

# 双偏心块驱动球形机器人原地转向运动控制

赵 勃,李满天,孙立宁

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨, eastano@163.com)

**摘要:** 为了提高球形机器人的运动性能,将原地转向运动作为一种独立的运动方式,研究了一种双偏心质量块驱动球形机器人的原地转向运动控制方法.介绍了双偏心质量块驱动球形机器人的机构特点,利用达朗伯原理对机器人进行受力分析,阐述了双偏心质量块驱动球形机器人原地转向运动原理,建立了机器人的原地转向动力学模型.将原地转向运动分为起始、粘滞、滑移3个阶段,提出了一种基于粘滑原理的球形机器人原地转向控制方法,并通过仿真和样机实验验证了控制方法的有效性.

**关键词:** 球形机器人;双偏心质量块;原地转向;粘滑原理

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)11-0049-05

## Turning in place motion control of two pendulums driven spherical robot

ZHAO Bo, LI Man-tian, SUN Li-nin

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China eastano@163.com)

**Abstract:** Considering the turning in place motion as an independent motion which can enhance the mobility of spherical robot, a turning in place motion control method of two pendulums driven spherical robot is studied. First, the mechanism characteristics of two pendulums driven spherical robot are introduced, and then the force condition of turning in place motion is analyzed based on D'Alembert's principle and the motion principle of turning in place motion of two pendulums driven spherical robot is discussed, finally, the dynamic model of turning in place motion is constructed. The whole process of turning in place motion is divided into three stages which are startup stage, stick stage and slip stage respectively, and a stick-slip principle for turning in place motion control is proposed. The effectiveness of the control method is validated by both simulation and prototype experiment.

**Key words:** spherical robot; two pendulums; turning in place; stick-slip principle

近几年来,球形机器人作为一种新型移动机器人引起了研究人员越来越多的关注.与轮式、足式移动机器人相比,球形机器人运动灵活,可以实现全方位行走,能够在狭小空间内运动;球形的外壳能够保护内部机构,受碰撞后机器人姿态易于调整,使机器人可以在某些潮湿、多尘、崎岖的恶劣环境下作业<sup>[1-2]</sup>.1999年卡内基梅陇大学的Brian Chemel等<sup>[3]</sup>研制了Cyclops球形机器人,首

次将偏心质量块驱动机构应用于球形机器人.驱动单元采用两个垂直放置的电机控制偏心机构运动,通过改变机器人重心位置产生偏心作用力,打破球体的静态平衡实现滚动运动,现有的球形机器人大都采用这种驱动方式.

球形机器人在运动时球壳与地面近似点接触,因此带来了运动学方面的非完整约束问题,而球形机器人系统的输入输出之间又存在着强烈的非线性问题,因此近年来球形机器人的研究热点集中于轨迹规划和运动控制.卡内基梅陇大学的Umashankar Nagarajan等<sup>[4-5]</sup>研究了ballbot球形足式机器人的控制方法.通过拉格朗日方程建立了机器人的动力学模型,根据动力学方程推导出

收稿日期: 2010-08-19.

基金项目: 长江学者创新团队计划 (IRT0423).

作者简介: 赵 勃(1982—),男,博士研究生;

孙立宁(1964—),男,教授,博士生导师.

机器人腿足之间的相对转角加速度与机器人倾角、倾斜速度之间的关系,提出了基于双曲正割函数的离线轨迹规划方法,并用 Nelder-Mead 算法对输入曲线进行优化.密歇根州立大学的 Ranjan Mukherjee 等<sup>[6]</sup>将球形机器人的运动控制问题与经典的球-平面系统相结合,建立了球形机器人的运动学模型,并用球面三角形法规划了球形机器人的运动轨迹,基于高斯-博内并行传输理论设计了机器人的一般运动控制方法<sup>[6]</sup>.卡内基梅隆大学的 Y S XU 等<sup>[7]</sup>通过拉格朗日乘法对单轮机器人 Gyrover 进行动力学建模,并用仿真和实验修正了动力学参数.通过对系统进行线性化处理,将机器人的滚动与侧倾运动解耦,由于机器人转向运动只与侧倾角度有关,因此设计了状态反馈控制器保持机器人稳定转向,以间接控制机器人的转弯速度.为了使机器人按照期望轨迹运动,建立了机器人滚动速度、侧倾角度与轨迹曲率半径的关系,并设计了速度反馈控制器确保机器人实际运动轨迹跟踪期望值<sup>[8]</sup>.岳明等<sup>[9]</sup>研究了球形机器人的爬坡运动控制,基于耗散形式的拉格朗日方程建立了机器人爬坡的动力学模型,通过临界摆角将动力学方程线性化,设计了以能量耗散最小为目标函数的非线性系统控制器.孙汉旭等<sup>[10-11]</sup>建立了转动关节的摩擦力矩和球壳与地面之间的摩擦力偶,对球形机器人的动力学模型进行修正,设计了基于容错策略的球形机器人控制系统.

