均匀吸气控制下后台阶流动的数值模拟

郑朝荣[1]，张耀春[1]，张建胜[2]，张文元[1]

（1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院，150090 哈尔滨；2. 浙江工业大学 建筑工程学院，310014 杭州）

摘　要：为检验本文数值方法及其求解策略模拟均匀吸气控制下钝体绕流的可行性，分别采用基于LES（large eddy simulation）方法的DKEM（dynamic kinetic energy subgrid-scale model）模型和基于RANS（Reynolds averaged Navier-Stokes）方法的SST（shear stress transport）k-ω模型对均匀吸气控制下三维后台阶（backward-facing step，BFS）的流动分离和再附进行了数值模拟. 比较了数值模拟和实验所得的平均风压系数分布和再附长度，结果表明：LES方法在本文精细网格下能得到较精确的预测结果；不同流量系数C_Q的吸气控制均能较显著地减小后台阶流动的环绕区范围和再附长度，改善台阶后的流场结构；随着C_Q绝对值的增加，吸气控制效果逐渐显著.

关键词：后台阶；吸气控制；数值模拟；流动分离；再附长度

中图分类号：O359　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0367－6234(2012)04－0023－05

Numerical simulation of a backward-facing step flow controlled by steady suction

ZHENG Chao-rong[1], ZHANG Yao-chun[1], ZHANG Jian-sheng[2], ZHANG Wen-yuan[1]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, 310014 Hangzhou, China)

Abstract: To verify the feasibility of the numerical methods and solution strategies for simulating the flows around bluff bodies controlled by steady suction, the separation and reattachment over a suction-controlled backward-facing step (BFS) flow is numerically investigated using the dynamic kinetic energy subgrid-scale model (DKEM) model based on the large eddy simulation (LES) method and the SST k-ω model based on the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) method, respectively. Comparisons of the mean pressure coefficient and reattachment length between the numerical simulations and the existed experiment are also conducted to prove the validity. The results indicate that the LES can acquire exact results under the refined grid adopted in the paper. Suction control with any suction flow coefficient C_Q can reduce the recirculation zone and reattachment length, and thus improve the flow fields downstream the step. With the increasing increments of the absolute C_Q, the effect of suction control is more significant.

Key words: backward-facing step; suction control; numerical simulation; separation; reattachment length

后台阶（backward-facing step，BFS）流动是流体力学复杂流动中的一个典型例子，它代表着工程中一类横截面突扩的钝体绕流问题. BFS流动的分离将导致一些负面效果，如：高速涡旋形成、压力损失、脉动增大以及噪声等，因此我们应该采取措施来抑制其流动分离的发展.

近年来，主动流动控制技术已在许多领域中得到了广泛应用，其中吸气控制技术也被应用于飞行器设计、流体机械、建筑结构抗风和管道输运等外流和内流中[1-6]. 2007年，Uruba等[2]对不同流量吸气控制下BFS流动的再附长度x_r进行了实验研究，考察了BFS的阶脚处的不同形状和大小的吸气孔对吸气控制效果的影响，并给出了各

收稿日期：2011－01－20.
基金项目：国家自然科学基金（51108142）；中国博士后基金（2011M500672）；浙江省自然科学基金（Y1110128）.
作者简介：郑朝荣（1981—），男，博士，讲师；
张耀春（1937—），男，教授，博士生导师.
通讯作者：郑朝荣，flyfluid@163.com.

工况的局部前流系数 γ_p 分布. 结果表明:吸气控制能显著减小 x_r, 其对分离区大小的影响主要依赖于吸气孔的容量. 2009 年,Sano 等[3] 对 BFS 的阶脚处(平行于主流方向)或下台阶处(垂直于主流方向)实施均匀吸气控制时的 BFS 流动进行了实验研究,分析了吸气流量系数对壁面压力系数、压力损失系数、局部/最大 Nu 数、再附长度和流场结构等的影响. 此外,2004 年 Dejoan 等[7] 还研究了周期性振荡射流对 BFS 流动分离的控制,分析了射流幅值和频率对流场结构的影响.

