

基于电磁感应的力矩发生装置研究

朱晓庆^{1,2}, 阮晓钢¹, 孙荣毅¹, 魏若岩¹, 王旭¹

(1.北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京 100124;2.麦吉尔大学机器人机械系统实验室,魁北克蒙特利尔 H3A2K6)

摘要: 为解决独轮机器人、导弹、卫星及航天器等欠驱动系统的欠驱动难题,本文提出一种基于电磁感应的力矩发生装置.该装置是在经典电磁学理论支持下的研究成果,文中详述了装置的原理和具体设计的技术方案,并通过实验进行验证.本文提出的力矩发生装置的显著优势是所提供的力矩大小正比于速度项,方使用伺服电机进行精确控制,而且具有节能、无噪声的优点.在独轮机器人侧向和偏航控制中良好表现,进一步表明本文提出的力矩发生装置是实用和有效的.

关键词: 欠驱动; 力矩; 电磁感应; 独轮机器人

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)02-0335-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.02.019

Study on a Device of Torque Generation Based on Electromagnetic Effect

ZHU Xiao-qing^{1,2}, RUAN Xiao-gang¹, SUN Rong-yi¹, WEI Ruo-yan¹, WANG Xu¹

(1. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Robotic Mechanical Systems Laboratory, McGill University, Montreal, QC H3A2K6, Canada)

Abstract: To conquer the problem of lack of direct torque in the under-actuated systems such as single wheel robots missiles satellites and spacecrafts, a device of torque generation is proposed in this paper. The research results are acquired under the theory of classic electromagnetism, and the details of the mechanism of the device are explained. The torque provided by the proposed mechanism is proportion to the speed, so it is rather convenient to perform exact control by motors. The experiments carried out on single wheel robot's lateral and yaw control respectively are included to demonstrate the superior performance the proposed method over some traditional ones, which illuminating the promising practical application potentiality of under-actuated systems.

Key words: under-actuated; torque; electromagnetic effect; single wheel robot

1 引言

欠驱动系统的控制输入量少于系统的自由度,是典型的静态不稳定系统且易受到扰动影响^[1~5].控制领域研究人员通常利用系统间的耦合间接控制欠驱动的状态量,以达到稳定欠驱动自由度并抑制干扰的目的^[6,7];也有一些研究人员独具匠心地通过设计物理装置来提供直接驱动力矩来克服欠驱动问题.独轮机器人是一个典型的欠驱动系统,它只有一个轮子与地面接触,只具备纵向自由度的驱动,但是却有纵向、侧向和偏航三个自由度要控制.对于独轮机器人纵向的控制,只需控制轮子前后转动就能够实现^[8],但是对于其侧向的

控制就不得不依靠额外的驱动装置了.斯坦福大学的 Schoonwinkel^[9],模仿人类骑行自行车原理构造的一款独轮机器人中设计了一个转盘来模拟人的腰椎的扭动以控制侧向平衡;香港中文大学的徐扬生团队^[10~13]研制了 GYROVER 系列的独轮机器人,该款独轮机器人利用陀螺效应,通过添加纵向安装的竖直陀螺转载来实现对独轮机器人的侧向平衡控制;北京邮电大学的郭磊等^[14]研制了独轮车机器人,该独轮机器人通过设计一个侧向滑动的质量块装置来调节车身的配重以改变系统重心,从而达到侧向平衡目的;韩国的 Seul Jung 等^[15]研制一款气动式独轮机器人,通过安装向左右两边的喷气装置,利用气体的反作用力实现独轮机器人的侧向平

