

## 主编按语

# 河流的新航道——应用数学与力学的学科再定向\*

卢天健

(南京航空航天大学, 南京 210016)

(本刊编委卢天健来稿)

**摘要:** 应用数学与力学已经进入一个必须重新辨明学科方向、研究重心与办刊取向的阶段。今天的困难,不是没有方向,而是方向太多;不是没有新词,而是新词太多,以至于主流与支流、河床与浪花越来越容易被混淆。本文以“河流的新航道”为隐喻,讨论数智时代应用数学与力学为何需要重新定向、应当朝哪里定向、又应当如何组织这种定向。文章认为,对《应用数学和力学》而言,真正的落脚点始终应当是力学对象、力学问题与力学规律;应用数学的重要性,不只是体现在为抽象形式与一般方法的推进,更在于它能够面向真实力学问题,提供建模、分析、计算、反演、优化、不确定性量化和数据同化等可信方法支撑。真正值得持续布局的新航道,不应只是若干热点对象的并列、罗列,而应首先回到力学的基本变量、基本关系、基本边界与基本方法之上,重建“力学基础问题与可信方法体系”这一总纲。在这一总纲下, AI for Mechanics 代表方法重组航道,从超材料走向智能超结构系统代表结构对象拓展航道,非局部理论与多场耦合代表理论基础重构航道,从生物力学到生命力学代表生命对象与机制整合航道。4 条航道并非彼此孤立,而是在复杂工程问题与极端力学这两个试验场中不断交汇、并流和接受检验。需要强调的是,真实需求不能替代自由探索和原始创新;更准确地说,基础问题提供河床,自由探索开辟源头,真实需求暴露边界,复杂系统检验成色。基于这一判断,本文提出《应用数学和力学》应在保持开放交叉视野的同时,明确以力学基础问题和复杂工程问题为主线、以应用数学提供可信方法支撑的办刊定位,并通过专题组织、问题链扶持、方向研判与共同体塑造,主动成为新航道的“水文测绘者”。

**关键词:** 应用数学; 力学; 学科再定向; 力学基础问题; 可信方法体系; AI for Mechanics; 智能超结构; 非局部理论; 生命力学; 极端力学

**中图分类号:** O3      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.21656/1000-0887.472008

## The River's New Channels: Reorienting Applied Mathematics and Mechanics

LU Tianjian

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R. China)

(Contributed by LU Tianjian, Member of the Editorial Board of AMM)

**Abstract:** Applied mathematics and mechanics have entered a stage at which their disciplinary direction, re-

\* 收稿日期: 2026-05-13; 修订日期: 2026-05-14

作者简介: 卢天健(1964—),男,教授,博士,博士生导师(E-mail: tjlu@nuaa.edu.cn).

引用格式: 卢天健. 河流的新航道——应用数学与力学的学科再定向[J]. 应用数学和力学, 2026, 47(5): 529-540.

search priorities, and journal orientation must be re-examined. The difficulty today does not lie in the lack of directions, but in the excessive abundance of them; not in the absence of new concepts, but in their inflation, to the point that mainstreams and tributaries, riverbeds and waves, are increasingly blurred. Using the metaphor of “the river’s new channels,” this editorial discusses why applied mathematics and mechanics must be reoriented in the intelligent age, where this reorientation should lead, and how it should be organized. It argues that, for *Applied Mathematics and Mechanics*, the real point of departure must remain mechanical objects, mechanical problems, and mechanical laws. The importance of applied mathematics lies not only in advancing abstract formulations and general methods, but also in providing trustworthy methodological support for real mechanics problems through modeling, analysis, computation, inverse identification, optimization, uncertainty quantification, and data assimilation. Convincing new channels should therefore not be reduced to a catalog of fashionable topics, but must first return to the basic variables, relations, boundaries, and methods of mechanics, and rebuild a general framework of fundamental problems and trustworthy methodologies. On this basis, AI for Mechanics represents a route of methodological reorganization, the transition from metamaterials to intelligent metastructural systems represents a route of structural-object expansion, nonlocal theory and multiphysics coupling represent a route of theoretical reconstruction, and the transition from biomechanics to life mechanics represents a route of life-object and mechanism integration. These four routes are not isolated lines, but interacting channels that converge and are tested in complex engineering problems and extreme mechanics. Real-world needs should not replace free exploration and original innovation. Rather, fundamental problems provide the riverbed, free exploration opens the sources, real-world needs expose the boundaries, and complex systems test the depth and reliability of emerging channels. The journal should therefore remain open to interdisciplinary expansion while making clear that its core orientation lies in mechanics problems—especially fundamental and complex engineering problems—supported by trustworthy mathematical methods. It should act not only as a publication platform, but also as a “hydrological surveyor” of emerging channels by organizing focused themes, supporting problem-chain research, and helping to shape a more coherent scholarly community.

