Proceedings of the 7th
World Congress on Intelligent Control and Automation
June 25 - 27, 2008, Chongqing, China

Motion Control of Micro Wall-Climbing Robot on Unsmoothed Wall

Yong Jiang, Hongguang Wang, Lijin Fang

Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016

***Abstract*—To solve the problem on automatic behavior control of a micro wall-climbing robot when its suction foot was not fulfilled enough vacuum pressure on an unsmoothed wall, a motion control method based on initiative exploration was proposed. Firstly the basic gaits of the micro wall-climbing robot were analyzed. Then a finite state machine model of the suction foot of the robot was introduced. In addition, the priority to transfer the state was defined according to the "handy" principle. The above-mentioned studies provided the foundation for the motion control method based on initiative exploration. Simulations and experiments show that the method can easily control the micro wall-climbing robot to search a proper touchdown point for its suction foot on the unsmoothed wall.**

***Keywords*—micro wall-climbing robot, motion control, initiative exploration, gait analysis**

欠平滑壁面上微小型爬壁机器人的运动控制

姜勇　　王洪光　　房立金

中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

摘　要　针对欠平滑壁面上微小型爬壁机器人吸盘足吸附失败后的自主行为控制问题，通过分析机器人的步态，建立了机器人吸盘足的有限状态机模型，并按"就近"原则设定状态转移优先级，提出了基于主动试探的微小型爬壁机器人着地点选择运动控制方法，并对该方法进行了仿真分析和实验验证，结果表明所提出方法在改善机器人控制性能，提高机器人自主能力方面是有效的。

关键词　微小型爬壁机器人，运动控制，主动试探，步态分析

1．引言

微小型爬壁机器人的吸附力是通过在吸盘和壁面之间的封闭空间内部产生真空负压来实现的。在爬壁机器人的运动空间中，一般都会存在不利于产生真空吸附力的障碍区域，例如表面缝隙、局部的凸起或凹陷等。如果这种障碍区域恰好处于吸盘与壁面之间并导致封闭空间漏气，使得内部真空度始终无法达到负载要求，则吸盘足将不能完成壁面吸附，从而影响后续动作的执行，一旦时间过长还有可能造成机器人倾翻的严重后果。J. Wettach 等在文献[1]中利用爬壁机器人多真空室吸附系统的热力学模型分析了混凝土墙壁裂缝导致漏气对真空负压产生的影响。为了避免这种情况的发生，一般的解决方法是改善吸盘足的吸附能力：一方面是从机构上考虑，设计出具有自适应能力的由多个真空室组成的吸盘足[2]，或者增加吸盘足的数量。例如日本东京工业大学的 NINJA[3]系列爬壁机器人的吸盘足设计；另一方面是从吸附方式上考虑，增加诸如粘接剂吸附、抓持吸附等辅助吸附方式。例如哈尔滨工业大学研制的爬壁机器人[4]等。这些方法都是以增大机器人的体积和能耗为代价的，并不适用于微小型爬壁机器人。本文从控制的角度出发，针对欠平滑壁面，根据步态分析结果，建立爬壁机器人吸盘足的有限状态机模型[5,6,7]，并按"就近"原则设定状态转移优先级，提出了一种基于主动试探的微小型爬壁机器人着地点选择运动控制方法。

国家"863"计划基金项目（资助号：2005AA420230）

2．微小型爬壁机器人

微小型爬壁机器人采用的是由四个旋转副和一个移动副构成的五自由度（RRPRR）三电机驱动的欠驱动机构[8]。如图 1 所示，吸盘足和腿之间的旋转关节 1 和 5 分别由两台电机（关节电机 1 和 3）独立驱动，使机器人产生两个俯仰自由度；关节电机 2 通过斜齿轮和齿轮齿条传动机构

驱动两条腿，形成一个伸缩自由度，即移动关节 3；旋转关节 2 和 4 是两个被动关节，分别位于机器人两条腿的末端，通过已解锁的齿条齿轮传动机构与移动关节 3 的运动耦合在腿和吸盘足之间产生两个回转自由度。根据两组齿条齿轮传动机构的解锁状态，微小型爬壁机器人可以实现 DLM、LUM 和 SUM 三种运动模式，并能够灵活地进行运动模式切换。

