

# 中国力学学会优秀博士学位论文奖推荐表

( 2020 年度 )

填表日期：2021-07-02

论文题目	基于多保真度建模的多层级筒壳屈曲分析及优化方法研究		
作者姓名	田阔	获得学位所在单位	大连理工大学
答辩日期	2018-09-07	获得学位日期	2018-09-30
二级学科	工程力学	论文涉及研究方向	薄壁结构稳定性分析与优化设计
导师	王博 教授	导师研究方向	结构与多学科优化
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	是	会员号	S030004926M
推荐单位/理事 联系人	大连理工大学 (张杨)	联系人E-mail	
联系人手机		是否获校优秀博士 论文	是

攻读博士学位期间及获得博士学位后一年内获得与博士学位论文有关的成果 (包括学术论文、专著、获奖项目和专利项目, 限填8项)

1.	Tian K, Wang B, Hao P, Anthony Waas, A high-fidelity approximate model for determining lower-bound buckling loads for stiffened shells, International Journal of Solids and Structures, 2018, 148-149, 14-23. (IF=3.213)	5.	Tian K, Zhang JX, et al., Buckling surrogate-based optimization framework for hierarchical stiffened composite shells by enhanced variance reduction method, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(21-22), 959-973. (IF=1.987)
2.	Tian K, Wang B, Zhang K, et al., Tailoring the optimal load-carrying efficiency of hierarchical stiffened shells by competitive sampling, Thin-Walled Structures, 2018, 133, 216-225. (IF=4.033)	6.	Wang B, Tian K, Hao P, et al., Numerical-based smeared stiffener method for global buckling analysis of grid-stiffened composite cylindrical shells. Composite Structures, 2016, 152, 807-815. (IF=5.138)
3.	Tian K, Li ZC, et al., Toward the robust establishment of variable-fidelity surrogate models for hierarchical stiffened shells by two-step adaptive updating approach, Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 61, 1515-1528. (2019年接收, IF=3.377)	7.	Wang B, Tian K, Hao P, et al., Hybrid analysis and optimization of hierarchical stiffened plates based on asymptotic homogenization method, Composite Structures, 2015, 132, 136-147. (IF=5.138)
4.	Tian K, Wang B, Zhou Y, et al., Proper-orthogonal-decomposition-based buckling analysis and optimization of hybrid fiber composite shells, AIAA Journal, 2018, 56(5), 1723-1730. (IF=2.108)	8.	Wang B, Tian K, Zhou CH, et al., Grid-pattern optimization framework of novel hierarchical stiffened shells allowing for imperfection sensitivity. Aerospace Science and Technology, 2017, 62, 114-121. (IF=4.499)

### 论文的主要创新点及学术影响:

主要创新点: (1)建立了基于本征正交分解的“离线-在线-更新”高保真降阶屈曲分析及优化框架, 可实现对屈曲载荷及模态的快速高精度预测; (2)建立了基于加筋单胞均匀化及自适应等效的快速屈曲分析方法, 突破了传统等效模型预测精度低、适用性差的技术瓶颈, 显著提高了多层级筒壳结构线性屈曲、后屈曲分析及优化效率; (3)建立了基于多保真度竞争性抽样的代理模型后屈曲优化方法, 可合理缩减设计空间, 有效提高了非线性后屈曲优化的全局寻优能力。

学术影响: 博士及博后阶段发表18篇SCI论文(9篇一作、4篇二作/导师一作、5篇通讯), SCI他引303次, 得到了俄罗斯联邦工程科学院院士Y.I.Dimitrienko、韩国工程院院士S.J.Shin等学者的正面评价, 获得了辽宁省自然科学学术成果奖学术论文类一等奖、大连理工大学优秀博士论文。作为代表性成果支撑了2017年教育部技术发明奖一等奖。在长征五号火箭筒段设计中获得应用。



推荐意见: (不超过300字)

该博士论文面向我国新一代运载火箭承力筒壳结构设计需求,建立了高保真降阶屈曲分析、自适应等效后屈曲分析以及基于竞争性抽样的代理模型优化方法,形成了基于多保真度建模的多层级筒壳结构高效屈曲分析及优化框架,突破了传统方法屈曲分析耗时长、非线性后屈曲优化寻优能力不足等技术瓶颈。该论文创新性突出、成果丰富。申请人在博士及博后阶段发表了18篇SCI论文,SCI他引303次,得到了俄联邦工程科学院院士Y.I.Dimitrienko、韩国工程院院士S.J.Shin等国际著名学者的正面评价。相关成果支撑了2017年教育部技术发明奖一等奖,并在长征五号运载火箭筒段设计中获得了应用。特此推荐参评力学学会优博论文。

