

基于混合模型的舰船腐蚀相关静态电、磁场

陈 聪, 龚沈光, 李定国

(海军工程大学 应用物理系, 武汉 430033, cckx7145@sohu.com)

摘 要: 为研究舰船水下腐蚀相关静态电场、磁场的分布特征, 提出了以舰船水下标量电位为线索, 对舰船进行混合建模, 即将舰船等效为水平电流线和离散三分量电偶极子的组合, 通过测量舰船下方某平面上的标量电位分布, 对混合模型中的未知结构参量进行拟合, 以建好的混合模型为基础对舰船水下腐蚀相关静态电、磁场进行研究. 在实验室中模拟海洋环境, 利用 1:100 船模对建模方法进行了验证, 并以建好的混合模型为基础, 计算了船模水下腐蚀相关静态电、磁场的分布特征. 实验结果表明混合模型结构简洁、实测数据量小、建模计算量小、模型稳定, 比较适合用于舰船腐蚀相关静态电、磁场分布特点的研究.

关键词: 混合模型; 腐蚀相关静态电磁场; 水下标量电位; 电流线; 电偶极子

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)03-0495-05

Corrosion related static electric and magnetic field of ships based on mixed modeling

CHEN Cong, GONG Shen-guang, LI Ding-guo

(Dept. of Applied Physics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China, cckx7145@sohu.com)

Abstract: Mixed modeling method with underwater electric potential as a clue is put forward in order to research the distribution characteristics of corrosion related static electric and magnetic fields of a ship, that is to regard a ship as a combination of horizontal current line and several discrete dipoles. The unknown parameters of the mixed model can be found out by fitting the measuring data of the underwater electric potential in a plane under the ship. Then the characteristics of corrosion related static electric and magnetic fields underwater can be studied based on the mixed model. The ocean environment has been simulated in laboratory, then the method of mixed modeling has been validated by experiments using a 1:100 physical scale model of a ship, then the distribution of corrosion related static electric and magnetic fields of the ship model has been calculated based on the built mixed model. The experimental results show that the mixed modeling has advantages of less unknown parameters, easier actual measurement, less calculation and more stabilization.

Key words: mixed modeling; corrosion related static electric and magnetic fields; underwater electric potential; current line; electric dipole

舰船的腐蚀和防腐措施不可避免地带来相关的电、磁信号,且来源于腐蚀和防腐措施的静态电场是舰船周围静态电场的主要组成部分^[1],而腐蚀相关的静态磁场(场分布与距离的二次方成反比)则由于其衰减比由舰船铁磁性材料的磁性产

生的静态磁场(场分布与距离的三次方成反比)要慢^[2],在已消磁舰船远场中以腐蚀相关静态磁场为主,目前已逐渐引起了研究者的重视.除了实船和实验室船模的实测以外,对舰船水下腐蚀相关电、磁场的研究都离不开数学模型研究^[3-4].特别是腐蚀相关磁场,由于它和舰船固有磁性产生的磁场在实测中无法分开,只能利用模型计算来分析其大小及分布特征.目前可见到的建模方法主要有有限元法^[5-6]、边界元法^[7-10]、偶极子源

收稿日期: 2008-09-11.

基金项目: 国防预研基金资助项目(51444070105JB11).

作者简介: 陈 聪(1971—),女,博士,副教授;

龚沈光(1939—),男,教授,博士生导师.

法^[11-14]. 其中发展起来并且逐步实用的方法是边界元法和偶极子源法, 两种方法各有优势. 国内在该方向的研究则主要采用偶极子源法, 通常采用在舰船水下部分位置规律分布且固定的三分量电偶极子阵列来建模^[15]. 原则上该建模方法可以不考虑舰船结构、防腐系统布局、舰船表面涂层完好性等因素, 可直接根据测得的场分布来建模.

本文提出以舰船水下标量电位为线索, 对舰船进行混合建模并且以此为基础进行腐蚀相关静态电、磁场的研究. 混合模型中, 水平电流线用来模拟舰船水下标量电位的绝大部分, 离散的三分量电偶极子则进行细节的补充修正. 这种新的建模方法将在保证模型精度的前提下减少计算量和实测数据量, 并且提高模型的稳定性, 而且由于标量电位易于测量, 因此更适合用于舰船腐蚀相关静态电、磁场分布特点的研究.

