

轮-腿复合移动机器人构型控制及越障策略*

鲁京立^{1,2} 卜春光¹

(1 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文构型和越障控制研究的是如何控制机器人的姿态和如何控制机器人以一系列的构型翻越障碍物, 构型及越障控制是轮-腿复合移动机器人技术领域的研究重点, 针对轮-腿复合移动机器人的结构特点以及早期方法存在的不足, 本文提出了在不平整地面上的构型控制方法和针对沟、坎典型地形环境的越障控制策略, 并利用六轮-腿复合移动机器人试验平台开展了验证实验。

关键词: 机器人 构型控制 越障

Control Strategies of Leg-Wheel Hybrid Robot Reconfiguration and Obstacle-Overcoming

Lu Jingli^{1,2} Bu Chunguang¹

(1 Robotics Lab Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016 China;
2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China)

Abstract: In this paper, reconfiguration control and obstacle-negotiation control are the study of how to control the robot's gesture and how to overcome the obstacles via a serial of gestures, these are the intensive topics in the filed of leg-wheel hybrid robot. Based on the analysis of leg-wheel hybrid structure and the disadvantage of early control method, this paper proposes new strategies of reconfiguration control in uneven terrain and auto-overcoming control for channel, ridge etc, These strategies are experimented in a six-leg-wheel hybrid robot, and the results show that these can be effective used in rough terrain.

Key words: robot reconfiguration control obstacle negotiation

1 引言

轮-腿复合移动机器人是在早期轮式移动机器人基础上发展而来的一种新型移动机器人, 由于它既具有轮式机器人的高效机动性, 又具有腿式机器人强的环境适应性和越障能力, 在机器人研究及应用等相关领域受到越来越多的关注^{[1][2]}, 目前最具代表性的研究成果是由洛克西德马丁公司负责开发的多用途通用/后勤装备(MULE)机器人^[3]。

轮-腿复合移动机器人在野外环境下强的越障能力需要根据机器人自身结构特点开发有针对性的构型控制方法来实现。早期构型控制方法^[4]假定机器人与地形环境间精确几何关系已知, 但在野外复杂地形环境下, 要想得到这种严格的几何关系几乎是不可可能的, 因而早期方法很难或无法在野外复杂环境中实现有效应用。

本文针对早期方法的不足以及轮-腿复合移动机构特点, 参考反射控制方法^[5], 提出一种适应野外不平整地面环境的构型控制方法和可实现自主跨越沟、坎等典型障碍的控制策略, 并在 863 资助开发的轮-腿复合移动机器人试验平台上对上述两种方法进行了实验验证。

2 试验平台概述

实验平台为六轮-腿复合移动机器人(见图 1, 以下简称六轮车), 特点如下:

- 1) 采用滑动转向方式;
- 2) 轮、腿采用电机独立驱动;
- 3) 轮驱动电机的控制模式可在速度模式和力矩模式间在线切换。
- 4) 摆腿上装有被动减震机构, 可根据受力不同可在 $\pm 20^\circ$ 范围内绕平衡位置摆动。摆腿的实际角度是由腿部电机控制的输出角和由减震机构

*基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA04Z250、2006AA04Z215 和 2007AA04Z257)资助项目。