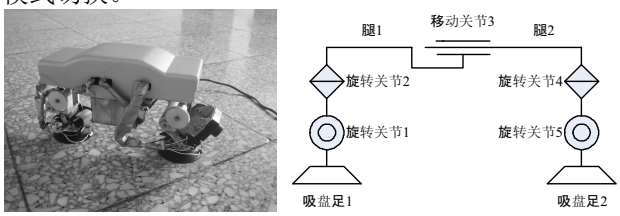


图 1　微小型爬壁机器人

DLM（双锁死模式）：两条腿上的齿条齿轮传动机构都处于锁死状态，旋转关节 2 和 4 同时被锁死，不能产生回转自由度。此时，关节电机 2 的输出力矩将驱动两条腿产生相对移动，从而使机器人本体伸长或者缩短；

LUM（伸长解锁模式）：当关节电机 2 驱动机器人本体伸长到某一长度时，腿 2 上的齿条齿轮传动机构将被解锁。此时，如果关节电机 2 继续驱动移动关节 3 伸长，则旋转关节 4 将与移动关节 3 产生运动耦合，从而在腿 2 和吸盘足 2 之间产生逆时针方向的相对转动；

SUM（缩短解锁模式）：当关节电机 2 驱动机器人本体缩短到某一长度时，腿 1 上的齿条齿轮传动机构将被解锁。此时，如果关节电机 2 继续驱动移动关节 3 收缩，则旋转关节 2 将与移动关节 3 产生运动耦合，从而在腿 1 和吸盘足 1 之间产生顺时针方向的相对转动。

微小型爬壁机器人的本体在伸长过程中，可以完成由 SUM 到 DLM 和由 DLM 到 LUM 之间的运动模式切换；在缩短过程中，可以完成由 LUM 到 DLM 和由 DLM 到 SUM 之间的运动模式切换；但是，LUM 和 SUM 之间不能直接进行运动模式的相互切换，必须要经过 DLM 过渡。

3．机器人步态分析

微小型爬壁机器人可以实现沿直线运动（前进、后退）和转向（SUM 左转、SUM 右转、LUM 左转、LUM 右转）两类共六种基本步态。

3.1　沿直线运动的步态

当微小型爬壁机器人处于 DLM 模式时，可以实现沿直线方向的运动，其运动步态可分解成六步，如图 2 所示。

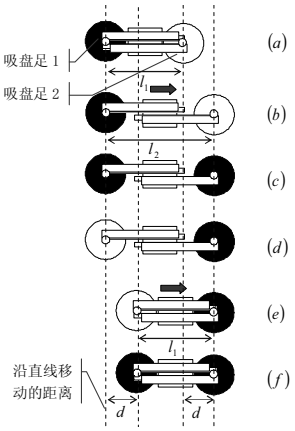


图 2　沿直线运动的步态

⑴ 吸盘足 1 吸附壁面，吸盘足 2 脱离，旋转关节 1 仰起 θ 角度（图 2(a)）；

⑵ 移动关节 3 伸长 d 距离（图 2(b)）；

⑶ 旋转关节 1 俯下 θ 角度，吸盘足 2 与壁面完全接触并吸附（图 2(c)）；

⑷ 吸盘足 1 脱离壁面，吸盘足 2 吸附，旋转关节 5 仰起 θ 角度（图 2(d)）；

⑸ 移动关节 3 缩短 d 距离（图 2(e)）；

⑹ 旋转关节 5 俯下 θ 角度，吸盘足 1 与壁面完全接触并吸附（图 2(f)）。

3.2　转向运动的步态

当微小型爬壁机器人处于 SUM 或 LUM 模式时，可以实现转向运动，即 SUM 左转、SUM 右转、LUM 左转和 LUM 右转。由于机器人机构的对称性设计，上述四种转向运动的过程基本相同，以 SUM 左转为例，其运动步态可分解成八步，如图 3 所示。

