2017年8月  泥沙研究 第42卷 第4期

Aug.,2017 Journal of Sediment Research Vol.42，No.4

**DOI：**10.16239/j.cnki.0468-155x.2017.04.000

非规则泥沙颗粒流动堆积过程中接触模型参数研究

姜胜强1[[1]](#footnote-1) ，谭磁安1，陈睿1，谭援强2

(1.湘潭大学 机械工程学院，湖南 湘潭 411105；2.华侨大学 制造工程研究院，福建 厦门 361021)

摘要：采用离散元法研究颗粒的流动与堆积过程时，物性参数和接触参数的选择是否合理直接影响着模拟结果的准确性。对于非规则颗粒而言，这些参数的选取尤为重要。本文以非规则泥沙颗粒为例，根据其形状和大小的不同建立了四种颗粒模型；设计了一系列实验来标定泥沙颗粒的密度、恢复系数、静摩擦系数、内摩擦系数，并通过试验与模拟相结合的方法标定了颗粒间滚动摩擦系数；通过试验和离散元仿真的手段对比了顶层泥沙在V型箱和L型箱中的流动过程，结果表明试验与仿真得到的运动轨迹吻合，验证了所采用的测定物料参数和接触参数方法的可行性和参数选择的合理性。

关键词：非规则颗粒；流动堆积；接触模型；离散元法；数值仿真

中图分类号：O347.7 文献标识码：A 文章编号：0468-155X(2017)04-0000-00

泥沙颗粒在自然界随处可见，国内外学者从堆积颗粒的物性参数及其相互接触作用出发，采用实验研究和数值分析方法对颗粒材料的流动堆积等方面进行了大量的研究。其中，由Cundall提出的离散元法（DEM）得到了广泛的应用[1-3]。Matuttis等[4]对球状颗粒的流动堆积进行了离散元模拟，并研究了颗粒流动堆积时的应力分布。Rives[5]对散体颗粒的堆积行为进行了模拟，将重力增大得到颗粒堆积形貌不断更新，颗粒系统时刻处于临界平衡状态。王海兵等[6]研究了粉末颗粒的堆积问题，评价了线性堆积密度模型的优缺点，提出了粉末颗粒线性堆积密度模型的改进方案，并应用现有的实验数据对改进前后的离散元模型进行比较。

然而，采用离散元法模拟颗粒流动堆积时，不可避免的一个问题是对所采用的接触模型参数进行赋值。而该参数的准确与否直接影响后续仿真的正确性。对此，研究者们通常需对颗粒材料的物性参数和接触参数进行测量。对于不同的参数，测量方法也相应有所改变，如，Barrios等[7]通过对单个铁矿石颗粒进行的摩擦磨损和跌落试验，得到了基于Hertz–Mindlin模型的颗粒材料和接触参数，并通过塌落度试验和滚筒试验分析比较了颗粒模型的准确性。Zhou等[8]采用了离散元模拟与物理实验相结合的方法，测量出颗粒的大小、滑动和滚动摩擦系数等相关参数，并研究了所测颗粒参数对颗粒堆积的影响。

本文以天然泥沙为研究对象，通过一系列实验测量泥沙颗粒的密度、恢复系数、静摩擦系数、内摩擦系数，并通过试验与模拟相结合的方法标定颗粒间滚动摩擦系数。最后通过试验和离散元仿真的手段对比了顶层泥沙在V型箱和L型箱中的流动过程，从而对本文所采用的测定物料参数和接触参数方法的可行性和参数选择的合理性进行验证。

1 离散元法的基本原理和接触模型

在离散元法中常将散体颗粒视为刚性的单元，通过选用合适的接触模型来描述单元间的相互作用力，并采用牛顿第二定律计算颗粒的加速度、速度及其位移。通过更新每一时步单元的位置，并遍及整个单元集合，循环迭代计算单元之间的作用力。通过对系统中每个单元的微观运动进行跟踪，从而得到整个系统的宏观运动规律。本文采用Hertz- Mindlin接触模型[9]来描述泥沙在自重作用下的流动与堆积过程，如图1所示。颗粒间的法向力由两部分组成，而切向力受摩擦库仑定律限制，计算公式分别为

 (1)



图1 颗粒接触力学模型

Fig.1 Contact mechanics

 (2)