衡;日本村田制作所^[16]于 2008 年推出了“村田少女”独轮机器人,通过安装在胸前的侧向竖直惯性飞轮的转动来实现独轮机器人的侧向控制,由于该种解决方案结构相对简单所以后续有较多的研究人员进行了深入研究^[17,18].研究人员在解决独轮机器人侧向欠驱动问题上设计了很多巧妙的解决方案,限于当时的研究条件加之独轮机器人侧向控制巨大挑战,研究人员能实现独轮机器人的侧平衡控制是十分难能可贵的,不过以上的方案或多或少都存在一些不足:(1)文献[9]其实主要是在利用偏航和侧向的耦合来控制侧向的,水平安置的低速转盘只能提供直接的偏航力矩,对侧向力矩的贡献极少;文献[10~13]利用的高速旋转陀螺可以提供直接的侧向控制力矩,但是陀螺的高速旋转需要消耗大量的能量;文献[14]通过调节配重和文献[15]利用空气反作用力的解决方案本质上是离散控制,不能实现连续控制,因而控制难度大、控制效果较差;文献[16~18]的侧向竖直安装的旋转飞轮所提供侧向力矩与飞轮惯量成正比,因而系统整体笨重;(2)所提供的侧向力矩与飞轮的角加速度成正比,但是因为控制飞轮的伺服电机是速度伺服系统而不是加速度伺服系统,所以该种解决方案控制难度大;(3)控制飞轮旋转的电机的转速有限制,不可能持续加速,因而在实际实验中易出现飞轮跑飞现象,存在安全隐患.为克服现有研究的种种不足,基于麦克斯韦方程组揭示的电磁感应原理,参考一些研究人员在电磁感应方面取得的研究成果^[19~27],我们设计了一种基于电磁感应的力矩发生装置,该装置提供的力矩跟速度项成显著正比,十分方便用电机进行控制.

2 机构原理

麦克斯韦方程组(公式 1~6)是英国物理学家詹姆斯·麦克斯韦在 19 世纪建立的一组偏微分方程,描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间的关系.麦克斯韦方程组中第四个方程揭示电场可以产生磁场,荷兰物理学家洛伦兹首先提出了运动电荷产生磁场和磁场对运动电荷有作用力的观点,为纪念他,人们称这种力为洛伦兹力,洛伦兹力是微观意义下的电荷在磁场中受力的准确表达式(公式 5),其宏观表现是安培力(公式 6),也就是通电导体在磁场中会受到力的作用,受此启发,研究人员发明了电动机和发电机(统称电机),电机中包含转子和定子两部分,现在广泛使用的电机是将定子固定,让转子转动;本文设计的基于电磁感应的力矩发生装置进行了反向利用:将定子部分与欠驱动系统固定连接,让转子对定子的作用力传递到欠驱动系统上,定子也相对转动,从而拓展了定子的一般意义.

表 1 符号及其物理意义

符号	物理意义	符号	物理意义
E	电场	ϵ_0	电常数
B	磁场	μ_0	磁常数
$\nabla \cdot$	散度符号	J	电流密度
$\nabla \times$	旋度符号	Q	电荷量
I	电流	v	电荷速度
ρ	电荷密度	L	导体有效长度
E_a	感应电动势	I_a	感应电流
n	转速	τ	转矩或力矩

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

$$F = Q(E + vB) \quad (5)$$

$$F = B \times IL \quad (6)$$

3 机构设计

3.1 装置设计方案

基于电磁感应的力矩发生装置如图 1、图 2、图 3 所示,包括:外壳 1、磁铁组 2、电枢绕组 3、前轴承 4、后轴承 5、前端盖 6、后端盖 7、电机 8、电机支架 9、负载 11,其中外壳 1 是一个磁性圆筒,下面连接着一个长方体,所述的长方体与位于所述的力矩产生装置外部的某个欠驱动系统固定连接,所述的欠驱动系统至少包括独轮机器人、直升飞机、蝶形飞行器、卫星、航天器、导弹中任何一个待驱动的系统,所述的外壳 1 还包含一个磁铁组 2,所述的磁铁组 2,至少由四块永久磁铁组成,所述的四块永久磁铁对称固定分布于所述的外壳 1 内侧,且固定连接,以形成恒定磁场;电枢绕组 3,同轴插入所述的外壳 1 内且相对反向转动,所述的磁铁组 2 与电枢绕组 3 之间有气隙,所述的电枢绕组 3 并联连接负载 11(负载指待驱动的系统,如独轮机器人、导弹、卫星等需要调整自身姿态的设备);前轴承 4,与所述的电枢绕组 3 同轴连接,嵌入所述的前端盖 6 中心的轴承槽内,所述的前端盖 6 是扣压在所述的外壳 1 前端口上面;后轴承 5,与所述的电枢绕组 3 同轴连接,嵌入所述的后端盖 7 中心的轴承槽内,所述的后端盖 6 是扣压在所述的外壳 1 后端口上面;电机 8,与伸出所述前端盖 6 的电枢绕组 3 的轴用弓形键同轴转动连接;电机支架 9,由位于上部的圆环和下部的长方条二者构成,所述的电机支架 9 上部的圆环与所述的电机 8 同轴插入固定,所述的电机支架 9 下部长方条与所述的欠驱动系统的一个固定部件固定连接.

