳长度差 } \Delta L_i = L_i - L_{ave} \text{。}$$

姿态调平控制器根据钢丝绳长度差 ΔL_i , 计算出电机转速变化量 $u_1^i (i=1, 2, 3, 4)$, 用于消除钢丝绳长度偏差,其内部结构如图 6 所示,它由 4 个相同的变速积分 PID 控制器组成。

变速积分 PID 控制的基本思想是设法改变积分项累加速度,使其与偏差大小相适应:偏差越大,积分

$$\begin{cases} L_i = L_{A_i B_i} & (F_i > 0) \\ L_i > L_{A_i B_i} & (F_i = 0) \end{cases}$$

4 调平控制器的设计

由吊盘稳车机构的逆向运动学分析可知,在已知吊盘位姿和钢丝绳张力的条件下可以得到 4 根钢丝绳的长短关系,这为调平控制器设计提供了参考依据。图 5 给出了吊盘提升过程中的调平控制器结构,该控制器主要由吊盘姿态调平控制器和钢丝绳张力均衡控制器构成。姿态调平控制器既是主控制器,也是粗调控制器,它根据逆向运动学模型得到的钢丝绳长度偏差计算 4 台电机转速变化量 $u_1^i (i=1, 2, 3, 4)$; 张力均衡控制器是辅助控制器,也是精调控制器,它根据钢丝绳张力差比率计算 4 台电机转速变化量 $u_2^i (i=1, 2, 3, 4)$, 该变化量 u_2^i 乘以权系数 w 得到控制量 u_3^i , 这里引入权系数 w 的目的是调节张力均衡控制器控制作用的强弱。将姿态调平控制量 u_1^i 、张力均衡控制量 u_3^i 和电机基准速度 ω_i 相加后的结果 u^i 传送给执行机构(变频器)控制 4 台电机的转速以实现吊盘姿态调平和钢丝绳张力均衡的控制目标。吊盘下放过程的控制器结构与提升过程控制器结构几乎相同,唯一的区别是传送给执行机构的控制量为 $u^i = \omega_i - u_1^i - u_3^i$ 。接下来,详细介绍姿态调平控制器和张力均衡控制器的设计过程。

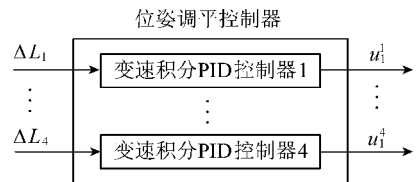


图 6 姿态调平控制器

Fig. 6 Orientation-leveling controller

越慢,反之则越快^[13]。采用变速积分的好处是:当系统偏差大时,积分作用减弱甚至全无,可以避免产生超调和积分饱和,有利于提高吊盘运动过程中的平稳性;当系统偏差小时,积分作用增强,有利于消除系统

静差,提高系统控制精度^[14-15]。

为实现变速积分,设置变速积分系数 $f_i[\Delta L_i]$,当 $f_i[\Delta L_i]$ 增大时, f_i 减小,反之增大。为此定义 f_i 为

$$f_i = \begin{cases} 1 & (|\Delta L_i| \leq a) \\ \frac{b - |\Delta L_i|}{b - a} & (a < |\Delta L_i| \leq b) \\ 0 & (|\Delta L_i| > b) \end{cases}$$

式中, a 和 b 分别为长度差的边界值。

至此,第 $i(i=1,2,3,4)$ 个变速积分的PID控制算法为

$$u_1^i(k) = K_p \Delta L_i(k) + K_d [\Delta L_i(k) - \Delta L_i(k-1)] / T_s + K_i \left\{ \sum_{j=1}^{k-1} \Delta L_i(j) + f_i[\Delta L_i(k)] \Delta L_i(k) \right\} T_s$$

式中, K_p , K_i 和 K_d 分别是比例、积分和微分系数; T_s 为采样时间; k 为第 k 个采样时刻。

由检测系统得到的钢丝绳张力 $F_i(i=1,2,3,4)$

可计算出钢丝绳平均张力 $F_{ave} = (\sum_{i=1}^4 F_i) / 4$,进而可

定义钢丝绳张力差比率 $\Delta F_i = (F_i - F_{ave}) / F_{ave}$ 。张力均衡控制器根据张力差比率 ΔF_i 计算电机转速变化量 $u_2^i(i=1,2,3,4)$ 用于均衡钢丝绳张力分布。

