

颗粒物质内自旋小球运动行为的数值模拟研究

程琦 冉宪文 刘苹 汤文辉 Raphael Blumenfeld

Numerical simulation of a spinning sphere moving in granular matter

Cheng Qi Ran Xian-Wen Liu Ping Tang Wen-Hui Raphael Blumenfeld

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 014702 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171459

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171459>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[二维圆盘颗粒体系声学行为的数值研究](#)

Numerical study on acoustic behavior of two-dimensional granular system

物理学报.2017, 66(23): 234501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234501>

[一维颗粒声子晶体的拓扑相变及可调界面态](#)

The topological phase transition and the tunable interface states in granular crystal

物理学报.2017, 66(22): 224502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224502>

[二维颗粒堆积中压力问题的格点系统模型](#)

Lattice model for pressure problems in two-dimensional granular columns

物理学报.2017, 66(20): 204501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204501>

[准静态颗粒流流动规律的热力学分析](#)

Non-equilibrium thermodynamic analysis of quasi-static granular flows

物理学报.2014, 63(3): 034702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034702>

[颗粒堆准静态崩塌及慢速流动过程中的堆结构研究](#)

Inner structure of granular pile during its quasi-static avalanches and slow flows

物理学报.2014, 63(1): 014703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014703>

颗粒物质内自旋小球运动行为的数值模拟研究*

程琦¹⁾ 冉宪文^{1)†} 刘莘¹⁾ 汤文辉^{1)‡} Raphael Blumenfeld¹⁾²⁾

1)(国防科学技术大学理学院工程物理研究所, 长沙 410073)

2)(剑桥大学卡文迪许实验室, 剑桥 CB30HE, 英国)

(2017年6月26日收到; 2017年10月12日收到修改稿)

针对大耳沙蜥在沙子中的运动行为, 以球形物体为研究对象, 利用3维离散元数值模拟程序LIGGGHTS模拟了旋转运动模式对颗粒物质中球形物体平动和上升/下降行为的影响, 定量分析了旋转速度以及颗粒间摩擦系数等因素的具体影响. 研究表明: 球形物体与颗粒物质基底颗粒间的摩擦系数以及球形物体的自转角速度对球形物体的运动有明显影响, 摩擦系数越大物体运动越明显, 自转角速度越大物体运动越明显. 该结果比较好地解释了沙漠生物外表具有鳞片的原因.

关键词: 颗粒物质, 自旋, LIGGGHTS, 大耳沙蜥

PACS: 47.57.Gc, 45.70.-n, 83.10.Pp, 83.10.Rs

DOI: 10.7498/aps.67.20171459

1 引言

许多工业中生产过程, 如产品分拣、原材料搅拌^[1-4]以及产品运输^[5,6]等, 都涉及到颗粒物质系统动力学. 同时, 颗粒物质系统动力学也是模拟不同特性颗粒分离^[7-9]以及颗粒斑图^[10]形成的基础. 颗粒物质系统动力学行为非常复杂, 涉及多种未知因素, 科学研究过程中必须对具体问题进行简化, 研究颗粒物质体系内较大物体的运动及对体系动力学行为的影响则是许多科技工作者选择的出发点. 该动力学过程与许多现实过程密切相关, 如巴西果效应问题^[7-9]、对颗粒物质的冲击成坑以及侵彻问题^[11-15]、地下管道的抬升^[16]以及沙漠生物的运动等^[17-19].

近年来, 如何解析沙漠蜥蜴在沙漠上奔跑、潜伏以及沙子中的游动问题得到相关科学家的关注^[17-19], 并对该问题进行了较多的研究, 尤其是颗粒物质中“犁地”和颗粒物质内水平驱动物体的上升问题^[20,21], 以及颗粒物质内深埋物体运动所

引起的浮力等问题^[1,3,22-26]. 相关结果表明, 颗粒物质内物体所受到的升力和阻力与物体的运动速度以及所处的深度密切相关, 这些结果的得出对于解析沙漠蜥蜴潜入沙子内部以及如何在沙子内部的游动提供了相关依据, 但这些结果依然无法解释大耳沙蜥(*Phrynocephalus mystaceus*)的运动行为. 与其他沙蜥属的蜥蜴不同, 大耳沙蜥是通过左右横向摆动和转动身体, 激发身体附近沙子的运动形成周围沙子的“液化”, 进而实现潜入沙子内部. 针对左右摆动问题, 我们以球形物体为研究对象, 采用离散元仿真进行了具体研究, 获得了影响球体升/降运动的相图, 并给出了横向振动频率和振幅相关的理论模型^[27]. 然而, 对于转动问题, 尚缺乏针对性的研究.