然而,至今还没有文献采用数值模拟方法研究均匀吸气控制对 BFS 流动分离和再附的影响. 本文主要采用基于空间滤波的 LES(large eddy simulation)方法和基于时间平均的 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)方法研究吸气控制对三维 BFS 流动的影响,通过与相应实验结果[2] 的比较来检验本文数值方法及其数值求解策略模拟均匀吸气控制下钝体绕流的可行性,并分析吸气对流场的控制效果.

1 数值模拟方法

1.1 计算模型及计算域

为与 Uruba 等[2] 的实验结果进行比较,数值计算模型与实验中基本相同. 图 1 给出了均匀吸气控制下 BFS 的计算域示意图,坐标原点定义在阶脚中心点处, 其中 x 向为顺流向. 图中 H = 0.25 m, w = 0.1 m,台阶高度 h = 0.025 m. 吸气孔为矩形孔,宽度 $a = 0.95 \times 10^{-3}$ m,入流平均速度 U_e = 5 m/s.

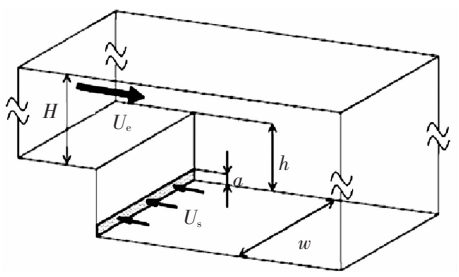
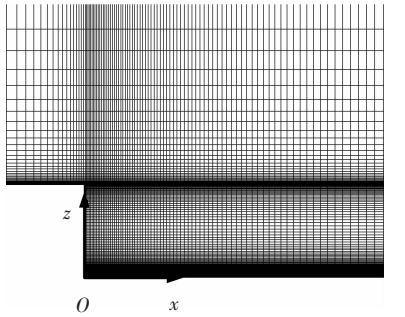
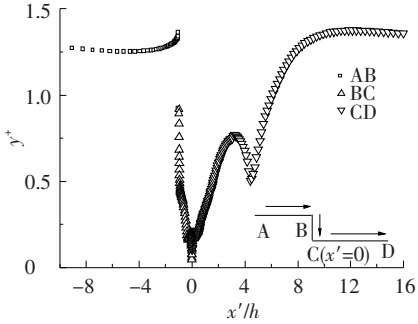


图 1 吸气控制下 BFS 的计算域示意

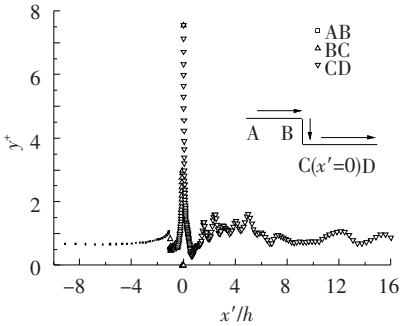
BFS 的计算域采用多块非均匀结构化网格离散,对台阶附近的网格进行局部加密,而远离台阶的区域采用较稀疏的网格. 经网格独立性检验,采用的台阶附近的网格如图 2 (a)所示,计算域的总网格数约为 110 万. 台阶附近的近壁面第一层网格的 $y^+ = \Delta y u_\tau / \nu$(式中各参数的定义可参考文献[8],$\Delta y$ 取 0.05 mm)分布如图 2(b)和(c)所示,BFS 附近多数区域的 y^+ 均小于 2(处于粘性底层内,适于研究边界层控制问题),因此网格质量较好.



