# 被动无边轮辐运动特性的 Adams 仿真分析

胡运富，朱延河，吴晓光，赵 杰

（哈尔滨工业大学 机器人研究所，哈尔滨 150001，huyunfu134@yahoo.com.cn）

**摘 要**：对双足被动机器人最初模型——二维无边轮辐进行了研究，建立了其动力学模型，并通过 Adams 分析了其运动过程中的特点，逐一分析了轮辐初速度、质量、足半径、辐条数量、辐条长度、转动惯量以及斜面坡度对无边轮辐运动的影响. 结果表明：合适的初速度和斜面坡度，以及较大的质量、较大的足半径、较多的辐条数量、较短的辐条长度、较大的转动惯量会使无边轮辐形成快速而平稳的周期运动.

**关键词**：无边轮辐；Adams 仿真；被动模型；双足机器人

**中图分类号**：TP242 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)07－1076－04

# Adams simulation analysis of motion characteristic of passive rimless-wheel

HU Yun-fu, ZHU Yan-he, WU Xiao-guang, ZHAO Jie

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, huyunfu134@yahoo.com.cn)

**Abstract**: In order to get a better convergence and transition for passive bipedal robot research, this article analyzed the initial model of passive biped robot, i.e. the two-dimensional rimless-wheel model. Its dynamic model was constructed and its motion characteristic was analyzed with Adams. The effect of initial velocity, quality, foot radius, the number of spokes, the length of spoke, moment of inertia and slope gradient on the movement of rimless-wheel was analyzed. Results show that a right initial velocity and slope gradient, larger quality and foot radius, more and shorter spokes, as well as larger moment of inertia can lead to a fast and smooth cycle motion for rimless-wheel.

**Key words**: rimless-wheel; Adams simulation; passive model; characteristic analysis; biped robot

二维无边轮辐是通过间歇性碰撞接触在斜坡上向下进行运动的机械结构，它的运动体现了人类行走的本质特征，模仿了人类行走的足地接触[1]. 美国 Cornell 大学[2]，MIT[3] 和荷兰的 Delft 大学[4] 在被动机器人研究方面成绩突出[5]，也源自于无边轮辐运动的启发. Margaria[6] 和 Mcgeer[7-9] 最早对无边轮辐模型进行了研究. Mcgeer 还对无边轮辐运动的稳定性进行了理论分析[7-9]，国内对无边轮辐运动研究得很少，吉林大学的刘振泽对无边轮辐的运动进行了简单的描述[10]. 二维无边轮辐具有正多边形外轮廓，它会以不连续的运动方式沿倾斜地面向下滚动. 在重力作用和自身惯性的作用下，无边轮辐利用刚性辐条的不连续滚动来替代人类行走的平滑滚动. 二维无边轮辐沿斜坡向下滚动，可视为跨距恒定，并带有躯体的被动机器人模型，对该模型的研究为后续二维被动机器人的研究打下理论基础.

影响无边轮辐稳定周期运动的参数很多也很复杂. 当前，对无边轮辐的研究仅仅局限于纯理论的推导和分析[1]，为了与现实模型更接近，更好、更准确理解无边轮辐稳定运动的机理，本文通过 Adams 仿真，逐一分析各参数对无边轮辐运动的影响，给出无边轮辐稳定运动的参数组合，进而为后续被动机器人稳定行走的参数设计提供指导依据.

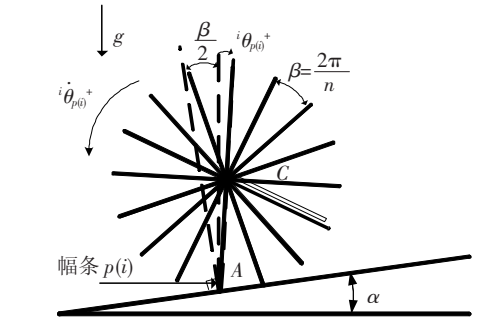
## 1 模 型

图 1 所示为斜面上的二维无边轮辐滚动模型. 设轮辐质量为 $m$，其相对质心的转动惯量为 $I_C$，轮辐辐条数为 $n$，辐条长度为 $L$，斜坡角度为 $\alpha$，辐条与地面接触端的圆弧半径为 $r$（也称为足半径），轮辐相邻辐条夹角为 $\beta(\beta = 2\pi/n)$，运动过程中总能量