本文采用美国圣地亚实验室开发的三维离散元程序LIGGGHTS^[28], 对颗粒物质内旋转的球形物体所导致的升/降问题和平动问题进行了研究, 具体研究了角速度、表面摩擦系数等对球形物体运动的影响.

* 国防科技大学预先研究项目(批准号: ZK16-03-01)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ranxianwen@163.com

‡ 通信作者. E-mail: wenhuitang@163.com

2 模拟设置

2.1 颗粒间的相互作用模型

模拟中颗粒之间的相互作用采用经典的 Hertz 模型, 也即软球接触模型^[29], 如图 1 所示. Hertz 模型将相互接触的两个颗粒之间的相互作用简化为颗粒之间的切向力(即两个颗粒中心的连线)和法向力(即在接触点垂直于切线方向), 采用弹簧来模拟相互作用的可恢复部分, 采用黏壶来模拟相互作用的耗散特性.

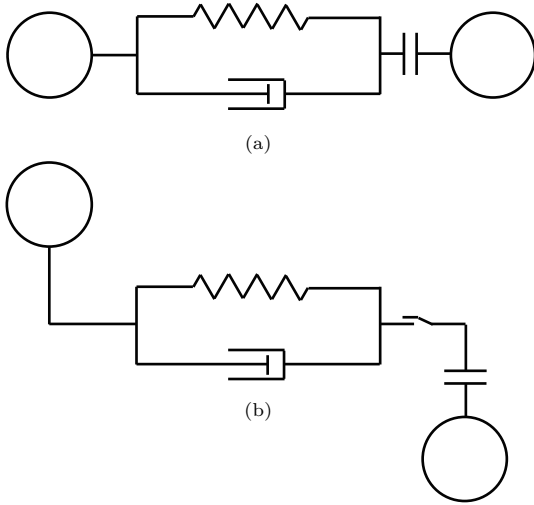


图 1 颗粒间相互作用的 Hertz 模型 (a) 法向相互作用; (b) 切向相互作用

Fig. 1. The Hertz model for the interactions of particles: (a) The normal interaction; (b) the tangential interaction.

根据 Hertz 模型和弹簧阻尼模型^[30], 颗粒物质中颗粒 i 和颗粒 j 相互接触时, 颗粒 i 的受力可分为法向力 F_{nij} 和切向力 F_{tij} 两个部分, 具体表达式为:

$$F_{nij} = (k_{nij}\delta_{nij} - \gamma_{nij}|\mathbf{u}_{nij}|) \cdot \mathbf{n}_{ij}, \quad (1a)$$

$$F_{tij} = \begin{cases} k_{tij}\delta_{tij} - \gamma_{tij}\mathbf{u}_{tij}, & k_{tij}|\delta_{tij}| \leq \mu_{ij}|F_{nij}|, \\ \mu_{ij}|F_{nij}|\frac{\delta_{tij}}{|\delta_{tij}|}, & k_{tij}|\delta_{tij}| > \mu_{ij}|F_{nij}|, \end{cases} \quad (1b)$$

其中, \mathbf{n}_{ij} 是由 j 的球心指向 i 的球心的单位向量, μ_{ij} 是颗粒 i 和颗粒 j 之间的摩擦系数, k_{nij} 和 k_{tij} 分别为法向和切向的弹性系数, γ_{nij} 和 γ_{tij} 分别为法向和切向的阻尼系数, δ_{nij} 和 \mathbf{u}_{nij} 分别是法向重叠量和法向相对速度, δ_{tij} 和 \mathbf{u}_{tij} 分别是切向滑移

和切向相对速度. 需要指出的是, \mathbf{u}_{tij} 不一定与切方向平行. k_{nij} 和 k_{tij} 与杨氏模量和泊松系数相关, 而 γ_{nij} 和 γ_{tij} 不仅与杨氏模量和泊松系数相关, 还与恢复系数相关. 需要明确的是, 法向重叠量 δ_{nij} 是不考虑颗粒变形时两个颗粒之间的重叠量, 如图 2 所示. 切向滑移的定义是: 一个时间步长内颗粒 i 和颗粒 j 的切向相对位移量. 具体计算方法是: $\mathbf{u}_{tij} * dt$, 然后取切方向的投影得到 δ_{tij} .

