

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	漂浮与奇特毛细系统的平衡与稳定性分析		
作者姓名	张飞	获得学位所在单位	华中科技大学土木工程与力学学院
答辩日期	2020-05-30	获得学位日期	2020-06-28
二级学科	流体力学	论文涉及研究方向	多相界面流体力学、线性稳定性理论
导师	周新平	导师研究方向	多相界面流体力学
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	王琳	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.	F. Zhang, X. Zhou*. General exotic capillary tubes. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 885: A1	5.	
2.	F. Zhang, X. Zhou*. Capillary surfaces in and around exotic cylinders with application to stability analysis. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 882: A28	6.	
3.	F. Zhang, X. Zhou*, C. Zhu. Effects of surface tension on a floating body in two dimensions. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 847: 489 – 519	7.	
4.	X. Zhou, F. Zhang*. Bifurcation of a partially immersed plate between two parallel plates. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 817: 122 – 137	8.	

论文的主要创新点及学术影响:

论文针对几种典型的毛细漂浮现象和奇特毛细现象开展了系列理论研究，得到了毛细作用下漂浮物体稳定性以及界面稳定性条件。主要创新点为：

（1）提出了考虑表面张力的多浮体漂浮现象的力学简化模型，可直接确定浮体间横向毛细力的大小，发现了浮体平衡位置的分岔现象，并以此判定其稳定性；

（2）基于变分原理，建立了毛细作用下一般截面浮体的静力学模型，可获得任意截面形状浮体的平衡位置及其稳定性，揭示了表面张力作用对竖直稳定性和旋转稳定性的影响机制；

（3）发现了两种新的“奇特”毛细构型，得到了确定“奇特”毛细构型的数学模型，并以此发展了一种判定毛细界面稳定性的新方法，避免了求解雅可比方程时的困难。

研究成果在流体力学顶级期刊JFM（4篇）上发表，研究内容被国内外同行关注和正面引用，得到同行审稿人的较好评价，并被长期跟踪研究。



推荐意见: (不超过300字)

该论文从能量平衡角度研究了两类典型毛细现象中的平衡与稳定性问题，即毛细漂浮现象和奇特毛细现象，显示了经典力学理论在毛细静力学中的有效性，为解决毛细现象中的稳定性问题提供了新的思路和方法。研究成果在界面流体力学的基础理论方面具有重要学术创新性，而且对于微纳流控等相关领域具有理论指导意义。论文主要结果在流体力学国际顶级期刊JFM发表论文4篇。论文工作充分说明该生具有扎实的理论和专业基础知识，独立进行科学研究的能力强，对所研究的问题有深入的了解和综合分析能力。强烈推荐该文参评中国力学学会优秀博士论文。

(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1 (签名)：郑晓静

电话：0931-8914560

电子邮箱：xjzheng@xidian.edu.cn

推荐人2 (签名)：许春晓

电话：010-62780576

电子邮箱：xucx@tsinghua.edu.cn

推荐人3 (签名)：倪明玖

电话：010-69671689

电子邮箱：mjni@ucas.ac.cn

推荐人4 (签名)：黄宁

电话：0931-8914569

电子邮箱：huangn@lzu.edu.cn

推荐人5 (签名)：王琳

电话：15827273750

电子邮箱：wanglindds@hust.edu.cn



博士学位论文综合介绍材料

推荐单位需针对与参评博士学位论文内容直接相关的情况进行介绍，可自由撰写对参评有益的内容，也可以参考以下几方面进行介绍。

一、选题意义：

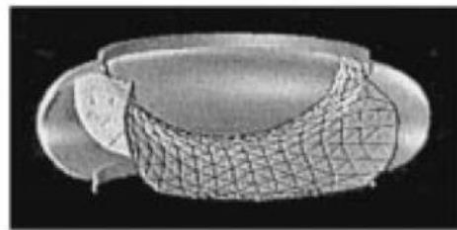
1. 论文选题的理论意义及实用价值

毛细现象在自然界中广泛存在，例如细管中的毛细上升，荷叶上水珠的形成以及水黾在水上行走与弹跳等。同时，毛细现象在工业应用中也十分重要，如矿物浮选、镜片防雾和水上机器人设计等。随着空间技术和微流体领域的蓬勃发展，人们遇到了越来越多的微重力和小尺度条件下的毛细现象，为理解这类现象，对毛细力学的深入研究也日益迫切。