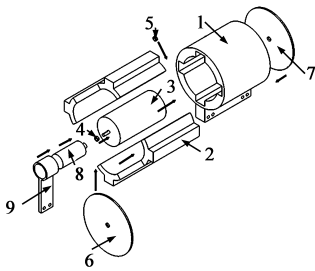


图1 一种基于电磁感应的力矩发生装置爆炸结构示意图

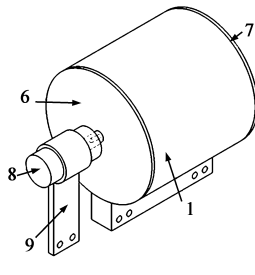


图2 一种基于电磁感应的力矩发生装置等轴测结构示意图

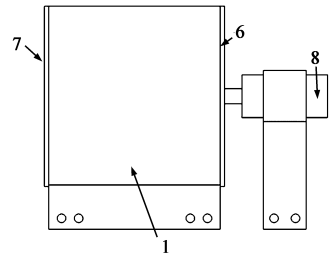


图3 一种基于电磁感应的力矩发生装置侧视图

3.2 装置执行具体原理及方案

如图4所示,当欠驱动系统需要提供逆时针方向力矩时,依据力矩大小与电机转速成正比即 $\tau = k \cdot n$ 反计算出电机转速,驱动电机以所需的转速逆时针旋转,电枢绕组切割磁感线,形成感应电动势 E_a ,该感应电动势 E_a 正比于电枢绕组转速 n ,由于感应电动势接通恒定负载 R ,故在电枢绕组中产生感应电流 I_a ,在磁场中电枢绕组受到的顺时针方向电磁转矩 τ_{em} ,该电磁转矩正比于感应电流 I_a ,由于力的作用是相互的,所以磁铁组同时受到等大的逆时针方向的反电磁转矩 τ_{antiem} ,在该反电磁转矩 τ_{antiem} 作用下本发明装置将逆时针方向的力矩传递并作用于欠驱动系统.同理当欠驱动系统需要提供顺时针方向力矩时,电机顺时针转动受力分析同上,不再赘述.这样欠驱动系统简便的获取的所需力矩并按照规定绕定点或定轴转动,完成姿态调整任务.

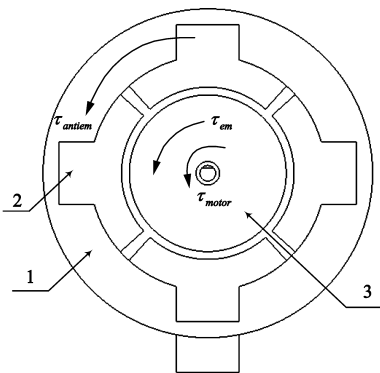


图4 一种基于电磁感应的力矩发生装置受力分析图

4 实验验证

4.1 装置自身性质验证

对课题组设计的一个基于电磁感应的力矩发生装置进行有限元分析后得到的截面磁感应强度分布情况,结果显示主体磁感应强度分布在定子绕组和转子上,定子绕组两侧和转子绕组中心轴的磁感应强度分布最弱;其截面的磁感应线分布结果与磁感应强度分布结果吻合,磁感应线穿过定子绕组和转子绕组件形成闭合回路,其定子绕组和转子绕组间分布的磁感应

线最密集.装置本身的有限元分析结果与符合预期,主体作用区域分别分布在定子绕组和转子绕组上,且该分析结果和实践测量经验结果吻合表明装置本身的性质符合设计要求.

将不同转速下测量的电磁转矩数据描点在图5中,其线性拟合结果如式(7)所示,其分析结果如图5所示,从图5中显然可以看出装置提供的力矩与转速成显著正比关系.