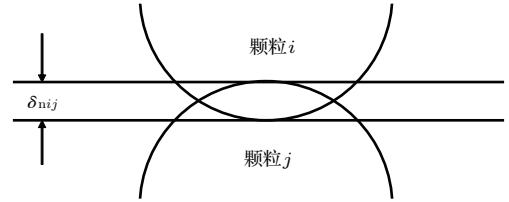


图 2 两个颗粒的法向重叠量

Fig. 2. The normal overlapped quantity of two particles.

2.2 模拟参数设置

模拟对象为一个深埋入颗粒系统中的球形物体, 通过球形物体的自主旋转运动来模拟大耳沙蜥身体的转动状态. 整个模拟空间或模拟容器为立方体, 具体尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$, 相关尺寸参数和模拟参数如表 1 所列. 为了减少边界对整个系统模拟的影响, 我们在 X 和 Y 方向设置周期性边界条件, 在 Z 方向设置固壁边界条件.

表 1 模拟中使用的相关参数

Table 1. Related args used in the simulation.

模拟容器尺寸	$0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$
基底颗粒半径	0.01 m
小球深度	0.61 m
小球半径	0.06 m
杨氏模量	10^7 Pa
摩擦系数	基底颗粒之间 0.45
恢复系数	基底颗粒之间 0.9 小球和基底颗粒之间 0.5
泊松系数	0.25
时间步长	10^{-5} s
密度	2500 kg/m^3
模拟物理时间	50 s

对于多数颗粒系统而言, 其内颗粒的分布是完全随机无规则的, 因此无法像生成晶体一样, 按

照其排列规则生成颗粒系统. 在模拟前, 首先采用“落雨法”^[31]生成基底颗粒, 即从容器上方随机生成颗粒然后落下, 在容器内形成基底颗粒, 待生成足够多的基底颗粒后则停止生成; 然后整个颗粒系统在重力的作用下弛豫足够长的时间, 以确保整个系统的总动能稳定并在较低的数值范围内. 而后在容器口生成小球, 让小球以固定速度运动到颗粒系统内基底颗粒中央, 带有小球的颗粒系统再在重力的作用下弛豫, 直到系统总动能稳定并在较低的数值范围内, 此时, 所生成的模拟构型就是我们要进行系统研究的颗粒系统, 如图3所示. 现在每个颗粒的位置就是数值模拟颗粒动力学前的初始位置, 并且每个颗粒均接近于静止状态.

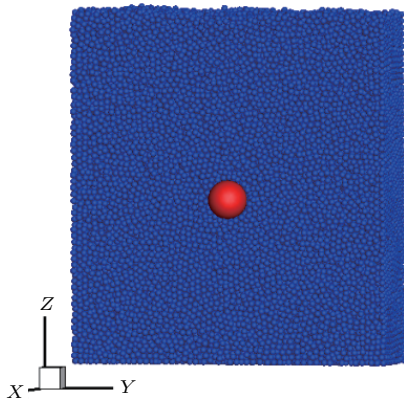


图3 重力弛豫后的颗粒系统

Fig. 3. The granular system after gravity-relaxation.

在获得模拟颗粒系统的初始状态后, 主要通过数值模拟研究小球的自转角速度 ω 以及小球与基底颗粒之间摩擦系数 μ 对小球在颗粒系统内运动的影响. 小球的自转轴为 X 轴, 其自转方向如图4所示. 模拟中, 小球与基底颗粒间的摩擦系数考虑0.4, 0.45, 0.5, 0.6四种情况; 自转角速度取10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 rad/s.

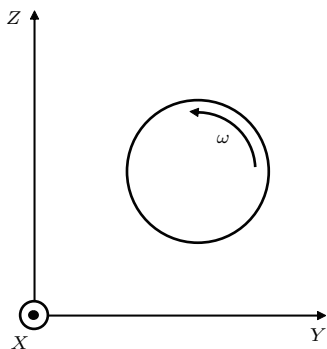


图4 小球自身的旋转运动

Fig. 4. The rotation of the embedded sphere.

3 模拟结果

模拟前, 小球埋入的深度约为0.6 m. 以小球的初始位置为坐标原点建立笛卡尔直角坐标系, 其中 X 轴方向为小球的自转方向, Z 轴方向为重力加速度反方向, Y 轴方向满足右手系. 模拟中发现小球除自身的旋转运动外, 还会有 Z 方向的上升运动以及 X 和 Y 方向的平动.