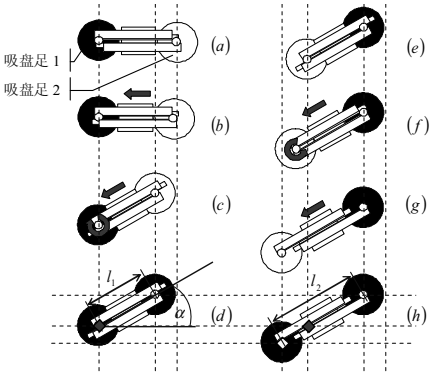


图 3　SUM 左转的步态

⑴ 吸盘足 1 吸附壁面，吸盘足 2 脱离，旋转关节 1 仰起 θ 角度（图 3(a)）；

⑵ 移动关节 3 收缩，使机器人从 DLM 模式切换到

SUM 模式（图 3(b)）；

⑶ 移动关节 3 继续收缩，旋转关节 2 随之产生耦合运动，机器人向左侧偏转α角度（图 3(c)）；

⑷ 移动关节 3 停止运动，旋转关节 1 俯下θ角度，吸盘足 2 与壁面完全接触并吸附（图 3(d)）；

⑸ 吸盘足 1 脱离壁面，吸盘足 2 吸附，旋转关节 5 仰起θ角度（图 3(e)）；

⑹ 移动关节 3 伸长，旋转关节 2 随之产生耦合运动，吸盘足 1 逆时针自转α角度（图 3(f)）；

⑺ 移动关节 3 继续伸长，使机器人由 SUM 模式切换到 DLM 模式（图 3(g)）；

⑻ 移动关节 3 停止运动，旋转关节 5 俯下θ角度，吸盘足 1 与壁面完全接触并吸附（图 3(h)）。

4．基于主动试探的运动控制

采用真空吸附方式的爬壁机器人对运动壁面的平滑程度有一定的要求。经过测试，在表面粗糙度参数$R_a \le 100\mu m$的情况下，微小型爬壁机器人可以产生满足负载要求的真空吸附力。然而，多数情况下，机器人的运动壁面都是欠平滑的。本文定义的欠平滑壁面具有以下两个特征：第一，壁面大部分区域的粗糙度$R_a \le 100um$，光滑而平整；第二，壁面局部区域的粗糙度过大，明显凸凹不平，或者局部不连续，存在裂缝、沟槽。

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \tag{1}$$

式中，y_i——基于中线的表面轮廓高度；n——所取的轮廓偏距数。

微小型爬壁机器人在欠平滑壁面上运动时，一旦由于着地点存在裂缝或凸凹不平而使吸盘足漏气，吸附力下降，最直接的办法就是通过调整步长或者改变运动方向来避开欠平滑区域，重新选择着地点。在缺乏壁面特征信息的前提下，实现机器人自主选择着地点的一个可行控制策略就是主动试探，即通过“吸附失败→调整着地点→再次吸附”的反复循环，对运动壁面的吸盘足着地点进行逐一尝试，直至吸附成功。

4.1 有限状态机模型

微小型爬壁机器人吸盘足的有限状态机模型M_s记为

$$M_s = (Q_s, \Sigma_s, \delta_s, q_{s0}, F_s) \tag{2}$$

式中，Q_s表示与吸盘足吸附和脱离动作相关的状态向量集合；Σ_s表示输入；q_{s0}表示吸盘足的初始状态；F_s表示吸盘足状态转移的末状态集合。δ_s表示吸盘足的状态转移函数。微小型爬壁机器人的状态向量v_i如表 1 所示：

表 1 状态向量

元素	LM		J_1		J_2		J_3	
位	15	14	13	12	11	10	9	8
元素	J_4		J_5		F_1	F_2	E	GS
位	7	6	5	4	3	2	1	0