毛细界面的平衡与稳定性作为毛细力学领域内的经典问题，与流体力学、界面化学以及微分几何等学科联系紧密，一直备受广大学者的关注。从数学角度来看，毛细界面的平衡与稳定性问题可以简单表述为“什么样的界面形状会使得系统的总势能极小化”，这个问题看似简单却非常复杂。即便是在极端简化条件下，研究该问题也相当困难。例如，在无体积力和压力约束情况下，平衡的毛细界面形状为极小曲面，即曲面上的平均曲率处处保持为零。研究给定边界的极小曲面性质称为 Plateau 问题，而直到 20 世纪极小曲面的存在性和正则性才被数学家证明。在工业应用或是自然现象中，往往情况更加复杂，毛细界面的平衡与稳定性问题也会变得更加复杂并且求解更加困难。



(a)



(b)

图 1, (a) 漂浮在水面上的微小物体会在表面张力作用下聚集，称为麦片圈效应；(b) 奇特毛细管内毛细界面呈现非轴对称形状，称为毛细界面的对称性破缺。

由此可见，相关毛细理论的发展并不十分完善，尤其是与其它物理现象的耦合，例如麦片圈效应和奇特毛细容器中的对称性破缺行为（图 1）。如何理解广泛存在的毛细现象，总



结提炼出新的理论，并运用理论成果应用于实际，已经成为当前一个亟待解决的问题。针对毛细漂浮现象和奇特毛细现象的基础科学研究不仅可以深化人们对自然的认知和理解，具有重要的学术价值；同时可也为微纳流控系统的优化设计等工程应用提供新思维、新原理和新方法，具有鲜明的工程应用背景。

2. 对本学科及相关领域的综述与总结

(1) 毛细漂浮现象

毛细漂浮现象是毛细尺度内的微小物体在表面张力作用下的漂浮行为。根据浮体尺度大小不同，毛细漂浮现象可以细分为小尺度毛细漂浮和中尺度毛细漂浮。当浮体大小远小于毛细尺度时，表面张力作用占主导地位，重力作用忽略不计，称之为小尺度漂浮，在界面与胶体化学中应用广泛；当浮体大小与毛细尺度相当时，毛细作用和重力作用相当，此时水面会出现变形，可以提供额外回复力使得较重的浮体漂浮在水面之上。

对于小尺度漂浮现象，由于重力作用可以忽略不计，可以认为浮体是被俘获到毛细界面上，所以又称为毛细俘获现象。对于单个浮体情形，Raphael 等人通过四顶点定理证明了一般二维凸柱体至少有四个平衡位置。这一结果启发了人们思考是否能存在无数个平衡位置的非圆柱形浮体。Gutkin 找到了满足任意朝向都是平衡位置的非圆柱浮体，并将上述浮体形状与数学中的台球问题联系起来。当浮体形状变得复杂或润湿性不均匀时，即各向异性浮体，在毛细作用下，吸附在水面上的各向异性浮体会使水面变形，它周围的毛细界面形状可以通过求解 Young-Laplace 方程来确定。在多浮体的系统中，毛细界面变形会使浮体间产生毛细相互作用，即横向毛细力，从而导致毛细自组装行为。由于浮体的几何形状复杂，难以求解 Young-Laplace 方程，一般采取极小化总势能来确定界面形状。