3.1 Z 方向的运动

图5中给出了50 s内小球在颗粒系统内沿 Z 方向上的运动情况: 1) 图5(a)中, 小球与基底颗粒间摩擦系数为 $\mu = 0.4$, 小于基底颗粒之间的摩擦系数 $\mu = 0.45$, 此时不论小球自转的角度多大, 基本上都没有产生小球的上升运动, 仅在角速度为1280 rad/s时, 小球才有少许的向上波动; 2) 图5(b)中, 小球与基底颗粒间摩擦系数为 $\mu = 0.45$, 与基底颗粒间的摩擦系数相同, 此时开始出现上升趋势, 但在50 s的时间内上升距离有限, 并且不同角速度之间上升的速度开始出现差异, 基本上是角速度越大上升越明显; 3) 图5(c)中, 小球与基底颗粒间的摩擦系数为, 大于基底颗粒间的摩擦系数, 此时小球的上升趋势十分明显, 在50 s的时间内, 角速度为160, 320, 640, 1280 rad/s的四种情况中, 小球均上升到了颗粒系统顶部, 成功地“飘”在颗粒物质上; 4) 图5(d)中, 小球与基底颗粒间的摩擦系数为 $\mu = 0.6$, 大于基底颗粒间的摩擦系数, 此时小球的上升趋势更为明显, 在50 s的时间内, 角速度为40, 80, 160, 320, 640, 1280 rad/s六种情况中的小球都成功上升到了颗粒系统顶部, 比图5(c)多出了两种状态.

图5(c)和图5(d)中, 当角速度为1280 rad/s时, 小球的上升速度反而比其角速度为640 rad/s时慢. 其原因可能是小球的角速度超过了临界点, 使得 F_{tij} 的计算变为 $F_{tij} = \mu_{ij} |F_{nij}| \frac{\delta_{tij}}{|\delta_{tij}|}$ 所导致, 但具体的原因还需要更深入的探索.

综合比较图5的结果可以看出, 在小球与基底颗粒的摩擦系数 μ 小于基底颗粒的摩擦系数时, 无论小球自身旋转速度多少, 小球都基本上“悬浮”于颗粒系统中; 当 μ 与基底颗粒间的摩擦系数相同时, 小球开始出现上升运动, 并且随着 μ 的增加, 上升

