

一种基于 CPG 的两足机器人步态生成方法

李福东, 李金良, 于 岩, 樊炳辉

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266510)

摘 要:提出一种基于中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)的双足机器人步态生成方法。应用 Matsuoka 振荡器设计了 CPG 控制器,其输出控制踝关节角度,膝关节和髋关节角度通过轨迹规划得到。通过将 CPG 输出与“引导曲线”叠加,实现了机器人的连续稳定行走。该方法避免了 CPG 繁杂的参数优化过程,是 CPG 应用的一大进步。MATLAB 仿真结果证明了所提方法的可行性。

关键词:中枢模式发生器;双足机器人;步态生成;参数优化过程

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)03-0095-06

A New Method for Gait Synthesis of Biped Robot Based on CPG

LI Fudong, LI Jinliang, YU Yan, FAN Binghui

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract:A new method for gait synthesis of biped robot based on CPG was proposed. In this method, a CPG controller was designed by using Matsuoka oscillators and the angles of the ankles were controlled by the output of CPG, and the angles of the knees and hips were achieved through trajectory planning. A stable and continuous walking pattern of the robot was obtained by simply adding the “leading curve” to the outputs of the CPG. This is a great improvement in CPG application because it avoids the complicated parameters optimization procedure of the CPG. MATLAB simulation results prove that the method is feasible.

Key words:central pattern generator(CPG); biped robot; gait synthesis; parameters optimization procedure

双足机器人的步态规划是机器人研究领域的一个重点和难点。近年来,结构化地形下的步态规划有了很大进展,但是非结构化地形下的行走适应性研究尚未有突破性进展。随着生物学和神经科学的发展,一些新的研究成果给机器人研究提供了新的思路,尤其是 CPG 出现后,其控制节律运动的稳定性和环境适应性吸引了很多机器人学者的关注^[1]。

目前,有不少学者使用 CPG 来控制机器人步态生成,其中应用最成功的是 Kimura 等^[2]的四足机器狗 Tekken2,该机器狗采用 CPG 控制不仅能实现多种步态行走,而且能适应室外未知地形。但是,该机器狗中 CPG 的参数都是在实验的基础上得出的,没有参数的优化过程。国内的 CPG 研究也取得了一些进展,比如中国科学院自动化研究所的研究人员利用 Matsuoka 提出的 CPG 振荡器成功实现了对仿生鱼的控制^[3]。上海交通大学的姜山等将 CPG 控制器用于双足机器人 SFHR(上海交通大学与富士通公司共同研制的仿人

收稿日期:2010-11-28

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20103718120004)。

作者简介:李福东(1985—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事双足机器人、仿生机器人方面的研究。

E-mail: lfd19850108@126.com.

李金良(1975—),男,山东沂水人,副教授,博士,主要从事机器人定位与导航、机器人视觉、机器人控制、特种机器人等研究。E-mail: leejinliang@sohu.com.

机器人), 并使用多目标遗传算法实现了其参数的优化^[4], 但是其过程十分复杂, 因而, 将 CPG 实际应用 to 机器人上仍有不少困难。

虽然 CPG 的研究有了不少进展, 但由于 CPG 振荡器本身就是非线性系统, 很难确定输出波形的周期、相位、幅值等与各参数之间的函数关系, 这限制了 CPG 在机器人上的应用。另外, 如果多自由度机器人各关节全部应用 CPG 控制, 则需要大量 CPG 振荡器来组成 CPG 网络。这样, 大量非线性振荡器加上它们之间的相互耦合作用, 其输出波形的确定难度可想而知。所以, 就目前 CPG 的研究状况来看, 完全用 CPG 来生成机器人的步态并非最好的选择。因此, 本研究提出一种通过综合轨迹规划法加 CPG 控制来生成机器人步态的方法。

1 运动学模型及其运动学逆解

七杆双足机器人的结构如图 1 所示, 基本参数如表 1 所示。脚的质心在脚掌处, 其他各连杆质心在连杆中点处。在右脚质心处建立参考坐标系如图 1 所示, 各坐标系(左脚)如图 2 所示, 所有坐标系的 Z 轴均为沿关节轴线方向指向纸外, 为清晰表示坐标的变换过程, 选择左脚开始抬起的状态进行标注。