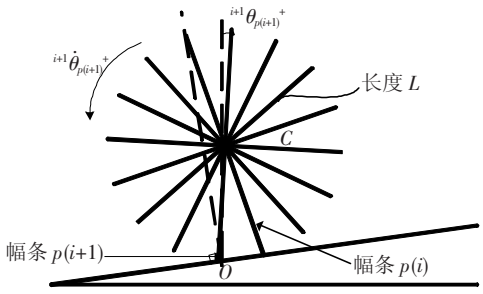
**收稿日期**：2009－03－11.

**作者简介**：胡运富(1985—)，男，硕士研究生；
赵 杰(1968—)，男，教授，博士生导师.

为 $E$. 当无边轮辐在沿斜面向下滚动时，辐条与地面碰撞可能会出现弹起或打滑等现象，同时还会造成更复杂运动极限环等[1]. 为了更好研究无边轮辐运动特性，作如下假设：辐条与地面碰撞为完全非弹性且瞬时完成，无打滑和弹起现象.




(a) ${}^{i}\dot{\theta}_{p(i)}{}^{+}=\alpha-\frac{\pi}{n}$




(b) ${}^{i+1}\dot{\theta}_{p(i+1)}{}^{+}=\alpha-\frac{\pi}{n}$

图 1　无边轮辐滚动的示意图

其运动过程描述为如下两个阶段：

1）当辐条一旦与地面碰撞后，辐条和地面就形成一个被动铰链，直到下个辐条与地面碰撞时结束，此过程中轮辐只在重力作用下做倒立摆运动，故由简单刚体倒立摆方程来描述[1]：

$$\ddot{\theta} - \lambda^2 \sin\theta = 0. \tag{1}$$

在两次碰撞间隔内位姿的角度变化范围在 $\theta \in [\alpha - \pi/n, \alpha + \pi/n]$，式(1) 中的二次微分项是对无量纲时间 $\tau = t\sqrt{g/L}$ 微分，且 $\lambda^2 = mL^2/(I_C + mL^2)$，$3 \leqslant n \leqslant \infty$，$0 \leqslant \alpha < \pi/2$.

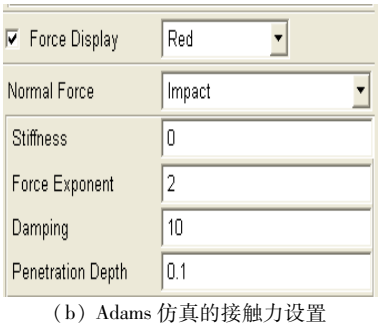
2）在下个辐条与地碰撞时，不考虑碰撞过程中重力的作用，碰撞前后系统的角动量守恒[1]，(用 $\boldsymbol{H}$ 表示角动量)，对于碰撞点 $O$：

$$\boldsymbol{H}_O^- = \boldsymbol{H}_O^+.$$

## 2　Adams 仿真设置

由于无边轮辐是复杂的非线性动力系统，建立其动力学数学模型时需要对轮辐结构参数、行走环境参数进行简化、优化，而 ADAMS 的仿真环境更逼近实际的实物试验环境. 因而通过 Adams 对无边轮辐仿真的结果对以后实际被动机器人物理样机的成功行走有实际的指导意义. 现给出本文用 Adams 仿真的细节和过程，如图 2 所示.

(a) 轮辐仿真动画




(b) Adams 仿真的接触力设置

图 2　Adams 仿真设置

在仿真中采用应用较广的 IMPACT 型接触力，各参数设置如图 2(b) 所示.

1）Stiffness 指定材料刚度. 一般来说，刚度值越大，积分求解越困难，但考虑到无边轮辐运动的所有分析是建立在完全非弹性的假设条件下，故取 Stiffness 值为 0；

2）Force Exponent 用来计算瞬时法向力中材料刚度项贡献值的指数. 通常取 1.5 或更大，其取值范围为 Force Exponent ≥ 1，对于橡胶可取 2 甚至 3；对于金属则常用 1.3 ~ 1.5，对于本次仿真取 Force Exponent 值为 2；

3）Damping 定义接触材料的阻尼属性. 取值范围为 Damping ≥ 0，对于一些橡胶和金属材料通常取 10 N · s/mm；

4) Penetration Depth 定义全阻尼(full damping)时的穿透值. 在零穿越值时，阻尼系数为零；ADAMS/Solver 运用三次 STEP 函数求解这两点之间的阻尼系数. 其取值范围为 Penetration Depth ≥ 0；对于一般的金属和橡胶材料取为 0.1 mm.