式中，为两颗粒间的法向、切向重叠量，单位m；，分别为两颗粒的相对速度法向、切向分量，单位m/s；，分别为两颗粒的法向、切向刚度系数，单位N/m；，分别为两颗粒的法向、切向阻尼系数，单位N/m；为两颗粒的摩擦系数。

此外，流动与堆积过程中的滚动摩擦也不可忽略，它可以通过接触表面上的力矩来表示，即

 (3)

式中为滚动摩擦系数，无量纲参数；为质心到接触点间的距离，单位m；为接触点处物体的单位角速度(矢量)，单位rad/s。

2 泥沙物性参数及接触模型参数的测定

2.1 物性参数的测量

通过对非规则形状泥沙的粒径分布、形状以及密度等参数进行测量，并将所测量的结果用于后续的离散元仿真中颗粒模型的构建。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 图2 筛分泥沙级配曲线  Fig.2 Screening sediment grading curves | |  |  |  | | --- | --- | --- | | （a）球形 |  |  | | （b）滚圆形 |  |  | | （c）锥形 |  |  | | （d）片状形 |  |  |   图3 泥沙形状（左图为实物，右图为DEM颗粒模型）  Fig.3 Particle shapes（real sediment at left；DEM particle model at right） |

（a）粒径分布。采用常见的筛分法测量粒度和粒度分布[10]，依据国家标准GB/T6003.1-1997规定，采用方孔筛（由浙江上虞市华丰五金仪器有限公司生产）对泥沙进行筛分，其筛孔边长分别为8、7.7、6.3、4.75（单位：mm），统计不同筛孔下泥沙的通过率，得到其级配曲线如图2所示。

（b）颗粒形状。颗粒的形状千差万别，对颗粒的流动性和充填性有着重要影响。为了提高离散元模拟结果的准确性，将泥沙形状分为四类（图3），分别是(a)球形，(b)滚圆形，(c)锥形，以及(d)片状形，并在EDEM软件中根据测量尺寸建立相对应的泥沙形状模型。泥沙取样1 L，按照前述形状进行分类统计，得到不同形状的泥沙所占颗粒数百分比的结果如表1所示。在生成泥沙颗粒模型时，根据统计颗粒数所占百分比来控制模拟中每种形状颗粒的数量。

表1 泥沙形状分布

Table 1 Distribution of stone shapes

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 泥沙形状 | (a)球形 | (b)滚圆形 | (c)锥形 | (d)片状形 |
| 颗粒数所占百分比/% | 10.8 | 24.3 | 51.5 | 13.4 |

（c）颗粒密度。对于散体材料而言，常见表征密度的参数有表观密度、堆积密度以及真密度等。本文采用排水法测定表观密度，如图4所示。考虑到颗粒所存在的堆积形态随机性，重复进行6次实验以降低随机误差的影响，测定结果如表2所示。

图4 表观密度的测量 图5 堆积密度的测量

Fig.4 Measurement of apparent density Fig.5 Measurement of bulk density

通过向一定容积的容器中慢速加入试验泥沙颗粒，并用刮片刮去满出容器口部分的物料，然后测出其堆积密度**，**如图5所示。取样不同的泥沙10次，重复上述实验，计算试验泥沙密度平均值及标准偏差。同时，采用离散元法对堆积过程进行模拟，实验与模拟结果如表2所示。从表2中可以看出，物理试验的结果与数值模拟的结果相差较小。

表2 试验与模拟的泥沙密度值

Table 2 Comparison of stone density values between experiment and simulation

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 平均值 | 标准偏差 |
| 表观密度（试验）/（g/ml） | 2.837 | 0.007 |
| 堆积密度（试验）/（g/ml） | 1.654 | 0.15 |
| 堆积密度（模拟）/（g/ml） | 1.659 | 0.02 |

**2.2** 接触参数的测量方法

在Hertz- Mindlin无滑动接触模型中，常用的接触参数主要有颗粒与接触面碰撞恢复系数、颗粒与接触面静摩擦系数、颗粒间的内摩擦系数，颗粒间的滚动摩擦系数。具体测试方法分别如下：