(a) 台阶附近的网格



(b) 定常计算时台阶附近的 y^+



(c) 非定常计算时台阶附近的 y^+

图 2 台阶附近的网格及近壁面网格质量 y^+

计算域入口采用均匀入流条件 U_e = 5 m/s;出口采用湍流完全发展的 outflow 边界条件. 吸气控制采用速度入口条件来模拟,定义吸气时速度为负值;无吸气时,边界改为无滑移壁面条件[5]. 为模拟实验室壁面[2] 的情况,计算域的其余壁面均采用无滑移壁面条件.

1.2 湍流模型

1.2.1 SST k-ω 模型

定常计算采用基于 RANS 方法的剪切应力输运(SST) k-ω 模型. 该模型在模拟低雷诺数的近壁区流动具有较高的精度和算法稳定性,并能较准确地模拟流动分离[9]. 其中 k 及 ω 的输运方程表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta^* \rho \omega k ,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] + \frac{\alpha}{\nu_t}\tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta\rho\omega^2 + \frac{2\rho(1-F_1)\sigma_{w2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}.$$

上式中各变量的定义及模型常数的取值可参考文献[10],这里不再赘述.

1.2.2　动态动能亚格子模型

非定常计算采用 LES 方法,其控制方程为

$$\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_i} = 0\ ,$$

$$\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial\bar{u}_i\bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2\bar{u}_i}{\partial x_j\partial x_j} - \frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}\ .$$

采用动态动能亚格子模型(dynamic kinetic energy subgrid-scale model, DKEM)来封闭亚格子应力 τ_{ij}, 并采用 Top-Hat 滤波器进行滤波[10].

亚格子尺度应力 τ_{ij} 可表示为

$$\tau_{ij} - \frac{2}{3}k_{sgs}\delta_{ij} = -2C_l k_{sgs}^{\frac{1}{2}}\overline{\Delta}\overline{S}_{ij},$$

其中 k_{sgs} 可由下式确定

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{u}_i k_{sgs}}{\partial x_i} = -\tau_{ij}\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} - C_\varepsilon\frac{k_{sgs}^{\frac{3}{2}}}{\overline{\Delta}} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i}\right).$$

上式中各变量的定义可参考文献[10].

定常计算和非定常计算的数值求解策略可参考文献[8]. 为保证非定常计算具有更好的稳定性和收敛性,将 SST k-ω 模型的定常计算结果瞬态化作为 DKEM 模型非定常计算的初始流场.

2　结果与分析

采用无量纲吸气流量系数 C_Q 来描述吸气控制的强度,C_Q 定义为

$$C_Q = \frac{\rho_s U_s F_s}{\rho_e U_e F_e} = \frac{\rho_s U_s a}{\rho_e U_e H}\ .$$

式中:ρ_s、U_s 和 F_s 分别为吸气气体的密度、吸气速度和吸气孔面积;ρ_e 和 F_e 分别为上游入流气体的密度和入流面面积;本文中 $\rho_s = \rho_e$,与 U_s 相同,吸气时 C_Q 也为负值.

2.1　基准模型

许多学者曾对无吸/吹气控制($C_Q = 0$)的后台阶流动(称之为基准模型)的分离和再附进行了大量的实验和数值模拟研究[11-12]. 一般高 Re 数 BFS 流动的流场沿流向可分为分离区、再附区和再发展区(前流区);分离区沿竖向又可以分为角涡区、回流区和主流核心区.

图 3 给出了 LES 方法(DKEM 模型)计算所得的基准模型对称面的流场特征示意图,清晰地描述了 BFS 流动的各个流态. 由图可知,BFS 的分离区是由环绕区的一个主涡系和角涡区的一个反向小涡系共同组成,这种流态也被 Šarić 等[13]的实验所证明.