现有对球形机器人的控制研究没有将球形机器人原地转向运动作为独立的运动方式进行控制,而原地转向运动是球形机器人特有的运动方式,能够使球形机器人在狭小空间内转弯,增强机器人的运动灵活性和环境适应能力.

本文研究了一种双偏心质量块驱动球形机器人的原地转向运动控制方法,介绍了机器人的结构特点,并分析了其原地转向运动原理,根据达朗伯原理建立了机器人原地转向运动的动力学模型,提出了一种基于粘滑原理的球形机器人原地转向运动控制方法,最后通过仿真和样机实验验证了控制方法的有效性.

## 1 双偏心质量块驱动单元结构

机器人外壳呈椭球形,当机器人发生碰撞或从高处跌落时,这样的外形易于操作者观察到机器人当前的姿态;椭球形的外壳也限制了机器人横向滚动在一定的角度范围,在一定角度的斜坡上穿越时不会翻车.

驱动单元是球形机器人的核心部分,现有的球形机器人大都采用了偏心质量块驱动方式,2个垂直放置的电机驱动一个偏心机构运动,分别控制机器人前进和转向,机器人运动灵活,能实现全方位行走.但这种驱动方式也有明显的不足,电机的驱动能力没有得到最大程度上的利用,因此机器人机动速度较慢,原地转向能力差.

设计了一种双偏心质量块驱动单元,其结构如图1所示.驱动单元有2个对轴放置的驱动电机,每个电机分别驱动一个偏心质量块,质量块只能绕电机轴旋转.2个质量块相对于球心对称放置在主轴上,每个偏心质量块质量为350 g,总质量占机器人质量的42.9%,与现有传统的偏心质量块驱动方式相比,这种改进的驱动方式能提供更大的偏心力矩和惯性力矩,使机器人有更快的速度和更灵活的转向能力.



图1 驱动单元结构

这种改进的驱动单元也给球形机器人带来了特有的运动原理,如图2所示,分别为机器人运动的侧视图和俯视图.两个质量块  $m_1$  和  $m_2$  只能绕  $x$  轴转动,相对地面摆角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$  时,机器人重心位置在  $MN$  和  $PQ$  交点  $O_1$  处,当质量块  $m_2$  摆角为  $\theta_3$  且与  $\theta_1$  反向时,机器人重心位置移动到  $MN$  与  $P'Q'$  交点  $O_2$  处.由此可见,两质量块偏摆角度使机器人重心位置改变,但始终在  $MN$  上移动,即无论质量块如何偏摆,机器人所受偏心力作用点始终在  $MN$  上,产生的偏心力矩绕  $x$  轴,因此偏心作用力只能使机器人绕  $x$  轴滚动,不能使机器人转向.机器人转向运动需要依靠惯性力,当质量块与球壳相对加速旋转时,会产生平行于  $yoz$  平面的惯性力,惯性力可以分解为沿  $y$ 、 $z$  轴的分力和绕  $x$  轴的力偶.沿  $y$  轴和  $z$  轴的分力分别产生绕  $z$  轴和  $y$  轴的惯性力矩,使机器人绕  $z$  轴和  $y$  轴旋转.