张力均衡控制器内部结构如图7所示,它由4个相同的张力均衡器组成,每个张力均衡器采用多项式控制律

$$u_2^i(k) = K_1 \Delta F_i^3(k) + K_2 \Delta F_i(k)$$

其中, K_1 和 K_2 为多项式系数。

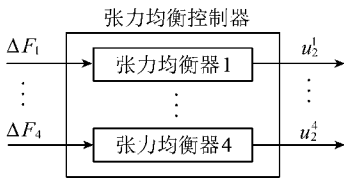


图7 张力均衡控制器

Fig. 7 Tension-even controller

5 实验验证

5.1 提升调平试验

提升调平控制实验步骤如下:首先将吊盘下放到距离地面0.1 m的位置;然后通过电机点动控制功能改变钢丝绳长度,使吊盘处于倾斜状态,此时,吊盘姿态角为 $\alpha = -11.93^\circ$, $\beta = 11.24^\circ$ 和 $\varphi = 13.19^\circ$,4根钢丝绳张力分别为 $F_1 = 114.1$ N, $F_2 = 326.5$ N, $F_3 = 196.5$ N和 $F_4 = 115.9$ N;设定控制器参数,姿态调平控制器参数包括 $K_p = 0.25$, $K_i = 5 \times 10^{-4}$, $K_d = 1 \times 10^{-5}$, $T_s = 0.1$ s, $a = 0.05$ m和 $b = 0.1$ m;张力均衡控制器参数 $K_1 = -0.048$ 和 $K_2 = -0.01$,权系数 $w = 0.4$,电机

运行的基准速度 $\omega_i = 240$ r/min($i=1,2,3,4$)。

提升过程中吊盘姿态角和钢丝绳张力变化过程如图8所示。

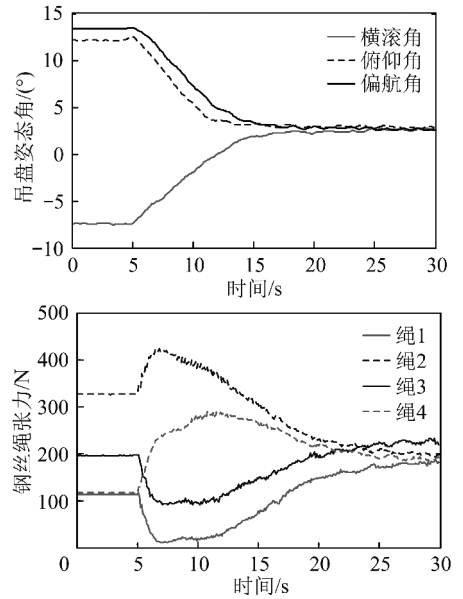


图8 吊盘姿态角和钢丝绳张力(提升过程)

Fig. 8 Orientation of the platform and tensions of cables(lifting up)

由图8可以看出,提升过程中吊盘的姿态角逐渐趋向于0,这表明吊盘在提升过程中由初始的倾斜状态逐渐调平为水平状态,调平后姿态角变化范围为 $\pm 0.5^\circ$ 。在提升过程中4根钢丝绳张力逐渐趋向于200 N,随后在150~250 N之间变化,调节后的钢丝绳张力比初始张力分布更加均匀。由图8还可以看出调平吊盘姿态和均衡钢丝绳张力分布所需要的时间为18 s。

5.2 下放调平试验

下放调平控制实验步骤如下:首先将吊盘提升到距离地面2.5 m的位置;然后通过电机点动控制功能改变钢丝绳长度,使吊盘处于倾斜状态,此时,吊盘姿态角为 $\alpha = -9.48^\circ$, $\beta = 10.55^\circ$ 和 $\varphi = 11.11^\circ$,4根钢丝绳张力分别为 $F_1 = 110.2$ N, $F_2 = 331.2$ N, $F_3 = 178.5$ N和 $F_4 = 149.5$ N;设定控制器参数与提升调平试验中控制器参数相同。下放过程中吊盘姿态角和钢丝绳张力变化过程如图9所示。由图9可知,下放过程中吊盘的姿态角逐渐趋向于0,这表明吊盘在下放过程中由初始的倾斜状态逐渐调平为水平状态,调平后姿态角变化范围为 $\pm 0.5^\circ$ 。在下放过程中4根钢丝绳张力逐渐趋向于200 N,随后在150~250 N之间变化,调节后的钢丝绳张力比初始张力分布更加均匀。图9还表明调平吊盘姿态和均衡钢丝绳张力分布所需要的时间也为18 s。

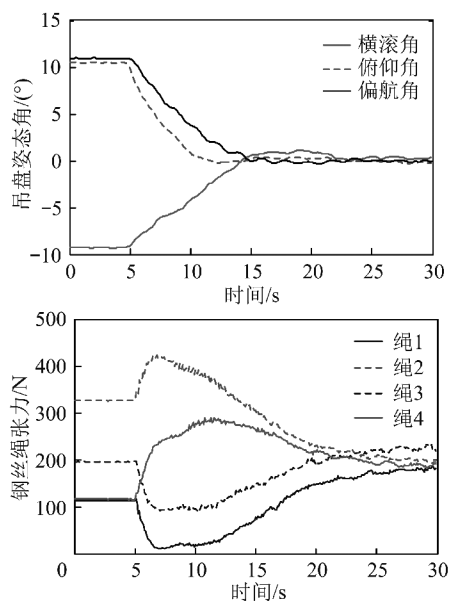


图9 吊盘姿态角和钢丝绳张力(下放过程)

