

多尺度表面织构流体润滑问题的快速求解方法

裴世源¹, 徐华¹, 马石磊¹, 狄茜²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 上海工程化学设计院有限公司, 200235, 上海)

摘要: 为解决传统数值方法在求解多尺度织构流体润滑问题时计算速度慢、效率低、规模受限等问题,提出了有限细胞算法. 针对简单的织构模型,通过对比有限元、流体力学和细胞算法的计算结果,验证了算法计算结果的准确性. 通过对比不同计算规模下有限元和细胞算法的数值试验结果,发现新算法的计算速度和计算规模都有显著提升. 对于大规模多尺度的织构模型,使用细胞算法进行求解,发现新算法的计算时间与网格数目成线性关系,表明细胞算法对于大规模织构问题具有良好的快速求解能力,并且为工程中类似的多尺度问题提供了具体的解决思路.

关键词: 有限细胞算法; 多尺度计算; 表面织构; 流体动压润滑

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0119-08

Multiscale Method for Modeling Surface Texture Effects in Hydrodynamic Lubrication Regime

PEI Shiyuan¹, XU Hua¹, MA Shilei¹, DI Xi²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. ShanghaiChem Engineering Incorporation, Shanghai 200235, China)

Abstract: Aiming at resolving slower computing rate and limited computing scale of the traditional numerical methods for multiscale surface texture hydrodynamic lubrication, the finite cell method (FCM) is proposed. The accurateness is verified by the comparisons among the conventional finite element method (FEM), computational fluid dynamic and FCM on simple texture model. The comparisons between FEM and FCM at different computational scale indicates that the computing rate is significantly improved and the computing scale is greatly enlarged. Several multiscale texture hydrodynamic models are solved with FCM, and the results reveal the linear relationship of computing time with mesh grids.

Keywords: finite cell method; multiscale computation; surface texture; hydrodynamic lubrication

为了改善摩擦副的润滑状况,传统方法往往对表面进行精加工处理,如抛光、研磨等. 在一定程度上,光洁表面可以提升摩擦副的润滑性能,但受材料性质和加工精度的限制,摩擦学性能的提升潜力有限^[1]. 近年来,一些研究指出^[2-3],摩擦副表面并非越光滑越好,在某些情况下,表面织构可以显著提高润滑表面之间的摩擦学性能,如在缸套活塞环中具有织构的表面相对于光滑表面平均可以降低 40% 的

摩擦力,在密封中织构表面可以降低 90% 的摩擦力. 20 世纪 60 年代,Hamilton 等人^[4]指出,单个突起的织构的作用相当于一个小的动压轴承,可以提高承载力,但该研究并未受到人们的广泛关注. 1996 年,Etsion^[2,5]及其领导的小组在该领域开始进行深入研究,并取得了突破性进展,随后织构技术得到了许多学者的广泛重视,并纷纷投入该技术理论^[6-10]和试验^[11-13]的研究. 目前,表面织构已成为摩擦领域

所关注的热点问题之一,但目前表面织构的设计只是建立在反复试验基础上的摸索^[2],而理论则无法很好地指导试验.这其中一个重要原因在于织构润滑问题的多尺度性,即实际零件润滑面的典型尺寸往往介于数十毫米至数米之间,而单个表面织构的典型尺寸为数十至数百微米.实际的润滑表面往往是由数百至数万个织构组成的,摩擦副的宏观工作状态是由大量织构的累积效应所决定的,而每个织构的微观边界条件又受到摩擦副宏观运动状态的限制.因此,织构表面的宏、微观是相互影响、相互关联的.目前,对于这种多尺度的织构问题,缺乏有效的求解工具,很多关于织构的理论研究往往是从阵列分布的织构中取出一个^[7-8]或数个单元^[6,10]进行分析,但这种处理方法忽略了宏、微观的相互影响,不能施加真实边界条件,也不能考虑织构之间的相互影响,从而导致计算无法真实反映实际的润滑状态^[14].如果使用传统方法对整个织构表面进行建模,为保证计算精度和表达几何细节,需要对每个织构进行密集的网格划分,这会导致超乎寻常的节点数目,对计算资源要求极为苛刻,甚至无法求解.虽然已有学者^[14]使用区域分解法成功地对大尺度的织构润滑问题进行了求解,但该方法没有从本质上改变多尺度求解时间过长、效率过低的问题.因此,开发适用于求解多尺度问题的高效计算方法,对促进织构的理论计算有着重要的现实意义.