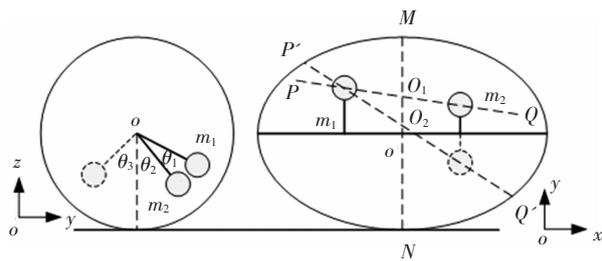


图 2 运动原理

## 2 基于粘滑原理的原地转向控制

### 2.1 原地转向运动原理

原地转向运动是球形机器人特有的运动方式, 可以使机器人在狭小空间内运动, 增强其环境适应能力. 双偏心质量块驱动球形机器人原地转向运动受力情况如图 3 所示.

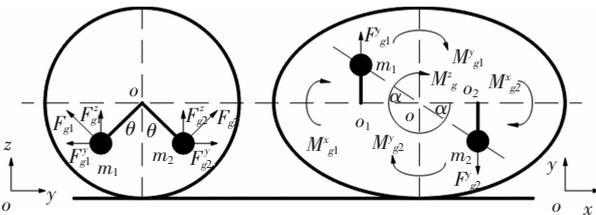


图 3 原地转向运动受力分析

两质量块反向旋转相同角度  $\theta$ , 保证角速度  $\dot{\theta}$  与加速度  $\ddot{\theta}$  相同, 因此惯性力  $F_{g1}$  与  $F_{g2}$  大小相等, 方向为垂直于质量块转动半径. 将惯性力分解为沿  $y$  轴和  $z$  轴的分力, 其中  $F_{g1}^x$  与  $F_{g2}^x$  分别产生绕  $x$  轴大小相等方向相反的惯性力矩  $M_{g1}^x, M_{g2}^x$  与绕  $y$  轴大小相等方向相反的惯性力矩  $M_{g1}^y, M_{g2}^y$ ,  $F_{g1}^y$  与  $F_{g2}^y$  产生绕  $z$  轴大小相等方向相反的惯性力矩  $M_g^z$ , 式(1)为机器人受力情况, 其中  $M_f$  为地面摩擦阻矩.

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ \sum F_y = F_{g1}^y - F_{g2}^y = 0, \\ \sum F_z = F_{g1}^z + F_{g2}^z - G + N = 0, \\ \sum M_x = M_{g1}^x - M_{g2}^x = 0, \\ \sum M_y = M_{g1}^y - M_{g2}^y = 0, \\ \sum M_z = M_g^z - M_f \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 机器人只受绕  $z$  轴的惯性力矩作用, 其他方向上所受惯性力与力矩都平衡, 因此机器人只有一种运动方式. 当绕  $z$  轴的惯性力矩  $M_g^z$  大于摩擦阻矩  $M_f$  时, 机器人做原地转向运动.

### 2.2 原地转向动力学模型

质量块相对球壳加速运动产生的惯性力为

$$F_{g1}^y = F_{g2}^y = m\ddot{\theta}r\cos\theta.$$

其中:  $r$  为质量块旋转半径,  $\theta$  为质量块与球壳绕  $x$  轴的相对转角, 在原地转向运动中, 由于球壳不会绕  $y$  轴旋转, 因此  $\theta$  即为质量块转角.

惯性力矩为

$$M_g^z = F_g^y \times d = 2m\ddot{\theta}rd\cos\theta.$$

其中  $d$  为质量块旋转中心到球心的距离.

由达朗伯原理, 得到机器人原地转向运动动力学方程如下:

$$M_g^z - M_f = J\ddot{\phi}.$$

其中  $\phi$  为机器人绕  $z$  轴的转角.

### 2.3 基于粘滑原理的原地转向控制

由原地转向动力学模型可知, 可以通过控制质量块摆角  $\theta$  控制机器人原地转向运动. 从质量块的位置考虑, 系统要求在转动的初始和终止时刻质量块都处于铅直位置, 一方面可以使机器人在原地转向的终止时刻立即进入下一个运动状态的起始位置; 另一方面可以在相同的初始位置控制质量块的运动.

将原地转向运动分为 3 个阶段进行控制, 分别为起始阶段、粘滞阶段、滑移阶段, 其具体控制过程如下:

1) 起始阶段: 保持两偏心质量块处于竖直位置, 不施加任何驱动信号, 机器人处于静止状态.