1 混合建模方法

对舰船进行混合建模, 即将舰船等效为水平电流线和离散三分量电偶极子的组合, 其中未知的结构参量则通过测量舰船下方某平面上的标量电位分布来进行拟合. 混合模型建立后, 舰船周围的场分布可以用混合模型产生的场来替代, 从而可以对场分布特征进行研究.

考虑空气-海水-海床3层海洋结构, 海水深度设为 D . 如图1建立直角坐标(图1中未画出海底), 以 $z=0$ 的平面为海平面, 原点选在舰船的中心, z 的正方向指向地心, x 正方向指向船首, y 正方向指向船的右舷. 将舰船等效为一根水平电流线和几个离散的三分量电偶极子的组合, 如图1中直线和点示意. 设水平电流线的起点和终点位置分别为 (x_0, y_0, z_0) 、 $(x_0 + L, y_0, z_0)$, 电流方向沿 x 正方向, 大小设为 I_x ; 三分量电偶极子共 n 个, 其位置分别位于 (x_i, y_i, z_i) 处, $i: 1 \sim n$, 3 个方

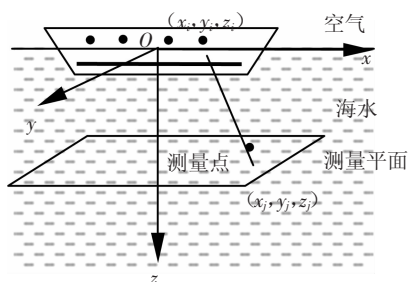


图1 水平电流线+离散电偶极子建模

向的偶极矩分别设为 (P_{xi}, P_{yi}, P_{zi}) . 上述模型参数可以全部待定, 也可以根据经验设定部分.

为拟合出未知模型参数, 需在舰船下方一定面积的测量平面上的 m 个场点 (x_j, y_j, z_j) 进行舰

船水下标量电位的测量, 假设测量值分别为 Φ_j , $j: 1 \sim m$.

电流线在第 j 个场点处产生的标量电位 Φ_{j0} ^[16] 为

$$\Phi_{j0} = f_{j0} I_x. \quad (1)$$

其中,

$$f_{j0} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\eta^k}{4\pi\sigma_1 r_{1kj}} + \frac{\eta^k}{4\pi\sigma_1 r_{2kj}} \right] \Big|_{x_0}^{x_0+L} + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\eta^m}{4\pi\sigma_1 r_{1mj}} + \frac{\eta^m}{4\pi\sigma_1 r_{2mj}} \right] \Big|_{x_0}^{x_0+L}. \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}. \quad (3)$$

$$r_{1kj} = (x_j - x)i + (y_j - y_0)j + (z_j - 2kD + z_0)k. \quad (4)$$

$$r_{2kj} = (x_j - x)i + (y_j - y_0)j + (z_j - 2kD - z_0)k. \quad (5)$$

$$r_{1mj} = (x_j - x)i + (y_j - y_0)j + (z_j + 2mD + z_0)k. \quad (6)$$

$$r_{2mj} = (x_j - x)i + (y_j - y_0)j + (z_j + 2mD - z_0)k. \quad (7)$$

式中: σ_1, σ_2 分别为海水和海床的电导率. x 的取值先后为 $x_0, x_0 + L$.

位于 (x_i, y_i, z_i) 处的三分量电偶极子源在第 j 个场点 (x_j, y_j, z_j) 处产生的标量电位 Φ_{ji} 为

$$\Phi_{ji}(x_j, y_j, z_j) = f_{ji} P_{xi} + g_{ji} P_{yi} + h_{ji} P_{zi}. \quad (8)$$