（a）碰撞恢复系数。它是表征碰撞中能量损失的重要参数，采用Newton定义来进行表征。即，恢复系数为碰撞后法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值[11]。由于颗粒碰撞前后的速度难以测量，本文采取让颗粒从指定高度自由落下，与下方静止的有机玻璃板或颗粒碰撞，通过测定颗粒的反弹高度来推导出碰撞前后的速度比。假定从高度*H*掉落，碰撞后又弹回高度*h*，则根据能量守恒定律，可以得到恢复系数与自由落体弹跳高度的关系为

 (4)

为精确测量颗粒的回弹高度，采用高速摄像机（Phantom v10，美国Vision Research公司）跟踪记录泥沙颗粒的下落及反弹过程，如图6所示。

图6 恢复系数的测量 图7 静摩擦系数的测量

Fig.6 Measurement of restitution coefficient Fig.7 Measurement of static friction coefficient

（b）静摩擦系数。颗粒与壁面的静摩擦系数通过自制的简易试验装置测量，如图7所示。将泥沙放置在与水平面成一定角度*θ*的有机玻璃板上，当颗粒刚好下滑时，利用高速相机记录玻璃板上升的角度，并通过公式（5）计算得到颗粒与壁面的静摩擦系数

 (5)

（c）内摩擦系数。颗粒间的内摩擦系数可以通过颗粒的直接剪切试验测得。所用仪器为ZJ型应变控制直剪仪（南京土壤仪器厂），采用4个试样分别在不同的垂直压力*p*下施加水平剪切力，求得破坏时的剪应力*τ*，然后根据库仑定律确定抗剪强度两个重要参数，分别是内摩擦角*φ*和粘聚力*c*。试样的剪应力

 (6)

式中*C*为测力计率定系数，单位KPa/0.01mm；*R*为测力计读数，单位0.01mm。



图8 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig.8 Relationship between shear stress and shear displacement



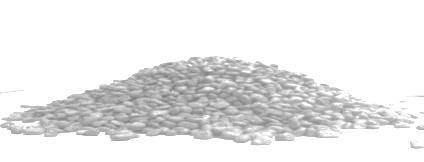
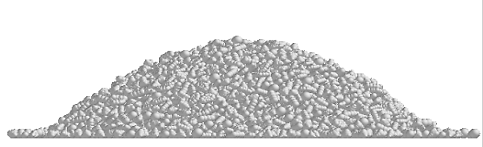
图9 抗剪强度与垂直压力关系曲线

Fig.9 Relationship between shear strength and vertical stress

图8为试验中泥沙的剪应力与剪切位移的关系曲线。图9为抗剪强度与垂直压力关系曲线。通过拟合图9的抗剪强度直线，得到泥沙颗粒间的内摩擦角*φ*，进而计算得到颗粒间的内摩擦系数为

 (7)

式中为颗粒间的内摩擦系数。

（a）实验结果 （b）模拟结果

图10 泥沙休止角实验及其离散元模拟

Fig.10 Gravel repose angles by experiment and DEM simulation

# 

|  |  |
| --- | --- |
| 图11 不同滚动摩擦系数下的离散元堆积模拟  Fig.11 Simulation of DEM stacking under different rolling friction coefficients | 图12 滚动摩擦系数与休止角拟合曲线  Fig.12 Rolling friction coefficient and repose angle |

（d）滚动摩擦系数。本文中的滚动摩擦系数通过试验与模拟相结合的方法间接计算得到。具体过程为：首先，通过堆积试验测定泥沙休止角，然后在EDEM中设置泥沙参数，将泥沙间静摩擦系数固定，同时改变泥沙间的滚动摩擦系数，分别模拟不同滚动摩擦系数下的堆积过程，仿真得到不同滚动摩擦系数下的休止角，最后对休止角随滚动摩擦系数变化的规律进行线性拟合，得出拟合方程，代入试验测定的泥沙休止角，从而间接求出泥沙间的滚动摩擦系数。

图10为泥沙堆积后实验与模拟的对比图。图11为不同滚动摩擦系数下提取的泥沙休止角的轮廓曲线。从图11可以看出，随着滚动摩擦系数的增大，休止角的轮廓曲线呈现上升趋势。对不同滚动摩擦系数与休止角进行拟合，拟合曲线及方程如图12所示。可以看出，随着颗粒间滚动摩擦系数的增大，休止角呈线性增加，且拟合度较高。需要提出的是，通过前述休止角试验测定得到泥沙休止角为30.2 °，从而计算得到颗粒间的滚动摩擦系数为0.068。

