第26卷第3期
2009年6月
计算力学学报
Chinese Journal of Computational Mechanics
Vol. 26, No. 3
June 2009

文章编号:1007-4708(2009)03-0364-05

时域自适应算法求解移动荷载下梁的多宗量反问题

李哈汀*， 杨海天

（大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 工程力学系，大连 116024）

摘 要：通过一种时域自适应算法，建立了求解变速移动荷载下梁的多宗量反问题的数值模型，可同时识别移动荷载和梁的物性参数。正问题采用时域自适应算法和FEM建模，并可由此方便地推导敏度公式；在反问题求解中采用Levenberg-Marquardt法，计算表明该方法具有较好的抗不适定性。通过两个算例，对所提算法进行了数值验证，并探讨了噪声和测点的变化对反演结果的影响，结果令人满意。

关键词：移动荷载；组合识别；时域自适应算法；有限元

中图分类号：TP273　　**文献标识码**：A

1 引 言

移动荷载是工程中常见的一种荷载作用方式[1]。相对静载而言，移动荷载条件下可为结构的参数识别提供更充分的响应信息。

根据所识别对象的不同，目前有关移动荷载反问题的研究大致可分为两个方面：一是针对移动荷载本身的识别，余岭和Chan[2]在最近对这一方面的工作做了详细综述，第二是针对结构参数的识别，其中包括结构的弹性模量、频率及模态等等。1997年Farrar[3]通过不同时间在桥梁上实际的交通行驶的作用所产生的激励信息，识别了桥梁的模态参数。Majumder和Manohar[4]通过使用伪逆矩阵识别了移动荷载作用下梁的抗弯刚度，并以单元刚度的减少来模拟破坏的发生。Zhu和Law[5]通过位移响应同时识别了两个移动的轮载作用下的水泥桥的弹性模量和轮载。最近，国内也有一些学者[6,7]研究了移动荷载下梁结构的参数识别。文献[6]通过识别减小的抗弯刚度以判断梁的结构损伤。文献[7]将移动荷载简化为了大小不随时间变化的集中荷载，识别了移动荷载作用下梁结构的抗弯刚度。但目前对移动荷载下(特别是移动载荷大小未知时)阻尼特性的识别似未见到直接报道，有关荷载与多类型结构参数组合识别的文献报道比较少，且以往的工作中大都假设荷载作用匀速移动。

本文考虑单跨Bernoulli-Euler梁，将移动荷载简化为移动集中荷载，并变速移动。正问题采用自适应展开技术[8]求解，可在时间步长改变的情况下保证计算精度，并可方便地实施响应信息对待识别参数的敏度分析。反问题采用Levenberg-Marquardt法[9](L-M法)求解，在荷载大小未知的情况下，可同时识别梁的多个物性参数与荷载大小。最后通过两个算例对所提方法进行了验证，并初步计及了测点布置和噪音对识别结果的影响。

2 控制方程及其求解

2.1 控制方程及其有限元离散

本文假定移动荷载的大小不随时间变化。

移动荷载下等截面均质Bernoulli-Euler梁的动力微分方程为[10]：

$$EI(x,t)\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}+\bar{m}(x,t)\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}+c(x,t)\frac{\partial y(x,t)}{\partial t}=P(x,t) \tag{1}$$

式中 $EI(x,t)$，$\bar{m}(x,t)$ 和 $c(x,t)$ 分别为抗弯刚度、单位质量和阻尼系数，$P(x,t)=\delta(x-x_p(t))P_0$ 为作用在梁结构上的移动荷载，其中

$$\delta(x-x_p(t))=\begin{cases}1 & x=x_p(t)\\ 0 & x\neq x_p(t)\end{cases} \tag{2}$$

式中 $x_p(t)$ 为荷载位置，P_0 为荷载的幅值。

设 $x_p(t)=v_0t+\frac{1}{2}at^2$，式中 v_0 表示移动荷载

收稿日期：2008-08-08；**修改稿收到日期**：2008-10-18.

基金项目：国家自然科学基金(10772035，10721062，10472019)；973项目(2005CB321704)；辽宁省中青年学术带头人基金资助项目.