其中,

$$f_{ji} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\eta^k (x_j - x_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1kji}^3} + \frac{\eta^k (x_j - x_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2kji}^3} \right] + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\eta^m (x_j - x_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1mji}^3} + \frac{\eta^m (x_j - x_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2mji}^3} \right]. \quad (9)$$

$$g_{ji} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\eta^k (y_j - y_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1kji}^3} + \frac{\eta^k (y_j - y_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2kji}^3} \right] + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\eta^m (y_j - y_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1mji}^3} + \frac{\eta^m (y_j - y_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2mji}^3} \right]. \quad (10)$$

$$h_{ji} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[-\frac{\eta^k (z_j - 2kD + z_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1kji}^3} + \frac{\eta^k (z_j - 2kD - z_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2kji}^3} \right] + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\eta^m (z_j + 2mD - z_i)}{4\pi\sigma_1 r_{1mji}^3} - \frac{\eta^m (z_j + 2mD + z_i)}{4\pi\sigma_1 r_{2mji}^3} \right]. \quad (11)$$

其中,

$$r_{1kji} = (x_j - x_i)i + (y_j - y_i)j + (z_j - 2kD + z_i)k. \quad (12)$$

$$r_{2kji} = (x_j - x_i)i + (y_j - y_i)j + (z_j - 2kD - z_i)k. \quad (13)$$

$$r_{1mji} = (x_j - x_i)i + (y_j - y_i)j + (z_j + 2mD - z_i)k. \quad (14)$$

$$r_{2mj\bar{i}} = (x_j - x_i)\bar{i} + (y_j - y_i)\bar{j} + (z_j + 2mD + z_i)\bar{k}.$$
 (15)

由叠加原理,第j个场点处的标量电位 Φ_j 应
是所有源产生的标量电位的叠加,因此有:

$$\Phi_j = \sum_{i=0}^n \Phi_{ji}.$$
 (16)

当j:1 ~ m,则可以得到m个方程,它们组成
一个线性方程组.用m×(3n+1)矩阵A来表示
方程组的系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} f_{10} & f_{11} \cdots f_{1n} & g_{11} \cdots g_{1n} & h_{11} \cdots h_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m0} & f_{m1} \cdots f_{mn} & g_{m1} \cdots g_{mn} & h_{m1} \cdots h_{mn} \end{bmatrix}.$$
 (17)

将待求量组成(3n+1)×1矩阵X为

$$X = [I_x \ P_{x1} \ \cdots \ P_{xn} \ P_{y1} \ \cdots \ P_{yn} \ P_{z1} \ \cdots \ P_{zn}]^T.$$
 (18)

将测量所得场量组成m×1矩阵Ψ为

$$\Psi = [\Phi_1 \ \cdots \ \Phi_m]^T.$$
 (19)

则线性方程组可用矩阵表示为

$$AX = \Psi.$$
 (20)

一般测量的场点较多,用最小二乘法解此矛盾
方程组即可拟合出未知的模型参量.

2 船模实验验模

利用船模实验来验证建模方法,并以此来分
析船模水下腐蚀相关静态电、磁场的分布特点.实
验室模拟海洋环境,按1:100设计制作船模,并外
加阴极保护系统(ICCP系统),采用测量电极线阵
测量船模下方网格状测量平面上的标量电位分
布,并以此来对船模混合模型中的未知参量进行
拟合,从而完成混合模型的建立.

测量平面上的舰船水下标量电位分布如图2
所示.图2中船模中轴线方向为y方向,x为其正
横距离.从图2可以明显看出带ICCP系统的舰船
水下标量电位分布的主体特征与水平电流线相
似,因此采用水平电流线来模拟其绝大部分场分
布特征是合理的.在设定的拟合精度下,由测量结
果对水平电流线的起点、终点的位置坐标、等效电
流、以及离散偶极子的位置和偶极矩进行拟合.建
好的混合模型在同深度测量平面上产生的标量电
位分布如图3所示.

将图2、图3进行多个视角对比,可见混合模
型的水下标量电位分布已能够较好的模拟实际船
模水下标量电位分布;同时建模过程中计算量小,
耗时短,模型较为稳定,另外由于实验中被测量物

理量为标量,实际测量过程相对容易完成.上述验
模过程表明混合建模不失为一种较为理想的开展
舰船水下腐蚀相关静态电场、磁场模型研究的
方法.