产生的被动弹性角共同确定。

- 5) 配有数字罗盘和激光雷达, 用以感知车体的姿态和周围环境中障碍物信息。

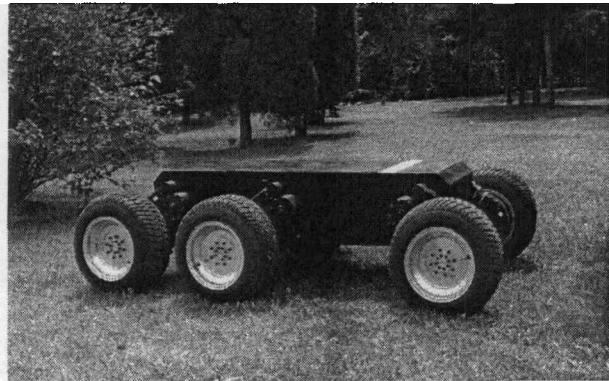


图 1 六轮-腿复合移动机器人

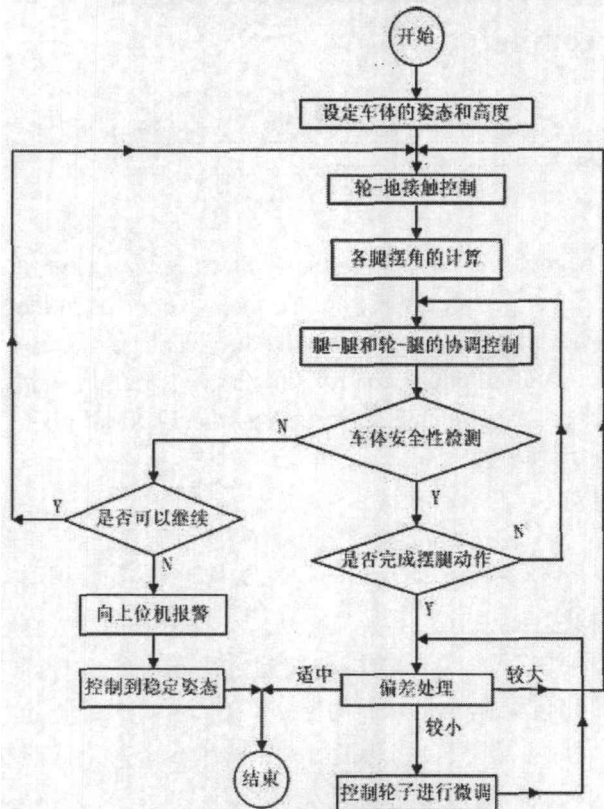


图 2 构型控制流程图

3 构型控制

早期构型控制的研究基于结构化环境假设, 利用机器人和地形环境间的几何关系、机器人自身的结构参数, 建立精确模型来实现构型控制。

这种方法原理简单, 适用于室内结构化环境, 但野外环境地形复杂, 获取精确的地形, 建立机器人与地面间精确的几何关系几乎是不可能的, 因此采用此方法的机器人无法很好的适应野外复杂地形环境。

本文针对早期方法的不足和轮-腿复合移动机构的特点, 提出一种新的构型控制方法, 大致思路是首先根据摆腿的受力情况, 估计轮-地接触情况, 控制各摆腿运动, 实现轮-地间的良好接触, 然后根据六轮车的结构尺寸、当前构型、期望构型等信息计算摆腿期望角度, 控制摆腿完成期望构型。控制流程图见图 2, 在下文中将对其详细说明。

3.1 轮-地接触控制

驱动轮与地面良好接触是构型控制过程中轮-腿协调的需要, 同时也是准确估计地形, 实现腿-腿协调的前提。本文通过以下两种方法的结合来保证轮-地间的良好接触:

- 1) 利用摆腿受力情况保证轮-地接触, 即通过测量摆腿减震装置的弹性形变间接判断驱动轮与地面是否接触;
- 2) 利用轮驱动电机力矩反馈感知轮-地接触程度, 即将轮毂电机设为力矩控制模式, 施加一定力矩后, 通过测量轮速来判断轮-地接触情况。

3.2 摆腿控制

根据车体的几何尺寸, 当前摆腿角度和期望姿态建立模型, 计算各摆腿的期望角度, 易知随着车体高度不同有无数组解, 本文引入车体距地面的高度变量可保证解的唯一性。由于地面高低不平, 为防止构型过程中, 车体两端接触地面, 所以将高度变量定义为车体两端距地面的最小高度。

这里首先假设轮-地接触控制完成后, 摆腿在小范围内运动时, 各轮所经过的地面是平整的。

模型所需要的变量定义如下:

α, β 分别为车体相对于地面的俯仰角和横滚角。

h_f, h_b 分别为车体前后两端的离地高度。

D, d, L, R 分别为车体的宽度、腿间距、腿长度和轮半径。

$\theta_f, \theta_m, \theta_r$ 分别为前、中、后腿的角度。

θ_{iR}, θ_{iL} 分别为 i 腿的右/左腿的角度。

利用数字罗盘和激光雷达的传感信息, 可以计算得到车体两端距地面的精确高度 h_f 和 h_b 。设期望输入为 (α_d, β_d, h_d) , 当前的状态 (α, β, h) , 根据期望俯仰角的符号可以判断 h_d 为前端或后端的期望高度, 以此来确定 $h = h_f$ 或 h_b 。由于车体尺寸