## 3　Adams 仿真分析

无边轮辐沿斜坡向下滚动时，在相邻两次碰撞的间隔内，轮辐绕支撑辐条做倒立摆运动，此时只有重力做功，故机械能守恒；在下一次碰撞瞬间前，轮辐的动能大于上一次碰撞后瞬间的动能；在碰撞后动能急剧减小，其后续运动可能为如下 3 种形式：

1）当轮辐在相邻两次碰撞的间隔内动能的

增量严格等于因下次碰撞而损失的能量，即每次碰撞后的初始状态等于上次碰撞后的初始状态，则轮辐将稳定地一直运动下去.

2）当轮辐在相邻两次碰撞的间隔内动能的增量总小于因下次碰撞而损失的能量，则轮辐向下滚动速度会越来越慢，直至停止.

3）当轮辐在相邻两次碰撞的间隔内动能的增量大于因下次碰撞而损失的能量，则轮辐速度会越来越快，直至达到稳定的周期运动.

图 3 反映了无边轮辐向下滚动时的能量随时间的变化关系，从图中可看出，势能在整个运动过程中逐渐减小，在相邻碰撞间势能是等差递减的，这说明轮辐每步的跨距是完全相等的且向下滚动；动能在每次碰撞时刻急剧减小，两次碰撞之间动能是总体增大，每次碰撞前的动能大于上次碰撞后的能量，而每次碰撞后瞬间的动能几乎相等，说明该轮辐此时的运动是稳定的；图 3 中总的机械能在相邻两次碰撞之间是恒定的，这是因为轮辐该阶段只在重力的作用下做倒立摆运动.

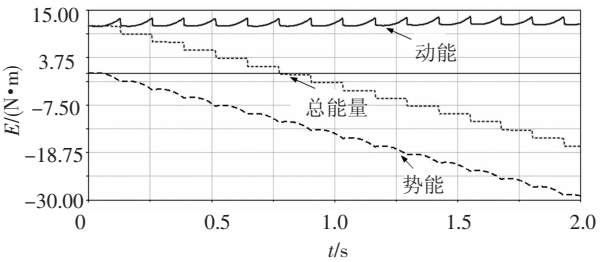
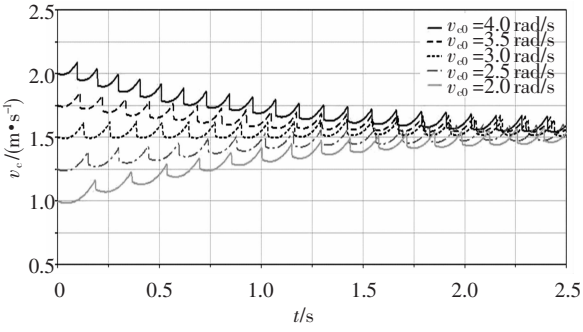



图 3 无边轮辐能量随时间变化曲线

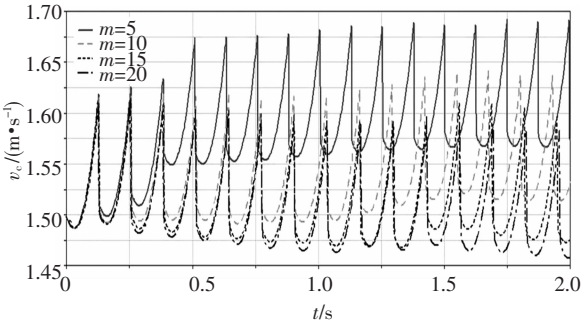
对无边轮辐向下稳定滚动产生影响的参数有很多，主要包括质心初速度 $v_{c0}$，质量 $m$，辐条的足半径 $r$，辐条数 $n$，辐条长度 $L$，转动惯量 $I_c$，斜面坡度 $\alpha$ 等，现在利用 Adams 仿真来逐一分析各参数对轮辐质心运动速度 $v_c$ 的影响（仿真中以下各参数单位：长度单位为 mm，质量单位为 kg，角度单位为 rad，时间单位为 s）：