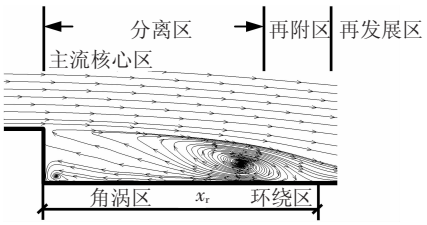


图 3　LES 所得的 BFS 时均流线及流场分区示意

由图 3 的流线图所得的再附长度约为 $x_r/h = 5.636$,该数值与 Uruba 等[2]的裂膜探针(split-film probe)测量结果 $x_r = 5.625\ h$ 接近,这表明 LES 结果具有较高的精度. 而 RANS 方法(SST k-ω 模型)所得的 $x_r/h = 6.288$(见图 4,图中坐标轴上的大刻度间距为 0.05 m 或 2.0h)则与实验结果吻合较差.

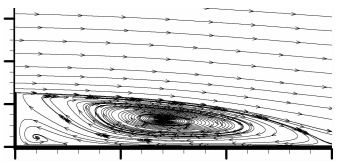


图 4　BFS 时均流线的 RANS 结果

图 5 给出了数值模拟所得的基准模型对称面底边上的平均风压系数 C_P 沿流向的分布及其与实验结果的比较.

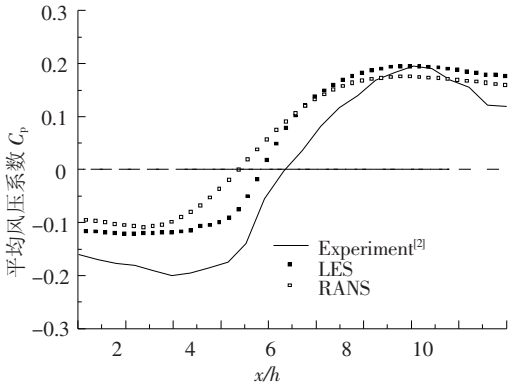


图 5　数值模拟和实验的平均风压系数 C_P 比较

由图 5 可知,数值模拟与实验所得的 C_P 沿流向的分布规律相同,且 LES 结果与实验的吻合程度较 RANS 结果稍好. 然而数值模拟对负压区 C_P 的预测要大于实验结果,这可能与数值模拟没有完全真实地模拟出实验的入流条件有关[14]. LES 所得的最大平均风压系数 $C_{Pmax} = 0.193$ 位于 $x_e = 0.2$ m 处,因此再附长度 x_r 可由 Príhoda 经验公式[2]得到,数值为 $x_r/h \approx 6.241$,与同样基于该式的实验结果[2] $x_r/h = 6.24$ 一致. 而 RANS 所

得的 x_r/h = 6.196，也与实验结果很接近，这表明数值模拟在确定 C_{Pmax} 的位置时具有较高的精度.

2.2 吸气控制模型

吸气控制模型的 C_Q 有：−0.002 ~ −0.01 以 −0.002为间距，−0.01 ~ −0.035 以 −0.005 为间距.

图 6 比较了采用不同湍流模型（DKEM 模型和 SST k-ω 模型）的两种数值模拟方法（LES 方法和 RANS 方法）所得的吸气控制模型对称面底边的 C_P 沿流向的分布. 由图可知，基于 RANS 方法的 SST k-ω 模型和基于 LES 方法的 DKEM 模型所预测的 C_{Pmax} 的位置和 C_P 沿流向的变化规律均吻合较好，而二者对 C_P 数值的预测偏差较大，当 C_Q 绝对值较大时，二者偏差越大.