$$\tau_{antiem} = -0.0032 \times speed - 0.0102 \quad (7)$$

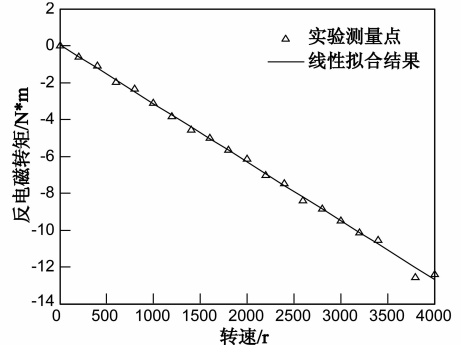


图5 装置产生的反电磁转矩与转速间关系分析图

4.2 装置在独轮机器人侧向控制中应用

独轮机器人的俯仰轴(PITCH)、横滚轴(ROLL)和偏航轴(YAW)定义如图6所示,独轮机器人绕横滚轴产生的角度设为 Φ .将本文设计的电磁感应力矩发生装置加载到独轮机器人本体上,安装时保持电枢绕组的转动所形成的面与独轮机器人前进方向垂直,即电枢绕组的轴与独轮机器人系统的横滚轴 roll 平行.独轮机器人在正常行走时整体要保持竖直状态,即保持横滚角为零度.如果不施加侧向力矩,在重力作用下独轮机器人受到一点干扰就会发生侧倒,而且启动时亦不能从倾斜状态自动达到平衡状态.独轮机器人侧向动力学分析如图7所示,机器人在重力 G 作用下会发生侧倒,为了克服重力作用,使用本文设计的电磁感应力矩发生装置产生作用力矩 τ ,以达到控制独轮机器人保持平衡状态.独轮机器人侧向动力学方程如式8所示,其中 J_r 为独轮机器人绕 roll 轴的转动惯量, h 为独轮机器

人重心到行走轮底部的距离.

$$J_r \ddot{\Phi} = -\tau + G \cdot \sin\Phi \cdot h \tag{8}$$

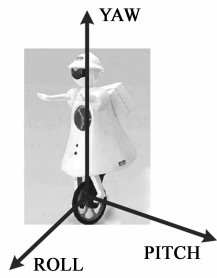
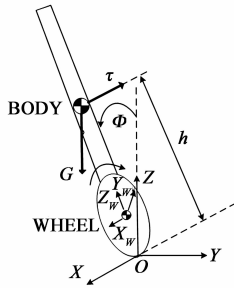


图6 独轮机器人坐标轴定义



设机器人回到竖直位置设独轮机器人的期望横滚角为 Φ_E , 独轮机器人通过姿态传感器获得的实时横滚角为 Φ , 角度均以逆时针方向为正, 下同. 通过计算误差值 $(\Phi_E - \Phi)$, 首先控制器参照预设的线性 PID 控制律 (公式 9) 根据误差及其导数的值计算出所需力矩, 然后根据装置具体参数计算出电枢绕组的转速. 公式 (9) 中 P 为比例系数, D 为微分系数, 由于测量仪器陀螺仪有

积分误差, 故 PID 控制律中不采用积分.

$$\tau = P \cdot (\Phi_E - \Phi) + D \cdot (\dot{\Phi}_E - \dot{\Phi}) \tag{9}$$

在独轮机器人上进行的一次侧向控制实验如下: 初始的横滚角为 10 度, 姿态传感器将测量到的时间是姿态信息传输给控制器, 控制器控制独轮机器人侧向力矩发生装置转动, 最终使得独轮机器人稳定到平衡位置, 独轮机器人侧平衡过程如图 8 所示, 由图 8 可知独轮机器人经过两次超调后迅速稳定到了平衡位置, 调节时间约为 3.7ms. 侧向力矩发生装置提供的侧平衡力矩如图 8 所示, 其变化趋势正好与独轮机器人的横滚角变化相反, 由图 9 可以看出, 侧向力矩发生装置在 3.1ms 后就不再提供侧平衡力矩, 依靠惯性就可以使独轮机器人侧向达到平衡位置, 这也表明机器人采用控制算法具有一定的智能. 装置的转速变化如图 10 所示, 可以看出该力矩发生装置有个启动的过程, 在 0.1ms 时达到了所需的转速, 在后续的控制中, 从 2ms 后装置的转速就很低了, 进入微调阶段, 在 3.1ms 后装置就不再转动, 这与装置所提供侧向力矩数据一致, 且这与 GYROVER 相比更加节能.