通过前述参数测量方法，得到如表3所示的非规则泥沙的各接触参数测定结果。

表3 各物理参数的测定结果

Table 3 Measurement results of physical parameters

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数 | 恢复系数 | 静摩擦系数 | 内摩擦系数 | 滚动摩擦系数 | 表观密度 | 堆积密度 | 休止角 |
| 测定值 | 0.620 | 0.390 | 0.607 | 0.068 | 2.837 g/ml | 1.654 g/ml | 30.2° |

3 离散元法模型中参数的设定与验证

为验证所测定物性参数与接触参数的正确性，本文通过离散元软件EDEM建立V型箱与L型箱模型，将试验测定的物性参数应用于模型中颗粒的流动与堆积，最终通过模拟与试验结果进行对比分析，以此验证所标定参数的准确性。

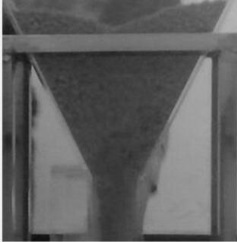
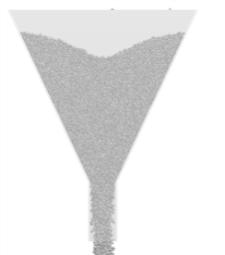
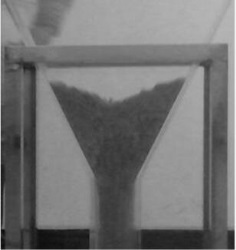
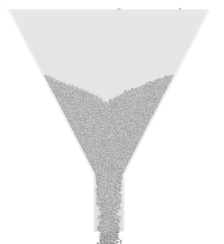


图13 V型箱结构示意图

Fig.13 Sketch of V shape box

**3.1** V型箱试验

V型箱的材料为有机玻璃，其结构参数如图13所示。试验时，将V型箱中放满颗粒，然后拉开底部挡板，并用秒表记录颗粒从箱中下落到平面所用的时间。经多次试验后，得到颗粒平均下落时间为2.9 s。而采用EDEM模拟整个流动过程所用时间为3.0 s，两者的相对偏差为3.3%。图14为下落过程中不同时刻下试验和离散元模拟的对比，可以看出，泥沙在V型箱中流动时，中间区域的颗粒流动速度大于两侧颗粒的流动速度，颗粒流动形态呈现出V字型，实验结果与仿真结果吻合较好。

(a)t=1s (b) t=2s

图14 V型箱试验及其离散元模拟（左图为试验结果，右图为离散元模拟结果）

Fig.14 Test of V shape box and result of DEM simulation

**3.2** L型箱试验

图15 L型箱结构示意图与试验图

Fig.15 Sketch and experimental L type box

与V型箱类似，L型箱试验同样反映了颗粒的流动性能。所用的L型箱采用有机玻璃制作而成，如图15所示。L箱中间由两块挡板分开，挡板1可以左右移动以改变放料的初始宽度。选取适当的宽度*L*0，固定挡板1，向两挡板间加入试验颗粒至指定高度*H*0，然后以恒定的速度*v*缓慢提升挡板2使颗粒流动，用高速相机拍下试验过程，记录颗粒流动时间和流动终止状态时颗粒的高度*H*1以及长度*L*1，从而得到颗粒最终滑动的角度*β*。

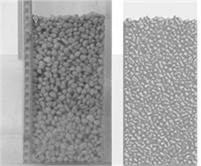
根据不同的初始条件，进行6组试验，每组实验重复多次，试验结果见表4。由离散元法模拟得到的值和试验得到的值最大相对偏差为1.6%（试验2），由此可知，由实验测得的参数应用于模拟L型箱中泥沙运动堆积的情况时，其结果与实际吻合程度高。