为解决传统数值方法在多尺度问题上计算速度慢、效率低、规模受限等问题,本文开发了有限细胞算法,详细介绍了算法的理论基础与核心步骤,并通过对比有限元、计算流体力学(CFD)和细胞算法的数值试验结果,验证了算法的准确性与高效性.最后,针对大规模的织构模型,验证了细胞算法在多尺度问题上的实际求解能力.

1 基本方程

1.1 控制方程

在稳态、不可压缩、等温情况下,表面织构的流体动压润滑问题可用 Reynolds 方程进行描述,即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial(hU)}{\partial x} \quad (1)$$

式中: x, y 为直角坐标系,分别表示平行和垂直于流体流动的方向; p 为油膜压力; h 为油膜厚度; U 为摩擦副之间的相对滑动速度; η 为润滑油黏度.

为保证计算精度,引入归一化参数

$$X = \frac{x}{L}; \quad Y = \frac{y}{B}; \quad H = \frac{h}{h_0};$$

$$\alpha = \frac{L^2}{B^2}; \quad P = \frac{h_0^2}{6\eta UL} p \quad (2)$$

式中: L, B 分别为润滑域的长度和宽度; h_0 为名义油膜厚度.将式(2)代入式(1)得到 Reynolds 方程的归一化形式

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \alpha \frac{\partial}{\partial Y} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \frac{\partial H}{\partial X} \quad (3)$$

1.2 承载力计算

在给出油膜厚度分布及边界条件,并通过数值方法计算得到压力分布后,在整个润滑域对压力进行积分,即可得到系统的承载力

$$w = \iint_{\Omega} p \, dA \quad (4)$$

式中: A 为润滑域面积.

2 有限细胞法

本文提出的有限细胞法是求解大规模、多尺度、重复结构二阶偏微分方程的有效工具.该方法的基本思想是认为整体模型由有限种细胞组成,先对每种细胞进行普通的有限元离散,使用适当的凝聚过程得到细胞的当量刚度矩阵和载荷向量;其次将不同细胞组装成整体求解域,求解得到细胞的边界自由度值;最后通过回代过程得到细胞的内部压力值.以图1所示的圆形织构润滑问题为例,来说明算法的基本理论.假设实际润滑表面如图1a所示,以最小重复出现的单元为一种细胞,故细胞又可以分为具有织构的细胞和没有织构的细胞,如图1b所示,整个计算域由2种细胞组装而成.在实现方法方面,有限细胞算法可分为以下几个核心步骤(见图1).

2.1 凝聚细胞内部压力值

为得到细胞的刚度矩阵和载荷向量,使用常规有限元子结构方法对细胞内部的压力值进行静凝聚,即对2种细胞均使用 $m \times m$ 的节点进行网格划分,运用有限元法组装得到细胞的整体刚度矩阵和载荷向量.经过适当的节点编号,细胞的平衡方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_{bb} & \mathbf{k}_{bi} \\ \mathbf{k}_{ib} & \mathbf{k}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_b \\ \mathbf{p}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_b \\ \mathbf{f}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_i$ 表示细胞边界和细胞内部的压力向量; $\mathbf{f}_b, \mathbf{f}_i$ 表示细胞边界和细胞内部的载荷向量; $\mathbf{k}_{bb}$ 表示边界刚度矩阵; $\mathbf{k}_{ii}$ 表示细胞内部刚度矩阵; $\mathbf{k}_{ib}$ 和 $\mathbf{k}_{bi}$ 表示细胞内外交叉刚度矩阵.

