**华侨大学研究生学位论文开题报告**

**学生姓名 徐洋涛**

**指导教师 许 斌 教授**

**合作教师 吴俊超 讲师**

**学 院 土木工程**

**年 级 2022级**

**学科专业 土木水利**

**研究方向 土木工程**

**学生类别 全日制专业学位硕士**

**开题日期 2023年12月15日**

**二〇一三年九月制表**

**填表说明**

1.正常开题通过的学生，填写表1-1、1-2；开题复审会通过的学生，填写表1-1、1-2，表2-1、2-2；重新开题的学生，填写表1-1、1-2，表2-1、2-2（有复审需填写），表3-1、3-2。

2.“学科专业”填二级学科名称，如“机械制造及其自动化”；“学生类别”填“学历博士、学历硕士”，以下情况则须填“高校教师、同等学力、全日制专业学位硕士、全日制工程硕士、在职专业学位硕士、在职工程硕士”。

3.硕士学位论文开题报告评审专家须具有硕士生导师资格，博士学位论文开题报告评审专家须具有正高职称（多数应具有博士生导师资格）。

4.开题结束后，培养单位需将所有通过开题的《华侨大学研究生学位论文开题报告》报送研究生院审核备案，经审核后的《华侨大学研究生学位论文开题报告》纸质版由培养单位汇总存档，电子版（word版本）除签名手写及盖章部分不能上传的其它内容都须上传至研究生管理信息系统。