(推荐单位填写此栏)

声明:本单位承诺,所提供的推荐材料真实有效,愿意承担相应责任。如产生争议,保证积极调查处理。

学位评定委员会主席: \_\_\_\_\_

单位公章:

推荐单位负责人签字:

年 月 日

(中国力学学会理事推荐填写此栏)

声明:本人承诺,所提供的推荐材料真实有效,愿意承担相应责任。如产生争议,保证积极调查处理。

推荐人(签名):

电话:

电子邮箱:



# 《基于多保真度建模的多层级筒壳屈曲分析及优化方法研究》

## 博士学位论文综合介绍材料

作者姓名：田阔

指导教师：王博 教授

博士学位授予学校：大连理工大学

### 一、选题意义：

筒壳结构由于具有较高的比刚度和比强度，被广泛地应用于运载火箭的燃料贮箱、级间段等主承力结构中，是最为常见的一种薄壁结构形式。筒壳结构占运载火箭结构干重比高达60%以上，其轻量化设计需求十分迫切。由于运载火箭在发射和飞行阶段承受着巨大的惯性载荷，筒壳结构的主要载荷工况为轴向压缩工况，其主要破坏模式为屈曲失稳。通过合理的优化设计可以有效提高筒壳结构的抗屈曲能力，进而保证运载火箭的承载性能。**为实现载人登月、深空探测等任务，我国正在发展新一代载人火箭，其结构大型化、承载重型化的趋势越发显著，因而对筒壳结构的轻质、高承载性能提出了更严苛的要求。**相比于传统的筒壳结构形式，多级加筋壳、混杂纤维筒壳等多层级筒壳结构形式具有丰富的结构或者材料层级，获得了更大的设计空间，在轻质、高承载等方面表现出更大优势，但结构或者材料层级的丰富也带来了更大的结构尺寸、更丰富的结构细节以及更多的设计变量，进而导致了屈曲分析效率低及全局寻优能力不足等难题。目前，国内外针对多层级筒壳结构高效屈曲分析及优化方法的研究工作较少，相关分析及优化理论还不完善，其挑战主要体现在以下两个方面：

**(1) 多层级筒壳结构构型及层级复杂、屈曲模态多样化，导致屈曲分析耗时长、高精度的快速屈曲分析方法欠缺。**随着筒壳结构尺寸跨越式增长，基于有限元方法的屈曲分析耗时激增，难以满足快速分析及优化设计需求。基于解析推导建立的等效刚度法（Smearred Stiffener Method, SSM）尽管在工程中获得了广泛应用，但其仅适用于周期性加筋壳屈曲载荷计算，且预测精度较低、适用性较差，难以直接应用于多层级筒壳结构。此外，屈曲模态多样化也对多层级筒壳结构的等效或降阶提出了极大的挑战，这也是现有等效或降阶分析方法对屈曲载荷及模态预测精度不足的主要原因。亟待针对多层级筒壳结构特征开展等效或降阶算法研究，建立高效高精度的屈曲分析方法。

**(2) 多层级筒壳结构后屈曲优化问题是多变量、多峰值、多约束的非线性优化难题，现有方法的后屈曲优化效率及寻优能力严重不足。**国际结构与多学科优化学会前主席 R.T. Haftka 教授指出，筒壳结构后屈曲优化问题是最复杂的结构优化难题之一，面临着建模、分析和优化的三重复杂度。随着筒壳结构的不断大型化、复杂化以及设计需求的不断提高，筒壳结构的复杂度也逐渐增加，优化求解极具挑战。为了得到更优的设计，学者们基于启发式优化算法开展了筒壳结构优化设计，但其需要大规模的迭代和计算，导致了巨大的计算成本。尽管代理模型技术可以提高启发式优化算法的优化效率，但是基于高保真度精细模型的抽样



步骤仍需要耗费大量的计算成本，亟需充分利用多保真度模型信息融合，建立高效的抽样及优化方法。

针对上述挑战，开展基于多保真度建模的多层级筒壳屈曲分析及优化方法研究，**对于提高屈曲分析方法精度和效率、提高后屈曲优化效率及寻优能力具有重要意义**。同时，还可以有效**推动复杂薄壁结构稳定性理论发展**，相关成果还可以**服务于我国新一代运载火箭轻量化及高承载设计需求**，有助于**提升我国航天先进装备的结构设计水平**。