按照黄强等^[5]提出的方法, 通过对机器人踝关节的运动距离、高度、摆动角度和髋关节的运动距离、高度、躯干的倾斜角度进行约束来生成机器人行走轨迹。由于两个踝关节的角度由 CPG 输出控制, 行走轨迹只能有 4 个约束, 因此, 不对髋关节高度和脚的摆动角度做约束。

根据 Denavit-Hartenberg 法建立坐标后, 坐标变换过程如下^[6]:

$${}^0_0\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} {}^4_5\mathbf{T}, \quad {}^0_2\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T}, \quad {}^0_5\mathbf{T} = {}^0_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} {}^4_5\mathbf{T}.$$

${}^i_j\mathbf{T}$ 是一个 4×4 的齐次变换矩阵, 它表示坐标系 $\{j\}$ 在坐标系 $\{i\}$ 中的描述。

运动学逆解过程如下:

髋关节坐标 ${}^0_3\mathbf{P}^T = (l_2, 0, 0, 1)$, ${}^0_3\mathbf{P}^T = (x_h, y_h, 0, 1)$,

${}^0_3\mathbf{P}^T$ 表示坐标系 $\{3\}$ 的原点(即髋关节)在坐标系 $\{2\}$ 中的坐标的转置, ${}^0_3\mathbf{P}^T$ 表示髋关节在坐标系 $\{0\}$ 中的坐标的转置。根据髋关节坐标转换关系: ${}^0_3\mathbf{P}^T = {}^0_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{P}^T$, 再结合右脚踝关节的坐标转换关系可以得出

$$\begin{cases} (c_{12}l_2 + c_1l_1)u_{11} - (s_{12}l_2 + s_1l_1)u_{21} + u_{14} = x_h \\ \theta_a + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \theta_h \\ (c_{45}l_5 + c_4l_4)v_{11} - (s_{45}l_5 + s_4l_4)v_{21} + v_{14} = x_a \\ (c_{45}l_5 + c_4l_4)v_{21} - (s_{45}l_5 + s_4l_4)v_{11} + v_{24} = y_a \end{cases} \quad (1)$$

其中: $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$; $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$; u_{11}, u_{21}, u_{14} 分别是 ${}^0_2\mathbf{T}$ 的 $(1, 1), (2, 1), (1, 4)$ 元素; $v_{11}, v_{21}, v_{14}, v_{24}$ 分别是 ${}^0_3\mathbf{T}$ 的 $(1, 1), (2, 1), (1, 4), (2, 4)$ 元素; x_a, y_a, x_h, θ_h 分别是踝关节在 x 向的轨迹, 踝关节在 y 向的

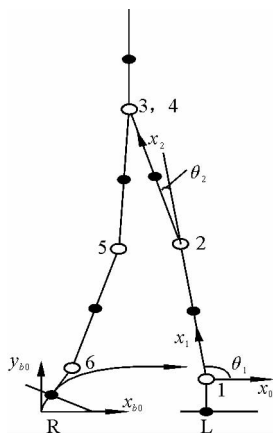


图 1 七杆双足机器人示意图

Fig. 1 Sketch of 7-link biped robot

表 1 机器人模型的基本参数表

Tab. 1 Basic parameters of the robot model

参数	数值	参数	数值
踝高(l_{an})/cm	5	脚质量(m_1)/kg	5
小腿长(l_1)/cm	30	小腿质量(m_2)/kg	5
大腿长(l_2)/cm	30	大腿质量(m_3)/kg	7
躯干长(l_3)/cm	10	躯干质量(m_4)/kg	40
后脚掌长(f_1)/cm	5	单腿支撑期(T_s)/s	2.4
前脚掌长(f_2)/cm	7	双腿支撑期(T_d)/s	0.6
步长(D_s)/cm	30		

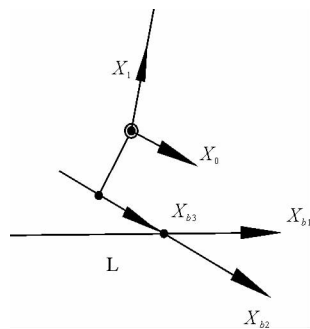


图 2 坐标变换(左脚)图

Fig. 2 Coordinates transformation(left foot)