作者简介：李哈汀*(1982-)，男，博士生
(E-mail：lihating@yahoo.com.cn)
杨海天(1956-)，男，教授，博士生导师.

的初速度，a 表示移动荷载的加速度。

通过有限元法[11]，可以得到离散形式的动力方程：

$$M(t)\ddot{\bar{y}}(t)+C(t)\dot{\bar{y}}(t)+K(t)\bar{y}(t)=F(t) \tag{3}$$

式中　$\ddot{\bar{y}}(t)$，$\dot{\bar{y}}(t)$ 和 $\bar{y}(t)$ 分别表示节点的加速度、速度和位移向量；$M(t)$，$C(t)$，$K(t)$ 和 $F(t)$ 分别表示 t 时刻系统的质量阵、阻尼阵、刚度阵和节点荷载向量。

2.2　时域自适应精细算法[8]

本文考虑质量阵、刚度阵、阻尼阵均不随时间变化。

在一个离散的时段 $t\in[t_0,t_0+T]$ 内设无量纲变量：

$$s=\frac{t-t_0}{T} \tag{4}$$

并将方程(3)中时间相关的变量展开为 s 的级数：

$$\bar{y}(t)=\sum_{m=0}\bar{y}^m s^m,F(t)=\sum_{m=0}F^m s^m \tag{5}$$

式中　$\bar{y}^m$ 和 F^m 分别为 $\bar{y}(t)$ 和 $F(t)$ 的 m 阶展开系数。

$\bar{y}(t)$ 对时间的导数为

$$\dot{\bar{y}}(t)=\sum_{m=0}\frac{m+1}{T}\bar{y}^{m+1}s^m \tag{6}$$

$$\ddot{\bar{y}}(t)=\sum_{m=0}\frac{(m+1)(m+2)}{T^2}\bar{y}^{m+2}s^m \tag{7}$$

将式(5～7)代入有限元离散方程(3)中，通过比较等式两边 s^m 的系数可得

$$\sum_{j=0}^{m}\frac{(j+1)(j+2)}{T^2}M^{m-j}\bar{y}^{j+2}+\sum_{j=0}^{m}\frac{(j+1)}{T}C^{m-j}\bar{y}^{j+1}+\sum_{j=0}^{m}K^{m-j}\bar{y}^{i}=F^m \tag{8}$$

递推公式中第一个时间段的初始条件由给定的初始条件给出，若第 k 个时段内的展开系数已知，则可得到第 $k+1$ 时段内的初始条件：

$$\bar{y}_{k+1}^0=\sum_{m=0}\bar{y}_k^m,\bar{y}_{k+1}^1=\sum_{m=0}(m+1)\frac{T_{k+1}}{T_k}\bar{y}_k^{m+1} \tag{9}$$

式中　T_k 和 T_{k+1} 分别为第 k 和第 $k+1$ 时间段的时长，节点位移 $\bar{y}$ 的上标 m 表示第 m 阶展开系数。给定梁的初始条件和边界条件，即可通过式(8～9)进行正问题求解。

2.3　收敛准则

在每个离散时段内通过下式判断收敛

$$\left|\left(\frac{\|\bar{y}^m s^m\|}{\sum_{j=0}^{m-1}\|\bar{y}^j s^j\|}\right)_{s=1}\right|\leqslant\varepsilon \tag{10}$$

式中　ε 为误差限，若该不等式连续满足若干次，就认为展开计算已经收敛。

2.4　荷载加速移动时载荷展开系数的计算

假设荷载移动至第 n 号单元，通过第 n 号单元所用时间设为 T_e^n，荷载通过前 $n-1$ 个单元所用时间为 $t_{00}=\sum_{i=1}^{n-1}T_e^i$。将 T_e^n 均分为 k_e^n 个时间段，则每个时间段的长度为 $T^n=T_e^n/k_e^n$。