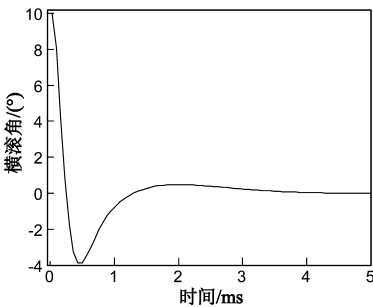


图8 独轮机器人横滚角变化实验结果

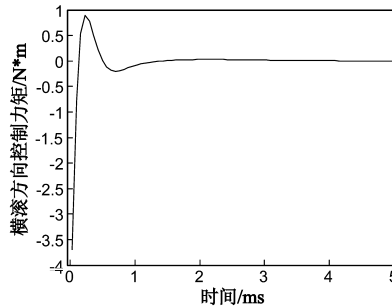


图9 横滚方向控制力矩变化实验结果

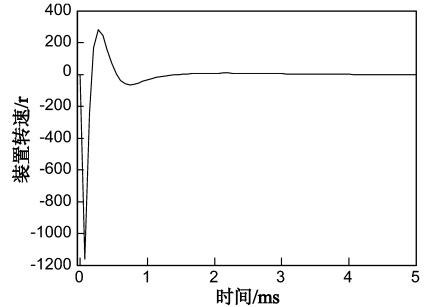


图10 电磁力矩发生装置转速变化实验结果

4.3 装置在独轮机器人偏航控制中应用

为实现类似文献[28]的机器人轨迹跟踪和文献[29]的机器人转向避障功能, 必须给独轮机器人以偏航力矩. 将本文设计的电磁感应力矩发生装置加载到独轮机器人本体上, 安装时保持电枢绕组的转动所形成的面与独轮机器人前进方向平行, 即电枢绕组的轴与

独轮机器人系统的偏航轴 yaw 平行. 由于将独轮机器人完全解耦, 所以其三个自由度完全独立, 在保证独轮机器人大致竖直情况下, 安放在独轮机器人中部的偏航力矩发生装置提供偏航所需的偏航力矩, 也就是向心力. 实验中, 独轮机器人从坐标点(1,0)开始做逆时针的单位圆周运动, 图 11 显示的是独轮机器人两个坐标

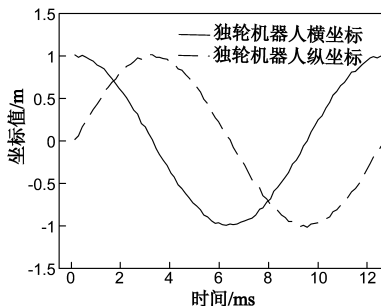


图11 独轮机器人坐标值随时间变化实验结果

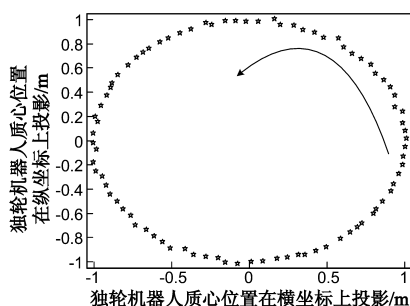


图12 独轮机器人质心坐标在地面上的投影坐标

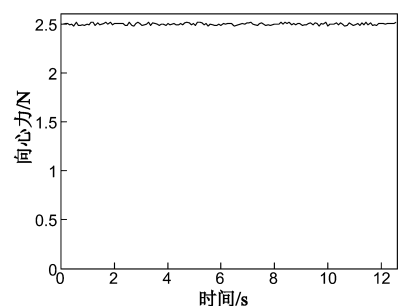


图13 独轮机器人做圆周运动时力矩发生装置提供的偏航力矩

位置随时间的变化情况,图 12 显示的独轮机器人质心坐标在地面坐标系内的投影坐标.由图 11 和图 12 可知独轮机器人较好地完成了圆周运动,偏航力矩发生装置发挥了预计的作用.实验中,独轮机器人的线速度约为 0.5m/s ,运行的圆周的半径为 1m ,运行一周所需时间约为 12.6s .由经典力学可计算出独轮机器人做上述匀速圆周运动所需的向心力为 2.5N (实验中独轮机器人的总质量为 5Kg),这与实验中测量到偏航力矩发生装置提供的力矩数据(如图 13)一致,实验中偏航力矩发生装置的转速约为 778r ,与利用公式(7)反向计算出的理论值 778.0625r 几乎一致.