LM——运动模式，“00”表示 DLM 模式，“01”表示 LUM 模式，“10”表示 SUM 模式，“11”无意义；

J_1——旋转关节 1 的运动状态，“00”表示静止，“01”表示仰起，“10”表示俯下，“11”无意义；

J_2——旋转关节 2 的运动状态，“00”表示静止，“01”表示顺时针转动，“10”表示逆时针转动，“11”无意义；

J_3——移动关节 3 的运动状态，“00”表示静止，“01”表示伸长，“10”表示缩短，“11”无意义；

J_4——旋转关节 4 的运动状态，“00”表示静止，“01”表示顺时针转动，“10”表示逆时针转动，“11”无意义；

J_5——旋转关节 5 的运动状态，“00”表示静止，“01”仰起，“10”表示俯下，“11”无意义；

F_1——吸盘足 1 的状态，“0”表示吸盘足 1 脱离壁面，“1”表示吸盘足 1 吸附壁面；

F_2——吸盘足 2 的状态，“0”表示吸盘足 2 脱离壁面，“1”表示吸盘足 2 吸附壁面；

E——无意义，取“0”；

GS——基本步态进程，“0”表示前半程阶段，“1”表示后半程阶段。

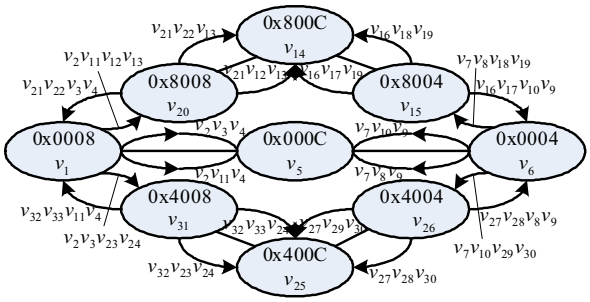


图 4 状态转移图

微小型爬壁机器人吸盘足的状态转移图如图 4 所示：它是一个既包括有向边又包括无向边的混合图，图中的结点对应着与吸盘足相关的状态向量；无向边表示其连接的两个结点状态可以无条件的互相转移；有向边表示其连接的两个结点之间状态转移是有方向和条件限制的，方向由图中的箭头标出，转移条件用状态转移函数δ_s表示；状态转移函数δ_s是以初始状态q_0和步态参数作为输入量，步态

链作为输出量的广义对应关系，其具体定义如下：

⑴ 步长调整函数 EL_Step 和 ST_Step：输入量是机器人的初始状态、转移后的目标状态和步长，即移动关节 3 的变化量 l_3；输出量根据转移状态的不同，分别对应两个步态链，记为

$$EL_Step(v_1, v_5, l_3) \to v_1 v_2 v_3 v_4 v_5$$
$$EL_Step(v_6, v_5, l_3) \to v_6 v_7 v_{10} v_9 v_5$$
$$ST_Step(v_1, v_5, l_3) \to v_1 v_2 v_{11} v_4 v_5$$
$$ST_Step(v_6, v_5, l_3) \to v_6 v_7 v_8 v_9 v_5$$

⑵ 转角调整函数 $SUM_LeftVeer$、$SUM_RightVeer$、$LUM_LeftVeer$ 和 $LUM_RightVeer$：输入量是机器人的初始状态、目标状态和旋转角度，即旋转关节 2 或 4 的变化量 γ_2 或 γ_4；输出量根据转移状态的不同，分别对应两个步态链，记为

$$SUM_LeftVeer(v_{20}, v_{14}, \gamma_2) \to v_{20} v_{21} v_{12} v_{13} v_{14}$$
$$SUM_LeftVeer(v_{15}, v_{14}, \gamma_2) \to v_{15} v_{16} v_{17} v_{19} v_{14}$$
$$SUM_RightVeer(v_{20}, v_{14}, \gamma_2) \to v_{20} v_{21} v_{22} v_{13} v_{14}$$
$$SUM_RightVeer(v_{15}, v_{14}, \gamma_2) \to v_{15} v_{16} v_{18} v_{19} v_{14}$$
$$LUM_LeftVeer(v_{31}, v_{25}, \gamma_4) \to v_{31} v_{32} v_{23} v_{24} v_{25}$$
$$LUM_LeftVeer(v_{26}, v_{25}, \gamma_4) \to v_{26} v_{27} v_{28} v_{30} v_{25}$$
$$LUM_RightVeer(v_{31}, v_{25}, \gamma_4) \to v_{31} v_{32} v_{33} v_{24} v_{25}$$
$$LUM_RightVeer(v_{26}, v_{25}, \gamma_4) \to v_{26} v_{27} v_{29} v_{30} v_{25}$$

