

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	张拉整体结构动力响应分析的模型和算法研究		
作者姓名	阚子云	获得学位所在单位	大连理工大学
答辩日期	2019-07-16	获得学位日期	2019-09-24
二级学科	动力学与控制	论文涉及研究方向	多系统动力学
导师	钟万勰、彭海军	导师研究方向	动力学与控制
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	张杨	联系人E-mail	
联系人手机		是否获校优秀博士 论文	否

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.	Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 293-314.	5.	Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, et al. International Journal of Solids and Structures, 2019, 167: 202-219.
2.	Ziyun Kan, Fei Li, Haijun Peng, Biaosong Chen, XueGuan Song. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146, 107021.	6.	Ziyun Kan, Ningning Song, Haijun Peng, Biaosong Chen, XueGuan Song. International Journal of Solids and Structures. 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.11.015
3.	Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen. AIAA Journal, 2018, 56 (12):5013-5027.	7.	Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, Wanxie Zhong. Composite Structures, 2018, 187: 241-258.
4.	Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, Wanxie Zhong. International Journal of Solids and Structures, 2018, 130-131: 61-79.	8.	阚子云, 彭海军, 陈飙松. 力学学报, 2017, 49(5): 1103-1114.

论文的主要创新点及学术影响:

论文围绕张拉整体结构的力学响应分析开展研究工作，主要创新点为：（1）在通用模型研究上，建立了张拉结构的多体动力学模型。提出了利用经典力元的结构找形的方案。为研究结构中的复杂动力学响应开辟了新思路。（2）提出了考虑节点摩擦效应的滑动绳索分析的线性互补方法，证明了指定位移下滑动点滑动距离的唯一性。揭示了滑动点摩擦效应导致的stick-slip效应。（3）发展了含松弛绳索的一般张拉整体结构静动力分析的线性互补框架。研究了张拉结构中的杆件碰撞现象。

相关工作将为索驱动软体机器人的动力学与控制这一前沿课题奠定基础。以第一作者在高水平SCI期刊发表论文7篇,论文引用次数49次。获批国家自然科学基金青年项目、博士后面项目各1项。



推荐意见: (不超过300字)

张拉整体结构是一种奇特而富有魅力的结构形式，被誉为“未来的结构体系”。论文通过深入分析张拉整体结构研究现状和存在的难点问题，系统地围绕含多非光滑现象的张拉整体系统的力学响应的建模和求解问题进行研究。论文拓展了传统非光滑多体系统动力学的研究内涵，对于促进其在航空航天、机器人等领域的多学科应用具有重要的工程价值。论文文献调研充分，掌握了学科前沿研究焦点。论文内容充实、分析合理、数据可靠，写作逻辑清晰，语言流畅。取得了丰硕的学术成果，具有很高的创新性和学术价值。因此郑重推荐本论文参加中国力学优秀博士论文评选！

(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：



博士学位论文综合介绍材料

一、选题意义

随着深空探测、救灾救援、医疗服务等极端环境和复杂工程任务的出现，工程结构的设计越来越朝向轻型化、柔性化、智能化的趋势发展，新的结构与机构设计概念层出不穷。张拉整体结构是一组受压的刚性杆件和受拉的轻质绳索组成的稳定自平衡体系。作为一种奇特而富有魅力的结构形式，张拉整体概念近年来得到众多工程领域的关注，在航空航天、土木建筑、仿生机械、生物工程领域有着重要的潜在应用，被誉为“未来的结构体系”。

张拉整体结构之所以能够在工程领域得到广泛的关注，本质上与系统的特性有关。相比于传统的刚性支撑系统，张拉整体系统具有以下优点：I，质量轻。系统中含有大量的轻质绳索，具有很高的体积-质量比，是航天轻质结构的优秀设计方案；II，可控性优异。系统的刚度与自应力大小紧密相关。通过调控自应力可使力学特性介于固定结构和可动机构之间。形态可控性使其特别适合作为主动结构和智能结构使用；III，抗冲击性强。在受外界冲击时，结构的易变形性使其能充分吸收冲击动能，可作为航天着陆缓冲装置的优秀备选方案。然而正是这些优异特性，使此类结构面临着不同于传统结构和机构的特点。特别是在应用过程中出现的大量复杂非线性、非光滑现象，给系统的力学响应分析带来严重挑战。

本论文通过深入分析张拉整体结构力学响应分析的研究现状和难点问题，系统性地围绕含多非光滑现象的张拉整体系统的建模和求解问题进行研究。论文的研究工作有助于促进“张拉整体”这一奇特结构概念向传统“多体动力学”或“动力学与控制”等学科领域的推广，对于拓展传统非光滑多体系统动力学的研究内涵具有很好的科学意义，对于挖掘此类结构的力学潜能并进一步促进其在航空航天、机器人等领域的多学科应用具有重要的工程价值。