**Key words:** applied mathematics; mechanics; disciplinary reorientation; fundamental problems of mechanics; trustworthy methodologies; AI for Mechanics; intelligent metastructures; nonlocal theory; life mechanics; extreme mechanics

## 0 引言:方向过多时,更需要辨认河床

《桥仍在,河向前》<sup>[1]</sup>讨论的是根脉和方向感;《科学研究必须坚持“四性”》<sup>[2]</sup>讨论的是评价研究的基本尺度;《问题为王》(即将发表)讨论的是研究从哪里开始;《创新为王》(即将发表)讨论的是研究如何真正向前。在这些讨论之后,还有一个更大的问题摆在我们面前:当问题越来越复杂,创新越来越多样,工具越来越强大,整个共同体究竟应当往哪里去。

我之所以写《河流的新航道》,并不是因为今天“新方向”太少,而恰恰是因为它们太多:人工智能、科学智能、数字孪生、生命系统、脑机接口、极端环境、智能结构、跨尺度、多场耦合、仿生、超结构、智能材料……几乎每一个词单独拿出来,都能画出一张很像样的路线图。问题在于:热闹并不等于主流,增长并不等于改道,局部起伏也不等于河床重塑。一个学科若没有能力在这些变化中重新辨认主轴,就很容易在表面活跃中失去真正的方向感。

对《应用数学和力学》而言,这一点尤其尖锐。因为“应用数学”和“力学”这两个词并列写在刊名里,很容易让人误以为这只是两个板块的简单相邻:数学做数学的事,力学做力学的事,彼此并列即可。然而,期刊的宗旨却不是这样。对本刊而言,真正的落脚点应当始终是力学对象、力学问题与力学规律。应用数学的重要性,不只是体现为抽象形式与一般方法的推进,更在于它能够面向真实力学问题,提供建模、分析、计算、反演、优化、不确定性量化和数据同化等可信方法支撑。这个判断不是要降低应用数学的地位,而是要把应用数学放回本刊最需要、也最能显示其力量的位置:在真实对象、真实边界和真实验证中支撑力学发展。

我并不主张把学科方向简单交给需求来规定。若把“需求牵引”理解为项目牵引、任务牵引和短期结果牵

引,确实会压缩自由探索空间,也会损害原始创新.真正应当坚持的,是基础问题牵引方向,真实需求暴露边界,可信方法连接二者,复杂系统检验成色.许多原始创新并不是从明确任务书中直接长出来的,而是来自长期自由探索、基础概念重构、数学方法积累和对经典理论边界的持续追问.重大需求的价值,不在于替代基础研究,而在于把基础问题逼得更尖锐,把理论边界暴露得更清楚,把方法短板检验得更严格.

因此,这篇文章不准备再做一份“前沿热点目录”.我更想追问的是:什么在真正改写河床?是对象本身变了,还是方法能力变了?是真实需求把边界推开了,还是工具革命把研究流程推快了?是交叉真的长出了新的机制,还是只把几个流行概念叠在了一起?这些问题若不问清楚,所谓“新航道”就很容易沦为一张漂亮而轻浮的地图.

为了把“新航道”讲清楚,还必须先把几组最容易混淆的概念摆正.今天围绕力学与交叉、力学与智能、力学与生命等方向,常见的表述至少包括 Mechanics of X、X-Mechanics、AI for Mechanics、Mechanics for X 与 Mechano-X.这些说法并不只是语序不同,它们背后对应着不同的对象关系、不同的学科角色和不同的推进力度.若不先把这些概念的层次关系辨明,后面关于新航道的讨论就很容易停留在术语表面,而不能真正进入对象、方法和学科角色共同重写这一层.

## 1 应用数学与力学:不是并列摆放,而是围绕真实问题重建接口

从学科史看,数学与力学本来就不是两条毫无关系的河.近代科学奠基阶段,二者曾以高度交织的方式共同推进自然规律的揭示;后来随着现代学科体系不断分化,数学更强化其抽象性、一般性和形式化,力学则更凸显其对象性、机制性和工程性,于是二者逐步分化为既亲缘深厚,又现实分工明确的学术共同体<sup>[3-7]</sup>.

今天重新讨论应用数学与力学的再定向,不是要取消这种分工,也不是要把应用数学压缩成狭义工具箱,而是要在复杂系统、重大需求和数智技术共同推动的新条件下,重建二者围绕真实问题的有效接口.对《应用数学和力学》而言,力学对象、力学问题和力学规律是刊物的主航道;应用数学则通过建模、分析、计算、反演、优化、控制、不确定性量化和数据同化等方法,为这一主航道提供可解释、可验证、可推广的支撑.