轨迹,髋关节在 x 向的轨迹以及躯干的角度(在基系 $\{b_0\}$ 中)。

θ_a 根据踝关节的轨迹与脚的几何关系 $f_2(1 - \cos \theta_a) + f_1 \sin \theta_a = x_a - D_s$ 求得。

令 $k_1 = (c_1 u_{11} - s_1 u_{21}) l_1$, $k_2 = (s_1 u_{11} + c_1 u_{21}) l_2$, $m_x = x_h - u_{14} - c_1 l_1 u_{11} - s_1 l_1 u_{21}$, $k_4 = c_5 l_5 v_{11} - s_5 l_5 v_{21} + l_4 v_{11}$, $k_5 = s_5 l_5 v_{11} + c_5 l_5 v_{21} + l_4 v_{21}$, $r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$, 解方程组(1)可得

$$\begin{cases} \theta_2 = \text{atan2}(\sqrt{r^2 - m_x^2}, m_x) - \text{atan2}(k_2, k_1) \\ \theta_3 = \theta_h - \theta_1 - \theta_2 - \theta_a \\ \theta_5 = \text{atan2}(s_5, c_5) \\ \theta_4 = \text{atan2}(y_a - v_{24}, x_a - v_{14}) - \text{atan2}(k_5, k_4) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $c_5 = \cos \theta_5 = \frac{(x_a - v_{14})^2 + (y_a - v_{24})^2 - l_4^2 - l_5^2}{2l_4 l_5}$; $s_5 = \sqrt{1 - c_5^2}$; l_4, l_5 分别是机器人右大腿和右小腿的长度, atan2 是能够区分象限的反正切函数。

在解算过程中, θ_1 与 θ_6 由 CPG 控制, 作为已知, 但它们并不是简单的 CPG 输出, 下面一节中将对 θ_1 与 θ_6 的产生过程进行说明。

2 基于 CPG 的步态生成

CPG 有多种模型, 其中, 应用最广泛的是 Mastuoka 振荡器模型。采用 2 个 Mastuoka 振荡器(每个振荡器由 2 个相互抑制的神经元组成), 连接形成一个简单的 CPG 网络, 如图 3 所示。

采用张秀丽修改过的 CPG 数学模型^[7], 可以避免因过零死区引起的运动停滞, 具体的微分方程为:

$$\begin{cases} \tau_i u_i^{(f,e)} = -u_i^{(f,e)} + b v_i^{(f,e)} + a y_i^{(e,f)} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j^{(f,e)} + u_0 + \text{Feed}_i \\ \tau'_i v_i^{(f,e)} = -v_i^{(f,e)} + y_i^{(f,e)} \\ y_i^{(f,e)} = f(u_i^{(f,e)}) \\ f(u_i^{(f,e)}) = \max(0, u_i^{(f,e)}) \\ y_i = y_i^f - y_i^e \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

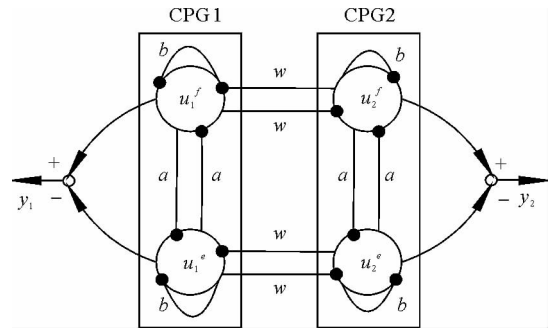


图 3 CPG 网络模型示意图

Fig. 3 Sketch of CPG network model

表 2 CPG 实验参数表

Tab. 2 Experimental parameters of the CPG

参数	$\tau_1 \sim \tau_4$	$\tau'_1 \sim \tau'_4$	a	b	u_0	w
数值	0.185	1.85	0.3	2	0.3	1

实验所用的 CPG 参数值如表 2 所示。

τ_i 与 τ'_i 为振荡器的上升时间常数和适应时间常数, 下标 i 与上标 f, e 分别表示第 i 个振荡器、屈肌、伸肌神经元, w_{ij} 为振荡器 j 到 i 的连接权重, a 为细胞间互抑制系数, b 为细胞自抑制适应系数, u_0 为恒定激励输入, Feed_i 为反馈项。