本文采用两节点的 Hermite 单元，则载荷所在单元的节点载荷向量可展开为

$$\begin{aligned}
F_e(t)&=P_0N_e\delta(x-v_0t-at^2/2)=\\
&P_0\left\{\begin{matrix}1-3x_0^2/l^2+2x_0^3/l^3\\ x_0-2x_0^2/l+x_0^3/l^2\\ 3x_0^2/l^2-2x_0^3/l^3\\ -x_0^2/l+x_0^3/l^2\end{matrix}\right\}+
P_0\left\{\begin{matrix}-6x_0x_1/l^2+6x_0^2x_1/l^3\\ x_1-4x_0x_1/l+3x_0^2x_1/l^2\\ 6x_0x_1/l^2-6x_0^2x_1/l^3\\ -2x_0x_1/l+3x_0^2x_1/l^2\end{matrix}\right\}s+\\
&P_0\left\{\begin{matrix}-3(x_1^2+2x_0x_2)/l^2+6(x_0x_1^2+x_0^2x_2)/l^3\\ x_2-2(x_1^2+2x_0x_2)/l+3(x_0x_1^2+x_0^2x_2)/l^2\\ 3(x_1^2+2x_0x_2)/l^2-6(x_0x_1^2+x_0^2x_2)/l^3\\ -(x_1^2+2x_0x_2)/l+3(x_0x_1^2+x_0^2x_2)/l^2\end{matrix}\right\}s^2+\\
&P_0\left\{\begin{matrix}2(x_1^3+6x_0x_1x_2)/l^3-6x_1x_2/l^2\\ (x_1^3+6x_0x_1x_2)/l^2-4x_1x_2/l\\ -2(x_1^3+6x_0x_1x_2)/l^3+6x_1x_2/l^2\\ (x_1^3+6x_0x_1x_2)/l^2-2x_1x_2/l\end{matrix}\right\}s^3+\\
&P_0\left\{\begin{matrix}-3x_2^2/l^2+6(x_0x_2^2+x_1^2x_2)/l^3\\ -2x_2^2/l+3(x_0x_2^2+x_1^2x_2)/l^2\\ 3x_2^2/l^2-6(x_0x_2^2+x_1^2x_2)/l^3\\ -x_2^2/l+3(x_0x_2^2+x_1^2x_2)/l^2\end{matrix}\right\}s^4+\\
&P_0\left\{\begin{matrix}6x_1x_2^2/l^3\\ 3x_1x_2^2/l^2\\ -6x_1x_2^2/l^3\\ 3x_1x_2^2/l^2\end{matrix}\right\}s^5+P_0\left\{\begin{matrix}2x_2^3/l^3\\ x_2^3/l^2\\ -2x_2^3/l^3\\ x_2^3/l^2\end{matrix}\right\}s^6
\end{aligned} \tag{10}$$

式中

$$x_0=v_0t_0+at_{00}t_0+at_0^2/2$$
$$x_1=v_0T^n+at_{00}T^n+at_0T^n$$
$$x_2=a(T^n)^2/2$$

式中　t_0 为荷载进入第 n 号单元开始计时的时长，l 为单元长度。

3 反问题求解

可通过以下泛函的极小化实现对未知参量的识别：

$$f(\chi)=\frac{1}{2}\sum_{t}\Big(\sum_{s}R^{\mathrm{T}}(\chi)R(\chi)\Big) \tag{12}$$

式中 $R(\chi)=\bar{y}^{p}(\chi)-\bar{y}^{m}(\chi)$，$\chi$ 为待识别变量，$\bar{y}^{p}(\chi)$ 和 $\bar{y}^{m}(\chi)$ 分别为节点位移向量的预测值和真实值，$\sum_{t}\sum_{s}$ 表示在时间和空间上求和。

Levenberg-Marquardt 法（L-M 法）中增量的计算公式为

$$(((\nabla R(\chi))^{\mathrm{T}}\nabla R(\chi))-\mu^{n}I)D_{n}=-(\nabla R(\chi))^{\mathrm{T}}R(\chi) \tag{13}$$

动力方程(3) 两边对阻尼系数求导得：

$$M\frac{\partial\ddot{\bar{y}}(t)}{\partial\{c_u\}}+\frac{\partial C(x)}{\partial\{c_u\}}\dot{\bar{y}}(t)+c\frac{\partial\dot{\bar{y}}(t)}{\partial\{c_u\}}+K\frac{\partial\bar{y}(t)}{\partial\{c_u\}}=0 \tag{14}$$