这层关系需要说清楚:应用数学的价值不只在形式复杂本身,也不只在抽象方法本身,而在于它能否进入真实力学对象的变量选择、边界表达、模型构造、参数识别和结果验证之中.一个数学方法如果能够揭示力学机制、提高预测可信度、改善反问题可辨识性、支撑工程决策,它就不是外在工具,而是学科推进的重要力量.反过来,一个看似精巧的方法如果始终不进入对象、边界和验证,就难以构成本刊所期待的主航道.

因此,本刊要坚持的不是“重力学,轻数学”,而是“以力学问题牵引应用数学,以应用数学支撑力学发展”.力学提出对象、边界、机制和工程约束,应用数学提供结构化表达、求解能力、误差分析和可信推断.二者的关系不是并列摆放,也不是简单附属,而是在真实问题中形成相互校正、相互支撑的接口.只有把这层接口建稳,刊物的方向判断才不会被热词牵引,也不会学科分化中失去自己的中心.

今天不少工作之所以看上去“方法很强”,却没有真正进入学科主流,往往不是因为方法本身没有价值,而是因为它没有落到对象上.没有对象,边界就轻;没有边界,机制就虚;没有机制,验证就松;验证一松,所谓方向判断就会越来越像传播判断,而不像学科判断.问题不在于方法能不能更新,而在于方法更新之后究竟落在哪里.落在对象之中,它可能重写河床;附着在热词之上,它多半只能制造浪花甚至涟漪.

应用数学与力学的接口,也不应被理解为一单向通道.并不是力学给出问题,应用数学只负责求解;也不是数学给出方法,力学只负责套用.真正高水平的交叉,往往发生在双向逼近之中:复杂力学对象提出新的数学问题,新的数学结构又反过来改变力学对象的表达方式.例如,非局部损伤、相场断裂、多尺度均匀化、随机动力系统、反问题与不确定性量化,并不是简单地把数学工具移植到力学问题中,而是在对象、方程、边界和验证共同变复杂之后形成的新接口.这样的接口越扎实,刊物越能在“应用数学”和“力学”之间形成真正有生命力的学术河道.

## 2 概念秩序:Mechanics of X、X-Mechanics、AI for Mechanics、

### Mechanics for X 与 Mechano-X

在进入更具体的方向判断之前,先把几组相关概念摆清楚,是必要的.否则,“学科再定向”很容易滑回几

个新术语之间的表面切换.表1把这几组概念并列放在一起,就是为了避免这种混淆.Mechanics of X、X-Mechanics、Mechanics for X 与 Mechano-X 并非彼此替代的关系,而是反映了力学在不同交叉层次中的不同角色.其中:AI for Mechanics 属于方法航道概念,主要描述人工智能服务于力学问题;Mechanics for X 强调力学对目标对象的主动赋能;Mechano-X 更进一步,强调力学从解释工具上升为对象组织与跨学科创新的内在驱动力.

表1 数智时代若干相关概念的内涵、方向与学科角色比较

Table 1 Comparison of the connotations, orientations, and disciplinary roles of several related concepts in the digital-intelligence era

概念	基本含义	主导方向	力学角色	典型场景	主要风险
Mechanics of X	研究对象 X 本身的力学行为、规律与响应	从对象到力学解释	分析与解释框架	brain mechanics、skin mechanics、porous-media mechanics 等	容易停留在“对象的力学描述”,未进入更强交叉
X-Mechanics	X 与力学形成交叉场域,力学进入 X 并与其共同发展	力学进入 X, 并发生双向渗透	交叉学科接口	neuro-mechanics、mechano-biology、mechano-medicine 等	容易把若干概念简单并列,形成拼盘式交叉
AI for Mechanics	人工智能服务于力学问题的建模、识别、预测与优化	从 AI 到 mechanics	AI 是方法,力学是落脚点	本构识别、反问题、代理模型、数字孪生、结构优化等	容易把“会算”误当成“已理解”
Mechanics for X	力学主动服务于 X 的设计、调控、诊疗、制造与功能组织	从 mechanics 到 X	支撑与赋能	力学驱动组织工程、器件设计、结构调控等	容易被弱化为“力学应用于 X”
Mechano-X	力学作为重组、塑造和驱动 X 的内在原理,促成新的对象组织方式	从 mechanics 到 X, 并形成更强双向重组	从分析工具上升为组织原则和创新引擎	力学重编程、Mechanomedicine、智能超结构、力学驱动跨学科创新等	容易被误写成更时髦的 X-Mechanics

从表1可以看出,真正重要的不是术语本身,而是力学角色是否发生了改变.若力学只是对对象作外部描述,它更多地停留在 Mechanics of X;若力学进入其他学科并形成交叉接口,它可以发展为 X-Mechanics;若力学进一步参与对象设计、功能调控和系统重组,它才逐步走向 Mechanics for X 乃至 Mechano-X.对本刊而言,判断这些概念是否有学科意义,不能只看名称是否新,而要看它是否提出了新的力学对象、新的基本变量、新的边界条件、新的方程接口和新的验证路径.没有这些实质内容,再漂亮的概念也只是术语翻新;有了这些内容,旧词也可能长出新的河床.