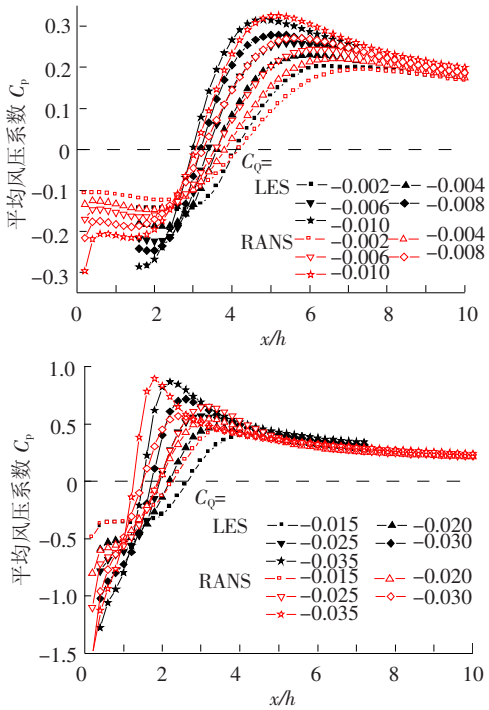


图 6 两种数值模拟方法所预测 C_P 的比较

上述两种数值方法对于底面附近（z = 1 mm 平面）的 V_x/U_e 沿流向的分布如图 7 所示. 由图可知，两种数值模拟方法所得的结果吻合较差，尤其是台阶附近的负风速区和 C_Q 绝对值较小的吸气控制模型.

依文献[2]所述，再附长度 x_r 可通过 BFS 对称面的下游底边的 C_{Pmax} 所在位置（简称方法 1）、底面附近的 V_x = 0 位置（简称方法 2）以及局部前流系数 γ_p = 0.5 位置（简称方法 3）等方法来确定. 其中 γ_p 定义为测点的局部前流（V_x > 0）累积时间 T_f 与总监测时间 T 的比值，该参数反映了湍流动态过程的间歇特性. 此外，还可以通过时均流线图来估算 x_r（简称方法 4，如图 3 和图 4）. 由于方法 1 ~ 3 均引入了经验公式或假定，因此基于方法 4 所得的 x_r/h 是最精确的.

图 8 给出了两种数值模拟方法所得的 x_r/h 与相应实验结果[2] 的比较. 由于基于方法 2 和方法 3 的 x_r/h 接近，故图中 LES 的结果仅给出了方法 3 的 x_r/h. 由图可知，不同 C_Q 的吸气控制均能较显著地减小 BFS 流动的 x_r/h，从而大大减小 BFS 的流动分离所产生的诸多负面影响. 吸气控制效果随 C_Q 绝对值的增加而逐渐显著，其中 C_Q = −0.035 时基于方法 4 的 x_r/h 约为基准模型的 40%.

