

附件 2

## 2022 年湖南省自然科学奖提名公示

**提名单位：**益阳市科学技术局

**项目名称：**结构拓扑优化 ICM 方法及建筑创构设计关键技术研究

**主要完成人：**彭细荣，隋允康

**主要完成单位：**湖南城市学院

**拟提名等级：**三等

## 一、项目名称：

结构拓扑优化 ICM 方法及建筑创构设计关键技术研究

## 二、提名意见

该课题对结构拓扑优化 ICM 方法和建筑结构创构设计的关键问题进行交叉学科研究，从 2 个方面展开：

①深入研究了结构拓扑优化 ICM 方法，扩展为可解决位移约束、频率约束、位移及频率约束、简谐载荷激励下动位移幅值约束等拓扑优化问题。深入比较了不同模型的适用性和合理性。发展了考虑破損-安全的结构拓扑优化 ICM 方法。经本课题的研究及发展，ICM 方法已成为结构拓扑优化领域内的主流方法之一。②紧密结合设计规范，提出了基于结构拓扑优化 ICM 方法的建筑结构创构设计技术。应用 ICM 方法对高层建筑大型支撑体系拓扑优化设计，可以有效地弥补基于经验设计的不足。基于 ICM 方法对树状结构进行创构设计，不需指定树状结构的层高、层数及分枝数量等一些先验的条件，具有更大的灵活性。

该课题共完成国家级课题 1 项，省级课题 1 项，出版专著 1 部。所列举的 5 个代表论文均发表于国内计算力学和结构设计领域的顶级期刊，总影响因子 11.9，总他引 236 次。研究成果丰富了结构拓扑优化理论，成为结构创构设计的主要技术手段之一，具有较高的理论和工程应用价值，在计算力学和结构设计领域处于国内领先水平。

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，全部材料真实有效，相关栏目均符合《提名工作手册》的填写要求。我单位和项目完成单位都已对该项目进行了公示，公示结果无异议。对照湖南省科学技术奖励办法及实施细则的授奖条件。提名该项目为湖南省自然科学奖三等奖。

## 三、项目简介

### 1. 主要研究内容简介

本课题属于计算固体力学与建筑结构设计两个领域的交叉学科的应用基础研究。主要研究内容集中在两个方面：

(1) 研究了主要完成人隋允康教授所提出的结构拓扑优化的独立连续映射 (ICM) 方法。

① 研究了不同过滤函数对优化的影响，选取不同的过滤函数以加速收敛过程并得到清晰的拓扑图形。研究了克服棋盘格现象、网格依赖、局部模态等问题的方法。扩展研究了位移约束、频率约束、位移及频率约束、简谐载荷激励下动位移幅值约束等拓扑优化问题。

② 对体积约束下最小化结构柔顺度模型（简称 MCVC 模型）和 ICM 方法

所建立结构性能约束下重量极小化的优化模型（简称 MWDC 模型）进行了深入比较，总结不同模型的优缺点，对两类模型进行了适用性和合理性比较。

③ 研究了考虑破损-安全的结构拓扑优化 ICM 方法，旨在克服传统模型求解所得最终构型存在的弊病，避免结构因缺乏合理的冗余结构而敏感于局部破坏，实现破损--安全的目标。

（2）紧密结合设计规范，创新性地研究应用结构拓扑优化 ICM 方法于建筑结构创构设计。

① 应用 ICM 方法建立受位移约束下重量极小为目标的高层建筑大型支撑体系优化设计模型，针对规范中的相对层间水平位移差的限值类型，推导了位移差的敏感度伴随法公式以提高计算效率。

② 应用 ICM 方法，研究了对树状结构进行创构设计的优化建模及求解方法，比较研究了不同设计条件的参数变化对树状结构拓扑形式的影响。

## 2. 科学发现点及科学价值

本课题的科学发现集中为两点：一是全面深入地发展了结构拓扑优化 ICM 方法；二是创新性地应用结构拓扑优化 ICM 方法对建筑结构进行创构设计。结构拓扑优化 ICM 方法已成为了结构拓扑优化设计领域内的主流方法之一，得到了广泛的研究和应用，丰富了结构优化理论；提出的基于结构拓扑优化的创构设计技术被同行认同为结构创构设计的主要技术手段之一，丰富了建筑结构设计方法。本课题所取得成果具有较高的理论及工程应用价值。