表4 L型箱试验测量值（括号内的值为标准偏差）

Table 4 Experimental values of L type box (values in parentheses are standard deviations)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | L箱结构参数/mm | 试验值 | | | 模拟值 | | |
| *L*1/mm | *H*1/mm |  | *L*1/mm | *H*1/mm |  |
| 1 | L0=100, H0=200 | 300.0(1.0) | 147.5(1.5) | 26.1(0.3) | 298.3 | 148.4 | 26.4 |
| 2 | L0=100, H0=250 | 300.5(4.5) | 176.0(2.0) | 30.2(0.6) | 298.6 | 171.4 | 29.7 |
| 3 | L0=150, H0=200 | 322.5(2.5) | 184.5(0.5) | 29.6(0.3) | 316.5 | 182.5 | 29.8 |
| 4 | L0=150, H0=250 | 361.0(1.0) | 219.0(2.0) | 31.1(0.3) | 352.4 | 212.5 | 30.9 |
| 5 | L0=200, H0=200 | 366.0(4.0) | 200.0(0.3) | 28.5(0.3) | 358.8 | 200.0 | 28.9 |
| 6 | L0=200, H0=250 | 415.0(3.0) | 238.0(2.0) | 29.7(0.1) | 408.5 | 233.5 | 29.6 |

选取顶层的一个泥沙颗粒进行运动轨迹追踪（图16a），记录该颗粒在竖直方向上位移随时间的变化关系，并比较该过程的试验与离散元仿真结果，如图16b所示。可以看出，在设定的6种不同L箱结构参数下，所追踪的顶层泥沙颗粒运动轨迹在试验与模拟计算结果中的吻合度较高，从而进一步验证所测定物性参数与接触参数的正确性。

(a)追踪颗粒的位置 (b)不同*L*0情况下试验与模拟结果

(a) Location of a track particle (b) Comparison between experiment and simulation

图16 L型箱试验

Fig.16 Experiment of L type box

**3.3** 分析与讨论

表5为本文所用到的Hertz- Mindlin无滑动接触模型所需参数的测量方法。在离散元模拟中需要标定所选接触模型参数时，可以通过筛分法、分类统计法、排水与刮片法等对颗粒的物性参数进行测量；在此基础上，通过回弹试验、滑动测角试验、直剪试验、堆积试验对接触参数进行测定；最后，通过对堆积或者流动过程进行试验和仿真，比较离散元模拟结果与试验结果。当两者结果吻合时，说明所测参数是合理可行的。

表5 Hertz-Mindlin无滑动接触模型参数及对应方法

Table 5 Contact model parameters of Hertz-Mindlin with relative measure methods

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 所需测量参数 | 测量方法 | 序号 | 所需测量参数 | 测量方法 |
| 1 | 颗粒粒度、粒径分布 | 筛分试验法 | 5 | 静摩擦系数 | 滑动测角试验 |
| 2 | 颗粒形状 | 分类统计法 | 6 | 内摩擦系数 | 直剪试验 |
| 3 | 颗粒密度 | 排水法、刮片法 | 7 | 滚动摩擦系数 | 堆积试验与仿真结合 |
| 4 | 碰撞恢复系数 | 回弹测试试验 |  |  |  |

4 结论

（1）通过筛分试验、排水法和刮片法等方法测量了颗粒的物性参数，通过直剪仪、自制滑动试验台以及与离散元模拟的结合得到了泥沙颗粒的Hertz-Mindlin无滑动接触模型的接触参数。

（2）进行了V型箱和L型箱的流动堆积物理试验与离散元仿真，结果表明泥沙颗粒的流动轨迹仿真结果与试验结果一致性较好，进一步说明前述试验方法测得的接触模型参数是合理的。