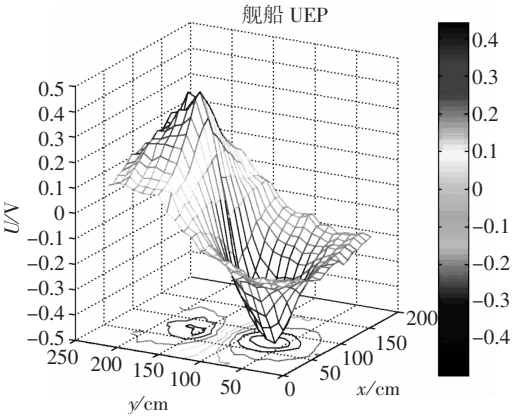


图2 (-61°,16°)视角时水下电位三维分布图

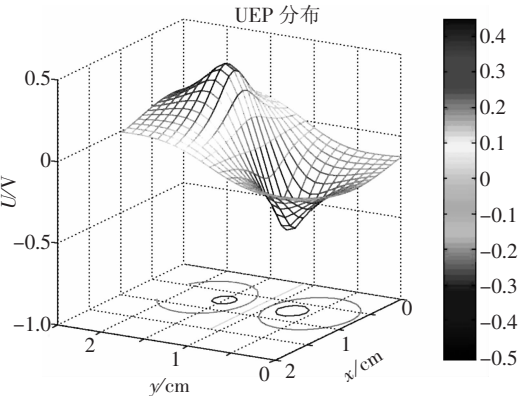


图3 混合模型模拟结果

当然若设置更高的拟合精度要求,需要的离
散偶极子个数将增多,计算量也将相应地增大.但
由于采用电流线模拟了舰船绝大部分场分布特
征,因此相对全部采用离散三分量电偶极子的建
模方法而言,模型待定参数少,相应的建模计算量
大大减少.对于有特殊需求的ICCP系统,只需改
变水平电流线的走向或者采用多根水平电流线的
组合即可.

3 船模下方腐蚀相关静态电、磁场分布

3.1 腐蚀相关静态电场分布

可计算腐蚀相关静态电场强度分布如图4
所示.结果表明:

1)电场的3个方向的分量均呈现出关于船模中
轴线的一定的对称性.这个对称性起源于船模本
身的对称性及外加ICCP系统的对称性.

2)船模下方平面上的电场分布主要体现为水平
电流线的电场分布特征,部分细节上的差异来源于

离散电偶极子.

3) 在船模、海水环境及 ICCP 系统的各个参数条件下, 船模下方单方向场强最大值可达 1 V 多. 此时

可由缩比模型理论^[17-18]结合实验条件参数估计实船的水下场分布.

4) 船模下方近场特征明显.

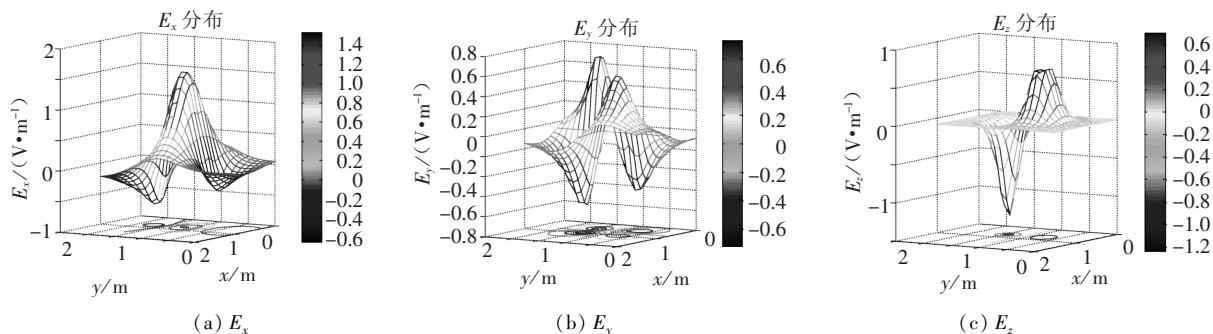


图4 腐蚀相关静态电场三维分布图

3.2 腐蚀相关静态磁场分布

可计算腐蚀相关静态磁场强度分布如图5所示.