5 结论

本文为解决欠驱动系统的欠驱动难题,设计一种基于电磁感应的力矩发生装置.该装置利用通电导体与磁场间的相互作用力,借鉴电机的部分原理,将电场和磁场间的作用力矩传递到欠驱动系统上.在独轮机器人侧向和偏航控制中的良好表现验证了本文提出力矩发生装置的有效性.并且与之前的独轮机器人的侧向控制装置相比,侧偏的起偏角大大提高,甚至可以实现极限的 90 度起偏至平衡位置,即平躺情况下自主平衡站立,这一点之前独轮机器人研究中只有 GYROVER 可以做到;另外在独轮机器人偏航控制中本文提出的力矩发生装置更能发挥出巨大作用,在一定程度上可以奠定在独轮偏航控制中基础.本文提出的力矩发生装置不仅可在独轮机器人上使用,在导弹、航天器、卫星、直升飞机等姿态调整亦可发挥重要作用.与其他欠驱动解决方案相比本文提出的力矩发生装置具有以下优点:(1)所提供的力矩正比于速度项,方便使用电机进行控制;(2)装置为电磁式传动装置,可实现电磁式变速,与通过不同大小齿轮咬合等实现变速相比具有无死区、无机械损耗和无噪声等优点;(3)不需要提供力矩时无能力消耗,节约能量.

参考文献

- [1] Ryu J C, Agrawal S K. Planning and control of under-actuated mobile manipulators using differential flatness [J]. *Autonomous Robots*, 2010, 29(1): 35 – 52.
- [2] Li Z J, Yang Y P, Li J X. Adaptive motion/force control of mobile under-actuated manipulators with dynamics uncertainties by dynamic coupling and output feedback [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1068 – 1079.
- [3] Zhang W Z, Che D M, et al. Super under-actuated multi-fingered mechanical hand with modular self-adaptive gear-rack mechanism [J]. *Industrial Robot*, 2009, 36(3): 255 – 262.
- [4] Qian D W, Yi J Q, Zhao D B. Hierarchical sliding mode control for a class of SIMO under-actuated systems [J]. *Control and Cybernetics*, 2008, 37(1): 159 – 175.
- [5] Han Y. A robust algorithm for model-following control of under-actuated systems and its application to a non-holonomic robot and an aircraft [J]. *International Journal of Systems Science*, 2005, 36(6): 341 – 356.
- [6] Sun N, Fang Y C. New energy analytical results for the regulation of underactuated overhead cranes: an end-effector motion-based approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(12): 4723 – 4734.
- [7] Sun N, Fang Y C, Zhang X B. An increased coupling-based control method for underactuated crane systems: theoretical design and experimental implementation [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 70(2): 1135 – 1146.
- [8] Ruan X G, Chen J, Yu N G. Thalamic cooperation between the cerebellum and basal ganglia with a new tropism-based action-dependent heuristic dynamic programming method [J]. *Neurocomputing*, 2012, 93: 27 – 40.
- [9] Schoonwinkel A. Design and test of a computer stabilized unicycle [D]. California: Stanford University, 1987. 46 – 51.
- [10] Xu Y S, Au S K W. Stabilization and path following of a single wheel robot [J]. *IEEE – ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(2): 407 – 419.
- [11] Au S K W, Xu Y S, Yu W W K. Control of tilt-up motion of a single wheel robot via model-based and human-based controllers [J]. *Mechatronics*, 2001, 11(4): 451 – 473.
- [12] Xu Y S, Brown H B, Au K W. Dynamic mobility with single-wheel configuration [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1999, 18(7): 728 – 738.
- [13] Brown H B, Xu Y S. A single-wheel, gyroscopically stabilized robot [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 1997, 4(3): 39 – 44.
- [14] 郭磊, 廖启征, 魏世民, 等. 独轮车机器人的动力学建模与非线性控制 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(9): 2730 – 2734.
- [15] Guo L, Wei Q Z, et al. Dynamical modeling of unicycle robot and nonlinear control [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(9): 2730 – 2734. (in Chinese)
- [16] Lee J H, Shin H J, Lee S J, Jung S. Novel air blowing control for balancing a unicycle robot [A]. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2010. 2529 – 2530.
- [17] MURATA MANUFACTURING CO., LTD. Murata boy and Murata girl [EB/OL]. http://www.murata.com.cn/corporate/boy_girl/, 2007 – 09 – 23.
- [18] 王启源. 独轮自平衡机器人建模与控制研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011. 22 – 44.
- [19] Wang Q Y. Single-wheeled self-balancing robot modeling and