⑶ 模式变换函数 DLM_SUM、SUM_DLM、DLM_LUM 和 LUM_DLM：输入量是机器人的初始状态和目标状态；输出量根据转移状态的不同，分别对应两个步态链，记为

$$DLM_SUM(v_1, v_{20}) \to v_1 v_2 v_{11} v_{12} v_{13} v_{20}$$
$$DLM_SUM(v_6, v_{15}) \to v_6 v_7 v_8 v_{18} v_{19} v_{15}$$
$$SUM_DLM(v_{20}, v_1) \to v_{20} v_{21} v_{22} v_3 v_4 v_1$$
$$SUM_DLM(v_{15}, v_6) \to v_{15} v_{16} v_{17} v_{10} v_9 v_6$$
$$DLM_LUM(v_1, v_{31}) \to v_1 v_2 v_3 v_{23} v_{24} v_{31}$$
$$DLM_LUM(v_6, v_{26}) \to v_6 v_7 v_{10} v_{29} v_{30} v_{26}$$
$$LUM_DLM(v_{31}, v_1) \to v_{31} v_{32} v_{33} v_{11} v_4 v_1$$
$$LUM_DLM(v_{26}, v_6) \to v_{26} v_{27} v_{28} v_8 v_9 v_6$$

4.2 主动试探算法

考虑到微小型爬壁机器人步态的多样性和复杂性，以当前状态的“就近”转移为原则，提出着地点选择运动控制主动试探算法如下：

⑴ 设集合 $A_{accid} = \{a_{accid1}, a_{accid2}, \cdots\}$，$\forall a_{accidi} \in A_{accid}$，$i = 1,2,\cdots$ 表示运动空间中机器人吸盘足吸附壁面失败的一个着地点位置，初始 $A_{accid} = \phi$；

⑵ 定位当前吸附失败的着地点 a_{accidk}，并将其作为新增元素对集合 A_{accid} 进行更新；

⑶ 区分当前吸盘足吸附失败是属于以下六种状态转移过程中的哪一种，即

① 0x0008 $\not\to$ 0x000C：DLM 吸盘足 2 吸附失败；
② 0x0004 $\not\to$ 0x000C：DLM 吸盘足 1 吸附失败；
③ 0x8008 $\not\to$ 0x800C：SUM 吸盘足 2 吸附失败；
④ 0x8004 $\not\to$ 0x800C：SUM 吸盘足 1 吸附失败；
⑤ 0x4008 $\not\to$ 0x400C：LUM 吸盘足 2 吸附失败；
⑥ 0x4004 $\not\to$ 0x400C：LUM 吸盘足 1 吸附失败。

⑷ 针对步骤 ⑶ 确定的状态转移过程，在排除集合 A_{accid} 所含区域的机器人运动空间中，按照表 2 规定的试探顺序选择优先级最高的未执行状态转移函数，对吸盘足着地点进行一次试探。如果吸附成功，结束试探过程；否则，返回到步骤 ⑵。

⑸ 如果优先级最低的试探结束后吸盘足仍未吸附成功，则机器人恢复到初始位姿。

5．仿真与实验

5.1 仿真

设微小型爬壁机器人的初始位姿 c_1 和目标点 P_{goal} 分别为

$$c_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 50 \end{bmatrix} \qquad P_{goal} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 400 \end{bmatrix}$$