从更深的学科逻辑看,今天力学面对的,并不是一个“旧范式退出一新范式接管”的简单过程,而是一个更复杂,也更真实的重组过程.更准确地说,力学并非简单地从 X-Mechanics 转向 Mechano-X,而是在保持前者持续向纵深发展的同时,后者迅速兴起并成为新的增长极<sup>[3-4]</sup>.前者更多体现为力学作为解释工具、分析框架和方法资源进入不同学科对象之中;后者则进一步强调,力学不仅描述对象,而且主动参与对象的设计、调控和重组.真正发生变化的,不是 X-Mechanics 失效了,而是力学的角色在上移:它正在从“进入别的领域”进一步扩展为“重新组织别的领域”.

因此,对这些概念的辨析,不能停留在线性递进关系上.它们之间不是机械替代关系,而是反映了力学在不同交叉层次中的角色差异:从对象解释,到学科接口,再到主动赋能,最后走向对象组织与系统重构.真正需要把握的,不是术语排列的先后,而是力学是否从“描述对象”进入“定义问题、组织变量、重构系统”的更深层次.概念辨析若能帮助共同体避免把“术语更新”误当作“方向重构”,它就已经发挥了真正作用.

### 3 一个总纲:力学基础问题与可信方法体系

如果把今天反复出现的若干前沿方向看作“新航道”,那么还必须追问:究竟是什么决定了这些航道不是昙花一现的支流,而是可能改变河流走向的主流?我的判断是:关键不在于它们是否足够热门,而在于它们是否回到了力学真正的基础问题.

这里所说的“基础问题”,不是狭义地指教科书上的若干经典方程,而是更广义的基本变量、基本关系、基本边界、基本尺度和基本方法:什么变量最能表征系统状态,哪些守恒律、变分原理与耗散约束仍然有效,局部与非局部的边界如何划定,模型误差与数据误差怎样进入预测,不同层级的结构信息能否被组织成可检验、可推广的理论框架<sup>[5-7]</sup>。

从这个意义上讲,应用数学与力学今天最需要补出的,不是第六、第七个热点方向,而是“可信方法体系”这一中层结构,如表 2 所示。可信方法体系不是单一算法集合,而是贯穿“对象—变量—方程—参数—预测—验证—部署”的方法链。它既要求应用数学提供严密的结构化表达,也要求力学问题提供真实对象、边界条件和验证标准。过去,我们常把应用数学理解为求解工具箱,把力学理解为问题提出者;但面对数据驱动、跨尺度、多场耦合、实时决策和工程部署并存的新局面,这样的分工已经不够,可信方法体系至少应包含 5 个相互衔接的环节:模型建构、参数识别、误差传播、不确定性量化、验证确认与工程部署。它们共同决定一个方向能否从概念走向机制,从局部结果走向可推广理论,从单点展示走向复杂系统应用<sup>[8-14]</sup>。

表 2 面向真实力学问题的可信方法体系

Table 2 Trustworthy methodological system for real mechanics problems

环节	核心问题	应用数学支撑	力学落脚点	主要风险
模型建构	对象如何被变量化、方程化和边界化	建模、变分、算子理论、约束表达	基本变量、控制方程、边界条件、尺度假设	只有形式,没有对象
参数识别	参数能否从实验、仿真或多源数据中可靠获得	反问题、优化、灵敏度分析、可辨识性分析	本构参数、界面参数、损伤参数、传输参数	参数不可辨识或多解
误差传播	模型误差、数据误差如何影响预测结果	数值分析、误差估计、稳定性分析	预测可靠性、尺度传递、边界敏感性	精度看似很高但不可解释
不确定性量化	不确定性如何进入设计、预测和决策	概率建模、Bayes 推断、随机计算	可靠性、安全裕度、服役寿命	只给均值,不给置信度
验证确认与工程部署	模型能否经受实验、工程和极端条件检验	数据同化、数字孪生、模型验证与确认	真实对象、复杂工程、极端环境	会算但不可信,能演示但不能部署