5.开题报告的撰写主要包括以下内容：

①论文选题的依据（包括选题的来源、意义以及国内外的研究动态）；

②论文研究的目标、方案（包括研究方法、技术路线、研究内容及拟解决的关键问题）；

③论文的研究特色及创新之处；

④论文达到的预期目标与预期研究成果；

⑤论文的研究进展和进度安排；

⑥主要参考文献。

**表1-1：研究生学位论文开题报告（首次开题）**

|  |  |
| --- | --- |
| 拟撰写学位论文的题目 | 内禀最优约束比的梁板壳结构有限元无网格混合分析方法 |
| 支持学位论文研究的科研项目 | 福建省自然科学基金面上项目： 薄壳结构变分一致免自锁高效无网格法 |
| 开题报告内容**（博士不少于5000字，硕士不少于3000字）**：   1. **论文选题的依据：**   梁、板、壳是建筑结构中主要的基本构件，这类构件主要承受竖向荷载，变形以受弯为主。在传统的Kirchhoff假设下，梁板壳构件忽略由横向剪切应力引起的剪切变形。然而，当构件的跨高比小于5时，受弯作用下梁内轴向剪切力所产生的变形将引起梁的附加挠度，使变形后的平截面不与轴线垂直，不符合平截面假定。此时，Kirchhoff假设已经不再适用，需要采用考虑剪切变形的Mindlin假设。数值仿真方法是一种简单、快速、低成本的结构受力分析方法，是结构设计中重要的理论依据，而有限元法[1]是目前最成熟、应用最广泛的数值仿真分析方法。在Mindlin假设下，传统有限元法中具有位移和转角两类自由度，能捕捉由结构的剪切变形，适用性高于Kirchhoff假设。然而，由于位移自由度与转角自由度所对应刚度的量纲并不相同，当处理薄梁板壳时，不同自由度所对应量纲的量级差将变大，从而导致大量纲项所对应的自由度受到约束。过多的自由度被约束时，将引起有限元分析出现严重的自锁现象[2]，包括剪切自锁和薄膜自锁等。自锁问题将引起有限元分析精度严重下降，严重阻碍有限元法在梁板壳问题中的发展。  以剪切自锁为例，消除自锁的途径通常可分为减少剪切应力自由度或增加应变自由度两种途径进行。减小剪切应力自由度最直接的方式为采用缩减积分法[3]进行数值积分，Ruqing等人[4]将该方法运用于近场动力学Mindlin板分析中以消除自锁现象。但是低阶高斯积分将伴随着数值积分精度不足，引起数值计算结果振荡和精度下降。Hughes和Winget针对低阶高斯积分精度不足的问题提出了选择积分方法[5]，该方法更精确地选择需要使用全积分的应变分量，从而提高非线性问题的求解精度。另一类减少剪切应力自由度的方法是以假定应变理论[6]为基础，将积分域内高阶近似的剪切应力投影至低阶空间，以减少积分域内的自由度数量。Sze和Yao[7]提出的假定自然应变法，该方法采用混合应力技术减少剪切应力自由度从而缓解自锁现象。Wang和Chen[8]、Huang和Wei[9]基于假定应变技术提出了Mindlin板伽辽金无网格分析的稳定节点积分法，该方法利用光滑梯度技术构造单点积分点处的光滑梯度值，在保证计算精度的同时降低剪切应力自由度。Hu等人[10]将B-bar假定应变法引入壳体结构等几何分析方法以消除剪切自锁。Gallistl和Schedensack[11]提出壳结构的Taylor-Hood单元，该方法采用全域连续性的形函数离散梯度，通过积分域之间共享自由度降低受到约束的自由度数量。  另一方面，通过增加应变自由度而避免薄膜自锁的方法主要以积分域为基础，在积分单元内增加额外的高阶形函数及应变自由度。Echter和Bischoff [12]通过应变差分离技术将全域的应变自由度离散为非连续的局部自由度，从而增加应变自由度数量缓解剪切自锁。Kikis等人[13]针对Mindlin壳体等几何分析分析提出了自适应调整位移与转角近似阶次的方法，从而调整剪切应力自由度与应变自由度比例，消除自锁现象。Zou等人[14]提出了一种基于Bézier双重基函数的等几何Reissner-Mindlin壳体单元，该方法通过增加基函数所对应的额外自由度以减小剪切自锁影响。Hai等人[15]采用两层次嵌套单元，将位移与转角采用不同大小的单元进行离散，从而导致全域剪切自由度与应变自由度不同，缓解剪切自锁现象。  从数学泛函角度出发，剪切自锁现象是由于离散的剪切应力和应变无法满足Ladyzhenskaya-Babuška-Brezzi (LBB)稳定性条件所导致。采用高阶的形函数可以在一定程度上缓解剪切自锁现象，但并不能彻底解决该问题。目前的免剪切自锁技术主要以积分单元为基础建立，而剪切应力与应变自由度的数量不仅涉及剪切自锁与否，还与其近似精度相关。传统有限元法基于单元建立形函数的近似方法难以在确保插值精度的同时消除剪切自锁现象。无网格法是一类不依赖单元建立形函数方法的统称[16-18]，该类方法可通过节点的位置信息构建全域高阶连续光滑的形函数，适用于薄板壳等高阶问题。在伽辽金弱形式求解过程中，基于移动最小二乘近似的无单元伽辽金法[19]和基于再生核近似的再生核质点法[20]是最常见的两种无网格近似方法。当再生核近似采用多项式基函数时，移动最小二乘近似与再生核近似具有等价关系。再生核无网格近似通过满足一致性条件构造形函数，而一致性条件则控制伽辽金法求解误差[21]。基于节点离散的无网格近似方法在节点布置方面十分便利，这也使其适用于局部加密问题，减轻高维问题的网格划分问题，缓解网格畸变引起的精度下降问题。  如上所述，目前的消除自锁方法还存在诸多未解决的问题，这些问题成为发展梁板壳结构数值分析方法的瓶颈。本论文将系统研究梁板壳结构有限元分析自锁问题，探究约束自由度与全域自由度比值和LBB稳定性条件之间的关系，从而确定剪切自锁、薄膜自锁和泊松自锁的最优约束比。同时，建立梁板壳结构有限元无网格混合离散分析方法，在传统有限元分析的基础上，采用无网格法近似约束自由度所对应的变量，如剪切应力。利用无网格节点布置的便利性和无网格形函数的全域连续性，在保证计算精度的情况下调整自锁约束比例直至最优，从而消除自锁现象。从而建立内禀最优约束比的梁板壳结构有限元无网格混合分析方法，为实际梁板壳结构提供可靠精确的数值分析工具。   1. **研究特色及创新之处**   本论文的研究特色及创新之处可分为以下两点：   1. 梁板壳混合离散分析中消除自锁问题的最优约束比例。 2. 自锁约束比例可控的有限元无网格混合离散分析方法。 3. **研究内容和方法**   本文将针对梁板壳结构自锁问题，研究约束自由度与全域自由度数量比与LBB稳定性条件影响机理，从而确定最优约束比。并利用最优约束比和无网格法的离散便利性，发展内禀最优约束比的梁板壳结构有限元无网格混合分析方法。具体内容如下：  1. 探究Mindlin假设下梁板壳问题中剪切应力、薄膜应力、静水压力与全域应变离散自由度数量与LBB稳定性条件之间的联系，确定满足LBB稳定性条件时约束应力和全域应变自由度数量比，从而建立考虑自锁现象的梁板壳问题有限元无网格法混合离散分析的误差估计方法。  2. 建立梁板壳结构有限元无网格混合离散理论框架，并研究可任意调整自由度数量的无网格法节点布置方案，分析无网格形函数影响域对计算精度的影响，从而优化形函数影响域大小，发展可任意调整约束自由度比例的有限元无网格混合离散分析方法。  3. 将梁板壳结构最优约束比例引入有限元无网格混合离散分析方法中，从而建立内禀最优约束比的免自锁有限元无网格混合离散分析方法，并通过经典算例和实际工程算例系统分析该方法的精度和有效性。   1. **论文的预期成果**   本论文的预期成果如下：  1. 建立梁板壳结构剪切自锁和薄膜自锁与LBB稳定性条件的关系，确定剪切自锁和薄膜自锁的最优约束比例。  2. 建立内禀最优约束比的有限元无网格混合离散分析方法，在保证计算精度的同时消除自锁现象。   1. **论文的研究进展和进度安排**  |  |  |  | | --- | --- | --- | | 时间 | 研究内容 | 进度情况 | | 2023.7-2023.12 | 验证LBB稳定性条件与自由度比例之间的关系 | ● | | 2024.1-2024.2 | 进行Timoshenko假设下梁结构、曲梁结构的有限元无网格混合离散分析 | ○ | | 2024.3-2024.9 | 进行Mindlin假设下板壳结构的有限元无网格混合离散分析 |  | | 2024.10-2024.12 | 整理成果并完成论文初稿撰写 |  | | 2025.1-2025.3 | 进一步修改完善论文，形成并提交论文初稿 |  | | ●已完成○正在进行 | | |  1. **参考文献** 2. Hughes T. Dover Publications, 2000. The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. 