学校编码：10384　　分类号__密级__
学号：25320061152711　　　　　　　　　　UDC___

厦门大学

硕士学位论文

非均质材料界面的间断伽辽金无网格模拟及梁板结构的大变形高效无网格分析

On Discontinuous Galerkin Meshfree Modeling of Heterogeneous Material Interfaces and Efficient Large Deformation Meshfree Analysis of Beams and Plates

孙　越

指导教师姓名：王东东
专 业 名 称：结构工程
论文提交日期：2009 年 5 月
论文答辩时间：2009 年 6 月
学位授予日期：

答辩委员会主席：__________
评阅人：__________________

2009 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行)》。

另外,该学位论文为(　　　　　　　　　　　　　　　)课题(组）的研究成果，获得（　　　　　　　　）课题（组）经费或实验室的资助，在（　　　　　　　）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）:

年　　月　　日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（　　）1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于　　年　　月　　日解密，解密后适用上述授权。

（ √ ）2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年　　月　　日

摘　要

近年来基于移动最小二乘或再生核近似伽辽金无网格法得到了日益广泛的发展和应用。然而移动最小二乘或再生核近似全域光滑的形函数不能很好地模拟材料界面上的梯度跳跃，在解决材料界面问题比如复合材料问题时会导致材料界面附近的数值振荡，严重影响了求解精度。本文将间断伽辽金法和无网格法相结合来处理复合材料的材料界面问题。在这种方法中，整个求解域根据材料性质的变化被分成若干片或者称为若干子域，在每个子域内采用标准且完全独立的无网格近似，各子域的形函数是用该子域内的节点分别建立的。然后用间断伽辽金法将不同子域组合起来，其中没有引入附加的未知量比如拉格朗日乘子或者特殊的界面函数。在间断伽辽金列式中材料界面上场变量的连续性通过平均边界流量（面力）施加于弱形式中。这种方法利用相邻子域的边界很好地模拟了场变量的梯度在材料界面上的跳跃。本文通过分析几个典型势问题和弹性力学问题验证了该方法的有效性与精确性。

本文的另一项工作是利用无网格法大变形分析的优点构造了大变形梁、板结构的稳定节点积分高效无网格法。研究对象包括完全几何非线性梁问题及在实际分析中常用到的小转角大挠度梁板问题。通过对梁板结构平衡方程等效积分弱形式的线性化得到增量平衡方程，然后采用建立在初始构形上的拉格朗日无网格形函数和稳定节点积分方法进行数值离散。稳定节点积分方法是通过建立拉格朗日节点光滑曲率来实现的。为了避免薄膜和剪切自锁问题，在对弱形式进行积分时采用点积分列式，即对薄膜和剪切刚度采用直接节点积分，对弯曲刚度采取拉格朗日光滑节点曲率进行积分。这样不仅有效消除了薄膜和剪切自锁，而且可在保证稳定的前提下提高了计算效率。文中详细给出了梁板结构的非线性计算流程。最后通过几个典型大变形梁板算例验证了所提方法的精度。

关键词：无网格法；间断伽辽金法；非均质材料；几何非线性；梁板结构

Abstract

Meshfree methods have experienced substantial developments and applications in recent years. However, using this method could cause severe solution oscillation when dealing with the problems involving material interfaces such as composite materials. The reason lies behind this undesired result is that the smooth MLS/RK meshfree shape functions with overlapping local supports can not properly model the gradient jump conditions across the material interfaces. In this thesis a discontinuous Galerkin meshfree formulation is proposed to solve composite material problems where the material interfaces have to be appropriately modeled. In the present approach the problem domain is partitioned into patches or sub-domains and each patch holds the same material properties. The discretized meshfree particles within in a patch are classified as one particle group. Various patches occupied by different particle groups are then linked using the discontinuous Galerkin method where a boundary flux is constructed based on the flux information from the adjacent patches. There are no additional unknowns like Lagrange multipliers and special interface functions as well in this method. The gradient jump conditions across the material interfaces are accurately captured by the boundary of the neighboring particle groups. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by several typical numerical examples of potential and elasticity problems.

Another work within the scope of this thesis is to fully employ the advantages of meshfree large deformation analysis and develop an efficient Galerkin meshfree formulation for geometric nonlinear analysis of beams and plates. The proposed total Lagrangian meshfree formulation is for the problems of fully geometric nonlinear beams and the large deflection beams and plates under the small rotation assumption that is reasonable for most practical analysis. The incremental equilibrium equation is obtained by performing the consistent linearization of variational equation. The meshfree shape function is constructed purely based on the initial configuration. Through the Lagrangian curvature smoothing operation the stabilized conforming nodal integration is systematically implemented. To avoid the membrane and shear locking, the weak form is integrated nodally where the shear and membrane stiffness matrices are computed via the direct nodal integration and the bending stiffness matrix is evaluated with the smoothed nodal curvature. Both stability and efficiency are gained in the proposed nonlinear meshfree formulation. The flowchart for

nonlinear meshfree analysis of beams and plates are presented in details. The effectiveness of the present method is validated by several benchmark beam and plate examples.