式中 $C(x)$ 为阻尼矩阵，$\{c_u\}$ 为待反单元的阻尼系数向量。则类似得到式(8) 的方法，节点响应对阻尼系数的敏度递推公式可表示为

$$\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{c_u\}}\right\}^{m+2}=\frac{-M^{-1}T^{2}}{(m+1)(m+2)}\left[\frac{\partial C(x)}{\partial\{c_u\}}\frac{(m+1)}{T}\bar{y}^{m+1}+C\frac{(m+1)}{T}\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{c_u\}}\right\}^{m+1}+K\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{c_u\}}\right\}^{m}\right] \tag{15}$$

同理，节点响应对荷载的敏度递推公式可以表示为

$$\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial P_0}\right\}^{m+2}=\frac{-M^{-1}T^{2}}{(m+1)(m+2)}\left[\frac{C(m+1)}{T}\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial P_0}\right\}^{m+1}K\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial P_0}\right\}^{m}-\left\{\frac{\partial F^{m}}{\partial P_0}\right\}\right] \tag{16}$$

节点响应对弹性模量的敏度递推公式可以表示为

$$\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{E_u\}}\right\}^{m+2}=\frac{-M^{-1}T^{2}}{(m+1)(m+2)}\left[\frac{(m+1)}{T}C\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{E_u\}}\right\}^{m+1}+K\left\{\frac{\partial\bar{y}}{\partial\{E_u\}}\right\}^{m}+\frac{\partial K(x)}{\partial\{E_u\}}\bar{y}^{m}\right] \tag{17}$$

综上所述，反问题计算的迭代过程如下：

Step1：选取变量初值$\{\chi\}^{0}$，设置迭代步 $n=0$ 及 ε。

Step2：计算 $R(\{\chi\}^{n})$ 和 $\nabla R(\{\chi\}^{n})$，通过式(13) 求解 D_n。

Step3：$\{\chi\}^{n+1}=\{\chi\}^{n}+D_n$，并令 $n=n+1$。

Step4：如果 $\|D_n\|\leqslant\varepsilon$，则停止迭代；否则执行 Step2。

4 噪声处理

加噪方式为

$$\{\bar{y}^{*}\}=(1+\xi\cdot N_{oise})\{\bar{y}^{e}\} \tag{18}$$

式中 $\{\bar{y}^{e}\}$ 为不含噪声的已知信息，ξ 是一个服从标准正态分布的随机变量，N_{oise} 表示噪声水平。对于每一个给定的 N_{oise} 都生成 40 组$\{\bar{y}^{*}\}$。

置信区间由下式给出：

$$\bar{x}\pm\frac{t_{(\beta/2,\ N-1)}*s_x}{\sqrt{N}} \tag{19}$$

式中 $\bar{x}$ 表示反演结果的平均值，s_x 表示标准差，t 表示 $N-1$ 个自由度的 t 分布，N 表示样本容量，置信度是 $1-\beta$。

5 数值算例

算例 1 考虑噪声的弹性模量识别

如图 1 所示，移动荷载加速通过简支梁。

图 1 简支梁模型

Fig. 1 Simply supported beam modal

结构参数均假设为无量纲参数，弹性模量 $E=100$，惯性矩 $I=1$，$\bar{m}=1$，$c=0.1$，杆长 $L=10$，$l=0.5$，$P_0=1$，$v_0=1$，$a=0.2$。取梁中点处 2000 个时间点上的位移值作为已知信息。荷载经过每个单元所用的时间被平分为 100 份，并假设四号及十二号单元的弹模为其他单元的 50%（阴影单元）。