使用式(6)和式(7)对细胞的内部压力值进行凝聚,细胞的等效刚度矩阵和等效载荷向量为

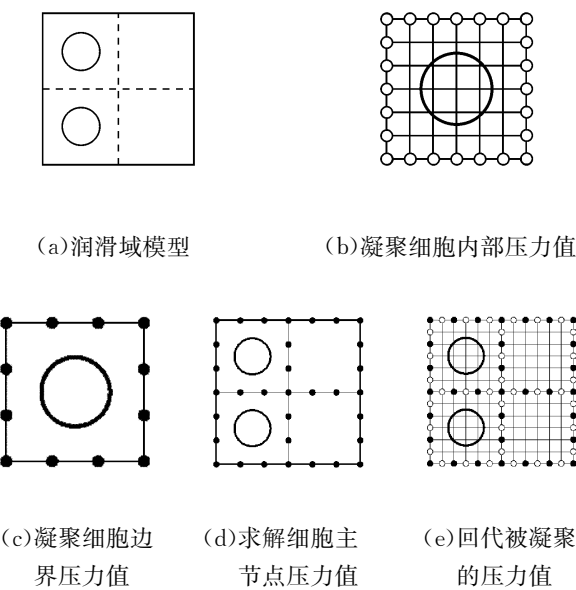


图 1 有限细胞算法核心步骤示意图

$$\bar{K} = k_{bb} - k_{bi}k_{ii}^{-1}k_{ib} \tag{6}$$

$$\bar{f} = f_b - k_{bi}k_{ii}^{-1}f_i \tag{7}$$

只有边界压力值的等效刚度矩阵、载荷向量的方程为

$$\bar{K}p_b = \bar{f} \tag{8}$$

即式(5)可由式(8)等效表示。

经过等效凝聚过程,待求的单个细胞的压力值从 m^2 个下降至 $4(m-1)$ 个,然而等效的细胞刚度矩阵是 $4(m-1) \times 4(m-1)$ 接近于满阵的大型矩阵。对于织构的润滑问题, m 的典型取值一般介于 60~150 之间^[14],若 m 取 100,则 K 是 396×396 接近于满阵的大型矩阵。大量算例表明,如果直接使用该矩阵进行后续计算,不但不能有效减少计算时间,反而有可能增加计算时间,这也是传统有限元子结构法无法求解多尺度问题的重要原因。

2.2 凝聚细胞边界压力值

为了进一步减小凝聚后刚度矩阵的大小,在细胞的 4 个边界上分别选取均布的 k 个主节点,如图 1c 所示。边界上的其余节点(即从节点)可由适当的形函数和主节点的压力值插值得到。使用拉格朗日多项式插值函数,从节点为

$$p_s = \sum_{j=1}^k \varphi_j p_{mj} \tag{9}$$

将式(9)用矩阵形式表示为

$$p_l = T p_m \tag{10}$$

式中: p_l 为从节点压力向量; p_m 为主节点的压力向量; φ_j 为插值形函数; T 表示插值矩阵。根据主节点

与从节点的分类,将式(10)代入式(8)得

$$\begin{bmatrix} k_{mm} & k_{ms} \\ k_{sm} & k_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ T \end{Bmatrix} p_m = \begin{bmatrix} f_m \\ f_s \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中: I 表示单元矩阵; f_m 表示细胞主节点载荷向量; f_s 表示细胞从节点载荷向量; k_{mm} 表示主节点刚度矩阵; k_{ss} 表示从节点刚度矩阵; k_{ms} 、 k_{sm} 表示主、从节点交叉刚度矩阵。于是

$$K_m p_m = f_m \tag{12}$$

$$K_m = k_{mm} + k_{ms} T \tag{13}$$

式中: K_m 表示细胞数的刚度矩阵。经过插值近似, K_m 的大小仅为 $4(k-1) \times 4(k-1)$ 。对于织构润滑问题,当细胞边界上保留 6 个主节点,即 k 取 6 时,细胞算法与有限元计算结果之间的误差已经低于 3%,此时 K_m 的大小仅为 20×20 。

2.3 求解细胞主节点压力值

由于整个润滑域由有织构和无织构细胞组装而成,如图 1d 所示,因此系统的总体刚度矩阵和载荷向量可由式(12)得到的 2 种等效细胞刚度矩阵和载荷向量组装得到

$$K p_m = f \tag{14}$$

$$K = \sum K_m; f = \sum f_m \tag{15}$$

式(15)表示总体刚度矩阵由每个细胞的等效刚度矩阵组装而成。施加边界条件后,求解式(14)得到全域细胞边界主节点的压力值。

2.4 回代被凝聚的压力值

在得到 p_m 后, p_s 可由式(10)回代得到,如图 1e 所示,由此便得到了细胞边界压力值,而细胞内部的压力向量

$$p_i = k_{ii}^{-1} f_i - k_{ii}^{-1} k_{ib} p_b \tag{16}$$

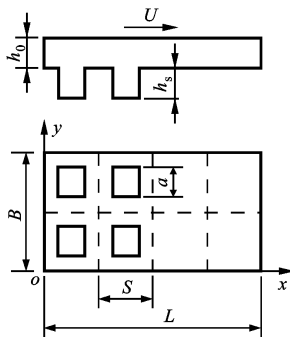
有限细胞算法是基于矩阵变换的一种算法,与控制方程无关,因此该算法不仅适用于求解多尺度的织构润滑问题,而且为求解工程中类似的多尺度问题(如粗糙表面的接触、复合材料力学分析等)提供了具体的求解工具。