Fig. 9 Orientation of the platform and tensions of cables(lowering down)

6 结 论

(1)建立了吊盘稳车机构逆向运动学模型,在已知吊盘位姿和钢丝绳张力的条件下,由逆向运动学分析可以得到4根钢丝绳的长短关系。

(2)基于逆向运动学模型设计了调平控制器,该控制器主要由吊盘姿态调平主控控制器和钢丝绳张力均衡辅助控制器组成。

(3)吊盘提升和下放过程中的调平控制实验表明所设计的控制器能够实现吊盘升降过程中姿态调平和张力均衡的控制目标。

(4)控制器所采用的控制律为变速积分PID和多项式控制律,这些控制律非常简单,有利于工业实现和应用。

参考文献:

- [1] 王生晖,李秋辉.立井施工事故及防患措施[J].煤炭技术,2001,20(8):33-34.
Wang Shenghui, Li Qiuhui. Accidents and preventive measures in vertical shaft construction[J]. Coal Technology, 2001, 20(8): 33-34.
- [2] 谢芝明.立井多台稳车同步集中控制技术及其应用[J].建井技术,2006,27(4):33-36.
Xie Zhiming. Application of synchronous intent control for multiple winches in vertical shaft[J]. Mine Construction Technology, 2006, 27(4): 33-36.
- [3] 薄忠成,赵彦林.利用ACS800变频器对稳车控制系统的改造[J].煤炭技术,2009(3):22-24.
Bo Zhongcheng, Zhao Yanlin. Reconstruction on the steady vehicle

- with ACS800 transducer[J]. Coal Technology, 2009(3): 22-24.
- [4] 钱乔国,朱真才,黄家贫,等.稳车群变频调速集控系统[P].中国专利:200820036188.5,2009-02-18.
Qian Qiaoguo, Zhu Zhencai, Huang Jiapin, et al. Speed regulation system with transducer for winches group [P]. China Patent: 200820036188.5, 2009-02-18.
- [5] Yu Yi, Yi Jianqiang, Li Chengdong, et al. Fuzzy logic based adjustment control of a cable-driven auto-leveling parallel robot [A]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. St. Louis, USA, 2009: 2102-2107.
- [6] Li Chengdong, Yi Jianqiang, Yu Yi, et al. Inverse control of cable-driven parallel mechanism using type-2 fuzzy neural network [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(3): 459-464.
- [7] 房怀英,杨建红,吴仕平.基于模糊PID控制沥青砂浆车液压调平系统[J].长安大学学报(自然科学版),2011,31(1):98-101.
Fang Huaiying, Yang Jianhong, Wu Shiping. Hydraulic leveling system for asphalt mortar vehicle based on fuzzy PID control strategy [J]. Journal of Chang An University (Natural Science Edition), 2011, 31(1): 98-101.
- [8] 陈代谢,殷伯华,林云生,等.大范围扫描原子力显微镜自动调平控制技术[J].仪器仪表学报,2011,32(1):225-229.
Chen Daixie, Yin Bohua, Lin Yunsheng, et al. Auto leveling control technique for large range atomic force microscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 225-229.
- [9] 盛英,仇原鹰.6腿支撑液压式平台自动调平算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2003,29(5):594-597.
Sheng Ying, Qiu Yuanying. An automatic adjusting algorithm for the hydraulic platform with six legs [J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2003, 29(5): 594-597.
- [10] M Saeed Varziri, Leila Notash. Kinematic calibration of a wire-actuated parallel robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42: 960-976.
- [11] 杜小菁,陈惠蓉,禹洪燕,等.微惯性测量装置的性能试验及分析[J].航空兵器,2007(1):13-17.
Du Xiaojing, Chen Huirong, Yu Hongyan, et al. Performance test and analysis for MIMU [J]. Aero Weaponry, 2007(1): 13-17.
- [12] 邵涛,李明,姜良银,等.基于LabVIEW的miniAHRS型传感器信号采集研究[J].现代机械,2010(3):33-36.
Shao Tao, Li Ming, Jiang Liangyin, et al. Position and orientation controlling of robot base on LabVIEW and miniAHRS [J]. Modern Machine, 2010(3): 33-36.
- [13] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [14] 谭宝成,党莉.变速积分增量式PID在气力除灰控制系统中的应用[J].西安工业大学学报,2010(5):478-481.
Tan Baocheng, Dang Li. The application of variable integral incremental PID in the pneumatic ash control system [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010(5): 478-481.
- [15] Xing Lijuan, Yang Shizhong. Fuzzy-PID controller with variable integral parameter for temperature control in variable air volume air conditioning systems [A]. International Conference on Electrical and Control Engineering [C]. Wuhan, China, 2010: 1050-1053.