分别在 10%、5% 噪声的情况下，样本容量取为 40，ξ 中的最大值为 2.1832，反演结果列入表 1。

算例 2 阻尼系数与弹性模量的组合识别

算例 2 所考虑问题同上，假设梁的第四到第九号单元的阻尼系数以及弹性模量未知，并且第四及第七号单元弹模与阻尼系数为其他单元的 50%。

考虑两种位移测点布置：

Case A：梁中点

Case B：所有有限元节点

样本容量为 40，在 10% 噪声下，识别结果列入表 2。

表 1　荷载未知时梁弹性模量识别

Tab. 1　Identification of elastic modulus with unknown load

变量	置信区间 $\sigma=0.1$		置信区间 $\sigma=0.05$		真实值
	初值	反演值	初值	反演值	
E_1	100	100.75 ± 1.17e-3	100	100.81 ± 5.40e-4	100
E_2	100	99.96 ± 1.78e-4	100	99.95 ± 8.31e-5	100
E_3	100	99.99 ± 3.02e-4	100	99.97 ± 1.50e-4	100
E_4	100	50.01 ± 4.48e-5	100	50.01 ± 5.12e-5	50
E_5	100	99.98 ± 1.77e-4	100	100.00 ± 9.39e-5	100
E_6	100	100.13 ± 4.21e-4	100	100.11 ± 2.14e-4	100
E_7	100	99.85 ± 5.02e-4	100	99.88 ± 2.40e-4	100
E_8	100	100.06 ± 4.11e-4	100	100.04 ± 1.94e-4	100
E_9	100	100.07 ± 7.63e-4	100	100.01 ± 3.80e-4	100
E_{10}	100	100.01 ± 7.28e-5	100	99.99 ± 3.17e-5	100
E_{11}	100	99.98 ± 2.08e-4	100	100.00 ± 1.04e-4	100
E_{12}	100	49.99 ± 2.88e-4	100	50.00 ± 1.42e-4	50
E_{13}	100	99.95 ± 2.61e-4	100	99.95 ± 1.40e-4	100
E_{14}	100	100.06 ± 1.34e-3	100	99.99 ± 6.54e-4	100
E_{15}	100	99.96 ± 7.36e-4	100	99.98 ± 3.65e-4	100
E_{16}	100	100.01 ± 5.96e-4	100	99.98 ± 3.00e-4	100
E_{17}	100	99.97 ± 3.69e-4	100	99.98 ± 1.97e-4	100
E_{18}	100	99.98 ± 1.54e-4	100	99.98 ± 1.22e-4	100
E_{19}	100	99.97 ± 1.14e-3	100	100.01 ± 6.32e-4	100
E_{20}	100	99.63 ± 4.03e-3	100	99.43 ± 2.25e-3	100
p_0	1.5	1.012 ± 0.0339	1.5	1.0059 ± 0.0169	1

表 2　在 10% 噪声情况下荷载未知时梁弹性模量与阻尼系数的组合识别

Tab. 2　Combined identification of elastic modulus and damping coefficients with 10% noise and unknown load

变量	Case A $\sigma=0.1$		Case B $\sigma=0.1$		真实值
	初值	反演值	初值	反演值	
E_4	100	49.99 ± 4.843e-5	100	50.01 ± 0.000272	50
c_4	0.1	0.0503 ± 3.17e-5	0.1	0.0491 ± 3.414e-5	0.05
E_5	100	100.00 ± 1.538e-5	100	99.98 ± 0.000480	100
c_5	0.1	0.1091 ± 9.74e-5	0.1	0.1031 ± 1.210e-4	0.1
E_6	100	99.99 ± 3.700e-5	100	100.03 ± 0.001268	100
c_6	0.1	0.0925 ± 1.953e-4	0.1	0.0983 ± 7.203e-5	0.1
E_7	100	50.01 ± 2.102e-5	100	49.97 ± 0.000929	50
c_7	0.1	0.0463 ± 2.416e-4	0.1	0.0462 ± 1.485e-4	0.05
E_8	100	99.99 ± 3.251e-5	100	99.97 ± 0.000945	100
c_8	0.1	0.1025 ± 1.518e-4	0.1	0.1054 ± 2.116e-4	0.1
E_9	100	99.99 ± 1.922e-5	100	100.02 ± 0.000595	100
c_9	0.1	0.0995 ± 3.41e-5	0.1	0.0980 ± 7.719e-5	0.1
p_0	1.5	1.0116 ± 0.0339	1.5	1.0154 ± 0.024692	1