从计算结果可以看出, 腐蚀相关磁场的3个方向的分量也呈现出关于船模中轴线的一定的对称性, 场的主要特征与水平电流线相似; 有明显的

近场特征, 且在船模结构、海水环境及 ICCP 系统的各个参数条件下, 船模下方单方向腐蚀相关静态磁场强度的最大值数量级可达 10^{-2} A/m, 由缩比模型理论, 这也是实际舰船在相关条件下产生磁场的最大值数量级.

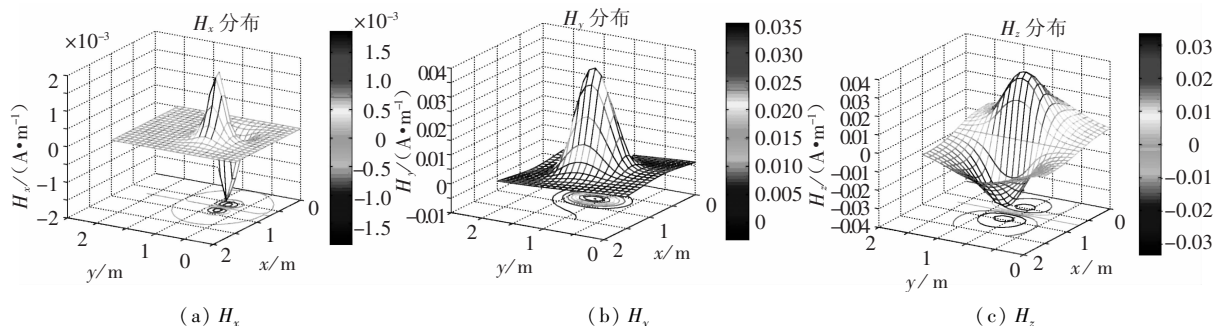


图5 腐蚀相关磁场三维分布图

4 结 论

1) 混合建模思路即用“水平电流线+离散电偶极子”对舰船进行建模, 用水平电流线来模拟舰船场特征的绝大部分, 用少量几个离散的三分量电偶极子来模拟场细节. 其方法是将舰船等效为一个水平电流线和几个离散的三分量电偶极子的组合, 通过测量舰船下方某平面上的多个点的水下标量电位值, 拟合出混合模型中的未知参量.

2) 按一定缩尺比在实验室中模拟海水和船模及其 ICCP 系统, 测量了船模下方一定面积的平面上的标量电位分布, 由此建立相应的混合模型. 由于建模所需物理量是标量, 因此相对于三维场量的测量实施起来要方便得多; 同时模型中待定的参数较完全用离散偶极子建模要少得多, 需要的已知场量的个数也相应的减少, 因此混合建模方法计算量小, 模型相对要稳定得多.

3) 在已建好的船模的混合模型的基础上, 对船模下方某平面上的腐蚀相关电、磁场的分布特

征进行了计算和分析, 得到了其分布特征, 并可根据计算结果及缩比模型理论估计实船的水下场分布. 结果表明来源于腐蚀和防腐的船模水下电场和磁场近场特征非常明显, 是值得关注的目标信号. 特别是其中与腐蚀相关的磁场信号, 由于无法直接通过实验测量来获得, 只能通过模型拟合的方式进行理论计算. 本文中对于腐蚀相关磁场的计算首次提供了实船水下来源于腐蚀防腐电流的静态磁场的分布特征和量值大小的信息.

参考文献:

- [1] 叶贤平, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 283-287.
- [2] DEMILIER L, DURAND C, RANNOU C, et al. Corrosion related electromagnetic signatures measurements and modelling on a 1:40th scaled model [J]. Simulation of Electro-chemical Processes II, 2007(54): 368.
- [3] 傅金祝, 译. 与腐蚀有关的磁特征管理[J]. 水雷战与舰船防护, 2000(2): 48-52.
- [4] HUANG Y, IWATA M, JIN Z L. Numerical analysis of