- control[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. 22 – 44. (in Chinese)
- [18] 熊梅. 独轮机器人姿态控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 13 – 25.
Xiong M. Study on posture control algorithm of the unicycle robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 13 – 25 (in Chinese)
- [19] 孙俊生, 武传松. 电磁力及其对 MIG 焊接熔池流场的影响[J]. 物理学报, 2001, 50 (02): 209 – 216.
Sun J S, Wu C S. The electromagnetic force and its influence on the weldpool fluid flow MIG weiding[J]. Acta Physica Sinica 2001, 50 (02): 209 – 216. (in Chinese)
- [20] Yan L, Chen I M, Lim C K, Yang G L, Lee K M. Modeling and iron effect analysis on magnetic field and torque output of electromagnetic spherical actuators with iron stator[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17 (6): 1080 – 1087.
- [21] 梅栋杰, 范宝春, 陈耀慧, 叶经方. 槽道湍流展向振荡电磁力控制的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59 (12): 8335 – 8342.
Mei D J, Fan B C, Cheng Y, Ye J F. Experimental investigation on turbulent channel flow utilizing spanwise oscillating Lorentz force[J]. Acta Physica Sinica 2010, 59 (12): 8335 – 8342. (in Chinese)
- [22] Wang YF, He L L. Effect of magnetic circuit's structure parameters on torque-speed characteristic for electromagnetic damper[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383: 2038 – 2044.
- [23] 余彦超, 张蔚曦, 王登龙. 电磁感应透明介质中非线性法拉第偏转[J]. 物理学报, 2011, 60 (06): 319 – 324.
Yu Y C, Zhang W X, Wang D L. Nonlinear faraday rotation in electromagnetically induce transparency medium[J]. Acta Physica Sinica 2011, 60(06): 319 – 324. (in Chinese)
- [24] 姚鸣, 朱卡的, 袁晓忠, 蒋逸文, 吴卓杰. 声子辅助的电磁感应透明和超慢光效应的研究[J]. 物理学报, 2006, 55 (04): 1769 – 1773.
Yao D, Zhu K D, Yuan X Z, Jiang Y W, Wu Z J. Phonon mediated electromagnetically induced transparency and ultraslow light in strongly coupled exciton-phonon systems[J]. Acta Physica Sinica 2006, 55 (04): 1769 – 1773. (in Chinese)
- [25] 张明晓, 田学雷, 郭风祥. 电磁感应式液固态金属电阻率定性测量装置及应用[J]. 物理学报, 2009, 58 (09): 6080 – 6085.
Zhang M X, Tian X L, Guo F X. Design and application of a device based on electromagnetic induction principle for electrical resistivity qualitative measurement of liquid and solid metals[J]. Acta Physica Sinica 2009, 58(09): 6080 – 6085. (in Chinese)
- [26] 黄以华, 杨智, 陈挚睿, 宋军江. 压电变压器在冷阴极管驱动器中的应用研究[J]. 电子学报, 2006, 34(05): 800 – 803.
Huang Y H, Yang Z, Chen Z R. The Research on the application of the piezoelectric transformer in cold-cathode fluorescent lamp driver[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(05): 800 – 803. (in Chinese)
- [27] 韩丽霞, 王宇平. 求解无约束优化问题的类电磁机制算法[J]. 电子学报, 2009, 37(03): 664 – 668.
Hang L X, Wang Y P. Electromagnetism-Like mechanism algorithm for unconstrained optimization problem[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(03): 664 – 668. (in Chinese)
- [28] 曹政才, 赵应涛, 付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(04): 632 – 635.
Cao Z C, Zhao Y T, Fu Y L. trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(04): 632 – 635. (in Chinese)
- [29] 江济良, 屠大维, 许 烁, 赵其杰. 基于生物触角的仿生条件反射机器人导航算法[J]. 电子学报, 2013, 41 (2): 388 – 394.
Jiang J L, Tu D X, Xu S, Zhao Q J. Mobile robot navigation algorithm of biometric conditioned reflex based on biological antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 388 – 394. (in Chinese)

作者简介



朱晓庆 男, 1987 年出生, 江苏徐州人. 北京工业大学电信信息与控制工程学院博士研究生, 国家公派高水平研究生至加拿大麦吉尔大学联合培养. 研究方向为机器人系统设计与控制.

E-mail: alex.zhuxq@gmail.com



阮晓钢 男, 1958 年出生, 四川自贡人. 1982 年获哈尔滨船舶工程学院工学学士学位, 1989 年和 1992 年浙江大学分别获得工学硕士和工学博士学位在、北京工业大学电信信息与控制工程学院教授、博士生导师, 人工智能与机器人研究所所长. 研究方向为机器人与人工智能.

E-mail: adrxg@bjut.edu.cn