## 二、成果创新性：

博士论文的创新性成果主要包含以下五个方面：

(1) 针对刚度突变的混杂纤维筒壳结构，**建立了基于本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)的“离线-在线-更新”高保真降阶屈曲分析及优化方法**。首先，基于POD方法推导了特征值屈曲分析的降阶有限元方程。然后，提出了有效的POD基构建及更新策略，搭建了“离线-在线-更新”的POD线性屈曲优化框架。与全阶有限元方法对比表明，该框架对刚度突变的混杂纤维筒壳结构的屈曲载荷和屈曲模态具有较高的预测精度，有效提高了该类型结构的线性屈曲分析及优化效率。

(2) 面向构型复杂、屈曲模态多样化的多级加筋壳结构，基于渐近均匀化快速数值实现方法(Numerical Implementation of Asymptotic Homogenization, NIAH)和瑞利-里兹方法，**建立了高效稳定、适用性广的数值等效刚度法(Numerical-based Smearred Stiffener Method, NSSM)**，可以快速预测多级加筋壳的线性屈曲载荷和屈曲模态，克服了传统的等效刚度法(Smeared Stiffener Method, SSM)预测精度较低、适用性较差的缺点。

(3) 针对显式动力学后屈曲分析方法计算耗时较长的技术瓶颈，**建立了基于NSSM自适应等效的多级加筋壳高效后屈曲分析方法**，为多级加筋壳后屈曲分析模型的合理等效提供了依据。在此基础上，基于定点法搭建了多级加筋壳的代理模型后屈曲优化框架，相比于传统优化方法表现出更优异的收敛速度、优化计算效率及全局寻优能力。

(4) 针对加筋筒壳折减因子预测优化效率低的瓶颈问题，**建立了基于模型修正的加筋筒壳折减因子快速预测优化方法**。首先，针对加筋筒壳等效模型，定义了面向屈曲问题的模态置信系数以表征屈曲模态的预测精度。然后，以此为约束条件建立了加筋筒壳等效模型的模型修正方法，提高了等效模型对屈曲载荷和屈曲模态的预测精度。最后，建立了加筋筒壳折减因子快速预测优化方法，相比于传统方法可大幅减少计算成本。

(5) 针对多变量、多峰值、多约束的多层级筒壳结构后屈曲优化问题，**建立了基于多保真度竞争性抽样的多层级筒壳代理模型后屈曲优化方法**，综合利用了等效/降阶模型的高效率及精细模型的高精度。与基于拉丁超立方抽样的代理模型优化方法对比表明，该方法可合理缩减设计空间，避免盲目抽样，保证每次高保真度抽样具有竞争性，表现出优异的全局寻优能力。



博士论文的国内外学术评价及应用效果:

(1) 俄罗斯联邦工程科学院院士 **Y.I. Dimitrienko 教授** 评价申请人建立的快速屈曲分析方法, “发展了有效的计算算法(effective computational algorithm)”、“在复材加筋特征计算方面取得了相当大的成功(considerable success)”。

(2) **SCI 期刊**《International Journal of Aeronautical and Space Sciences》**副主编 J.S.Park 教授** 以及 **韩国航空宇宙研究院多位科学家** 针对申请人建立的快速屈曲分析方法开展了跟踪研究, 并将该成果作为基准等边加筋壳“baseline isogrid-stiffened shell”, 称其提供了高效、精确的计算“efficient and appropriate precise computations”。

(3) **德国宇航中心复合材料设计部主任 C.Hühne 教授** 等在发表的 7 篇论文中连续引用了申请人建立的快速屈曲分析及优化方法, 将其作为评判其他同类承载力预测方法精度的下限值方法“lower-bound methods”、屈曲实验的替代方法“an alternative to buckling tests”。2017 年, 对方主动邀请申请人合作撰写论文, 并于 2018 年发表于薄壁结构稳定性领域顶级期刊《Thin-walled Structures》。

(4) **韩国工程院院士 S.J. Shin 教授**、**美国普渡大学 Wenbin Yu 教授**、**英国卡迪夫大学 Carol Featherston 教授**、**新加坡国立大学 Victor Shim 教授** 等国内外知名学者引用了申请人提出的快速屈曲优化方法, 评价为“新颖的(new numerical method)”、“高效的(efficient)”、“鲁棒的(robust)”、“相比于传统方法大幅度减少了计算耗时(reduce the computational time sharply than traditional method)”。