二、成果创新性：

张拉整体结构起源于建筑雕塑领域，目前系统性研究“张拉整体”这一结构概念的学者也多集中在土木建筑领域。国内比较有代表性是浙江大学罗尧治教授和东南大学冯健教授领导的科研团队。他们的研究工作多侧重于结构的形态学分析，重点关注结构的稳定性分析和找形分析，相关的理论成果也日臻成熟。然而形态学的研究仅仅可视为结构研究的第一步。力学响应分析是后续将此类结构概念应用于工程实际的关键环节。为了弥补传统研究内容的不足，学位论文作者在大量的文献调研基础之上，凝练出了目前张拉结构研究的科学性的问



题。在创新性上，学位论文最大的特色是指出并系统性地研究张拉整体这一独特的结构概念中的非光滑现象。研究思路极具交叉性、多学科性。经典的非光滑多体动力学主要关注刚体与刚体之间的接触、摩擦、碰撞等现象。张拉结构作为含有大量柔性绳索的系统，其中蕴含的非光滑现象却鲜有被传统非光滑多体系统动力学的研究者们所关注。学位论文关注了张拉整体结构中普通绳索的松弛问题并提出了高效稳定的求解方法。在滑动绳索摩擦问题上，指出了现有文献中的误区，揭示了 Euler-Eytelwein 准则中所蕴含的接触点处的复杂粘滑现象。因此论文在实质上可视为对传统非光滑多体系统动力学研究内容的补充。具体地，论文取得的创新性成果可归纳如下：

(1) 在通用模型研究上，建立了张拉整体结构的多体动力学模型。提出了基于多体动力学中经典力元弹簧-阻尼-作动器 (Spring-Damper-Actuator, SDA) 的结构找形的方案。提出了适用于 clustered 张拉结构分析的无摩擦滑动绳索单元。弥补了现有张拉整体结构力学模型的不足，为研究此类结构的复杂非线性动力学响应开辟了新思路。

张拉整体系统的建模问题本质是解决采用何种数学和力学模型来描述结构特性的问题，其贯穿于力学响应分析的始终。结构的建模分析或可追溯到 1976 年 Kenner 的工作。他首次将牛顿矢量力学引入到八面体张拉单元的静力分析中。随后，一大批学者基于几何非线性有限元法方法，如完全 Lagrange、更新 Lagrange 或共旋坐标方式研究了张拉整体结构的几何大变形分析问题。这类建模方式广泛地被建筑、土木工程背景的学者使用，其核心思想是将压杆和绳索均模拟为杆单元，其缺点在于对于较为粗壮的杆件，无法考虑绕轴向旋转的自由度。对于轴向刚度过大的杆件，会导致刚度矩阵病态，引起非线性迭代的收敛困难。特别地，当杆件形状较为复杂时，其仍需要将杆件离散成多个有限单元，造成系统自由度过多。本论文创新性地将基于笛卡尔建模方式的多体动力学方法引入到张拉整体结构的分析中，建立了针对 class 1 和 class k ($k > 1$) 张拉结构的通用动力学模型。提出了利用多体动力学中的经典力元 SDA 实现结构找形分析的方案。提出了一种适用于 clustered 张拉结构的无摩擦滑动绳索单元并应用于结构的展开分析中。该模型通用性强，为张拉结构中的复杂非线性动力学响应的研究提供了新的统一框架。

基于该部分工作撰写的学术论文发表在力学领域著名期刊《International Journal of Solids and Structures》以及国内权威力学期刊《力学学报》上。论文列表如下：

- Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, Wanxie Zhong. A sliding cable element of multibody dynamics with application to nonlinear dynamic deployment analysis of clustered tensegrity. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 130-131: 61-79.
- 阚子云, 彭海军, 陈飙松. 考虑弹簧阻尼作动器解析雅可比矩阵的多刚体动力学分析. *力学学报*, 2017, 49(5): 1103-1114.



上述发表在 IJSS 的论文,在审稿阶段被审稿人认为是“is original”和“has a major novelty”。中南大学杨孟刚教授等在其发表在 IJSS (2020, 207 卷, 42 - 54 页)的论文对我们提出的策略进行了积极评价“Kan et al. (2018) developed a sliding cable element for multibody system dynamics, which provides a powerful tool for analyzing clustered tensegrity.”

此外,论文作者还延续传统有限元方法的思路,对压杆为细长状的 clustered 张拉结构的力学特性,特别是结构固有频率随自应力变化关系以及非线性动力、展开动力学行为进行了研究。相关论文发表在复合结构权威期刊《Composite Structures》上。

- **Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, Wanxie Zhong.** Nonlinear dynamic and deployment analysis of clustered tensegrity structures using a positional formulation FEM. *Composite Structures*, 2018, 187: 241-258.