的前后对称性,不妨设 $h=h_b$ 。

首先,由期望构型和当前构型求出两侧前、中、后轮需要移动的平均高度分别为: Δh_1 、 Δh_2 和 Δh_3 。

$$\Delta h_3 = h_d - h_b + l_1 \cdot (\cos \alpha_d - \cos \alpha) + l_2 \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha)$$

$$\Delta h_2 = h_d - h_b + l_1 \cdot (\cos \alpha_d - \cos \alpha) + l_2 \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha) + d \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha)$$

$$\Delta h_1 = h_d - h_b + l_1 \cdot (\cos \alpha_d - \cos \alpha) + l_2 \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha) + 2d \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha)$$

然后根据横滚角 β_d 和 β ,可以计算出两侧每个轮的位移变化量。

$$\Delta h_{iR} = \Delta h_i + 0.5D \cdot \sin(\beta_d - \beta);$$

$$\Delta h_{iL} = \Delta h_i - 0.5D \cdot \sin(\beta_d - \beta);$$

最后由

$$\Delta h_{i,j} = (L \cdot \cos(\theta_{i,j}^d - \alpha_d) + R) - (L \cdot \cos(\theta_{i,j} - \alpha) + R) = L \cdot (\cos(\theta_{i,j}^d - \alpha_d) - \cos(\theta_{i,j} - \alpha))$$

计算出每个腿的期望角度。其中 $i=1, 2, 3$;
 $j=R, L$,一般情况下,期望角度的符号的和相应腿的当前角度符号相同,以减小摆腿摆动的角度;若有轮悬空时,根据当时构型确定摆腿相应的符号。

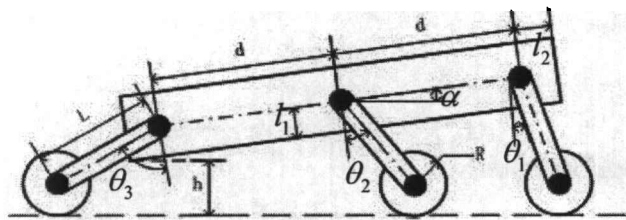


图3 六轮车的结构示意图

3.3 协调控制

构型控制需要腿-腿协调和轮-腿协调。

3.3.1 腿-腿协调控制

腿-腿协调控制主要是解决构型控制过程中的摆腿运动同步问题,摆腿间运动同步有两个作用:其一,保证构型控制过程中车体姿态的平稳过渡,其二,实现各腿部负载均匀。

具体方法:首先由各摆腿的当前角度和期望角度得到相应摆腿的运动行程,然后根据摆腿运动的最大加速度和最大速度规划各摆腿运动轨迹,规划的准则为各摆腿同时开始运动,同时到达终点。

3.3.2 轮-腿协调控制

在摆腿运动的过程中,设驱动轮的输出力矩为

M ,则驱动轮对摆腿产生的力矩为 $M' = M(1 + \frac{L}{R})$,

其中 L 和 R 分别为摆腿长度和轮半径。可见,驱动轮的良好控制可以大大减缓摆腿电机的载荷。

在构型控制过程中,由于地面不平整,各驱动轮的协调运动无法精确得到,为此我们将驱动轮控制方式设为力矩控制模式,通过PID控制器控制轮毂电机力矩来控制摆腿的被动弹性角(由摆腿减震机构引入)。

这种方法的好处在于它不仅实现了轮-腿协调,改善了摆腿在构型控制过程中的受力状况,而且最大的意义在于它实现了轮-腿间力的协调,而不像早期方法(驱动轮采用速度控制方式)中采用的运动协调。当然这种方法也引出了新的问题,就是当机器人遇到松软地面时,由于轮-地接触很难控制,轮-地间会发生打滑现象,使驱动轮失去或降低驱动力,为此我们引入牵引力控制的方法(具体方法见文献^{[7][8]}),通过检测驱动轮是否失速来判断轮-地间接触是否良好,然后控制牵引力,使轮-地恢复良好接触。