如果直接将 CPG 的输出 y_1 和 y_2 赋给 θ_1 和 θ_6 , 则由于未对脚的摆动角度进行规划, 将造成脚的摆动没有规律, 不能保证行走的连续性。虽然可以通过对 CPG 参数进行优化来解决这个问题, 但 CPG 的参数较多, 其优化过程会非常复杂, 甚至可能得不到所需波形。在此提出一种解决行走连续性问题方法: 为 CPG 的输出叠加“引导曲线”, 具体过程如下。

1) 以右脚为例, 对脚尖离地、脚后跟着地、脚掌完全着地的 3 个瞬间(图 4) 进行运动学逆解, 得到踝关节的三组瞬时角度: θ_{11} 和 θ_{61}, θ_{12} 和 θ_{62}, θ_{13} 和 θ_{63} 。

2) 生成“引导曲线”

$$\begin{cases} y_{10} = \theta_{11} - \frac{1}{3}y_1(t), t = kT_c \\ y_{10} = \theta_{12} - \frac{1}{3}y_1(t), t = kT_c + T_d \\ y_{10} = \theta_{13} - \frac{1}{3}y_1(t), t = kT_c + T_c \end{cases} \quad (4)$$

按式(4)生成一条三次样条插值曲线,即“引导曲线” y_{10} ,同样可得 y_{60} 。选取系数 $\frac{1}{3}$ 是为了取得合适的CPG 振荡幅度。

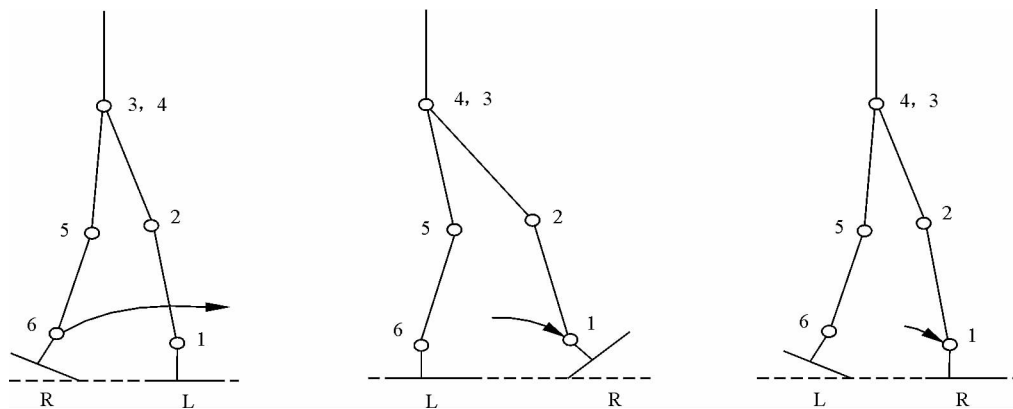


图4 行走的3个关键瞬间图

Fig. 4 Three key moments of the walking

3) $\frac{y_1}{3} + y_{10}$, $\frac{y_2}{3} + y_{60}$ 分别赋给 θ_1 和 θ_6 , 确定了 θ_1 和 θ_6 后,即可进行第1节里的运动学逆解过程,最终获得机器人的步态。这样生成的步态由于对3个关键瞬时的姿态进行了约束,所以能够很好地实现行走的连续性和周期性。

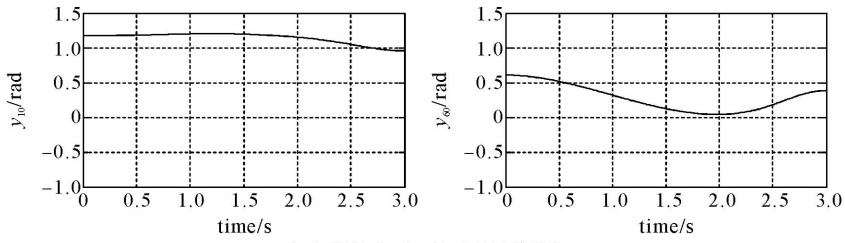
CPG 的抗干扰性是由它对初值不敏感的特点决定的。引入适当的反馈并加入合适的反射机制后,当机器人受到干扰时反射机制便会起作用,对控制力或控制角度有一个突然调节作用,使其产生一个跃变。传统的控制对这个跃变需要经过一段时间的反馈来消除,甚至无法消除而导致运动不稳定。而 CPG 则由于它对初值不敏感,在接收了这个跃变之后,很快便会把这个跃变“消化”掉,重新恢复其稳定振荡状态。所以,CPG 控制的机器人有一定的抗干扰性^[2]。