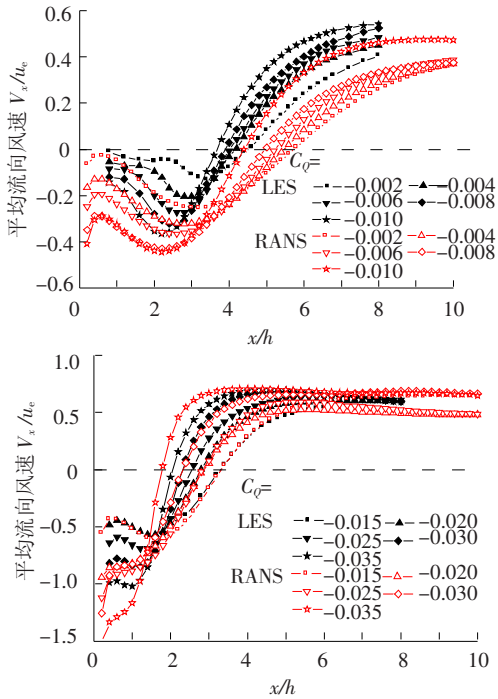


图 7 两种数值模拟方法所预测 V_x/U_e 的比较

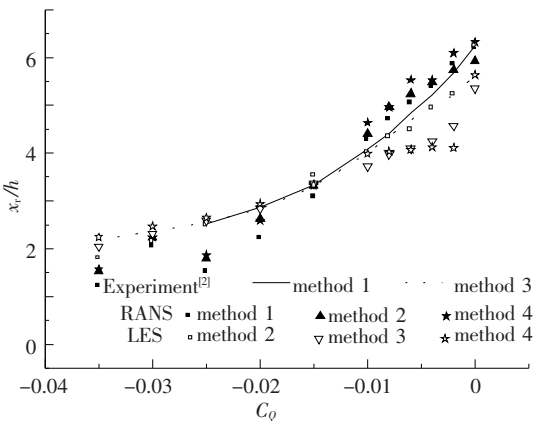


图 8 再附长度 x_r/h 的比较

由图 8 可知，通过与实验结果的比较，基于 LES 方法的 DKEM 模型的预测结果较精确；而基于 RANS 方法的 SST k-ω 模型所预测的 x_r/h 则在 C_Q 绝对值较小时稍大于实验结果，而在 C_Q 绝对值较大时小于实验结果，总体上而言精度较差. 这表明 RANS 方法在模拟大尺度涡控制的湍流输运和旋涡脱落显著的分离流动时具有无法克服的

困难,所得结果可信性较差,虽然其计算消耗远少于 LES 方法.

3　结　论

1) 比较了两种数值模拟方法和实验所得的基准模型及吸气控制模型的平均风压系数 C_P 沿流向的分布和再附长度 x_r/h, 综合分析并评价了两种数值方法及其求解策略对 BFS 的流动分离和旋涡控制效果的模拟能力. 结果表明,LES 方法在本文精细网格下能得到较精确的预测结果,而 RANS 方法在模拟大尺度涡控制的湍流输运和旋涡脱落显著的分离流动时具有无法克服的困难,所得结果可信性较差.

2)吸气能够吸除环绕区中的低速运动流体,抑制流动分离和旋涡脱落的发生,从而减小 x_r 和能量损失.

3) 不同流量系数 C_Q 的吸气控制均能较显著地减小 BFS 的 x_r/h,改善台阶后的流场结构. C_Q 绝对值越大时,吸气控制效果越显著.

参考文献:

[1] HUANG L, HUANG P G, LEBEAU R P. Numerical study of blowing and suction control mechanism on NACA0012 airfoil [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(5): 1005 – 1013.

[2] URUBA V, JONÁŠ P, MAZUR O. Control of a channel-flow behind a backward-facing step by suction/blowing [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(4): 665 – 672.

[3] SANO M, SUZUKI I, FUKAZAWA K. Control of turbulent channel flow over a backward-facing step by suction [J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2009, 4(1): 188 – 199.

[4] CHNG T L, RACHMAN A, TSAI H M, *et al.* Flow control of an airfoil via injection and suction [J]. Journal of Aircraft, 2009, 46 (1): 291 – 300.

[5] ZHENG Chaorong, ZHANG Yaochun. Numerical investigation on the drag reduction properties of a suction controlled high-rise building [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2010, 11(7): 477 – 487.

[6] 郑朝荣, 张耀春. 分段吹气高层建筑减阻性能的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(4): 385 – 392.

[7] DEJOAN A, LESCHZINER M A. Large eddy simulation of periodically perturbed separated flow over a backward-facing step [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25: 581 – 592.

[8] 郑朝荣. 高层建筑风荷载吸/吹气控制的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[9] MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(4): 305 – 316.

[10] FLUENT INC. Fluent 6.2 User's guide [M]. Lebanon: Fluent Inc, 2005, 11: 27 – 48.

[11] ARMALY B F, DURST F. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 127: 473 – 496.

[12] 刘沛清, 邓学蓥. 明渠中跌坎后突扩分离流数值研究[J]. 力学学报, 1998, 30(1): 9 – 19.

[13] ŠARIĆ S, JAKIRLIĆ S, TROPEA C. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: an example of flow separation control [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127: 879 – 887.

[14] AIDER J L, DANET A. Large-eddy simulation study of upstream boundary conditions influence upon a backward-facing step flow [J]. C R Mecanique, 2006, 334: 447 – 453.

(编辑　赵丽莹)