对于中尺度漂浮现象，研究者们最初关注较重的物体漂浮在水面上的力学机理。研究者发现是表面张力能提供了额外的回复力，并证明了回复力的大小等于毛细界面排开水的所受的重力。然而，上述结论对于计算回复力帮助不大，这是因为计算毛细界面排开水的体积通常比直接计算回复力更加复杂。计算由表面张力作用产生的力通常有两种方法，包括力法和能量法。这两种方法在数学上是等价的，但是适用场景有所不同，力法更加适合接触线很容易计算的情形，而能量法适用于构型更加复杂的情形，核心问题都在于确定毛细界面的形状。然而，绝大多数情形下，毛细界面形状的确相当困难，其存在性和唯一性都在理论和计算上都存在极大困难。因此，对于中尺度漂浮现象的研究还仅仅停留在少数几种简单构型上。

截至目前，关于毛细漂浮现象研究工作已经相当普及，在众多学者的努力下，已经取得了丰硕的研究成果。然而，在毛细漂浮现象的现有研究中，大都只关注两浮体的毛细漂浮现象和简单形状浮体，而关于多浮体（多于两浮体）和复杂形状浮体的毛细漂浮现象的研究较少，有待进一步探索。

(2) 奇特毛细现象

毛细现象是指液体在狭窄通道内部，在表面张力作用下，使液体在不需施加外力的情况



下，自发流向狭小通道内的现象。当考虑静力学平衡时，毛细爬升高度一般可以通过管的半径和壁面润湿性确定。然而，数学家发现了一种特殊形状变半径圆管，使得毛细爬升高度无法确定（即爬升高度存在无穷多个且连续分布），这种现象被形象地称为“奇特（exotic）毛细现象”。

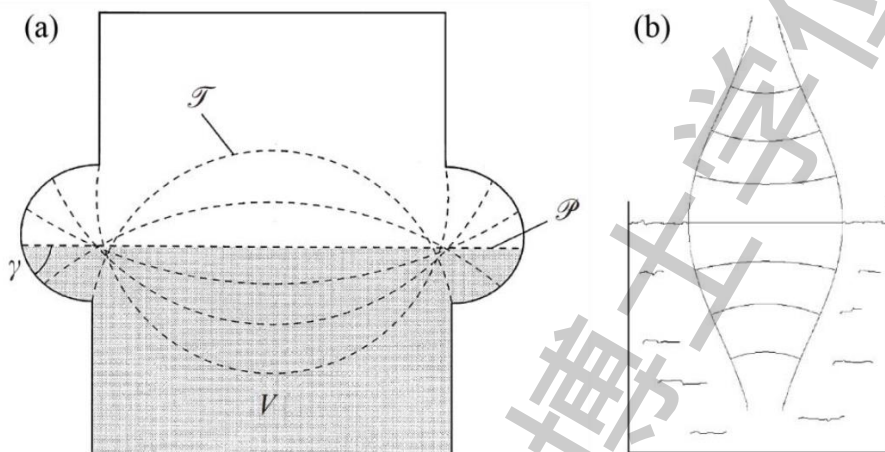


图 2, (a)奇特毛细容器和(b)奇特毛细管

奇特毛细现象可以分成两种情况讨论，第一种是体积约束情况，是指在一个特殊形状的轴对称容器（称为奇特毛细容器，如图 2a 所示）中有无穷多个且连续分布的轴对称毛细界面，其中任意毛细界面包围的液体体积是恒定的，所以被称为体积约束情况；第二种是压力约束情况，是指在一个特殊形状的轴对称管（称为奇特毛细管，如图 2b 所示）中有无穷多个且连续分布的轴对称毛细界面，其中液体的压力在固定高度是给定的，所以被称为压力约束情况。