3 有限细胞算法的有效性验证

为了验证有限细胞算法的有效性,本文分别采用有限元法、CFD 和有限细胞算法进行数值对比试验,所有计算均在个人台式机(CPU 2.8 GHz, RAM 4 GB)上完成,编程语言为 MATLAB,操作系统为 Windows 7(64 bit)。

采用图 2 所示的模型对有限细胞算法进行验证,

并设定以下参数: L 和 B 分别取10 mm和5 mm, h_0 为10 μm ;织构形状为正方形,边长 a 为1.25 mm,织构位于基本单元(图2中的虚线方格)的中心;基本单元为正方形, S 为2.5 mm, h_s 为10 μm ; η 为0.08 Pa·s, U 为5 m/s.采用相对压力求解,为减小计算量,应用模型的对称性,在 y 方向取一半进行建模.为便于对比计算,对于空化现象采用 Sommerfeld 边界条件.

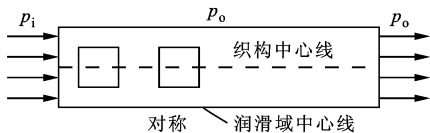


h_s : 织构深度; a : 正方形边长; S : 织构单元边长

图2 简单织构润滑模型的示意图

3.1 不同计算方法的设置

为了研究不同网格密度对计算结果的影响,采用四节点等参元对式(3)进行离散,每个基本单元采用等距 30×30 、 50×50 、 70×70 、 90×90 、 110×110 、 130×130 、 150×150 共7种不同的网格密度进行划分.边界条件如图3所示,在求解域的左、右和上边界施加强加边界条件($p=0$),在求解域的下边界施加自然边界条件,有限元所生成的线性代数方程组可采用直接解法求解.



p_i 、 p_o : 分别表示进口和出口压力

图3 计算模型及边界条件

分别使用 Ansys-Design、Modoler 和 Ansys-Mesh 软件进行建模和网格划分,使用 Fluent 进行 CFD 分析求解.在长度、宽度以及油膜厚度方向分别划分 320、80 和 10 个单元,计算域共 14.2 万个单元,整体网格如图4所示,油膜厚度方向的局部网格如图5所示.在 Fluent 中设置图3所示的边界条件, $p_i=0$ 为压力入口边界条件, $p_o=0$ 为压力出口边界条件,下边界设置为对称边界.将图2中的摩擦副上板设置为运动壁面边界条件,下板设置为固定

壁面边界条件.整个流体域设置为等温环境,层流.采用 Simple 求解器双精度求解,变量残差收敛精度为默认的 1×10^{-4} .

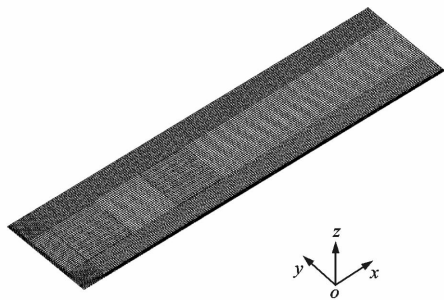


图4 Fluent 网格划分

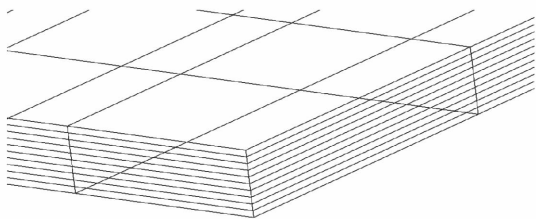


图5 Fluent 网格局部放大图

整个求解域可认为是由有织构和无织构细胞组成的,细胞内部采用四节点等参元进行离散.与有限元法相同,对于每种细胞,每个基本单元均采用7种不同的网格密度进行划分,对节点进行适当的编号,将细胞边界节点和内部节点分成相对独立的两组.使用有限元组装刚度矩阵的方法,得到如式(5)所示的平衡方程,并用式(6)和式(7)对式(5)进行凝聚,消去细胞内部的压力值,得到只有边界压力值的平衡方程式(8).