（3）若模型中有N个参数需要确定，为保证参数选择的合理性和正确性，建议至少选取N+1个试验来进行测量和验证。

参考文献：

1. Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique，1979，29(1): 47-65.
2. Xiao X, Tan Y, Zhang H, et al. Experimental and DEM studies on the particle mixing performance in rotating drums: effect of area ratio [J]. Powder Technology, 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.044>. (In Press)
3. Zhong W, Yu A, Liu X, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications [J]. Powder Technology, 2016, 302: 108-152.
4. Matuttis H G, Luding S, Herrmann H J. Discrete element simulations of dense packings and heaps made of spherical and non-spherical particles [J]. Powder Technology, 2000, 109(1):278-292.
5. Rives C，Lacks [D J](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Daniel%20J.%20Lacks%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson). Avalanches and self-organized criticality in simulations of particle piles [J]. [Chemical Physics Letters](http://xueshu.baidu.com/usercenter/data/journal?cmd=jump&wd=journaluri%3A%2886759d13fce4887c%29%20%E3%80%8AChemical%20Physics%20Letters%E3%80%8B&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dpublish&sort=sc_cited), 2003, 370(5–6):700-705.
6. 王海兵, 刘咏, 黄伯云等.粉末颗粒线性堆积密度模型的改进. 粉末冶金技术, 2001, 19(4): 208-211.
7. Barrios G K P, Carvalho R M D, Kwade A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling [J]. Powder Technology, 2013, 248(2):84-93.
8. Zhou Y C, Xu B H, Yu A B, et al, An experimental and numerical study of the angle of repose coarse spheres [J]. Powder Technology, 2002, 125(1): 45–54.
9. Zdancevičius E, Kačianauskas R, Zabulionis D. Improvement of viscoelastic damping for the hertz contact of particles due to impact velocity [J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 1286-1290.
10. 吴世亮, 倪晋仁, 李振山. 沙漠沙的筛分粒径与粒径计粒径的比较实验[J]. 泥沙研究, 2002, (1): 60-65.
11. 鲍四元, 邓子辰. 利用DMSM方法求解弹性撞击恢复系数[J]. 动力学与控制学报, 2005, 3(4): 44–49.

Study on parameters of contact model for non-uniform gravel particles in movement and accumulation processes

JIANG Sheng-qiang1，TAN Ci-an1，CHEN Rui1，TAN Yuanqiang2

(1.*School of Mechanical Engineering, Xiangtan University,* *Xiangtan* 411105，*China*；2 . *Institute of manufacturing engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021，China*)

**Abstract：**Discrete element method (DEM) is used to simulate the flow and accumulation processes of the particles. The accuracy of the simulation results is directly influenced by the choice of physical parameters and contact parameters. Four kinds of irregular particle models are established according to their shape and size in this paper. A series of experiments were designed to calibrate the density, recovery coefficient, static friction coefficient and internal friction coefficient of the gravel particles. Friction coefficient between the particles is also determined by the combination of experiment and simulation. Flow processes of the top layer particle in V shape box and L shape box are compared by means of experiment and DEM simulation. It is shown that the trajectory of the top layer particle in DEM simulation coincides well with the experiment trajectory.

**Key words：**non-uniform gravel particles; moving accumulation; contact model; discrete element method; numerical simulation.

**请作者在此论文模板粘贴相应的文字内容，并点击页面对应的样式进行修改和初步排版。**

前言为研究目的、现状、方法等简介，前言不设标题，5号字体。论文内容应包括：中文标题、中文作者、中文单位、中文摘要、中文关键词、前言、正文(图表要有中、英文标题)、参考文献、英文标题、英文作者、英文单位、英文摘要、英文关键词。论文页面设置为上下左右页边距均为2.5cm，行间距为单倍行距，通栏排版，中文字体为宋体，英文和数字字体为Times New Roman，单位字体为正体，变量、矢量字体为斜体，包括公式、图表。数量和单位的使用请参照国家法定计量单位最新标准(GB 3100-93)，采用国际单位制(SI单位)，数值和单位之间加1空隔，数值小数点之前每3位数加1空隔(公式和图中数值不加空隔)。受版面限制，按照此论文模板排版后的文档尽可能不要超过6页(超过6页部分将每页加收200元版面费)。投稿文件名格式：第一作者姓名-论文标题。

# 1 一级标题(小4号宋体，顶格左排，段前和段后各0.5倍行距)

**1.1** 二级标题(5号黑体，顶格左排)

正文5号字体

1.1.1 三级标题(5号宋体，顶格左排)

(1)公式要求

公式编辑器中需定义的主要参数依次为：10.5，6，4.5(word公式编辑器默认格式)。公式编号右齐，单倍行距，公式变量用斜体，矢量、张量为斜体加黑；三角函数、双曲函数、对数、特殊函数的符号、圆周率、自然对数底e、虚数单位i、j，微分符号d等均排正体。

第一次出现的公式符号需说明，如计算水库淤积物干密度变化的经验公式为

 (1)