3.4 车体安全性检测

在野外复杂地形下,在完成构型控制的同时还必须考虑采取各种措施确保机器人自身的安全。为此,本文在构型控制过程中对机器人侧翻或倾翻以及电机过载等情况进行了考虑。由于构型控制多在低速情况下完成,故本文采用稳定锥方法^[6]来检测车体的稳定性。另外对电机过载的检测主要是通过检测驱动电机电流来实现,具体方法如下:

1) 电机过载检测

电机损毁多是由于电机过载造成的,电机过载会直接造成电机过流,长时间过流就会造成电机过热而损毁,因此,电机过载情况需要根据电机过流以及过流时间等进行综合判断。当电机发生过流时,采取短时间、间歇的工作方式,可避免电机损坏。

2) 姿态检测

在野外环境中,构型控制会因为很多不可预测的因素而失败,如算法漏洞、地面塌陷,电机控制问题等等。由于这些问题的出现通常会导致车体发生倾斜,甚至是倾翻或侧翻等危险发生,因此,需要对车体姿态进行实时监测。

本文利用三轴罗盘以及三轴陀螺对车载姿态进行实时检测和估计,当检测到车体倾斜达到预设

危险极限时，机器人将自动终止构型控制，并立刻向监控站进行汇报。

3.5 偏差处理

由于摆腿上装有被动减震器，当进行构型控制时，减震器所受作用力会随着摆腿构型的变化而变化，作用力的大小无法精确计算，因此，减震器的形变无法预知，这导致摆腿的实际位置与期望位置间总是会出现误差。这种误差无法通过规划方法完全消除，必须通过多次调整才能完成。

为此，本文采用规划和实时反馈控制相结合的方法来满足构型控制任务的要求，当构型偏差较大时，对构型重新规划；当偏差较小时，则通过调整单侧轮毂电机的输出力矩，改变摆腿减震器弹性形变来调整机器人姿态。

4 越障控制

越障性能是轮-腿复合移动机器人与传统轮式机器人的最大区别之处，也是其最大的优势所在，但要发挥这一优势，光有构型控制方法还不够，还需要针对机器人的结构特点开发有效的越障控制策略。本文所研究的越障策略主要针对沟、坎等典型障碍物。根据沟、坎等典型障碍物的几何特征，坎可进一步被分为上台阶和下台阶，而沟被分解为下台阶和上台阶。为此，本文对机器人上下台阶过程的控制策略进行了研究。

障碍物信息由基于激光传感器的障碍物检测算法给出，机器人据此判断当前障碍物是否可跨越，若可跨越，则调整航向角使之正对障碍物，若不可翻越则采取避障策略。相关变量定义如下：

$\theta_f, \theta_m, \theta_r$ —分别为前、中和后腿的角度。

L, R, H —分别为摆腿长度，轮半径和障碍物高度或深度。

α, β —分别为车体的俯仰角和横滚角。

4.1 上台阶

若遇到的是上台阶，机器人首先判断上台阶的坡度，若坡度较小，则利用机器人爬坡能力直接通过上台阶，若坡度较大，则控制构型变化实施越障，过程见图 4。

- 6) 根据上台阶的高度 H ，摆成如图 4.1 的构型，其中 θ_m 和 θ_r 为预设角度，而 θ_f 是利用障碍物高度 H 、车体姿态 α 和 β 以及中、后腿角度 θ_m

和 θ_r 计算得到（可根据车体两侧对应障碍物高度的不同，分别算出两侧前腿的期望角度）。构型控制完成后，机器人根据障碍物与机器人的距离，利用里程计行进，直至前轮在障碍物上。

- 7) 下压前腿和后腿如图 4.2 所示，其中 θ_f, θ_r 为预设角度， θ_m 是根据 $\theta_f, \theta_r, H, \alpha, \beta$ 等信息计算得到， θ_m 须满足中轮轴心离地高度在 $[H+R/3, H+2R/3]$ 之间，目的是为判断中轮是否登上障碍物提供依据。
- 8) 中轮登上障碍物后，控制前腿和后腿如图 4.3，行进直至后腿在障碍物上方。
- 9) 复原至行进构型。