2000Mineola, New York. 3. Arnold D N, Brezzi F. Locking-free finite element methods for shells. *Mathematics of Computation*, 1997, 66(217): 1-15. 4. Zienkiewicz O C, Taylor R L, and Too J M. Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1971,3(2): 275-290. 5. Ruqing B, Guan L, Hakim N, et al. Locking alleviation technique for the peridynamic Reissner-Mindlin plate model: the developed reduced integration method. *Archive of Applied Mechanics*,2022,93(3):1167-1188. 6. Hughes T, Winget J. Finite Elements Reduction and Associated Numerical Integration Schemes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1980,15(2):299-315. 7. Pian T H H, Sumihara K. Rational approach for assumed stress finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1984, 20(9): 1685-1695. 8. Sze K Y, Yao L Q. A hybrid stress ANS solid-shell element and its generalization for smart structure modelling. Part I-solid-shell element formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 48(4): 545-564. 9. Wang D, Chen J S. Locking-free stabilized conforming nodal integration for meshfree Mindlin-Reissner plate formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(12-14): 1065-1083. 10. Huang T-H, Wei Y-L. A stabilized quasi and bending consistent meshfree Galerkin formulation for Reissner-Mindlin plates. *Computational Mechanics*, 2022: 1-29. 11. Hu Q, Xia Y, Natarajan S, Zilian A, Hu P, Bordas S P A. Isogeometric analysis of thin Reissner-Mindlin shells: locking phenomena and B-bar method. *Computational Mechanics*, 2020. 12. Gallistl D, Schedensack M. Taylor--Hood Discretization of the Reissner-Mindlin Plate. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 2021: 1195-1217. 13. Echter R, Bischoff M. Numerical efficiency, locking and unlocking of NURBS finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, 199(5): 374-382. 14. Kikis G, Dornisch W, Klinkel S. Adjusted approximation spaces for the treatment of transverse shear locking in isogeometric Reissner–Mindlin shell analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*,2019,354850-870. 15. Zou Z, Scott M, Miao D, et al. An isogeometric Reissner–Mindlin shell element based on Bézier dual basis functions: Overcoming locking and improved coarse mesh accuracy. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*,2020, 370. 16. Hai T O, Van N V D. A New Approach to Reduce Transverse Shear Locking of Reissner–Mindlin Plate Based on The Cell-Centered Finite Element Method. *International Journal of Computational Methods*,2022,19. 17. 张雄, 刘岩. 无网格法.清华大学出版社, 2004. 18. Chen J S, Hillman M, Chi S W. Meshfree methods: Progress made after 20 Years. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, 143(4): 04017001. 19. Wang L, Hu M, Zhong Z, et al. Stabilized Lagrange Interpolation Collocation Method: A meshfree method incorporating the advantages of finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2023, 115780. 20. Belytschko T, Lu Y Y, Gu L. Element‐free Galerkin methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1994, 37(2): 229-256. 21. Liu W K, Jun S, Zhang Y F. Reproducing kernel particle methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1995, 20(8-9): 1081-1106. 22. Wu J, Wang D. An accuracy analysis of Galerkin meshfree methods accounting for numerical integration. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 375: 113631. | |
| 指导教师意见：  指导教师签字：  年 月 日 | |