2) 粘滞阶段:  $0 \sim t_1$  时间段, 给质量块施加一个缓慢上升的速度驱动信号, 如图 4 所示, 质量块开始绕  $x$  轴同步反相缓慢摆动, 由于两质量块摆动产生的绕  $z$  轴的惯性力矩  $M_g^z$  始终小于最大静摩擦阻矩  $M_f$ , 即地面有能力提供球壳静止所需的摩擦阻矩, 此时球壳将与地面保持静止, 机器人处于粘滞状态, 质量块旋转至  $\theta$  角度, 等待下一步控制信号.

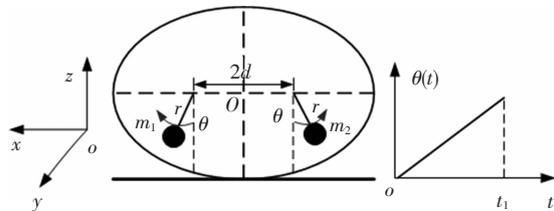


图 4 粘滞阶段

3) 滑移阶段: 在粘滞阶段的终了时刻  $t_1$ , 单摆的速度驱动信号急速下降,  $t_1 \sim t_2$  时间段, 两质量块从  $\theta$  位置回摆到竖直位置, 如图 5 所示, 质量块产生的惯性力矩  $M_g^z$  超过了球壳与地面间的最大静摩擦阻矩  $M_f$ , 球壳做原地转向运动, 机器人处于滑移阶段. 当摩擦阻矩耗散掉机器人全部动能时, 球壳停止运动, 即重新回到静止阶段, 如此一个原地转向运动周期结束.

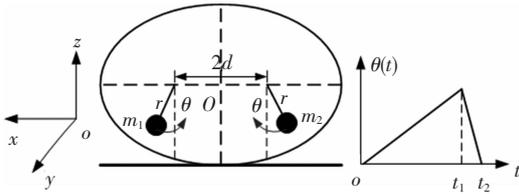


图5 滑移阶段

### 2.4 原地转向运动控制仿真

用 Matlab 对原地转向控制方法进行仿真,仿真时间为 3 s,仿真中机器人参数如表 1 所示.

表 1 机器人参数

参数	质量块总质量/kg	其他机构总质量/kg	球壳转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	质量块旋转半径/m	质量块旋转中心到球心距离/m
数值	0.70	0.93	0.002 9	0.038	0.045

摩擦阻矩模型为

$$M_f = \begin{cases} D_v \dot{\varphi} \text{sign}(\dot{\varphi}), & \dot{\varphi} \neq 0; \\ M_{\text{static}}, & \dot{\varphi} = 0. \end{cases}$$

其中,  $M_{\text{static}}$  为静摩擦阻矩,  $D_v$  为黏性阻尼系数,在室内相对平坦的地面通过实验测得  $M_{\text{static}} = 0.014\ 24\ \text{N} \cdot \text{m}$ ,  $D_v = 0.057\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ .

仿真中摆角  $\theta$  控制轨迹为

$$\theta(t) = \begin{cases} -\frac{\theta_m}{K_v} \cos(\omega t) + \left(1 - \frac{1}{K_v}\right)\theta_m, & \text{粘滞}; \\ \frac{\theta_m}{K_v} \cos(K_f \omega t) + \left(1 - \frac{1}{K_v}\right)\theta_m, & \text{滑移}. \end{cases}$$

其中,  $\theta_m$  为质量块摆角最大值,  $\omega$  为谐波频率,  $K_v$  为转速系数,可以通过调整  $K_v$  的大小控制质量块角速度的最大值,  $K_f$  为变频系数,可以改变滑移阶段质量块回摆时间,控制滑移阶段质量块产生惯性力的大小,取  $\theta_m = \pi/6$ ,  $\omega = \pi/0.8$ ,  $K_v = 2$ ,  $K_f = 4$ ,质量块摆角曲线与速度曲线如图 6 所示.摆角曲线上升时,机器人处于粘滞阶段,质量块先加速后减速,摆动到  $\theta_m$  位置,摆角曲线下降时机器人处于滑移阶段,质量块先加速后减速回摆至竖直位置,质量块在滑移阶段的最大速度是粘滞阶段的 4 倍,最大加速度是粘滞阶段的 16 倍,也就是质量块在滑移阶段能产生 16 倍于粘滞阶段的惯性力,使机器人完成原地转向运动.