(2) 在滑动绳索的非光滑特性研究上,提出了适用于显式动力学分析的考虑节点摩擦效应的滑动绳索分析的线性互补方法。利用线性互补理论证明了指定位移下滑动点滑动距离的唯一性。揭示了滑动点摩擦效应导致的 stick-slip 效应,以及各绳索段的内力并不随绳索段单调变化这个大量现存文献的误区。所提方法克服了传统方法需要反复判断搜索,稳定性不高、程序实现繁琐等缺点。

由于其轻质、易变形等特性,张拉整体概念越来越得到可展开结构设计者的青睐。为了克服传统驱动方式的缺点,人们对原始的结构形式做了创新,其中最为成功的莫过于引入了滑动绳索的概念。2009年,Moored和Bart-Smith将含有滑动绳索的张拉整体结构正式命名为“clustered”(聚集式)张拉整体结构,并系统地比较了此类结构与传统张拉整体结构静力学特性的区别与联系。对 clustered 张拉结构的研究关键在于对结构中滑动绳索的准确高效分析。滑动绳索在工程上有着十分广泛的应用,特别是在起重机或索驱动机器人中。节点摩擦效应是滑动绳索系统准确分析的关键要素。为了考虑节点摩擦效应,不同领域的学者做了大量的工作。这些工作大都利用 Euler - Eytelwein 准则,但仅仅关注摩擦力造成的绳索段内力的损失。由于滑动状态的复杂性,已有工作均忽略了或者回避了 Euler - Eytelwein 准则中在动力学分析中内在的 stick-slip 效应,以及由之引起的各绳索段的内力并不单调变化的结果。受非光滑多体系统动力学中关于刚体摩擦和接触分析思想的启发,论文首次提出了采用线性互补理论处理滑动绳索摩擦效应的思路,以捕捉滑索驱动中的复杂非线性非光滑现象。该方法稳定性好,数学形式简洁,程序实现非常简单,十分便于工程应用。

基于该部分工作撰写的学术论文已发表在机械工程领域著名期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》(中科院一区, IF= 6.471):

- **Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen.** A simple linear complementarity approach for sliding cable modeling considering friction. *Mechanical Systems*



and Signal Processing, 2019, 130: 293-314.

论文在审稿阶段获得 MSSP 审稿人的高度评价：“The manuscript proposes a linear complementarity formulation for sliding cable problems. This original study of a complex structural mechanics problem is of interest and has valuable scientific potential. The approach is well constructed and mathematically sound, advantages of that methods are well identified. The method offers new insight and a new way to solve the sliding cable problem with a limited number of assumptions which offers a robust and simple alternative to some existing techniques”。论文发表后得到瑞士洛桑联邦理工学院客座教授，张拉整体结构国际著名研究者 Nizar Bel Hadj Ali 和迈阿密大学教授 Landolf Rhode-Barbarigos 的关注。论文作者和他们合作在所提方法的基础上结合传统土木领域流行找形方法对索网结构中的滑索摩擦问题进行了研究 (Engineering with Computers, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00893-z>)。

此外，论文作者在上述工作基础上，针对隐式动力学和静平衡分析中仍存的难点问题，提出了采用非线性互补理论对滑动绳索摩擦问题进行研究的思路，并拓展到多体系统动力学分析中。相关论文已发表在机械工程和力学领域著名期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》和《International Journal of Solids and Structures》上，论文列表如下：

- Ziyun Kan, Fei Li, Haijun Peng, Biaosong Chen, XueGuan Song. Sliding cable modeling: A nonlinear complementarity function based framework. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146, 107021.
- Ziyun Kan, Ningning Song, Haijun Peng, Biaosong Chen, XueGuan Song. A comprehensive framework for multibody system analysis with clustered cables: examples of tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.11.015>

上述发表在 MSSP 的论文亦得到审稿人的高度评价：“The manuscript presents an original formulation for sliding cable models, and proposes a continuous and robust model for implicit analysis. This is a very good scientific contribution that truly pushes forward the state of the art in the existing literature. The assumptions and the formulation are sensible and mathematically sound. The work deserves publication.”