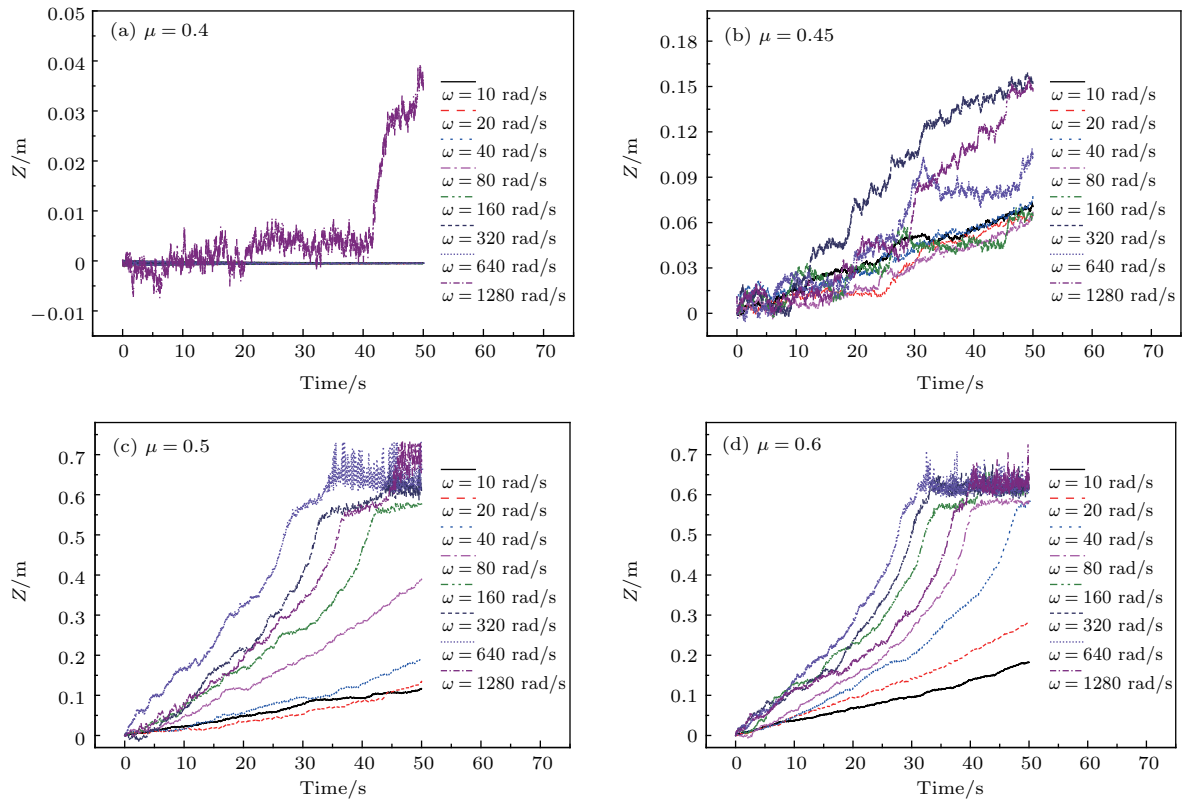


图5 Z方向上小球的运动
Fig. 5. The motion of sphere in the Z direction.

趋势更为明显; 对比 μ 相同、但小球自身旋转速度不同的情况, 自转速度越大, 小球上升的趋势就越为明显.

3.2 X方向上的运动

小球在X方向上的运动如图6所示, 可以看出X方向上的运动没有明显的规律. 当小球与基底颗粒间的摩擦系数小于基底颗粒间的摩擦系数时, 除角速度为1280 rad/s的情况外, 小球位置在X方向上基本不变, 即使是角速度1280 rad/s时, 小球在X方向上的位移也很小, 远小于小球的半径0.06 m; 当小球与基底颗粒间的摩擦系数大于基底颗粒间的摩擦系数时, 小球在X方向上的位移变得相对明显, 但随着小球与基底颗粒间摩擦系数的增加, X方向上的位移并没有明显的增加, 而且X方向上的位移均小于小球半径0.06 m, 这说明小球X方向上的运动与X方向上的自转关系不大.

3.3 Y方向上的运动

小球在Y方向上的运动如图7所示, 与X方向的运动相比, 显然Y方向的运动要明显得多. 当 μ

小于基底颗粒间的摩擦系数时, 如图7(a)所示, 小球位置在整个50 s的模拟时间内在Y方向上基本保持不变, 只有角速度为1280 rad/s时, 小球才在44 s后开始产生Y方向运动, 但所产生的位移也小于小球的半径0.06 m. 当 μ 等于基底颗粒间的摩擦系数时, 如图7(b)所示, 小球在Y方向上的位移开始变得明显, 并且呈现明显的分叉状态, 即小于160 rad/s的自转在Y方向上引起Y轴正向位移; 大于320 rad/s的自转在Y方向上引起Y轴负向位移. 当 μ 大于基底颗粒间的摩擦系数时, 如图7(c)和图7(d)所示, 小球自转所引起Y方向的位移更为明显, 可达到小球半径的4—6倍; 对比图7(c)和图7(d)可以看出, 小球自转角速度以及小球与基底颗粒之间的摩擦系数都会对Y位移产生影响, 二者的增加都会带来Y方向位移的增加; 特别是对于角速度160 rad/s的情况, 当小球与基底颗粒之间的摩擦系数为 $\mu = 0.5$ 时, 小球的运动趋势是Y轴正向, 而当 $\mu = 0.6$ 时, 小球的运动趋势则为Y轴负向; 当小球上升到颗粒系统表面时, 由于小球自转的影响, 则在Y轴负向产生明显的位移, 此种情况与沙漠表面车轮的运动类似.