机器人原地转向运动仿真结果如图 7 所示,实线和虚线分别为球壳绕  $z$  轴转角  $\varphi$  的位移曲线和速度曲线.可以看出,在  $0 \sim 0.8\ \text{s}$  时间段,机器人处于粘滞阶段,球壳角位移为 0,在  $0.8 \sim 1.0\ \text{s}$  时间段,机器人处于滑移阶段,球壳先加速后减速,角速度最大值为  $2.74\ \text{rad}/\text{s}$ ,球壳角位移为  $0.28\ \text{rad}$ ,机器人原地转向运动周期为  $1\ \text{s}$ .仿真中摩擦模型为理想模型,因此机器人进入粘滞阶段时立即停止转动,球壳角速度为零,角位移不变.

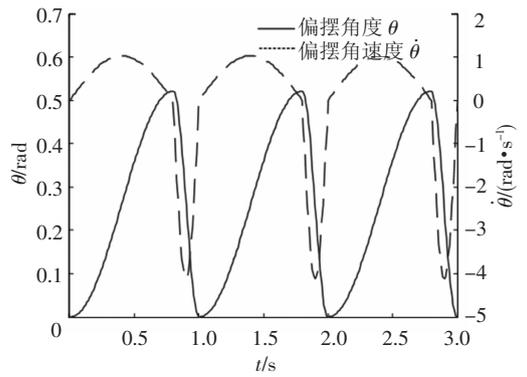


图6 质量块摆角与角速度仿真曲线

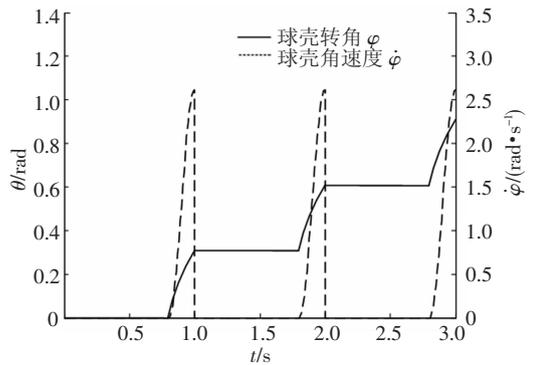


图7 球壳角位移与角速度曲线

### 3 原地转向运动实验研究

在室内地面进行了双偏心质量块驱动球形机器人原地转向运动实验研究,通过遥控机对机器人下达“原地转向”指令,实验中质量块输入信号及其参数设置与仿真中一致,实验结果如图 8 所示,机器人能完成原地转向运动.机器人原地转向角速度通过传感器测量结果如图 9 所示,机器人原地转向运动周期为  $1\ \text{s}$ ,质量块启动瞬间,由于角动量守恒,惯性力矩产生机器人反向的角速度,即在运动初始时刻机器人转向方向与期望方向相反,但这种反向运动在短时间内即可被地面摩擦力矩阻止.从图中可以看出,机器人在滑移阶段之后,转动角速度无法立即减为零,即实验中地面的摩擦阻矩无法使机器人在粘滞阶段的初始时刻立即静止,摩擦阻矩对机器人运动的阻止需要  $0.5\ \text{s}$  的时间,因此机器人在粘滞阶段也有一小段角位移.

实验中机器人除了做原地转向运动之外,还有周期性绕  $y$  轴的转动,即横滚运动,横滚角速度通过传感器测量,结果如图 10 所示.机器人原地转向运动通过 2 个质量块产生 2 个大小相等、方向相反的惯性力实现,而实验中无法保证 2 个质量块无误差的同步运动,因此沿  $z$  轴的惯性力产生了绕  $y$  轴不平衡的惯性力矩,使机器人有横滚运

动. 偏心质量块在滑移阶段产生最大惯性力, 从图 10 中可以看出, 机器人在滑移阶段的横滚角速度最大, 最大值可达  $0.78 \text{ rad/s}$ , 粘滞阶段由于能量耗散, 横滚角速度逐渐减小, 但在  $0.8 \text{ s}$  内无法减为零, 机器人进入下一个滑移阶段. 因此在原地转向运动过程中, 机器人不可避免地带有横滚运动.