## 3. 同行引用及评价

本课题所列举的 5 个代表性论文均发表于力学和结构设计领域的顶级或重点期刊，论文总影响因子达 11.961，被国内外专家在领域内重点期刊上发文广泛引用，总他引 236 次。表明本课题成果得到了同行的高度认可与肯定。

# 四、客观评价

本课题主要创新点体现在两个方面：一是全面深入地发展了结构拓扑优化 ICM 方法；二是提出了基于结构拓扑优化方法的结构创构设计技术。两个方面研究成果均得到了同行专家的广泛关注及认可。

## 1. ICM 方法已成为结构拓扑优化领域内主流方法之一

结构拓扑优化 ICM 方法是主要完成人隋允康教授于 1996 年首次提出，经本课题的全面深入研究，克服了早期 ICM 方法中的棋盘格现象、网格依赖、局部模态等诸多问题，扩展为可处理多载荷工况下位移、应力、频率及简谐载荷激励下动位移幅值等多性能约束拓扑优化问题；与国内外广泛流行 MCVC 模型的深入对比显示 ICM 方法建立的以性能为约束结构重量极小化的模型更易与工程规范紧密相融；并将 ICM 方法扩展到考虑破损-安全的拓扑优化。同行评议如下：

① 大连理工大学王选等在其发表于《力学学报》（影响因子 2.661）的论文“考虑结构自重的基于 NURBS 插值的 3D 拓扑描述函数法”列举近 20 年所提出

的各种结构拓扑优化方法时指出“还有国内隋允康等[引用论文代表作 1]提出的独立连续映射法”。（见附件 2 中他引代表论文 1）

②中国科学院陈卓等在其发表于《光学》（影响因子 2.906）的论文“基于碳纤维框架天基目标探测二维跟踪转台结构优化”依据我们对 MCVC 模型和 MWDC 模型的比较结论指导其建立优化模型，他引原文为“彭细荣等[引用论文代表作 2]研究表明，体积约束下结构柔顺度最小化模型（Minimum Compliance with a Volume Constraint, MCVC）适用于解决单荷载工况下未给出位移约束的工程问题，容易得到结构刚度最大化的拓扑。”（见附件 2 中他引代表论文 2）

③中国工程物理研究院总体工程研究所冯佳等在其发表于《固体力学学报》（影响因子 1.326）的论文“基于双向渐进结构优化法的“破损-安全”结构轻量化设计”中指出“而轻量化作为目标，刚度 / 强度等设计需求作为约束更贴合工程实际应用。因此，彭细荣和隋永康[引用论文代表作 3]将各破损状况的结构位移（承载形变）作为设计约束来定义拓扑优化问题，基于其早期发展的独立连续映射（ICM, Independ Continuous Mapping）法提出了以最危险残余承载形变为约束、材料用量最小化为优化目标的“破损-安全”设计方法。”（见附件 2 中他引代表论文 3）

④国内多个重点期刊上发表的有关结构优化设计方面的综述文章均将 ICM 方法列为目前国内外主流的结构拓扑优化方法。如**特约专家中国能源学会副理事长王定标**发表于郑州大学学报(工学版)（影响因子 1.464）的特约评论论文章“流体拓扑优化的方法及应用综述”中指出“目前最常用的拓扑设计变量表述方法主要有以下几种：变密度法(density-based)、水平集法(level set method)、双向渐进结构优化方法(BESO)、独立连续映射方法(ICM)[引用论文代表作 1]等。”。**华侨大学结构优化专家周克民**发表于《力学进展》（影响因子 4.739）的综述文章“结构拓扑优化研究方法综述”将独立连续映射（ICM）方法作为结构拓扑优化的数值方法中的主流方法进行介绍。引文为“每个单元仅有一个设计变量板厚、密度、独立连续拓扑变量等，便于采用准则法，计算效率较高。其中独立连续拓扑变量及映射变换法 ICM 是...”。**北京空天技术研究所林晔**发表于《固体力学学报》的综述文章“压电智能结构拓扑优化研究进展”指出“代表性的拓扑优化方法包括人工密度法(SIMP)、进化结构优化方法(ESO)、水平集方法和独立连续映射方法(ICM)等”。（见附件 9 中其它证明材料 1~3）