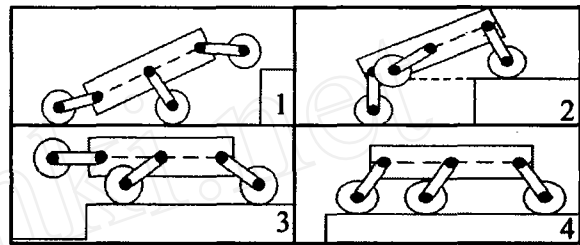


图 4 过坎构型序列

4.2 下台阶

若遇到下台阶，机器人首先判断下台阶的深度和坡度，若深度小或坡度小可直接行进走下下台阶，若坡度较大，则控制构型变化实施过沟，过程见图 5。

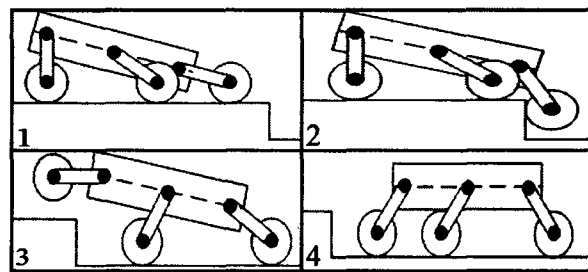


图 5 过沟构型序列

- 1) 首先摆出如图 5.1 的构型，准备下台阶，前轮设置为力矩模式，中轮和后轮设为速度模式，前进过程中实时比较前轮转速与车速，若前轮转速远大于车速，则表明前轮已经悬空。
- 2) 前轮悬空后，利用里程计定位，继续行进，行进距离为摆腿长度 L ，然后下压前腿，其中前腿角度 θ_f 根据沟深度 H 计算得到。
- 3) 把前轮和后轮的驱动模式设为速度模式，中轮的驱动模式设为力矩模式，利用同样的方法判断中轮是否悬空，若悬空，则控制摆腿摆出如图 5.3 的构型。

4) 继续前进至后轮在沟底, 然后恢复构型至行进状态。

中台阶高度为 360mm, 越障的构型序列见图 8 和图 9。

5 试验验证

针对本文提出的构型控制及自主越障控制策略的两种方法, 在六轮车上进行了试验验证。

5.1 构型控制

在室外不平整地面进行了两组试验。

1) 侧倾构型控制试验

在不平整地面控制车体的横滚角, 见图 6, 具体结果见表 1。

表 1 侧倾构型控制的试验结果

车体姿态	当前输入	期望输出	实际输出
俯仰角 (°)	3.8	0.0	1.4
横滚角 (°)	6.4	0.0	-0.5
距地距离 (mm)	315	200	213

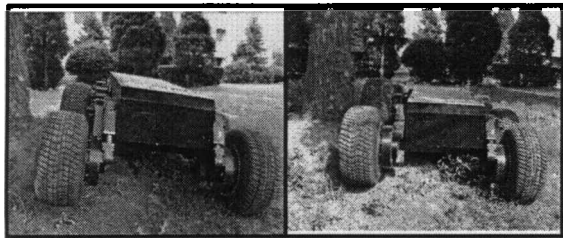


图 6 侧倾控制试验

2) 俯仰构型控制试验

在不平整地面控制车体的俯仰角, 见图 7, 具体结果见表 2。

表 2 俯仰构型控制的试验结果

车体姿态	当前输入	期望输出	实际输出
俯仰角 (°)	3.6	10.0	8.9
横滚角 (°)	6.5	0.0	1.3
距地距离 (mm)	310	150	142