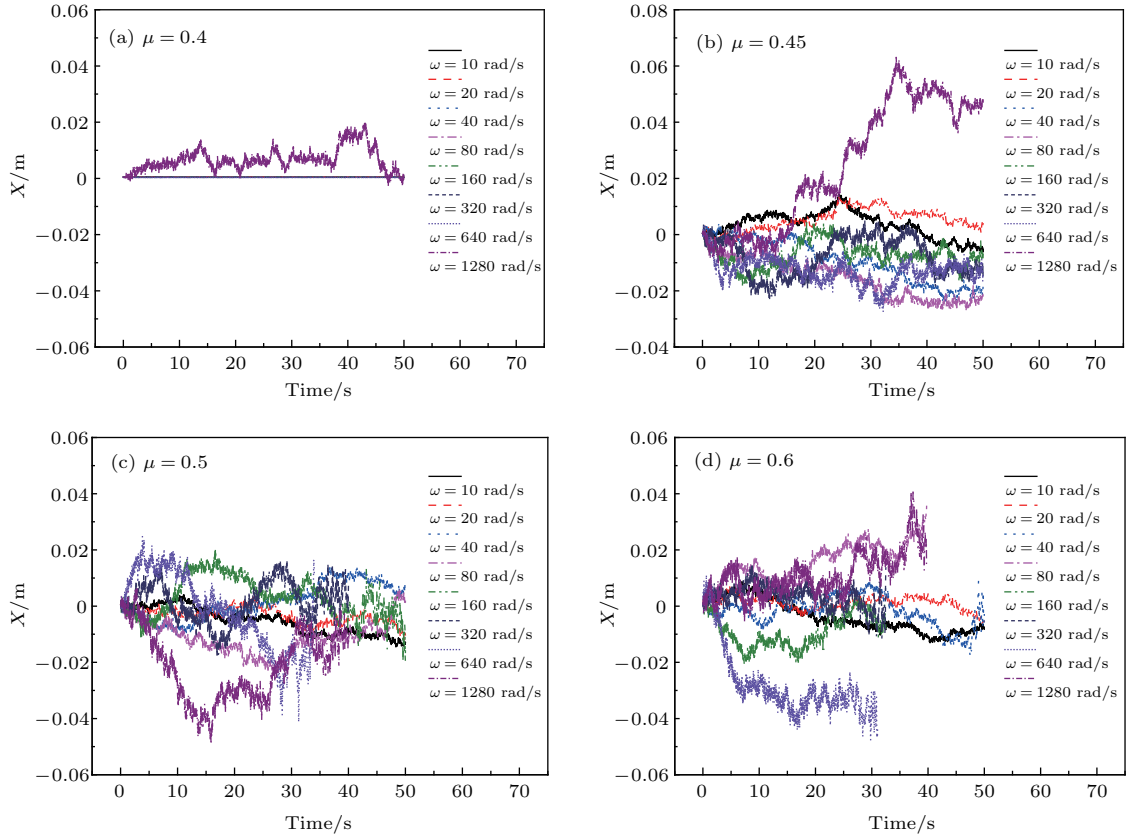


图 6 X 方向上小球的运动

Fig. 6. The motion of sphere in the X direction.