Key Words: meshfree method; discontinuous Galerkin method; heterogeneous material; geometric nonlinearity; beams and plates

目　录

Table of Contents

第一章 绪论

1.1 引言

科学发展到今天，人们已可以通过提炼力学和物理方程来解决一些实际问题，但是能够采用解析方法解决的问题仍然非常有限。在土木工程领域中，就有很多问题还无法用解析方法进行求解，例如复杂结构的非线性大变形应力变形问题。这就驱使人们研究新的数值方法来解决这些问题。上世纪中叶，出现了有限单元法(Finite Element Method)，随后伴随电子计算机科学技术的快速发展，有限元法作为工程分析的有效方法，在理论和方法研究，计算机程序开发以及应用领域的开拓等方面均取得了很大的发展，目前有限元已经成为理论基础完善、应用最为广泛的数值方法。

尽管有限元已经取得了巨大的成功，但对一些重要问题还存在困难，比如在大变形分析问题中网格畸变即当单元被很大程度的扭曲或挤压使得有限元求解精度出现大幅下降；在沿复杂及不确定路径增长的裂缝问题中，由于边界拓扑关系的变化使得有限元法处理起来仍然相当困难。究其原因，这主要是由于有限元依赖于有序的单元连接。这些困难的传统解决方法是在模拟过程中不断重新划分网格。尽管目前已经有了一些复杂结构重新划分网格的方法，但大型三维复杂结构网格剖分至今仍是一个还没有很好解决的研究课题。另外对于薄梁板等问题，如何构造 C1 类型的单元仍然是个难题。为了有效解决这些问题，从 20 世纪 70 年代开始，特别是最近十多年，无网格法(Meshfree Methods)受到了广泛重视并且得到了很大发展，先后出现了各种类型的无网格法，它们的一个共同的特点就是近似函数不依赖节点之间的有序拓扑连接而通过节点信息直接建立起来的，可以构造任意高阶的整体协调位移场和应力场，对于用传统有限元法求解较困难的问题，有着独到的优势,现已成为一个非常活跃的研究方向[1][2][3][4]。

1.2 无网格法研究的历史及现状

1977 年 Lucy 和 Gingold 等人[5][6]提出了光滑粒子法（SPH）。这种方法是一

种不需要网格的纯拉格朗日方法。此后 Monaghan 等人对这种方法进行了深入研究[7][8]，将其定义为核近似方法。1992 年，Nayroles 等人[9]将移动最小二乘近似（MLS）引入伽辽金法中，提出了扩散单元法（DEM）。之后 Belytschko 等人[10]改进了 DEM 法，提出了无单元伽辽金法（EFG），掀起了无网格法的研究热潮。Onate 等人[12][13]利用移动最小二乘法来构造近似函数，并采用配点格式进行离散，提出了有限点法（FPM）。1995 年，Liu 等人[14][15]基于伽辽金法提出了一种再生核质点法（RKPM），之后 Zhou 等人[16]用这种方法研究梁的振动。Oden 和 Duarte[17][18]利用移动最小二乘法建立单元分解函数，再通过伽辽金法建立离散格式，提出了 Hp 云团法(Hp Clouds)，Liszka 等人[19]改用配点格式，提出了 Hp 无网格云团法（Hp Meshless Clouds）。Atluri 等人[20][21]提出了局部边界积分方程(LBIE)和无网格局部法(MLPG)[22][23]。Long, Xiong[24]和 Chen[25]等人也对这两种方法进行了深入研究。Sulsky 等人[26][27]在质点网格法（PIC）的基础上提出了物质点法(MPM)。2001 年，Liu[28]提出点插值法（PIM）。随后，Wang 和 Liu[29]在径向基函数概念基础上，提出径向插值无网格法（RPIM）。此后，Chen[30]和 Gao[31]等人对边界点和边界元无网格法进行了深入研究。

目前已提出了十余种各具特色的无网格方法，其主要区别在于采用不同的离散微分方程方法（如伽辽金法、配点法、最小二乘法、彼得洛夫-伽辽金法等）和建立不同的近似函数的方法（移动最小二乘近似、核近似、重构核质点近似、单位分解法、hp 云团法、径向基函数法、点插值法等）。本文研究的无网格法指的是 EFG 和 RKPM，这类方法具有稳定性好、精度高的特点。当采用多项式基函数时，EFG 和 RKPM 是等价的。目前，无网格法的研究还处于初级阶段，在很多方面还不成熟，但由于它不需要网格，所以在很多领域具有广阔的发展前景[4]。

1.3 本文的选题背景

前面介绍的一些移动最小二乘或再生核无网格法具有较大优势，近年来得到了广泛的应用，取得了良好的效果。但是，对于包含材料分界面比如复合材料问题，应用这种方法会导致在材料界面附近场函数梯度的振荡。导致这种结果的原因是移动最小二乘或再生核无网格法光滑的形函数无法很好模拟材料界面上场