这一体系不能停留在口号上。以 AI for Mechanics 为例,物理约束学习若要真正服务力学,不能只把控制方程写进损失函数,还必须检验边界条件是否合理、守恒关系是否满足、训练数据是否覆盖关键状态、预测误差能否外推到未见工况。本构识别也是一样,神经网络拟合出一条应力-应变曲线并不等于获得了本构规律;只有当参数具有可辨识性,模型满足客观性、稳定性、热力学一致性,并能在不同加载路径下接受验证,它才可能从“拟合工具”进入“力学模型”。

再以生命力学为例,脑组织、血脑屏障、细胞膜-基质-细胞核系统和脑机接口等对象中,实验可测量的往往只是端量:位移、速度、应变场、电信号、温度、灌注量、通透性或功能响应。真正困难的是如何从这些端量反演出具有力学意义的参数,并区分材料参数、几何边界、活体状态、频率依赖、时间历史和模型假设的影响。若没有可辨识性分析和不确定性量化,就很容易把成像量、实验读数或算法输出误认为“真实参数”。这正是可信方法体系在新航道中必须承担的任务。

还要看到,可信方法体系不仅是方法论要求,也是对“方向是否成立”的筛选机制。一个方向如果不能说明对象如何定义、变量如何选择、方程如何封闭、参数如何识别、误差如何传播、结论如何验证,那么它即使看上去“新”,也很难成为真正的新航道。相反,有些方向表面上并不时髦,却能长期稳定地推进基础变量、基本关系和验证标准的重构,这样的工作更有可能改变河床。学科方向的判断,最终不是看概念传播速度,而是看其是否形成可积累、可检验、可传承的问题链。

杨卫《力学基本问题》、胡海岩等《力学工程问题》对今天的讨论仍有直接启发<sup>[5-7]</sup>。前者提醒我们,所谓“基础”不是远离对象,而是回到那些决定对象能否被真正看清的变量、边界和关系;后者则提醒我们,工程中的力学问题不能只在局部求一个漂亮答案,而要放回复杂系统和真实约束中检验。二者合在一起,构成了判断新航道是否站得住的底层尺度:它是否回到了力学基础问题,是否构造了可信方法,是否经受了复杂系

统和真实约束的检验。

因此,本文所说的新航道,并不是由短期需求直接规定的路线,而是在基础问题、自由探索、真实对象和复杂需求之间形成的判断秩序,需求只有在暴露新的变量、边界、尺度和验证难题时,才真正转化为学科问题;自由探索只有在不断追问基本概念、基本关系和方法边界时,才可能孕育原始创新,二者并非相互抵消,而是在可信方法体系中相互校正。

也正因为如此,我更愿意把今天的学科再定向压缩成一句更硬的话:应用数学与力学的新航道,首先不是热点并列,而是“力学基础问题与可信方法体系”的重建,没有这条河床,再热闹的航道都可能只是暂时的支流。

由此,可以形成本文后续讨论的基本框架:以“力学基础问题与可信方法体系”为总纲,以 AI for Mechanics、智能超结构系统、非局部理论与多场耦合、生命力学为 4 条代表性航道,以复杂工程问题和极端力学为检验场,这个框架的重点不在于增加若干方向标签,而在于建立一套判断秩序:先看河床是否成立,再看航道是否有深度,最后看其能否在真实对象、复杂边界和极端条件中经受检验。

## 4 4 条航道:层级定位与内在关系

在“力学基础问题与可信方法体系”这一总纲之下,本文讨论 4 条具有代表性的新航道,详见表 3。这里必须说清楚:这 4 条航道并不在同一层面上简单并列, AI for Mechanics 更偏向方法重组;从超材料走向智能超结构系统,更偏向结构对象拓展;非局部理论与多场耦合,更偏向理论基础重构;从生物力学到生命力学,则更偏向生命对象与机制整合。4 条航道并非平行热点,而是在“力学基础问题与可信方法体系”总纲下形成的不同层级推进路径,其价值不在于概念新旧,而在于能否产生新的对象、新的变量、新的方程接口和新的验证标准,它们的性质不同,但共同指向同一个判断:应用数学与力学的再定向,必须从热词判断转向对象、方法、理论和验证共同构成的学科判断。

表 3 数智时代应用数学与力学新航道的层级定位

Table 3 Hierarchical positioning of the new channels of applied mathematics and mechanics in the digital-intelligence era