(5) 基于提出的多层级筒壳结构快速屈曲分析及优化方法, 研发了**网格加筋壳快速屈曲分析及优化软件**, 获批了软件著作权 2015SR240043, **应用于航天一院贮箱筒段设计**, 为设计部门提供了自主可控的设计工具, 缩短了研发周期。

(6) 提出的多层级筒壳结构快速屈曲分析及优化方法, **应用于长征五号运载火箭大直径加筋壳承载能力评估**, 将原来近 1 个月的分析耗时减少到 2 天, 减幅近 94%。

(7) 提出的多层级筒壳结构快速屈曲分析及优化方法, 作为代表性成果**支撑了 2017 年度教育部技术发明奖一等奖**“大直径复杂薄壁筒壳结构轻量化设计技术与应用”。

### 三、综合能力:

目前, 申请人已**入职大连理工大学工程力学系副教授**, 博士论文获得了**大连理工大学优秀博士学位论文**, 并被**推荐参评辽宁省优秀博士学位论文**。

在学术成果方面, 基于博士及博士后阶段的研究工作, 以主要作者发表 **SCI 论文 18 篇 (9 篇一作, 4 篇二作/导师一作, 5 篇通讯)**、**EI 检索论文 5 篇 (1 篇一作, 2 篇通讯, 2 篇二作/导师一作)**, 相关成果发表于 **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (中科院 1 区, IF=5.763)**、**International Journal of Solids and Structures (JCR1 区, IF=3.213)**、**Composite Structures (JCR1 区, IF=5.138)**、**Aerospace Science and Technology (JCR1 区, IF=4.499)**、**Thin-walled Structures (JCR1 区, IF=4.033)**、**Structural and Multidisciplinary**



Optimization (JCR1 区, IF=3.377)、AIAA Journal (IF=2.108) 等力学、优化、宇航领域的权威期刊。授权发明专利 6 项 (美国 1 项、欧洲 1 项、日本 1 项、中国 3 项), 获批软件著作权 1 项。担任 11 个 SCI 期刊的审稿人。

在科研项目方面, 主持 1 项国家自然科学基金青年基金、1 项博士后面上项目、4 项航天五院横向课题。

在学术获奖方面, 获得了研究生国家奖学金、辽宁省自然科学学术成果奖学术论文类一等奖 (第一获奖人)、辽宁省优秀毕业生、大连市专利奖一等奖 (第四获奖人)、大连市三好学生、大连理工大学优秀博士论文单项奖学金、钱令希力学奖学金一等奖。

中国力学学会优秀博士论文



## 中国力学优秀博士论文奖推荐表附件材料

### 1、博士学位论文（共1个附件）

（1）博士论文-田阔.pdf

### 2、学位证书（共1个附件）

（1）学位证书-田阔.jpg

### 3、CSTAM会员证（共1个附件）

（1）力学学会会员证.jpg

### 4、获得成果栏中学术论文的刊物封面、目录及论文首页（共8个附件）

（1）学术论文-1.pdf

（2）学术论文-2.pdf

（3）学术论文-3.pdf

（4）学术论文-4.pdf

（5）学术论文-5.pdf

（6）学术论文-6.pdf

（7）学术论文-7.pdf

（8）学术论文-8.pdf

### 5、专著封面和版权页（共0个附件）

### 6、获奖证书及专利证书（共13个附件）

（1）获奖1—辽宁省自然科学学术成果奖学术论文类一等奖.pdf

（2）获奖2—大连专利一等奖.pdf

（3）获奖3—研究生国家奖学金.pdf

（4）获奖4—大连理工大学优秀博士论文单项奖.pdf

（5）获奖5—钱令希一等奖学金.pdf

（6）获奖6—大连理工大学优秀博士论文及辽宁省优秀博士论文推荐.pdf

（7）专利1.pdf

（8）专利2.pdf

（9）专利3.pdf

（10）专利4.pdf



(11) 专利5.pdf

(12) 专利6.pdf

(13) 软件著作权1.pdf

7、其他有助于评选的材料（共1个附件）

(1) 其他成果-学术论文（一作、二作及通讯）.pdf

中国力学学会优秀博士学位论文