为研究细胞算法的精度,细胞边界分别保留等距的4~6个主节点,即从节点的压力值可以由3、4和5次多项式函数根据主节点的压力值插值得到.由式(9)可将主节点与从节点之间的关系改写成插值矩阵,即式(10).根据主节点与从节点的分类,可将式(8)通过矩阵分块改写成式(11),再用式(13)将式(11)中的第1个方程变换为式(12),从而得到了仅保留边界主节点的细胞当量刚度矩阵和载荷向量.

根据实际的求解域情况,将2种细胞的当量刚度矩阵和载荷向量用式(15)进行组装,得到求解域整体的平衡方程式(14),施加与有限元方法相同的边界条件后,对式(14)采用直接解法求解,得到主节点的压力值.对求解域中的每个细胞,用式(10)得到

从节点的压力值,由此便得到了所有细胞边界上的压力值.最后,通过式(16)回代得到细胞内部的压力值,至此求解域中的每个节点的压力值均已求得.

3.2 油膜压力的对比

图 6 和图 7 是由 CFD 方法和边界保留 6 个主节点的细胞算法(网格密度为 360×90)得到的油膜压力分布.可以看出,二者的压力分布形状非常吻合,在油膜运动方向压力呈波动分布,最高压力均为 2.12 MPa,最低压力均为 -1.51 MPa.



图 6 Fluent 计算的压力分布

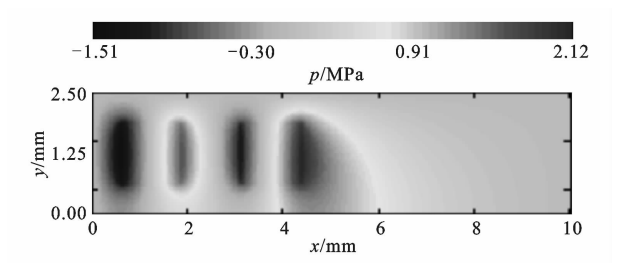


图 7 有限细胞算法计算的压力分布

图 8 和图 9 分别对比了在润滑域中心线和织构中心线处,由 3 种不同计算方法得到的压力分布.图中 4、5、6 节点分别表示在细胞边界上保留 4、5 和 6 个主节点的细胞算法.从图 8 中可以看出,由有限元、CFD 以及不同主节点数目的细胞算法得到的压力分布趋势是一致的,在润滑域中心线处,有限元和 CFD 之间的最大差异约为 5.59%,这可能是由于 Reynolds 方程的简化所造成的.有限元与保留 4、5 和 6 主节点的细胞算法之间的最大相对误差分别为 25.29%、15.50%和 2.69%,这是由于在细胞边界上引入的插值函数造成的,显然随着边界主节点数目的增多,计算精度也将随之提高.该结论同样也适用于织构中心线处,如图 9 所示,有限元和 CFD 之间的最大差异约为 4.06%,而有限元与 4、5、6 主节点的细胞算法之间的最大差异分别为 2.30%、3.24%和 0.39%.大量计算表明,对于织构的润滑问题,在细胞的边界上保留 6 个主节点就可使细胞

算法具有足够高的计算精度了,由此计算的压力与有限元之间的最大相对误差不超过 3%,保留更多的主节点虽然会使计算精度略有增加,但同时也增加了计算时间、内存需求和编程的复杂性.因此,在本文的后续章节中所涉及的细胞算法均在细胞边界上保留了 6 个主节点.