航道	层级定位	核心问题	应用数学角色	力学落脚点
AI for Mechanics	方法重组航道	AI 如何改变建模、反演、预测、优化和验证流程	机器学习、反问题、神经算子、数字孪生、不确定性量化	真实力学问题的可解释、可验证、可部署求解
智能超结构系统	结构对象拓展航道	如何从局部功能材料走向轻巧承力、多功能协同结构	多目标优化、拓扑优化、智能设计、可靠性分析	轻量、承载、散热、吸能、减振和极端服役的结构协同
非局部理论与多场耦合	理论基础重构航道	经典局部连续介质理论的边界如何拓展	非局部算子、相场、梯度理论、多场耦合建模与数值分析	尺度效应、损伤演化、界面传递和跨尺度验证
从生物力学到生命力学	生命对象与机制整合航道	力学如何进入活体、多相、含液、时变、功能反馈系统	多尺度建模、端量反演、参数识别、数据同化	对象、剂量、边界、容量、端量和验证闭环

### 4.1 AI for Mechanics:从工具辅助到方法重组

人工智能与力学的深度融合,无疑是当前最活跃,也最容易被说轻的方向,国际学术界对这一趋势反应极快。Bai 等系统梳理了 physics- and data-guided AI frameworks in computational mechanics 的发展脉络,一系列综述又进一步围绕 PINNs、断裂与损伤中的机器学习、深度学习在计算力学中的应用、图神经网络在力学领域的推广、数据驱动本构模型等主题展开,显示出这一方向正在迅速走出“辅助工具”的初级阶段,转向更深层的方法重组<sup>[8-13]</sup>。

但我必须把话说得更硬一点:“AI for Mechanics 若只是把 AI 叠加到力学之上,它至多是一个热闹支流;只有当它真正进入力学问题内部,改变问题链组织、参数识别路径、实验—模型—验证关系以及制造—服役闭环时,它才可能成为主航道的一部分。”这就是为什么我在判断这一方向时,不太在意它用了多少新术语,而更在意它是否真正回到了对象、边界、机制和可信性。

真正值得布局的,不是“AI+力学”这一宽泛写法,而是那些真正改变了力学研究组织方式的工作:物理

约束学习如何嵌入守恒律与边界条件,数据驱动本构如何经受可辨识性检验,神经算子怎样进入多尺度系统预测,数字孪生又如何和误差分析、可靠性评估一起形成可部署闭环<sup>[8-14]</sup>。谁能在这条航道上把这些问题压实,谁的工作才更接近主航道;只把“会算”当成“已理解”,最终只会把河流带向一片热闹的浅滩。

这里尤其要警惕两类倾向。一类是把力学问题降格为数据拟合问题,只追求误差指标下降,却不说明方程、边界、参数和机制是否仍然成立。另一类是把 AI 工具直接包装成“范式变革”,却没有回答模型在外推工况、极端边界、稀缺数据和噪声数据下是否可靠。真正的 AI for Mechanics,应当把 AI 放入力学的约束之中,也把力学放入 AI 的验证之中。只有二者相互校正,方法革命才不会变成工具幻觉。

更进一步看, AI for Mechanics 的价值不在于替代力学判断,而在于扩展力学判断的范围和效率。对于高维参数空间、多尺度结构设计、复杂边界反演和服役状态预测,传统方法往往难以直接穷尽所有可能性; AI 可以帮助我们快速搜索、压缩、识别和预测。但它不能替代对基本变量、控制方程、边界条件和失效机制的判断。AI 给出候选,力学给出约束; AI 提供速度,力学提供方向; AI 扩展探索空间,可信方法体系负责判断哪些结果真正可用。只有在这个意义上, AI for Mechanics 才不是工具热,而是方法重组。

#### 4.2 从超材料走向智能超结构系统:从局部功能到系统协同

第二条航道,在我看来,不应被简单理解为“超材料很热”或“超结构很新”。它真正重要的地方,在于正在把过去偏向局部材料响应的研究,推向更高层级的结构组织。康瑞等<sup>[15]</sup>关于轻巧-承力-功能一体化超结构的综述,已经把这一点讲得很清楚:这一方向的关键,不是只追求某个局部奇异性能,而是如何把轻量、承载、散热、减阻、吸能、振动控制和环境适应性统一压到结构层面。如果说过去很多超材料研究更多停留在“功能点”的惊艳上,那么今天真正值得重视的,是它们能否走向系统协同、工程部署和结构重构。

从国际进展看,这条航道正在快速汇聚。机械生物超材料、可重构机械超材料、智能超表面、AI 赋能的 meta-device 设计与优化等方向,都在说明一个共同趋势:设计对象正在从“材料单元”走向“结构系统”,评价标准正在从“单一功能极值”走向“多功能协同与可部署性”<sup>[16-18]</sup>。对我而言,未来高端装备中的关键对象,不应只是“材料本体”,也不应只是“介质本体”,而是那些轻巧承力、能在极端环境中继续工作、并同时具备热管理、减阻、吸能和环境适应性等多重功能的结构系统。若一个方向能够帮助我们逼近这种对象,它就不是一阵时髦热闹,而是在重写未来结构设计的主河道。