式中为第*t*年干密度，t/m3；为第1年干密度，t/m3；*B*为常数，t/m3。

(2)插图要求

粘贴可编辑的原Excel图(或增强型图元文件)，

图字体为中文6号宋体(英文和数字Times New Roman 7.5磅)

图1 中文图标题(小5号黑体，图下居中)

Fig.1 Figure title in English(小5号，居中)

插图大小合适、标注清楚(图1)，由于本刊目前是黑白印刷，尽可能是黑白图，图中字体为中文6号宋体(英文和数字Times New Roman 7.5磅)，如果是Excel图，直接粘贴可编辑的原Excel图，否则粘贴增强型图元文件。带坐标的图，一定要注明坐标轴物理量名称和单位，坐标刻度线朝内，变量名用斜体，单位用正体，分隔符为“/”，如“水量 / 亿m3”、“沙量 / 万t”、“水深*h* / m”。如果单位中包含“/”，单位加括号，如“流速*V* / (m/s)”、“含沙量*S* / (kg/m3)”、“来沙系数 / (kg·s/m6) ”等。如果是排列图，用(a)、(b)、(c)等对齐标注图名排序(图2)。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 粘贴可编辑的原Excel图(或增强型图元文件)，图字体为中文6号宋体(英文和数字Times New Roman 7.5磅)  图2 中文图标题(小5号黑体，图下居中)  Fig.2 Figure title in English(小5号，居中) | |

(3)表格要求

表格采用三线表形式(表1)，上下线为1磅，次线为0.5磅，表内字体大小为6号。表内数值小数点对齐，小数点之前每3位数加1空隔。

表1 中文表标题(小5号黑体，居中)

Table 1 Table title in English(小5号，表上居中)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 时段/年 | 水文站Ⅰ | |  | 水文站Ⅱ | |  | 水文站Ⅲ | |
| 径流量/亿m3 | 输沙量/万t |  | 径流量/亿m3 | 输沙量/万t |  | 径流量/亿m3 | 输沙量/万t |
| 1990-1999 | 845.3 | 4 145.2 |  | 556.6 | 4 620.8 |  | 516.3 | 2 103.6 |
| 2000-2009 | 776.5 | 3 051.4 |  | 578.4 | 2 369.6 |  | 461.7 | 954.5 |

参考文献：

参考文献不分文种，均按在文中出现的先后顺序编号，并在正文引用处标注。参考文献的主要责任者之间用逗号分隔，只需注明前3个作者，其余用“,等(英文et al)”代替，英文作者的姓写全、名只写首位大写字母。小5号宋体齐肩编排，常用书写格式参照附件《文后参考文献著录规则》(GB/T 7714-2005)。举例如下：

1. 杨美卿.河床冲刷粗化过程的水槽试验研究[R].北京:清华大学水利水电工程系泥沙研究室,1991:10-18.
2. 胡春宏,陈绪坚,陈建国,等.黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅰ)——理论与模型[J].水利学报,2010,41(3):253-263.
3. 刘兴年.沙卵石推移质运动及模拟研究[D].成都:四川大学,2004:20-40.
4. Wang Z Y, Larsen P, Nestmann F, et al. Resistance and drag reduction of flows of clay suspensions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 124(1): 41-49.
5. 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983:105-110.

Experimental study on transport of bed load material(小四号加粗居中)

ZHANG Li1,2，LI Jin-you3，WANG Hai-tao3(五号居中)

(1.*Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes*，*Chinese Academy of Sciences*，*Chengdu* 610041，*China*；

2.*Institute of Mountain Hazards and Environment*，*Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources*，*Chengdu* 610041，*China*；

3.*Yangtze River Scientific Research Institute*，*Wuhan* 430010，*China*) (六号居中，英文斜体，数字和标点符号正体)

**Abstract：**Flume experiments study of bed load transport rule by clear water scouring were carried based on the discontinuous wide-graduation sediment…(五号)

**Key words：**discontinuous wide-graduation sediment；variation of bed load transport rate；bed load size distribution；bed load transport law(五号)