从图 4（a）可看出，当轮辐的运动在其他参数一定时，质心初速度 $v_{c0}$ 对轮辐最终的稳定运动几乎无影响，当初速度 $v_{c0}$ 较小时，其速度会随时间逐渐增大，直到形成稳定的周期运动速度；当初速度 $v_{c0}$ 较大时，其速度会逐渐减小，直到形成稳定的周期运动速度. 初速度越大，轮辐在达到稳定运动之前，每次与地面碰撞损失的能量也越大（大于相邻两次碰撞之间的动能增量），同时运动也越不平稳.

从图 4（b）可看出，随着质量的增大，轮辐稳定运动的速度越小，每次支撑辐条与地面接触的时间也更长，因而运动更平稳.




（a）质心初速度对其质心速度变化的影响

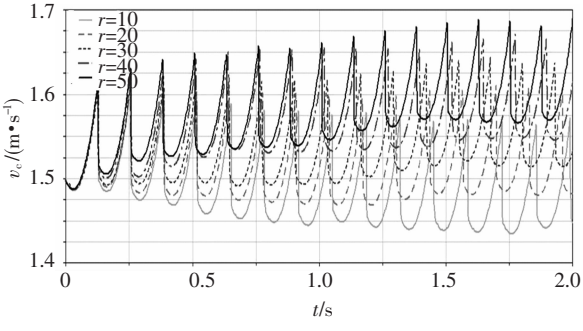



（b）质量对其质心速度变化的影响

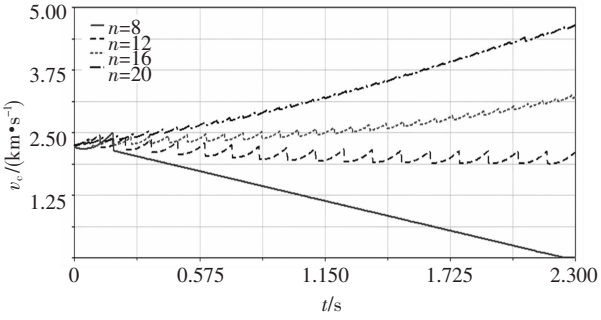
图 4 轮辐质心初速度和质量对其质心速度变化的影响

从图 5（a）可看出，当轮辐运动在其他参数一定时，随着足半径的增大，轮辐下滚的速度越来越大，由于相邻辐条长度和夹角是相同的，故跨距也是一定的，且相邻两次碰撞间重力做功是一样的，因此可说明足半径越大，足地碰撞损失的能量就越小，当损失的动能小于重力所做的功时，轮辐就向下滚动越来越快，而且可以看出足半径越大，运动也越来越平稳.

从图 5（b）可看出，当轮辐运动的其他参数一




（a）辐条足半径对其质心速度变化的影响



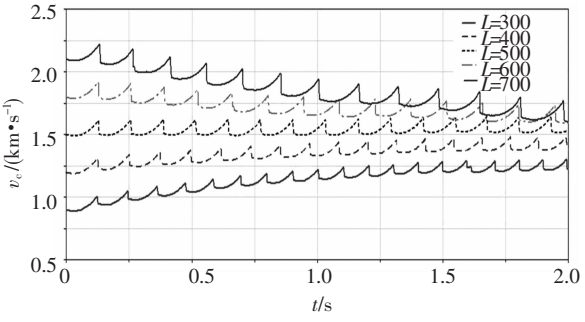

（b）辐条数量对其质心速度变化的影响

图 5 轮辐辐条足半径和辐条数量对其质心速度变化的影响

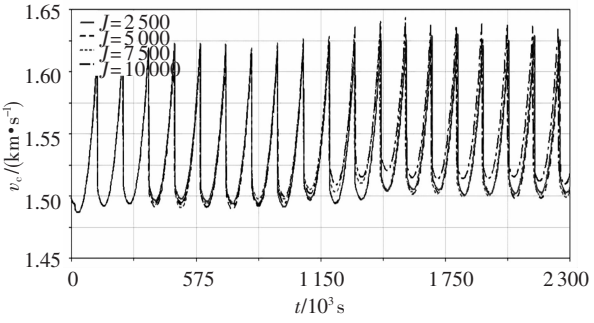
定时，随着辐条数量的增多，轮辐下滚的速度也越来越大，而且相同时间内碰撞的次数越来越多，但每次碰撞损失的能量会随辐条的增多而减小，运动也越来越平稳；当辐条数小到一定值时，轮辐将无法克服自身的惯性滚动，只能沿斜面滑动，直至速度为 0（如上图（b）中 $n = 8$ 时，轮辐的运动情况）.