在介于机器人和目标点之间的壁面上存在一个由 400×3 和 160×3 两条直线交叉而成的“十”字形裂缝，机器人的最大步长 $d_{ste} = 80$。

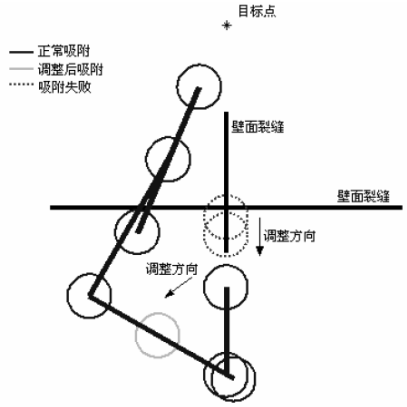


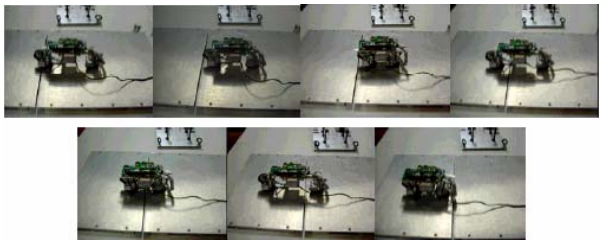
图 5 主动试探算法仿真

如图 5 所示，从仿真可以看出，当机器人以最大步长开始向目标点移动时，吸盘足 2 的着地点恰好落于“十”字形裂缝的交叉点上，经过延时等待，确认吸附失败，即

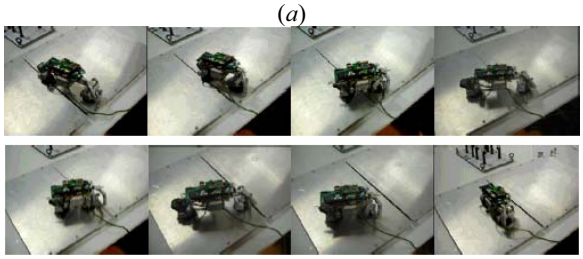
0x0008 $\not\rightarrow$ 0x000C。随后，按照预先设定的试探优先级，机器人选择优先级为 2 的状态转移函数 $ST_Step(v_1, v_5, d_{ste})$，将步长缩短至 $d_{ste} = 60$，进行第一次着地点试探，但是，这次试探没有成功。随后，按照预先的设定，机器人选择优先级为 3 的转向步态开始第二次着地点试探，即先执行模式变换函数 $BLM_SUM(v_1, v_{20})$，再执行转角调整函数 $SUM_LeftVeer(v_{20}, v_{14}, \gamma_2)$。经过 $\gamma_2 = \pi/3$ 方向调整，吸盘足 2 最终吸附成功。在完成转向步态后，机器人继续向目标点靠近。

5.2 实验

用两块铝板搭建模拟壁面裂缝的实验环境，在微小型爬壁机器人上对基于主动试探的着地点选择运动控制方法进行实验验证。实验如图 6(a)和(b)所示：



(a)



(b)

图 6 主动试探算法实验

从图 6(a)可以看出，当机器人向前移动时，前吸盘足恰好落在两块铝板的接缝处，经过吸盘足的自主调姿[9,10]和延时等待，始终无法完成吸附动作。随后，机器人缩短了步长，进行第一次着地点试探并吸附成功。在接下来的运动中，机器人将步长又恢复到初始值，最终顺利地跨过了板间缝隙。在图 6(b)的实验中，机器人的第一次着地点试探没有吸附成功，随后，机器人根据状态转移优先级进行了收缩左转的第二次着地点试探。这次试探使机器人成功避开了板间缝隙。

6．结论

本文针对欠平滑壁面上微小型爬壁机器人吸盘足吸附失败后的自主行为控制问题，在机器人步态分析基础上，建立了吸盘足的有限状态机模型，并按“就近”原则设定状态转移优先级，提出了基于主动试探的微小型爬壁机器人着地点选择运动控制方法。仿真分析和实验结果表明：机器人在壁面爬行过程中，一旦吸盘足落入粗糙区域并导致吸附失败，采用该方法能够有效地使机器人在较短的时间内找到合适的着地点，从而避开障碍。

参考文献

[1] J. Wettach, C. Hillenbrand and K. Berns. “Thermodynamical modelling and control of an adhesion system for a climbing robot,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Spain, vol. 1, pp. 2727-2732, 2005.

[2] 李曙生. 具有轮换移动机构的爬壁机器人研究. 泰州职业技术学院学报, 2(3), 14-17, 2002.

[3] S. Hirose, A. Nagakubo and R. Toyama. “Machine that can walk and climb on floors, walls and ceilings,” *Fifth International Conference on Advanced Robotics*, Japan, vol. 1, pp. 753-758, 1991.

[4] http://news.sina.com.cn/c/edu/2007-04-02/16311550626s.shtml

[5] D. Suwimonteerabuth and P. Chongstitvatana. “Online robot learning by reward and punishment for a mobile robot,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, Thailand, vol. 1, pp. 921-926, 2002.

[6] V. Montreuil, D. Duhaut and A. Drogoul. “A collective moving algorithm in modular robotics: contribution of communication capacities,” *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Finland, vol. 1, pp. 641-646, 2005.