⑤已经有本课题团队之外的不少年轻学者跟随 ICM 方法，采用其建模和算法，乃至发展了该方法，如华北电力大学的龙凯教授、长沙理工大学的荣见华教授等均对 ICM 方法进行了扩展研究。上海大学的白世烨博士以对 ICM 方法的研究作为其博士论文。（见附件 9 中其它证明材料 4~6）

## 2 基于结构拓扑优化方法的创构设计已成为创构设计的主要技术手段之一。

结构拓扑优化 ICM 方法建立以结构性能为约束、结构重量极小化为目标的

优化模型，与工程结构设计规范中的提法一致。本课题应用结构拓扑优化 ICM 方法对建筑结构进行创构设计，在高层建筑大型支撑体系拓扑优化和树状结构拓扑创构设计 2 个方面进行了探索性研究。哈尔滨工业大学土木工程学科等级 A+，哈尔滨工业大学在结构创构设计研究领域处于国内领先。本课题研究成果得到了以哈尔滨工业大学研究团队为代表的领域内专家的关注及好评。

① 哈尔滨工业大学刘鹏远等在其发表于《地震工程与工程振动》（影响因子 1.256）的论文“主次结构巨型支撑的多目标拓扑优化方法”指出“彭细荣[引用论文代表作 4]采用 ICM 法实现了高层结构大型支撑的拓扑优化，给出满足结构刚度限值下支撑重量极小值。”（见附件 2 中他引代表论文 4）

② 哈尔滨工业大学武岳等在其发表于《建筑结构学报》（影响因子 2.916）的论文“互承式空间网格结构找形方法研究”将我们所提出的应用结构优化的方法进行结构创构（或找形）作为主要方法进行介绍，他引原文为“对于结构找形，目前主要有物理过程模拟和结构优化[引用论文代表作 5]两类方法。”（见附件 2 中他引代表论文 5）

### 3. 本课题所列举的 5 个代表作均发表在国内领域内的顶尖学术期刊上。

代表论文 1 和 3 发表于力学领域内的顶刊《力学学报》，代表论文 2 发表于力学领域内重点期刊《固体力学学报》。代表论文 4 发表于工程结构领域内重点期刊《工程力学》，代表论文 5 发表于结构设计顶刊《建筑结构学报》。总影响因子达到 11.961。知网数据库总他引数 236。表明本课题研究成果得到了领域内专家的广泛好评。（见附件 3 中他引检索报告）

## 五、代表论文或著作

| 序号 | 论文著作名称/期刊名称                   | 第一作者/通讯作者 |
|----|-------------------------------|-----------|
| 1  | 结构拓扑优化 ICM 方法的改善/力学学报         | 隋允康/隋允康   |
| 2  | 对连续体结构拓扑优化合理模型的再探讨/固体力学学报     | 彭细荣/隋允康   |
| 3  | 考虑破损-安全的连续体结构拓扑优化 ICM 方法/力学学报 | 彭细荣/隋允康   |
| 4  | 基于 ICM 法的高层建筑大型支撑体系拓扑优化/工程力学  | 彭细荣/隋允康   |
| 5  | 基于连续体结构拓扑优化的树状结构拓扑创构/建筑结构学报   | 彭细荣/彭细荣   |

## 六、代表作及论文被他人引用的情况

| 序号 | 被引代表作及论文序号 | 引文题目/作者   | 引文刊名/影响因子       | 引文发表时间(年月日) |
|----|------------|---|-----------------|-------------|
| 1  | 1          | 考虑结构自重的基于 NURBS 插值的 3D 拓扑描述函数法/王选, 胡平, 祝雪峰等     | 力学学报 /2.661     | 2016-08-15  |
| 2  | 2          | 基于碳纤维框架天基目标探测二维跟踪转台结构优化/陈卓, 胡庆龙, 李朝辉            | 光学/2.906        | 2021-03-15  |
| 3  | 3          | 基于双向渐进结构优化法的“破损-安全”结构轻量化设计/冯佳, 吴艳发, 邱文科, 黄舟, 夏凉 | 固体力学学报/1.326    | 2022-08-29  |
| 4  | 4          | 主次结构巨型支撑的多目标拓扑优化方法/刘鹏远, 李东风, 张俊良, 单庆飞, 李祚华, 滕军  | 地震工程与工程振动/1.256 | 2020-12-15  |
| 5  | 5          | 互承式空间网格结构找形方法研究/武岳, 苏岩, 乔刚                      | 建筑结构学报/2.916    | 2018-05-04  |