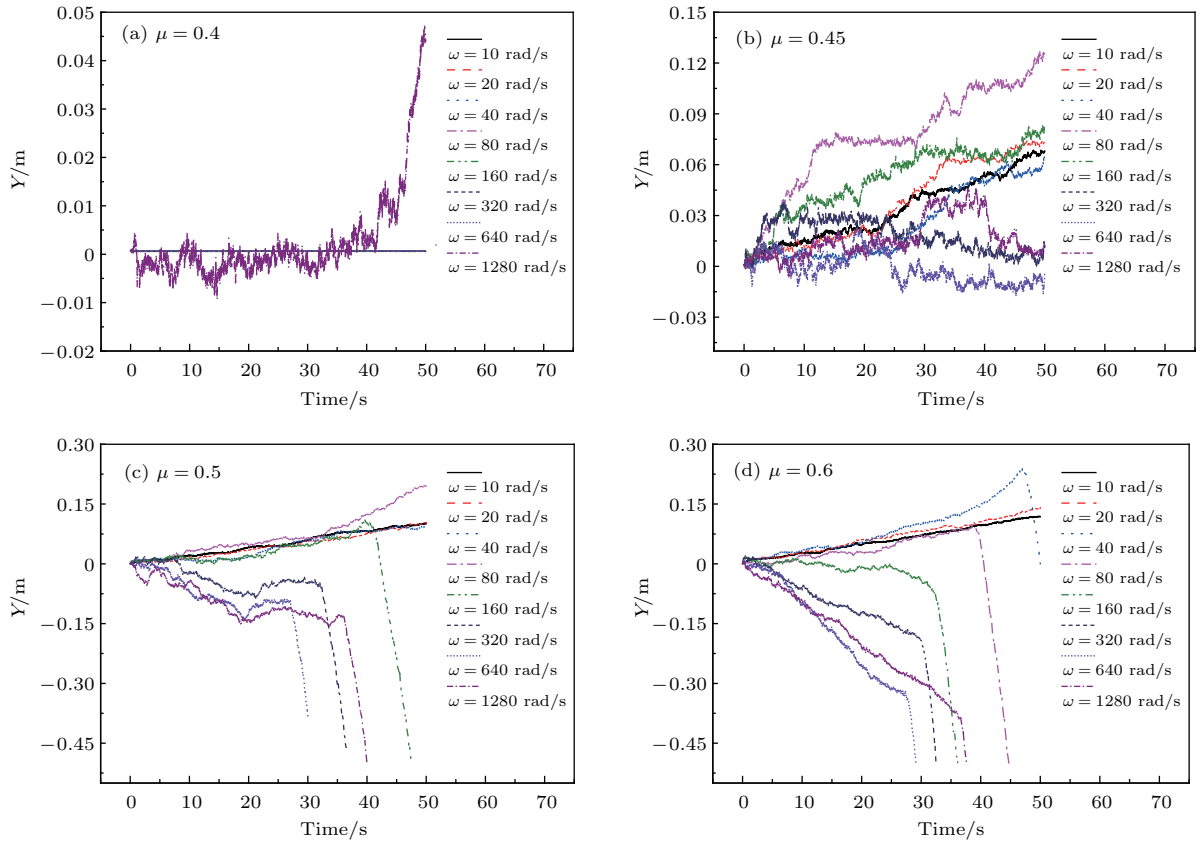


图 7 Y 方向上小球的运动

Fig. 7. The motion of sphere in the Y direction.

4 结 论

根据数值模拟和讨论结果,对于深埋入颗粒物质中物体的旋转运动,可以得出以下结论:

1) 深埋入颗粒物质内的物体,水平旋转运动能够引起竖直以及水平方向上相对明显的运动,但在角速度方向上所引起运动位移有限,小于物体自身的尺度;

2) 物体与基底颗粒间的摩擦系数对物体在颗粒物质内部的运动轨迹有显著影响,只有当物体与基底颗粒间的摩擦系数大于颗粒物质自身基底颗粒间的摩擦系数时,物体才会获得显著的运动,这也许就是大多数沙漠生物外表披挂鳞片的原因;

3) 在物体与基底颗粒间的摩擦系数大于颗粒物质自身基底颗粒间的摩擦系数的前提下,深埋入颗粒物质中的物体自身的旋转角速度对其运动轨迹也会产生很大的影响,旋转角速度越快所引起物体的运动就越明显。

参考文献

- [1] Soller R, Koehler S A 2006 *Phys. Rev. E. Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **74** 021305
- [2] Guillard F, Forterre Y, Pouliquen O 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 138303
- [3] Guillard F, Forterre Y, Pouliquen O 2014 *Phys. Fluids* **26** 043301
- [4] Guillard F, Forterre Y, Pouliquen O 2015 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **91** 022201
- [5] Knight J B, Ehrichs E E, Kuperman V Y, Flint J K, Jaeger H M, Nagel S R 1996 *Phys. Rev. E* **54** 5726
- [6] Eshuis P, van der Meer D, Alam M, van Gerner H J, van der Weele K, Lohse D 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 038001
- [7] Shinbrot T, Muzzio F J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4365
- [8] Möbius M E, Lauderdale B E, Nagel S R, Jaeger H M 2001 *Nature* **414** 270
- [9] Shinbrot T 2004 *Nature* **429** 352
- [10] Cheuk C Y, White D J, Bolton M D 2008 *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **134** 154
- [11] Metcalfe G, Shattuck M 1996 *Physica A: Stat. Mech. Appl.* **233** 709
- [12] Wood R J K, Wheeler D W 1998 *Wear* **220** 95
- [13] Lohse D, Rauhe R, Bergmann R, van der Meer D 2004 *Nature* **432** 689
- [14] Lohse D, Bergmann R, Mikkelsen R, Zeilstra C, van der Meer D, Versluis M, van der Weele K, van der Hoef M, Kuipers H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 198003
- [15] Katsuragi H, Durian D J 2007 *Nat. Phys.* **3** 420
- [16] Clark A H, Petersen A J, Kondic L, Behringer R P 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 144502
- [17] Dowling K J 1996 *Ph. D. Dissertation* (Pittsburgh: Carnegie Mellon University)
- [18] Maladen R D, Ding Y, Li C, Goldman D I 2009 *Science* **325** 314
- [19] Maladen R D, Ding Y, Umbanhowar P B, Kamor A, Goldman D I 2011 *J. R. Soc. Interface* **8** 1332
- [20] Costantino D J, Bartell J, Scheidler K, Schiffer P 2011 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **83** 011305
- [21] Percier B, Manneville S, McElwaine J N, Morris S W, Taberlet N 2011 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **84** 051302
- [22] Wassgren C R, Cordova J A, Zenit R, Karion A 2003 *Phys. Fluids* **15** 3318
- [23] Chehata D, Zenit R, Wassgren C R 2003 *Phys. Fluids* **15** 1622
- [24] Ding Y, Gravish N, Goldman D I 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 028001
- [25] Maladen R D, Umbanhowar P B, Ding Y, Mase A, Goldman D I 2011 *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on.* IEEE Shanghai, China, May 9–13, 2011 p1398
- [26] Potiguar F Q, Ding Y 2013 *Phys. Rev. E* **88** 012204
- [27] Huang L, Ran X, Blumenfeld R 2016 *Phys. Rev. E* **94** 062906
- [28] Kloss C, Goniva C, Hager A, Amberger S, Pirker S 2012 *Prog. Comput. Fluid Dyn.* **12** 140
- [29] Gran model hertz model, Christoph K http://www.cfdem.com/media/DEM/docu/gran_model_hertz.html [2017-04-03]
- [30] Sun Q C, Wang G Q 2009 *Introduction to Mechanics of Granular Materials* (Beijing: Science Press) p31 (in Chinese) [孙其诚, 王光谦 2009 颗粒物质力学导论(北京: 科学出版社) 第31页]
- [31] Huang D C, Feng Y D, Xie W M, Lu M, Wu H P, Hu F L, Deng K M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124501 (in Chinese) [黄德财, 冯耀东, 解为梅, 陆明, 吴海平, 胡凤兰, 邓开明 2012 物理学报 **61** 124501]