- electropotential distribution on the surface of marine structure under cathodic protection (application of three dimensional BEM) [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1990(168):589-592.
- [5] KASPER R G, APRIL M G. Electrogalvanic finite element analysis of partially protected marine structures [J]. Corrosion, 1983, 39(5):181-183.
- [6] NAGAI K, IWATA M, OGAWA K. Numerical analysis of potential distribution in electrolyte under cathodic protection (Part 2 application of 3-D FEM) [J]. Journal of the West-Japan Society of Naval Architects, 1987, 38(4):114-116.
- [7] IWATA M, HUANG Y, FUJIMOTO Y. Application of BEM to design of the impressed current cathodic protection system for ship hull [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1992(171):377-380.
- [8] CHAUANG J M, ZAMANI N G, HSIUNG C C. Some computational aspects of BEM simulation of cathodic protection systems [J]. Applied Mathematical Modeling, 1987, 11(5):371-379.
- [9] ZAMANI N G. Boundary element simulation of the cathodic protection system in a prototype ship [J]. Applied Mathematics and Computation, 1988, 26(2):119-134.
- [10] ADEY R, BAYNHAM J. Predicting corrosion related electrical and magnetic fields using BEM [C]//Conf Proc UDT Europe, London: UK. 2000:473-475.
- [11] RAWLINS P G. Aspects of corrosion related magnetic (CRM) signature management [C]//Conf Proc UDT Europe. London: UK, 1998:237-241.
- [12] HOITHAM P, JEFFREY I, BROOKING B, *et al.* Electromagnetic signature modeling and reduction [C]//Conf Proc UDT Europe. London: UK, 1999:97-100.
- [13] DAVIDSON S J, RAWLINS P G. Characterisation of the seabed conductivity environment in littoral waters for electromagnetic signature analysis [C]//Conf Proc UDT Europe. London: UK, 2000:384-391.
- [14] ADEY R, BAYNHAM J. Predicting corrosion related signatures. Simulation of Electrochemical Processes II [J]. Engineering Sciences, 2007(54):368-371.
- [15] 刘胜道. 舰船水下电场的测试技术与电偶极子模型研究 [D]. 武汉:海军工程大学, 2002:48-52.
- [16] 陈聪. 舰船电磁场的模型研究及深度换算 [D]. 武汉:海军工程大学, 2008:67-101.
- [17] MCGRATH J N, TIGHE-FORD D J, HODGKISS L. Scale modeling of a ship's impressed-current cathodic protection system [J]. Corrosion Prevention & Control, 1985(4):36-39.
- [18] DITCHFIELD R W, MCGRATH J N, TIGHE-FORD D J. Theoretical validation of the physical scale modeling of the electrical potential characteristics of marine impressed current cathodic protection [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995(25):54-60.

(编辑 张 红)

(上接第494页)

参考文献:

- [1] ESPIAN B, SARDAIN P. The anthropomorphic biped robot B IP2000 [C]//Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA: [s. n.], 2000:3997-4002.
- [2] 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.
- [3] MOCHON S, MCMAHON T A. Ballistic walking [J]. Biomechan, 1980, 13:49-57.
- [4] MCGEER T. Passive dynamic walking [J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2):62-82.
- [5] MCGEER T. Passive dynamic biped catalogue [C]//Proc Experiment Robotics II: The 2nd International Symposium. Berlin:Springer-Verlag, 1992:465-490.
- [6] GARCIA M, CHATTERJEE A, RUINA A, *et al.* The simplest walking model: stability, complexity, and scaling [J]. ASME Journal of Biomechanic Engineering, 1998, 120(2):281-288.
- [7] COLLINS S H, WISSE M, RUINA A. A 3-d passive dynamic walking robot with two legs and knees [J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(7):607-615.
- [8] COLLINS S H, RUINA A. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005:1983-1988.
- [9] TEDRAKE R, ZHANG T W, SEUNG H S. Stochastic policy gradient reinforcement learning on a simple 3D biped [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York, NY, USA: IEEE, 2004:2849-2854.
- [10] SCHUITEMA E, HOBBELEN D G E, JONKER P P, *et al.* Using a controller based on reinforcement learning for a passive dynamic walking robot [C]//Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. New York, NY, USA: IEEE, 2005:232-237.
- [11] COLLINS S, RUINA A. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walker [J]. Science Magazine, 2005, 307:1082-1085.

(编辑 杨 波)