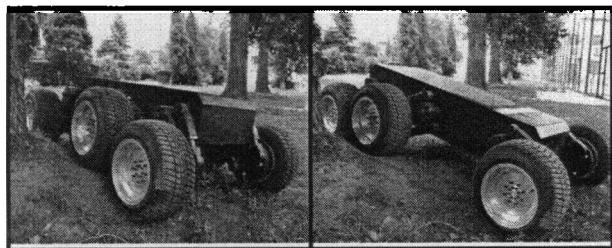


图 7 俯仰控制试验

5.2 自主越障

本文越障试验利用木质台阶模拟沟坎地形, 其

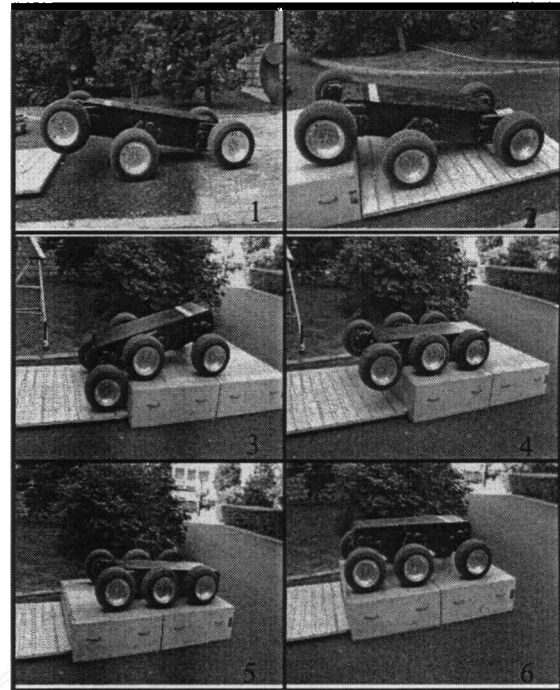


图 8 上台阶过程

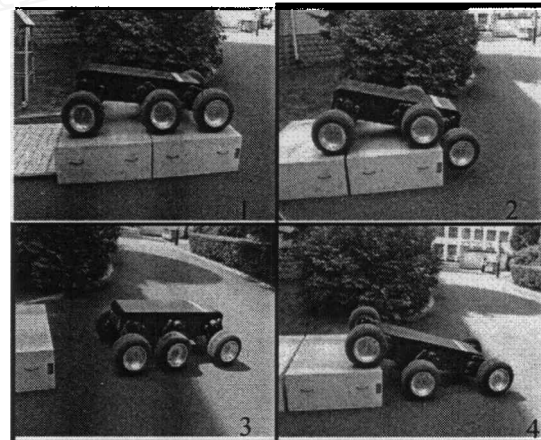


图 9 下台阶过程

试验结果表明, 本文提出的控制策略在机器人的实际应用中可以有效地实现构型和越障。

6 结论

本文针对轮-腿复合移动机器人, 提出了用于不平整地面的构型控制方法及越障控制策略, 并开展了算法验证试验, 试验结果表明上述方法是有效性的。同时我们也发现上述方法还存在的一些不足, 针对这些不足我们提出了相应的办法, 具体如下:

1) 在构型控制方面, 由于构型控制需要多次调整,

控制过程时间较长,降低了实用性,为此,我们将开发摆腿被动弹性角预测算法,减少构型调整次数,提高构型控制效率。

- 2) 在越障控制策略方面,没有考虑地面物理特性以及塌陷等情况,因此,限制了方法的适用性,为此,下一步我们将重点开展野外场地试验,通过试验建立地面物理特性模型,对方法进行改进,改善其适用性。

参考文献

- [1] Lauria, M, Piguet, Y, Siegwart. Octopus: An Autonomous Wheeled Climbing Robot [C]. In Proceedings International Conference o Climbing and Walking robots, 2002:315-322.
- [2] Tae-Bum Noh, Wan-Suk Yoo, Min-Ho Kim, etc. Analysis and Design of a Multi-Wheeled Vehicle with Variable Geometry Suspension[C], Proc of SPIE, Orlando, 2006: 20-27.
- [3] Lockheed Martin. MULE/ARV-A, Face Sheet, 2007.
- [4] 吕琴, 卜春光, 吴镇炜,等. 轮腿复合移动机器人自主越障姿态设定及轮腿运动协调算法实现,仪器仪表学报, 2008, 30(6):243-248.
- [5] 徐正飞, 杨汝清, 王韬. 关节式移动机器人的越障运动[J].中国机械工程,2003, 14(2):1052-1055.
- [6] 李斌, 刘金国, 谈大龙.可重构模块机器人倾翻稳定性研究[J].机器人 ROBOT, 2005, 27(3):241-246.
- [7] Iagnemma K, Dubowsky S. Traction control of wheeled robotic vehicles in Rough Terrain with Application to Planetary Rovers [J]. The International Journal of robotics Research, 2004, 23(10):102-104.
- [8] 沈沉, 田有为.汽车驱动防滑控制系统的控制方式[J], 辽宁省交通高等专科学校学报,2004, 6(1):12-13.