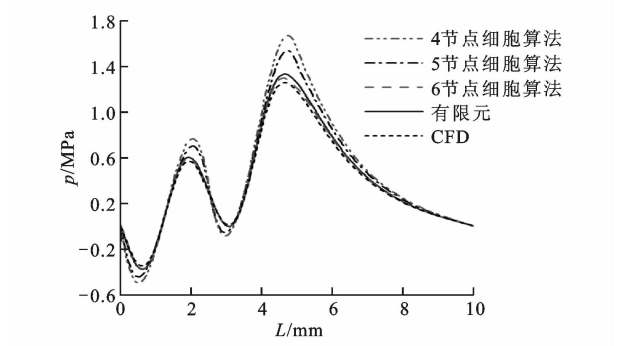


图 8 润滑域中心线压力分布对比

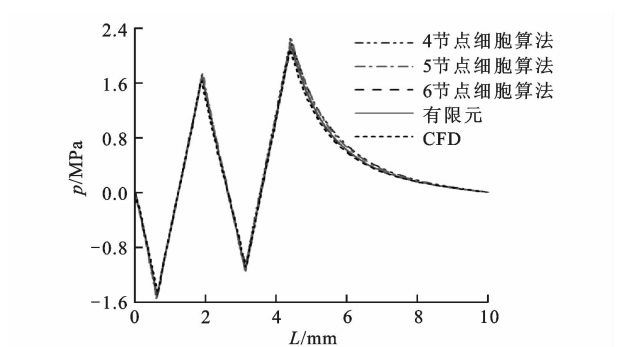


图 9 织构中心线压力分布对比

3.3 织构网格密度的影响

网格密度将直接影响数值方法的计算精度和计算效率,在不同网格密度下,有限细胞算法和有限元计算得到的承载力、计算时间和内存需求如表 1 所示.从表 1 中可以看出,随着织构网格密度的增加,细胞算法和有限元计算得到的承载力均呈逐渐下降趋势,但当网格密度高于 90×90 时,计算结果均趋于稳定,为了达到足够的计算精度,在后续分析中,将使用 90×90 的网格对基本单元进行网格划分.此外,在不同网格密度下,细胞算法与有限元的结果均吻合得较好,其误差均不超过 2%.在计算时间方面,随着网格密度的增加,细胞算法和有限元方法的计算时间均显著增长,但细胞算法的计算时间仅为相同网格密度下有限元方法的 13%左右.在内存需求方面,有限元方法的内存占用随网格密度的增加而显著增加,但细胞算法却保持不变.这是因为细胞算法所对应的线性代数的大小是由边界主节点的数

目所决定的,它不受细胞内部网格数目的影响.当结构的网格数目达到 130×130 时,相对于有限元方法,细胞算法的内存占用下降了 3 个数量级.通过对比以上数值试验结果,证明了细胞算法较有限元的计算速度显著提升,内存需求显著降低,同时也从统计量角度再次验证了细胞算法结果的准确性.

3.4 计算效率的验证

为进一步验证有限细胞算法的计算效率,采用有限元和有限细胞算法进行了数值对比试验.计算模型仍选用上节的算例,保持单个结构的特征尺寸,长宽比和润滑剂性质不变,润滑域长度分别取 10、20、30 和 40 mm.从表 2 中可以看出,在相同面积条件下,虽然细胞算法计算出的油膜承载力相对于有限元法存在一定的误差,但相对误差 δ 在 2.5% 以下,这在工程计算中是允许的.随着润滑面积的扩大,有限元的计算时间急剧增多,当网格数目达到 52 万个时,计算时间约为 53 min,并且此时有限元程序所占用的总内存已接近计算机物理内存容量,因此没有用此方法进行更大规模的计算.在相同的网格数目下,细胞算法的计算时间仅为 8 s,不足有限元方法的 1%,而其内存的占用也仅为有限元的 0.1% 左右.此外,从表 2 中也可以推断,如果进一步

扩大计算规模,在计算时间方面细胞算法的优势将更加明显.通过以上对比可以发现,相对于有限元,细胞算法的计算速度显著提升,而内存需求则显著降低.

4 大规模、多尺度问题的实例计算

4.1 模型描述

为考察有限细胞算法在大规模、多尺度表面结构流体润滑问题上的实际求解能力,采取如图 10 所示的模型.设定结构形状为正方形, a 为 1.25 mm, S 为 2.5 mm, h_s 为 $10\text{ }\mu\text{m}$, h_0 为 $10\text{ }\mu\text{m}$, η 为 $0.08\text{ Pa}\cdot\text{s}$, U 为 5 m/s, X 和 Y 方向的织构率分别为 0.7 和 0.8.润滑域的长宽比为 1,长度分别取 125、250、375、500 和 625 mm,而对应的织构数目分别为 1 250、5 000、11 250、20 000 和 31 250 个.