从图 6（a）中可看出，当轮辐运动在其他参数一定时，辐条长度 $L$ 对轮辐稳定运动影响和质心初速度 $v_{c0}$ 对轮辐运动的影响相似，这是因为轮辐绕支撑辐条运动的初始角速度相同，辐条长度越大，则质心的初速度越大；辐条长度 $L$ 越大，轮辐最终稳定运动的速度也随之稍许增大；辐条长度 $L$ 越小，则每次因碰撞损失的动能就越小，运动也越平稳.

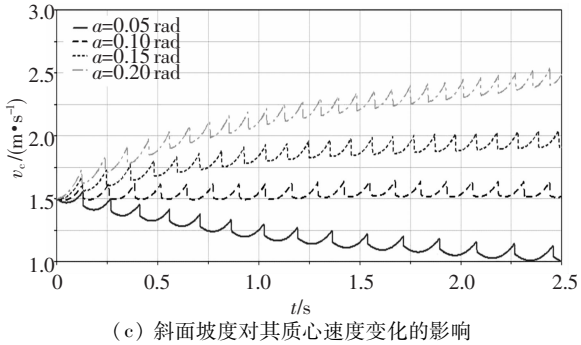
从图 6（b）中可看出，当轮辐运动在其他参数一定时，轮辐相对质心的转动惯量 $I_c$ 对轮辐运动的影响不如其他因素明显，但仍可看出随着 $I_c$ 的增大轮辐的速度是还是有所增大，且每次因碰撞损失的能量也有所减小，轮辐能沿斜面向下稳定运动是重力和惯性作用的效果，惯性越大，克服阻力向下运动的趋势越强，且运动也越平稳.




（a）轮辐辐条长对其质心速度变化的影响




（b）轮辐转动惯量对其质心速度变化的影响




（c）斜面坡度对其质心速度变化的影响

图 6　轮辐辐条长度、转动惯量和斜面坡度对其质心速度变化的影响

从图 6（c）中可看出当轮辐运动在其他参数一定时，斜面坡度越大，轮辐的运动速度越快，当达到稳定周期运动时，其稳定运动速度也越大，但每次碰撞损失的能量也随之增大，运动的平稳性会变差，因此选择合适的斜坡角度，对无边轮辐平稳而快速滚动很重要.

## 4　结　论

1）给出了二维无边轮辐运动过程的数学描述；利用 Adams 软件对无边轮辐的运动特性和运动过程中的影响因素进行了分析.

2）合理的初速度、质量、足半径、辐条数、辐条长度、转动惯量以及斜坡角度可形成快速而平稳的周期运动.

## 参考文献：

[1] CLOEMAN M J. A stability study of a three-dimensional passive-dynamic model of human gait[D]. New York: Faculty of Graduate School of Cornell University, 1998.

[2] 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.

[3] 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[C]. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 2849 – 2854.

[4] 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.

[5] COLLINS S, RUINA A. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walker[J]. Science Magazine, 2005, 307: 1082 – 1085.

[6] MARGARIA R. Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise[M]. Oxford: Clarendon Press, 1976.

[7] MCGEER T. Passive dynamic walking. Intern. J Robot Res, 1990, 9(2): 62 – 82.

[8] MCGEER T. Passive walking with knees[C]//1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos, CA: IEEE, 1990: 1640 – 1644.

[9] MCGEER T. Passive dynamic biped catalogue [C]// Proc Experiment Robotics II: The 2nd International Symposium. Berlin: Springer-Verlag, 1992: 465 – 490.

[10] 刘振泽. 欠驱动步行机器人运动学机理与控制策略研究[D]. 长春：吉林大学，2007.

（**编辑**　杨　波）