6　结　论

本文的主要贡献是通过时域自适应精细算法，并利用 L-M 算法，提出了一种在变速移动荷载下识别梁结构参数的数值模型，在移动荷载大小未知的情况下，可实现对弹性模量、阻尼系数及载荷大小的组合识别，据作者查阅，国内外似未见直接相关的文献报道。

参考文献 (References)：

[1] YU L, CHAN T Y H T. Moving force identification from bending moment response of bridge[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, **14**(2): 151-70.

[2] YU L, CHAN T Y H T. Recent research on identification of moving load on bridges[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, **305**(1-2): 3-21.

[3] FARRAR C R, JAMES G H. System identification from ambient vibration measurements on a bridge[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, **205**(1): 1-18.

[4] LUNA MAJUMDER, MANOHAR C S. Nonlinear reduced models for beam damage detection using data on moving oscillator-beam interaction[J]. *Computer Structural*, 2004, **82**(2-3): 301-314.

[5] ZHU X Q, LAW S S. Damage detection in simply supported concrete bridge structure under moving vehicular loads[J]. *Journal of Vibration and Acoustics, ASME*, 2007, **129**(58): 58-64.

[6] 卜建清,王树栋,罗韶湘. 由车激响应识别桥梁损伤的灵敏度方法[J]. 振动与冲击, 2007, **26**(7): 80-84. (BU Jian-qing, WANG Shu-dong, LAW Siu-seong. Bridge damage identification using dynamic response induced by a passing vehicle based on response sensitivity analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, **26**(7): 80-84. (in Chinese))

[7] 袁向荣. 由荷载覆盖梁的动力响应数据识别梁的破损[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2008, **7**(1): 81-86. (YUAN Xiang-rong. Damage detection through space series of dynamic response[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2008, **7**(1): 81-86. (in Chinese))

[8] HAITIAN Y. A new approach of time stepping for solving transfer problem[J]. *Communications in numerical methods in engineering*, 1999, **15**: 325-334.

[9] 王彦飞. 反演问题的计算方法及其应用[M]. 北京：高等教育出版社, 2007. (WANG Yan-fei. *Computational Methods for Inverse Problems and Their Ap-*

plications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))

[10] LIN Y H, TRETHEWEY M W. Finite element analysis of elastic beams subjected to moving dynamic loads[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, **136** (2): 323-342.

[11] ZIENKIEWICZ O C. *The Finite Element Method* [M]. Beijing: Science Press, 1985.

Identification of multi-variables in a beam subjected to moving loads via a self-adaptive precise algorithm in time domain

LI Ha-ting*, YANG Hai-tian

(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A numerical model is presented to identify constitutive parameters for a simply supported beam subjected a moving load. An adaptive precise algorithm in the time domain and FEM are employed to describe the direct problem, and sensitivity analysis can therefore be implemented conveniently. The Levenberg-Marquardt algorithm is utilized to solve the inverse problem, and the combined identification of elastic modulus and damping coefficients is realized. Two numerical examples are provided to verify the proposed model, and satisfactory results are achieved. The measurement noise is taken into account.

Key words: moving load; combined identification; self-adaptive precise algorithm; finite element

(上接第 363 页)

Large-eddy simulation of the evolution of land form of desert

WU Chui-jie*[1], CHEN Jian[2]

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Research Center for Fluid Dynamics, Science School, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The methods of large-eddy simulation, the motion of sand particles with mixed sand sizes and immersed boundary are used to simulate the formation and evolution of sand ripples and sand dunes. When sand ripples appear in the flat ground, at the same time, they also shown up on the sand dunes, which means that the evolution of sand ripples has multiscale nature. Besides, the effects of sand sizes to the formation and evolution of sand ripples and sand dunes, and the effects of sand dunes to the formation and evolution of sand ripples on the flat ground, are analyzed.

Key words: sand ripples; sand dunes; large-eddy simulation; mixed sand sizes; immersed boundary method; multiscale