但这条航道也最容易产生泡沫。功能展示太容易吸引注意,工程部署却很难。一个样品做得漂亮,一组图像很震撼,并不等于它已经站住了。真正的难点在于:它能否承受真实边界? 能否进入复杂系统? 能否在多目标权衡中保持稳定? 能否把多功能集成真正变成结构组织原则,而不是功能拼盘? 谁能回答这些问题,谁的工作才更接近真正的新航道。

智能超结构系统也最能体现应用数学与力学的接口关系:一方面,多目标优化、拓扑优化、机器学习、可靠性分析和不确定性量化为复杂结构设计提供了新能力;另一方面,承载、传热、吸能、减振、制造缺陷和服役损伤又不断提醒我们,结构设计不能只在算法空间里完成。算法给出的是候选解,力学给出的是能否成立的边界。只有当候选结构能在真实载荷、真实材料、真实制造和真实服役中站住,智能超结构才真正从图案设计走向结构科学。

这里还应特别强调“结构”二字。未来先进装备中真正关键的,不是某一种孤立材料性能的极值,而是结构在复杂环境中的整体表现。轻巧承力结构、热管理结构、吸能结构、减振结构、极端环境防护结构,最终都要面对同一个问题:在有限质量、有限空间、有限能耗和有限可靠性裕度下,如何组织材料、孔隙、界面、拓扑和功能路径。超材料提供了新的局部单元,智能设计提供了新的搜索能力,但只有上升到结构系统层面,才能真正进入高端装备的设计主线。

#### 4.3 非局部理论与多场耦合:重写连续介质边界

第三条航道,看上去不像 AI 那样显眼,也不像生命交叉那样新鲜,但在我看来,它在更深层上改写的是力学本体。因为它直接接触一个基本问题:经典连续介质框架的边界究竟在哪里。

过去很多力学问题之所以能被处理得较为清楚,是因为我们默认局部作用、单场主导、尺度分离和近似均匀等假设足够成立。但今天越来越多对象不再允许这种轻处理。裂纹扩展、损伤局部化、复杂渗流、非均匀

多孔介质、大变形地质体、软物质界面、复合材料层间损伤、微纳结构尺度效应以及热-力-化-电多场竞争等,都在逼我们承认:原来的连续介质边界开始松动了。于是,近场动力学、相场方法、非局部损伤、梯度理论、非局部渗流、多场耦合与跨尺度统一刻画,正在从若干看似分散的支流,汇聚成一条更深的航道<sup>[19]</sup>。

我尤其看重这一航道,是因为它并不是“多加几个变量”的表面扩展,而是在追问:什么才是合适的基本变量?什么样的边界才真正成立?什么时候局部化处理会误伤主导机制?什么时候尺度之间的相互牵动已经不能被简单平均?这些问题一旦被逼出来,它对应用数学和力学的要求都会同步提高。数学上,要回答非局部算子的稳定性、收敛性、边界条件表达、反问题可辨识性和数值实现可靠性;力学上,要回答非局部长度、损伤演化、界面传递、多场耦合项和实验可验证性究竟意味着什么。

这一航道的典型对象并不少。断裂问题中,裂纹尖端奇异性与损伤区演化要求超越传统局部场描述;复合材料和陶瓷基复合材料中,基体裂纹、纤维-基体界面、层间脱粘与热传导路径会相互改变;多孔介质中,孔隙结构、流体迁移、固体骨架变形和温度场之间很难被单一等效参数完全吸收;极端环境下,热冲击、氧化、烧蚀、相变和结构承载更是共同决定服役边界。所有这些问题都说明,非局部理论与多场耦合并不是形式主义,而是在复杂对象面前重新寻找基本变量、边界条件和验证路径。

本刊在这一航道上应特别重视三类工作:第一,能够把非局部理论、相场方法、梯度理论或多场耦合模型与明确力学对象相连接的工作;第二,能够说明模型参数如何测量、反演或验证的工作;第三,能够进入复杂工程问题、极端服役场景或跨尺度设计链条的工作。相反,那些只把局部方程改写为非局部形式、只把单场模型扩展为多场变量,却没有说明特征长度、耦合项、参数来源和验证路径的工作,虽然形式新,却未真正触到河床。非局部与多场耦合的价值,不在于方程更复杂,而在于它是否真正解决了局部理论无法解释的对象、边界和失效问题。