4.2 数值计算结果与分析

从图 11 中可以看出,在不同计算规模下,虽然每个结构的内部压力都有所波动,但相邻的织构相互影响、产生累积效应,总体的压力分布与阶梯轴承类似.

在不同润滑面积下,系统的承载力如表 3 所示.从表 3 中可以看出,适当的织构形貌可以产生可观

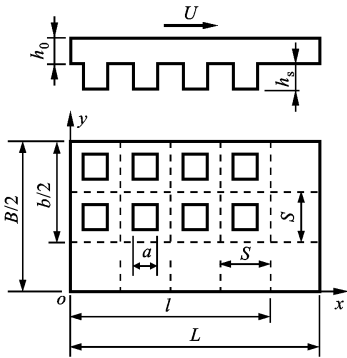
表 1 不同网格密度下细胞算法与有限元算法的结果比较

单织构 网格密度	承载力/N		$\delta/\%$	计算时间/s		时间比/%	内存需求*/kB		内存比/%
	细胞算法	有限元		细胞算法	有限元		细胞算法	有限元	
30×30	15.35	15.52	1.10	0.36	2.09	17.22	0.484	29.34	1.650
50×50	14.70	14.91	1.41	1.09	9.06	12.03	0.484	80.09	0.604
70×70	14.42	14.65	1.57	3.97	24.12	16.46	0.484	155.87	0.311
90×90	14.26	14.50	1.68	7.11	51.97	13.68	0.484	256.6	0.189
110×110	14.16	14.41	1.75	12.2	93.34	13.07	0.484	382.43	0.127
130×130	14.09	14.35	1.81	19.73	153.67	12.84	0.484	533.21	0.091
150×150	14.04	14.30	1.82	28.72	234.23	12.26	0.484	708.99	0.068

*:线性代数方程系数矩阵占用空间的大小.

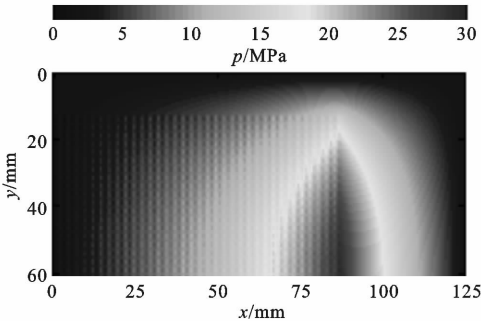
表 2 不同润滑面积下细胞算法与有限元算法的结果比较

细胞数	承载力/N		$\delta/\%$	计算时间/s		时间比/%	内存需求/kB		内存比/%
	细胞算法	有限元		细胞算法	有限元		细胞算法	有限元	
4	14.26	14.50	1.68	7.11	51.97	13.68	0.484	256.6	0.189
16	108.80	111.21	2.22	7.25	407.20	1.78	1.523	1 019.0	0.149
36	363.63	372.09	2.33	7.80	1 353.00	0.58	3.125	2 289.0	0.137
64	858.94	879.26	2.37	8.59	3 203.33	0.27	5.289	4 064.0	0.130

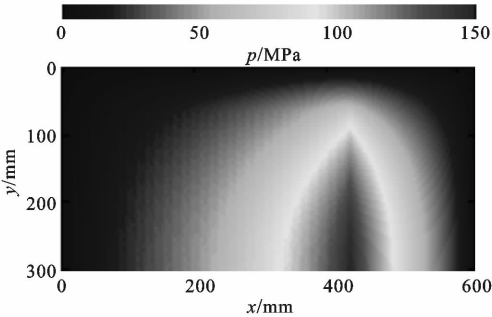


l : 织构区长度; b : 织构区宽度

图 10 多尺度计算模型示意图



(a) 织构数 1 250(节点数 0.1 亿)



(b) 织构数 31 250(节点数 2.53 亿)

图 11 不同织构数目的压力分布云图

表 3 大规模实例的计算结果

网格数/ 10^6	面积/ m^2	承载力/ MN
10	0.015 6	0.13
40	0.062 5	1.01
91	0.140 6	3.41
182	0.250 0	8.09
253	0.390 6	15.80

的承载力,在本文模型的假设条件下,当润滑面积达到 0.39 m^2 时,可以产生约 15.8 MN 的承载力.此外,传统数值方法,如有限元和有限差分法,计算时

间 t 与网格数目 N_p 往往成指数关系,随着网格数目的增多计算时间急剧增长,这也是传统方法无法进行多尺度计算的主要原因之一.从图 12 中可以看到,细胞算法的计算时间与网格数目成线性关系,基于这种优良特性,当网格数目达到 2.53 亿时,有限细胞算法的求解时间仅约为 14 min .通过以上数值试验可以发现:细胞算法在求解多尺度织构润滑问题时显示出良好的特性,在计算速度、规模和效率方面显示出巨大优势.