Numerical simulation of a spinning sphere moving in granular matter*

Cheng Qi¹⁾ Ran Xian-Wen^{1)†} Liu Ping¹⁾ Tang Wen-Hui^{1)‡} Raphael Blumenfeld¹⁾²⁾

1) (Institute of Engineering Physics, College of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

2) (Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB30HE, The United Kingdom)

(Received 26 June 2017; revised manuscript received 12 October 2017)

Abstract

Recently, how the desert lizards run, hide or swim in the sand has attracted much attention of many scientists in granular matter field, and many valuable results have been published, except for the *Phrynocephalus mystaceus*, a type of the desert lizard, which can embeds itself into the sand through a motion mode which is completely different from other types of desert lizards. To illuminate the roles played by the spinning-mode in the *Phrynocephalus mystaceus*' motion in the sand, the three-dimensional (3D) numerical simulation using the Hertz model on the system, in which one sphere is spinning in the granular matter, is carried out with the open-source code LIGGGHTS released by the Sandia National Laboratory in USA. In the numerical simulations for all the cases, the initial conditions are the same and the sphere spins around X -axis while the X - Y plane is the horizontal plan and the Z axis is the vertical direction. According to the numerical results and analyses, for the spinning sphere deeply embedded in the granular matter we can draw some conclusions. 1) The X -axis spinning motion can cause the sphere embedded in the granular to notably displace along the Z -axis and Y -axis, but the displacement along the spinning direction is smaller than the sphere diameter. 2) The friction coefficient μ between the sphere and the granular matter has a notable influence on the motion of the sphere in granular matter, the spinning sphere can move vertically and horizontally only when the friction coefficient μ between the sphere and the granular matter is larger than that of the granular matter; and the bigger the μ , the more violent the movement of the sphere is. This can be used to explain why most of the desert creatures each have a coarse skin. 3) On the premise that the friction coefficient μ between the sphere and the granular matter is larger than that of the granular matter, the spinning velocity of the sphere also has a great influence on the movement of the sphere in the granular matter. In a spinning velocity range between 10 rad/s and 640 rad/s, the larger the ω , the more obvious the movement of the sphere is. When the spinning velocity reaches 1280 rad/s, the movement of the sphere slightly decreases compared with when the spinning velocity is 640 rad/s. 4) For the spinning sphere in granular matter, the sphere always moves upward in the Z direction, but in the Y direction the sphere may move in a positive or negative direction depending on the ω and μ . The sphere moves in the positive direction of Y axis if the ω and μ are relatively small, while it moves in the negative direction if the ω and μ are larger.

Keywords: granular matter, spin, LIGGGHTS, *Phrynocephalus mystaceus*

PACS: 47.57.Gc, 45.70.-n, 83.10.Pp, 83.10.Rs

DOI: 10.7498/aps.67.20171459

* Project supported by the Advanced Project of National School of Defense Technology, China (Grant No. ZK16-03-01).

† Corresponding author. E-mail: ranxianwen@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: wenhuitang@163.com