本研究的仿真过程没有加入反馈项(即 $Feed_i = 0$),因为要使反射机制真正起到“调节”作用,反馈项需要经过大量实验和分析,其形式比较复杂。但是,这不影响所提出的步态生成方法的普遍性和正确性。

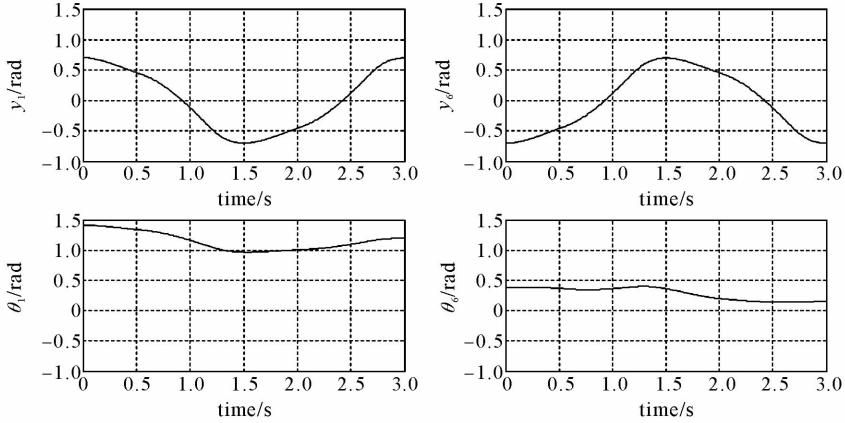
3 仿真结果分析

图5是CPG直接控制步态与叠加“引导曲线”后控制步态的对比。

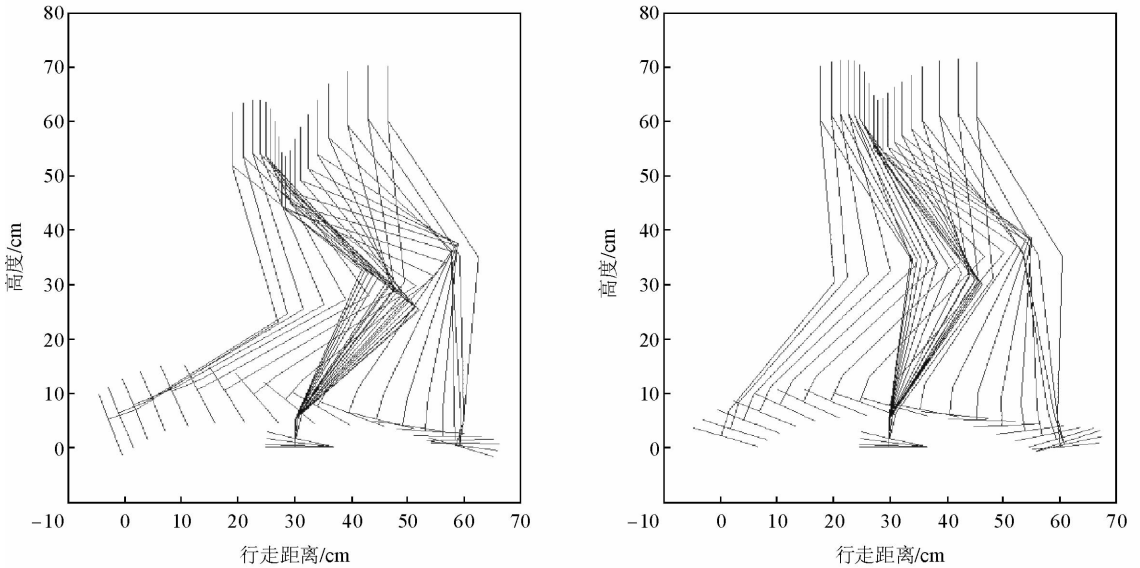
从图5(b)左图可以看出,CPG的直接输出为对称振荡波形,这与正常行走的踝关节角度曲线相差太远,图5(b)右图是叠加了图5(a)中的“引导曲线”而生成的踝关节角度曲线,相当于让CPG沿着“引导曲线”振荡,而不是自由地对称振荡,其效果是约束了机器人行走的3个关键姿势。从图5(c)可以看出,未叠加“引导曲线”之前,机器人行走过程中脚的摆动角度很乱,无法形成连续稳定行走。叠加“引导曲线”之后,脚的摆动角度在行走的3个关键瞬间受到约束,成功实现了机器人的连续稳定行走。从图5(c)中也可以看出,机器人的行走并不完美,髋关节的起伏较大,这是因为没有对髋关节的高度进行全程约束。