Gulliver 等人最早研究了无重力条件下的接触角为 90 度的奇特毛细容器，并得到了该奇特毛细容器形状的解析表达式。Finn 研究了一般情形下的奇特毛细容器，并建立了确定奇特毛细容器形状的数学模型。他还发现奇特毛细容器中的轴对称毛细界面都是不稳定的，也就是说在轴对称的奇特毛细容器中会出现非轴对称毛细界面，即对称性破缺现象。该奇特现象在太空实验中得到了证实，随后得到了理论证明和数值验证。受到奇特毛细容器的启发，著名数学家 Wente 提出了一种特殊的变半径的轴对称毛细管，当奇特毛细管置在水中合适的高度时，管中会存在无穷多个且连续的轴对称毛细界面。结果显示，与奇特毛细容器不同的是，奇特毛细容器中的轴对称毛细界面是稳定的，即奇特毛细管中不会出现非轴对称毛细界面。Wente 还证明了提高管的位置会使得管中的水全部排出，而降低管的位置会使得管中充满水。总而言之，奇特毛细现象是采取一种特殊的固面形状使毛细界面的平衡状态无穷多且连续分布的现象。

在奇特毛细现象的研究中，大都只关注体积约束下的奇特毛细现象，针对压力约束下的奇特毛细现象的研究还很少，仅提出了一种奇特毛细管，是否存在其它奇特毛细构型是备受关注而又悬而未决的关键科学问题。



二、成果创新性：

该论文从能量平衡角度研究了两类典型毛细现象中的平衡与稳定性问题，即毛细漂浮现象和奇特毛细现象，显示了经典力学理论在毛细静力学中的有效性，为解决毛细现象中的稳定性问题提供了新的思路和方法。研究成果在界面流体力学的基础理论方面具有重要学术创新性，而且对于微纳流控等相关领域具有理论指导意义。本文创新点总结如下：

(1) 提出了多浮体毛细作用三平行板简化模型，得到了五种不同类型的力位移曲线和八种类型分岔图，揭示了中间板的平衡稳定性机制。

(2) 首次建立了一般截面浮体的毛细漂浮现象的力学模型，揭示了表面张力作用对其竖直稳定性和旋转稳定性的影响机制。

(3) 发展了三种以横截面曲率分类的奇特毛细柱，提出了正/负重力下的广义奇特毛细管的概念，建立了相应的数学模型，提出了一种判定毛细界面稳定性的新方法。

论文工作在流体力学国际顶级期刊 *J. Fluid Mech.* 发表 4 篇论文。论文发表以来，受到国内外同行关注，相关研究成果被世界著名的毛细静力学专家、美国斯坦福大学的数学家 Robert Finn 教授邀请，申请人在国际会议 7th Int. Conf. on Mathematical Modeling in Physical Sciences (2018 年，莫斯科) 的 Mathematical Theory of Capillarity 专题研讨会上作了“Featured Lecture”。

三、综合能力：

论文研究内容涉及多相流体力学、理论力学、微分几何和数学分析等多学科交叉领域，具有较高的挑战性和创新性。论文基于水静力学-变分原理-线性稳定性理论-谱理论等相结合的理论框架，针对几种典型的毛细漂浮现象和奇特毛细现象开展了系列理论研究，要求作者熟练掌握和应用水动力学、微分几何和多相流体力学等基础理论和专业知识。论文结构严谨，表述清晰，工作量和难度大；获得了论文答辩委员会评审专家高度评价，一致认定这是一篇优秀博士学位论文。论文工作表明作者具有坚实的理论基础和宽广的专业知识，对所研究的问题有深入的了解和综合分析能力，已具备独立进行科学研究的能力。



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2个附件）

（1）博士学位论文_部分1.pdf

（2）博士学位论文_部分2.pdf

2、学位证书（共1个附件）

（1）学位证书-张飞.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5个附件）

（1）论文首页.pdf

（2）JFM1封面和目录.pdf

（3）JFM2封面和目录.pdf

（4）JFM3封面和目录.pdf

（5）JFM4封面和目录.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）