图 8 原地转向运动实验研究

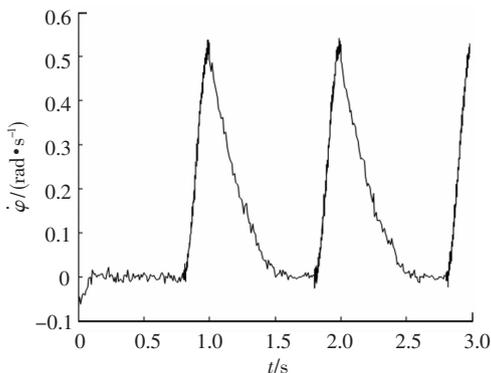


图 9 球壳角速度

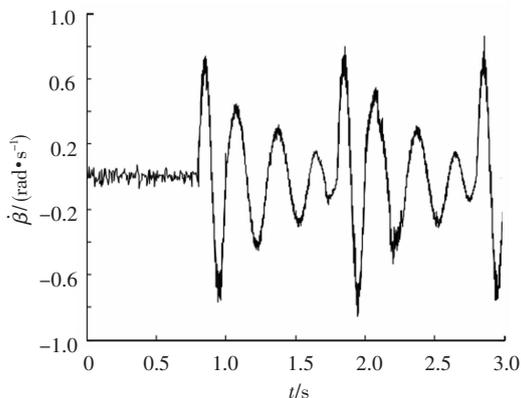


图 10 横滚角速度

## 4 总 结

1) 原地转向运动是球形机器人特有的运动, 能够增加球形机器人的环境适应能力, 本文将原地转向运动作为一种独立的运动方式, 研究了双偏心质量块驱动球形机器人的原地转向运动控制方法.

2) 分析了机器人原地转向运动原理, 利用达朗伯原理建立了机器人原地转向运动动力学模

型, 提出了一种基于粘滑原理的原地转向运动控制方法, 并通过仿真从理论上证明了控制方法的正确性.

3) 进行了样机试验研究, 分析了实验结果, 通过实验验证了控制方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] HALME A, SCHONBERG T, WANG Y. Motion control of a spherical mobile robot [C]//IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. MIE, Japan; IEEE, 1996: 259-264.
- [2] ARMOUR R H, VINCENT J F V. Rolling in Nature and Robotics: A Review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 195-208.
- [3] CHEMEL B, MUTSCHLER E, SCHEMPF H. Cyclops: miniature robotic reconnaissance system [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, MI, USA; IEEE, 1999: 2298-2302.
- [4] UMASHANKAR N, GEORGE K, RALPH L H. Trajectory planning and control of an underactuated dynamically stable single spherical wheeled mobile robot [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan; IEEE, 2009: 3743-3748.
- [5] UMASHANKAR N, ANISH M, GEORGE K, et al. State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan; IEEE, 2009: 998-1003.
- [6] MUKHERJEE R, MARK A M, PUKRUSHPAN J T. Motion planning for a spherical mobile robot: revisiting the classical ball-plate problem[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, 2002, 124(4): 502-511.
- [7] XU Y S, SAMUEL K W. Stabilization and path following of a single wheel robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2): 407-419.
- [8] FERREIRA E, TSAI S J, PAREDIS C J J, et al. Control of the Gyrover: a single-wheel gyroscopically stabilized robot[J]. Advanced Robotics, 2000, 14(6): 459-475.
- [9] 岳明, 邓宗全. 球形机器人爬坡状态下动力学建模及最优控制器设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 46-51.
- [10] 孙汉旭, 王亮清, 贾庆轩, 等. BYQ-3 球形机器人的动力学模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 8-14.
- [11] 孙汉旭, 刘大亮, 贾庆轩, 等. 基于容错策略的球形机器人控制系统[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 89-95.

(编辑 杨波)