附件：参考文献常用书写格式

依据中华人民共和国国家标准《文后参考文献著录规则》(GB/T 7714-2005)，本刊参考文献著录采用顺序编码制，并以单字母或双字母方式标识以下各种参考文献类型：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参考文献类型 | 专著 | 期刊文章 | 报纸文章 | 论文集 | 汇编 | 学位论文 |
| 文献类型标识 | M | J | N | C | G | D |
| 参考文献类型 | 标准 | 专利 | 报告 | 数据库 | 电子公告 | 计算机程序 |
| 文献类型标识 | S | P | R | DB | EB | CP |

# 1 顺序编码制的书写格式

顺序编码制是指在正文中按引用文献出现的先后顺序连续编码，酌情按以下三种格式中的一种将序号置于方括号内标注，在参考文献表中按此序号(序号加方括号)依次著录。

例：……，表明已低到2500m的高度[2] ……

或 文献［2］指出，高度已低到2500m……

或 MacFarland[2]指出，高度已低到2500m……

引用多篇文献或同一著者多篇文献时，只需将各篇文献的序号在方格号内全部列出，各序号间用“，”分隔。如遇三个及以上连续序号，可标注起讫序号，中间用“-”号连接。

例：早期的研究结果[2,4,6-9]表明……

或 Brown[2,4,6-9]认为……

# 2 参考文献著录格式示例

2.1 普通图书(注明起止页码)

格式：著者. 书名[M]. 版本. 出版地：出版社，出版年：引文页码.

例：周之豪. 水利水能规划[M]. 北京：水利电力出版社，1985：31-36.

2.2 论文集(注明起止页码)

格式：著者. 论文集名[C]. 出版地：出版社，出版年：引文页码.

例：辛希孟. 信息技术与信息服务国际研讨会论文集：A集[C]. 北京：中国社会科学出版社，1994：10-20.

2.3 学位论文(只标到学校，不用说明是硕士还是博士论文)

格式：作者. 论文名[D]. 地名：学位授予单位，年份：引文页码.

例：邵学强. 水力学模型在水文学中的应用研究[D]. 南京：河海大学，2005：10-20.

2.4 报告(注明起止页码)

格式：著者. 报告名[R]. 单位城市：报告单位名称，出版年：引文页码.

例：王婷，李涛. 溯源冲刷效果影响因素研究[R]. 郑州：黄河水利科学研究院，2013：34-40.

2.5 期刊(注明起止页码)

格式：作者(列前3个作者). 文献题名[J]. 期刊名，出版年，卷号(期号)：起止页码.

例：胡春宏，陈绪坚，陈建国，等. 黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅰ)——理论与模型[J]. 水利学报，2010，41(3)：253-263.

2.6 论文集中的析出文献(注明起止页码)

格式：析出文献主要责任者. 析出文献题名[C]//原文献主要责任者. 原文献题名. 出版地：出版者，出版年：析出文献起止页码.

例：钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用：中国运筹学会第五届大会论文集. 西安：西安电子科技大学出版社，1996：468-471.

2.7 报纸文章

格式：主要责任者. 文献题名[N]. 报纸名，出版日期(版次).

例：陈志平. 减灾设计研究新动态[N]. 科技日报，1997-12-13(5).

2.8 国际国家标准

格式：著者. 标准编号，标准名称[S]. 出版地：出版社，出版年.

例：全国文献工作标准化技术委员会第六分委员会. GB/T 7714-2005，文后参考文献著录规则[S]. 北京：中国标准出版社，2005.

2.9 专利

格式：专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别：专利号，出版日期.

例：王杏林. 建筑砌块联接件[P]. 中国：1036800，1997-09-27.

2.10 电子文献

格式： 主要责任者. 电子文献题名 [电子文献及载体类型标识]. 电子文献的出处或可获得地址，发表或更新日期/引用日期.

例：左东启. 黄河河道格局的历史演变及其对现代治黄思路的启示[EB/OL]. [2005-11-11]. http://kkb.hhu.edu.cn/lt/ lt016.htm.

2.11 各种未定义类型的文献

格式：主要责任者. 文献题名[Z]. 出版地：出版者，出版年.

1. 收稿日期：2014-06-18(6号宋体)

   基金项目：国家自然科学基金项目（51605409，11602212）资助

   作者简介：姜胜强(1986–)，男，湖南宁乡人，副教授，主要从事散体材料输送、脆性材料加工等方面的研究。E-mail：jsqcx@126.com [↑](#footnote-ref-1)