## 七、主要完成人情况

摘自“主要完成人情况表”中的部分内容，公示姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、主要完成单位、对本项目的贡献。

| 姓名  | 排名 | 职务 | 职务职称 | 工作单位   | 主要完成单位 | 对本项目的贡献                      |
|-----|----|----|------|--------|--------|------------------------------|
| 彭细荣 | 1  | 教师 | 教授   | 湖南城市学院 | 湖南城市学院 | 省自科项目主持人；国自科项目第一参与人；5个代表作作者。 |

|     |   |    |    |        |        |                   |
|-----|---|----|----|--------|--------|-------------------|
| 隋允康 | 2 | 教师 | 教授 | 北京工业大学 | 北京工业大学 | 国自科项目主持人;5个代表作作者。 |
|-----|---|----|----|--------|--------|-------------------|

## 八、主要完成单位情况及创新推广贡献

湖南城市学院是本项目中省自科项目1项、国自科项目1项的项目依托单位，是代表作论文作者彭细荣（第一主要完成人）当前工作单位，是本项目中ICM方法的发展，基于ICM方法的建筑创构：高层大型支撑体系拓扑优化方法，树状结构创构设计方法等重要发现的主要完成单位。湖南城市学院高度重视教师的科学的研究工作，对教师科研课题的开展及项目技术攻关给予大力支持，组建了多学科研究团队，为本课题的研究提供了实验条件，给予了研究经费配套，并进负责了对外跟相关部门进行调研及数据收集协调工作，聘请了技术专家进行相关指导，为本课题的顺利开展提供了帮助，同时对成果的实践应用、推广提供了人、才、物的帮助。

北京工业大学是主要完成人隋允康教授退休前工作单位。代表论文1是隋允康教授指导彭细荣在北京工业大学读博士期间完成成果。代表论文2~4是北京工业大学退休教授隋允康与其毕业博士彭细荣共同合作研究完成。隋允康教授是ICM方法的提出者。北京工业大学是本项目ICM方法的发展，基于ICM方法的建筑创构：高层大型支撑体系拓扑优化方法等重要发现的主要完成单位。

## 九、主要完成人合作关系说明

第二完成人隋允康是北京工业大学退休教授，是第一完成人彭细荣的博士学位指导老师。毕业之后，彭细荣与隋允康教授一直保持合作研究关系，隋允康于2015年9月1号至2021年8月31号间受聘为湖南城市学院客座教授。隋允康教授长期对彭细荣的研究工作提供指导性意见，两人合作发表论文，合作完成项目。

代表论文1是隋允康指导下由彭细荣主要完成的攻读博士学位期间的成果，代表论文2~4是两人在科研项目合作的基础上共同完成，均是彭细荣为第一作者，隋允康为通讯作者。

隋允康作为湖南城市学院特聘客座教授所主持的国家自然科学基金项目《融合连续体结构拓扑优化ICM法提升与扩展变密度法》（编号：11672103）中，彭细荣是第一参与人。

## 主要完成人合作关系情况汇总表

| 序号 | 合作方式 | 合作者/排名             | 合作时间                      | 合作成果        | 证明材料           | 备注 |
|----|------|--------------------|---------------------------|-------------|----------------|----|
| 1  | 论文合著 | 隋允康/第 1<br>彭细荣/第 2 | 2005/01/01-2<br>005/40/01 | 论文 1        | 代表论文 1         |    |
| 2  | 论文合著 | 彭细荣/第 1<br>隋允康/第 2 | 2005/01/01-2<br>018/12/31 | 论文 2-4      | 代表论文 2-4       |    |
| 3  | 项目合作 | 隋允康/第 1<br>彭细荣/第 2 | 2017/01/01~2<br>020/12/31 | 国自科一<br>般项目 | 立项申请书<br>成员列表页 |    |