(a) 踝关节1和6的“引导曲线”



(b) 叠加“引导曲线”前后两个踝关节角度曲线



(c) 叠加“引导曲线”前后机器人行走姿态

图 5 行走仿真图

Fig. 5 The diagram of walking simulation

4 结论

对基于 CPG 控制的平面双足步行机器人的步态规划进行了研究,通过将 CPG 的输出与“引导曲线”叠加成功地实现了步态的周期性和连续性,改变了以往应用 CPG 要通过大量的实验或者通过繁杂的优化过程来确定参数的情况,并通过 Matlab 仿真验证了方法的可行性。所提出的叠加“引导曲线”的方法对于将 CPG 成功应用于两足机器人步态生成具有较为重要的意义,同时对于多足机器人的步态生成也有很好的启发性。

参考文献:

- [1]TAGA G, YAMAGUCHI Y, SHIMIZU H. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment[J]. *Biological Cybernetics*, 1991, 65: 147-159.
- [2]KIMURA H, FUKUOKA Y, COHEN A H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(5): 475-490.
- [3]王龙, 谭民, 曹志强, 等. 基于CPG模型的仿生鱼运动控制[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(5): 769-755.
WANG Long, TAN Min, CAO Zhiqiang, et al. CPG based motion control of biomimetic robotic fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(5): 769-755.
- [4]姜山, 包志军. 基于多目标遗传算法的仿人机器人中枢神经运动控制器的设计[J]. *机器人*, 2001, 23(1): 58-62.
JIANG Shan, BAO Zhijun. GA based self-organized stable humanoid robot walking pattern generators design[J]. *Robot*, 2001, 23(1): 58-62.
- [5]HUANG Q, YOKOI K, KAJITA S, et al. Planning walking patterns for a biped robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280-289.
- [6]CRAIG J J. Introduction to robotics; mechanics and control[M]. 3rd edition. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [7]张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [8]KIMURA H, AKIYAMA S, SAKURAMA K. Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator[J]. *Autonomous Robots*, 1999, 7(3): 247-258.
- [9]VUKOBRATOVIC M, BOROVAC B. Zero-moment point-thirty five years of its life[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2004, 1(1): 157-173.
- [10]LIU G L, HABIB M K, WATANABE K, et al. Central pattern generators based on Matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2008, 12(2): 264-269.

(上接第94页)

- [7]刘美全, 徐章遂. 基于漏磁的表面裂纹识别及评估[J]. *北京科技大学学报*, 2005, 25(6): 575-579.
LIU Meiquan, XU Zhangsui. Distinction and evaluation of adjacent parallel surface cracks based on magnetic flux leakage [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 25(6): 575-579.
- [8]仲维畅. 磁化场方向影响磁粉显现缺陷的理论[J]. *无损检测*, 1995, 17(5): 138-142.
ZHONG Weichang. Theory of effect of magnetizing field orientation on revealing defects by magnetic particles[J]. *Nondestructive Testing*, 1995, 17(5): 138-142.
- [9]谭波, 康宜华, 贾冬花. 移动式油管纵横缺陷检测系统的研制[J]. *机械与电子*, 2006(11): 47-49.
TAN Bo, KANG Yihua, JIA Donghua. Development of portable testing system for longitude and circumferential flaw of oil pipe[J]. *Machinery & Electronics*, 2006(11): 47-49.
- [10]邹应国. 油管纵向及横向缺陷自动检测系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.