(3) 在张拉结构的其他非光滑特性研究上，发展了含松弛绳索的一般张拉整体结构的大变



形静、动力分析的线性互补框架，验证了其在含大面积松弛绳索结构力学响应分析的稳定性和正确性。建立了三维空间中的杆件的连续碰撞力模型，研究了张拉结构中的杆件碰撞现象。发现了经典张拉整体单胞在杆件接触过程中的硬化-软化-硬化的力学性质。

张拉整体结构和一般桁架结构的显著不同点在于结构受载过程中包含着大量的非光滑现象。绳索松弛是人们最先认识到的非光滑现象。传统 Newton-Raphson 方法在处理绳索松弛问题时一般采用直接判断的方式。2014 年，Zhang 等研究了拉压不同模量桁架的静力分析问题，证实了 Newton-Raphson 方法在处理具有较大拉压比的情况时收敛曲线会陷入无休止的振荡。2011 年，Oliveto 和 Sivaselvan 采用线性互补方法研究了含松弛绳索张拉整体结构的分析问题。这些已有工作仅局限于静力分析或者小位移分析。在张拉整体结构的大位移动力分析中，绳索松弛的问题将更加严重，对算法的稳定性提出了更高的要求。论文发展了含松弛绳索的一般张拉整体结构的线性互补方法，提出了涵盖各种分析情况的统一框架。此部分工作可以为极端条件下大尺寸张拉整体结构的分析提供可靠的手段。杆件碰撞是张拉结构涉及到的另一类典型非光滑现象。碰撞现象将导致构件的速度发生突变，给结构带来严重的非光滑力学响应。杆件碰撞现象很早就为学者们所注意，但他们通常采用一些手段防止此现象的发生。然而在某些应用中，杆件碰撞现象无法完全避免。如航空航天工程中，为了追求较低的体积占有率，基于张拉整体概念的可展开结构在初始状态可能会被折叠到极度收缩状态，导致杆件之间出现大量的相互接触现象。论文建立了三维空间中的杆件的连续碰撞力模型，利用赫兹接触定律研究了接触刚度随接触角变化关系，研究了杆件接触碰撞现象对张拉整体结构折展行为的影响。此外还发现了经典张拉整体单胞在杆件接触过程中的硬化-软化-硬化的力学行为，论文结果或可以启发进一步的利用张拉整体单元设计更为复杂的张拉整体网架、张拉整体超材料或极材料。

基于该部分工作撰写的学术论文已发表在航空航天和力学领域著名期刊《AIAA Journal》、《International Journal of Solids and Structures》上。论文列表如下：

- Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen. Complementarity framework for nonlinear analysis of tensegrity structures with slack cables. *AIAA Journal*, 2018, 56(12):5013-5027.
- Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, et al. Investigation of strut collision in tensegrity statics and dynamics. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 167: 202-219.

三、综合能力



学位论文综合采用了多体动力学和有限元方法对张拉整体结构中的非线性、非光滑现象的动力学建模和求解问题进行了研究。研究思路极具交叉性、多学科性。反映出了作者熟练掌握多体动力学，结构动力学，有限元分析，非光滑力学分析等基础理论知识。论文作者调研了大量的文献，凝练出了目前张拉整体结构研究的科学性难点问题。论文研究内容丰富、工作量大，交叉性强，多篇论文发表在力学、航天、机械等领域著名期刊，体现了作者具有很强的分析问题和解决问题的能力。

论文作者目前从事博士后研究工作，致力于将学位论文取得的创新性成果进行进一步拓展，以发挥工程实用价值。具体的技术路线是将相关理论成果应用在机器人、特别是连续型仿生软体机器人/机械臂的设计、分析上。论文作者以前述研究工作为基础申请并获批国家自然科学基金青年项目和博士后面项目各1项。项目目前处于实施阶段，已基于张拉整体概念设计了仿生连续型软体机械臂，并搭建了相关的试验平台。利用学位论文的理论成果和分析程序成功地实现了对仿生软体机械臂缠绕、捕获等复杂动力学行为的准确模拟，并和试验进行了初步对比验证。已有的工作表明了学位论文成果的合理性和工程实用性。此外，论文作者还和中山大学航空航天学院吴志刚教授团队合作，双方已就将张拉整体软体机械臂应用于航天在轨组装任务前景进行了探索性研究。在后续的研究中，论文作者将继续以学位论文的研究工作为基础，将重心聚焦于控制和试验上，力争在软体机器人的动力学与控制这一学术前沿课题上取得突破。

以上综合表明，论文作者具有坚实宽广的基础理论知识和系统深入的专门知识，具有很强的独立开展科研工作能力，并具有优秀的综合能力和很大的发展潜力，特推荐其参加中国力学学会优秀博士学位论文的评选。



中国力学优秀博士学位论文推荐表附件材料

1、博士学位论文（共4个附件）

（1）part_1.pdf

（2）part_2.pdf

（3）part_3.pdf

（4）part_4.pdf

2、学位证书（共1个附件）

（1）证书.jpg

3、CSTAM会员证（共0个附件）

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）1.pdf

（2）2.pdf

（3）3.pdf

（4）4.pdf

（5）5.pdf

（6）6.pdf

（7）7.pdf

（8）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0个附件）

7、其他有助于评选的材料（共0个附件）



中国力学学会优秀博士学位论文



2020062090002005642