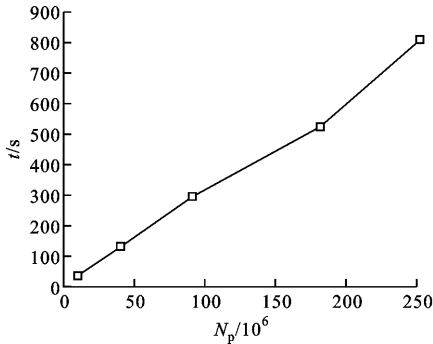


图 12 细胞算法的计算时间随网格数目的变化

5 结 论

(1)针对多尺度的表面织构流体润滑问题,本文提出了有限细胞算法.针对简单的织构模型,通过对比有限元、CFD 和细胞算法的压力分布,验证了新算法计算结果的准确性.

(2)通过对比不同计算规模下有限元和细胞算法的数值试验结果,发现新算法的计算速度显著提高,计算规模显著扩大.当织构数目达到 64 个、网格数目达到 52 万时,细胞算法计算时间不足有限元方法的 1%,而内存占用仅为有限元方法的 0.1% 左右.

(3)对采用细胞算法大规模的多尺度织构模型进行了求解,结果显示,新算法具有计算时间与网格数目成线性关系的优良特性,对多尺度问题具有良好的快速求解能力,表明新算法在求解大规模、多尺度、重复性结构的偏微分方程方面具有现有数值方法无可比拟的优点.

参考文献:

[1] 万轶,熊党生.激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J].摩擦学学报,2006,26(6):603-607.
WAN Yi, XIONG Dangsheng. Study of laser surface texturing for improving tribological properties [J]. Tribology, 2006,26(6): 603-607.

- [2] ETSION I. State of the art in laser surface texturing [J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127,: 248-253.
- [3] 王晓雷,王静秋,韩文非. 边界润滑条件下表面微细结构减摩特性的研究 [J]. *润滑与密封*, 2007, 12(12): 36-39.
WANG Xiaolei, WANG Jingqiu, HAN Wenfei. Effect of surface texture on friction reduction under boundary lubrication [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 12(12): 36-39.
- [4] HAMILTON D, WALOWIT J, ALLEN C. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. *J Basic Eng*, 1966, 88(1): 177-185.
- [5] ETSION I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(4): 733-737.
- [6] BRIZMER V, KLIGERMAN Y, ETSION I. A laser surface textured parallel thrust bearing [J]. *Tribology Transactions*, 2003, 46(3): 397-403.
- [7] SAHLIN F, SERGEI G B, ALMQVIST T, et al. Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication [J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(1): 96-102.
- [8] 彭旭东,杜东波,李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(4): 367-371.
PENG Xudong, DU Dongbo, LI Jiyun. Effect of different section profile micro-pores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal [J]. *Tribology*, 2006, 26(4): 367-371.
- [9] NANBU T, REN N, YASUDA Y, et al. Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication; effects of texture bottom shape and surface relative motion [J]. *Tribology Letters*, 2008, 29(3): 241-252.
- [10] CUPILLARD S, MICHEL C J, GLAVATSKIH S. Pressure buildup mechanism in a textured inlet of a hydrodynamic contact [J]. *Journal of Tribology*, 2008, 130(2): 1-10.
- [11] WANG X, KATO K, ADACHI K, et al. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed [J]. *Tribology International*, 2001, 34(10): 703-711.
- [12] SCHRECK S, ZUM K G. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247(1): 616-622.
- [13] COSTA H, HUTCHINGS I. Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1175-1180.
- [14] 刘红彬,孟永钢. 基于区域分解法的纹理表面流体润滑分析: 纹理分布模式的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(6): 555-561.
LIU Hongbin, MENG Yonggang. Hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces with the domain decomposition; method effect of texture distribution patterns [J]. *Tribology*, 2007, 27(6): 555-561.

(编辑 管咏梅)