[7] 贾建强, 陈卫东, 席裕庚. 基于有限状态机的足球机器人行为设计与综合. 高技术通讯, 14(4), 61-65, 2004.

[8] Jizhong Xiao, Jun Xiao and Ning Xi. “Minimal power control of a miniature climbing robot,” *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, USA, vol. 1, pp. 616-621, 2003.

[9] Jiang Yong, Wang Hongguang, Fang Lijin and Zhao Mingyang. “Adaptive control for a climbing robot to transit between differently inclined surfaces,” *JICC2005 The 11th Joint International Computer Conference*, China, vol. 1, pp. 275-281, 2005.

[10] Jiang Yong, Wang Hongguang, Fang Lijin and Zhao Mingyang. “A novel approach to fault detection and identification in suction foot control of a climbing robot,” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, vol. 1, pp. 3423-3428, 2006.

表 2 试探优先级

吸附失败的状态转移过程	试探行为	状态转移函数	优先级
0x0008 $\not\rightarrow$ 0x000C	调整步长	$EL_Step(v_1, v_5, d_{ste})$	1
		$ST_Step(v_1, v_5, d_{ste})$	2
	改变方向	$DLM_SUM(v_1, v_{20})$ $SUM_LeftVeer(v_{20}, v_{14}, \alpha)$	3
		$DLM_LUM(v_1, v_{31})$ $LUM_LeftVeer(v_{31}, v_{25}, \alpha)$	4
0x0004 $\not\rightarrow$ 0x000C	调整步长	$EL_Step(v_6, v_5, d_{ste})$	1
		$ST_Step(v_6, v_5, d_{ste})$	2
	改变方向	$DLM_LUM(v_6, v_{26})$ $LUM_LeftVeer(v_{26}, v_{25}, \alpha)$	3
		$DLM_SUM(v_6, v_{15})$ $SUM_LeftVeer(v_{15}, v_{14}, \alpha)$	4
0x8008 $\not\rightarrow$ 0x800C	调整转角	$SUM_LeftVeer(v_{20}, v_{14}, \alpha)$	1
		$SUM_RightVeer(v_{20}, v_{14}, \alpha)$	2
	改变模式	$SUM_DLM(v_{20}, v_1)$ $EL_Step(v_1, v_5, d_{ste})$	3
		$SUM_DLM(v_{20}, v_1)$ $DLM_LUM(v_1, v_{31})$ $LUM_LeftVeer(v_{31}, v_{25}, \alpha)$	4
0x8004 $\not\rightarrow$ 0x800C	改变模式	$SUM_DLM(v_{15}, v_6)$ $EL_Step(v_6, v_5, d_{ste})$	1
		$SUM_DLM(v_{15}, v_6)$ $DLM_LUM(v_6, v_{26})$ $LUM_RightVeer(v_{26}, v_{25}, \alpha)$	2
	调整转角	$SUM_LeftVeer(v_{15}, v_{14}, \alpha)$	3
		$SUM_RightVeer(v_{15}, v_{14}, \alpha)$	4
0x4008 $\not\rightarrow$ 0x400C	改变模式	$LUM_DLM(v_{31}, v_1)$ $ST_Step(v_1, v_5, d_{ste})$	1
		$LUM_DLM(v_{31}, v_1)$ $DLM_SUM(v_1, v_{20})$ $SUM_LeftVeer(v_{20}, v_{14}, \alpha)$	2
	调整转角	$LUM_LeftVeer(v_{31}, v_{25}, \alpha)$	3
		$LUM_RightVeer(v_{31}, v_{25}, \alpha)$	4
0x4004 $\not\rightarrow$ 0x400C	调整转角	$LUM_LeftVeer(v_{26}, v_{25}, \alpha)$	1
		$LUM_RightVeer(v_{26}, v_{25}, \alpha)$	2
	改变模式	$LUM_DLM(v_{26}, v_6)$ $ST_Step(v_6, v_5, d_{ste})$	3
		$LUM_DLM(v_{26}, v_6)$ $DLM_SUM(v_6, v_{15})$ $SUM_RightVeer(v_{15}, v_{14}, \alpha)$	4