这一点对应用数学同样提出了更高要求。非局部算子、多场耦合项、跨尺度参数和界面条件,不是把方程写得更长就能成立。它们必须回答适用性、稳定性、收敛性、尺度一致性和实验可识别性问题。没有数学上的结构约束,非局部模型可能变成任意调参;没有力学上的对象约束,多场耦合可能变成变量堆砌。真正有价值的理论基础重构,必须同时经受数学严密性和力学真实性的双重检验。

#### 4.4 从生物力学到生命力学:从工具性应用走向机制整合

第4条航道,是我近年来感受尤其深的一条。过去很多关于生物体、组织或器官的力学研究,更多是把力学当作一种解释工具:某个组织为什么会变形,某个器官为什么会失效,某种生理现象能不能从应力、应变、流动或传热上得到说明。这样的工作当然重要,但若停留在这里,力学与生命科学的交叉就很容易停留在工具性应用层面。

我越来越清楚地意识到,真正值得长期布局的,不是“生物力学题材越来越多”,而是生命系统正在逼着力学进入过去没有充分展开的复杂对象内部。细胞机械生物学、Mechanomedicine、生物热-力-电生理耦合学,都不是把力学借到生命里做一层描述,而是在逼着力学面对更复杂的边界、更细的尺度竞争、更强的时变性和更难的功能响应<sup>[20-22]</sup>。真正重要的,不是“力学也能做生命了”,而是生命对象正在迫使力学发展新的机制整合能力。

因此,我理解的生命力学,不是把所有生命现象都纳入力学话语,也不是给传统生物力学换一个更大的名字。它更应当指向这样一类问题:在细胞、组织、器官和系统层面,力、变形、流动、传热、电生理、界面、代谢和结构重构如何共同决定生命功能;这些过程中的力学变量如何定义,力学剂量如何传递,边界条件如何改变,功能端量如何测量,模型预测又如何经受实验、临床或工程验证。

这条航道已经有若干具体对象。脑组织与脑机接口中,灰质、白质、脑脊液、血管周围间隙、细胞外基质、血脑屏障和植入界面共同形成多尺度、多相、多场耦合系统,单纯把脑当作普通软材料显然不够;细胞膜-基质-细胞核系统中,基质刚度、细胞骨架、核膜、染色质结构和分子转运共同改变疾病、发育与再生过程;皮肤、牙、血管和神经组织中,热-力-电-流耦合并不是附加效应,而可能直接影响感觉、损伤、修复和功能维持。这些对象说明,生命力学不是生物医学问题的简单力学化,而是要求力学在活体、含液、多相、时变和功能反馈条件下重新组织变量、剂量、边界和验证。

也正因为如此,我不赞成把这一航道写成毫无边界的“生命力学万象图”。真正值得支持的,是那些在生命对象内部抓住真实机制、建立可验证命题,并且能够让力学与实验、临床或系统功能评价形成闭环的工作。不能把所有生物医学问题都称为生命力学;只有当力学变量、力学剂量、边界条件和验证闭环成为核心问题时,它才真正进入生命力学。谁能把对象说清、变量立住、剂量讲明、边界压实、验证闭合,谁的交叉才不是拼盘式组合,而是在形成新的学科骨架。

生命力学尤其能提醒我们,基础研究和真实需求并不是彼此排斥的两端。生命健康、脑机接口、组织修复和医疗器械当然具有强烈需求背景,但若只按应用场景罗列,就难以形成学科贡献。真正重要的是,这些对象迫使力学重新思考活体边界、含液多相结构、时间依赖参数、界面传递、功能反馈和端量反演。也就是说,生命需求并不是直接规定理论,而是不断暴露现有理论解释不了的新问题。能不能从这些需求中抽象出基础问题,才决定生命力学能走多远。

#### 4.5 航道交汇与并流:新方向不是 4 条平行线

还有一点不能忽略:上述 4 条航道并不是 4 条互不相干的平行线。现实研究中,它们往往在同一个复杂对象中交汇,并在交汇处产生真正有分量的新问题。

例如,智能超结构系统越来越离不开 AI for Mechanics。多目标优化、生成式设计、代理模型和数字孪生可以显著扩展结构设计空间,但若没有承载、传热、振动、冲击、疲劳和制造约束的力学校正,AI 生成的结构很可能只是计算空间中的漂亮图案。反过来,智能超结构又为 AI for Mechanics 提供了最好的试验对象:变量多、约束硬、目标冲突明显,正适合检验 AI 是否真正能够服务复杂力学设计。

生命力学同样离不开非局部理论、多场耦合和可信反演。脑组织、细胞核、细胞外基质和血脑屏障等对象中,局部应力-应变关系往往不足以解释功能响应,热、流、电、化学和结构重构之间也难以简单拆开。若再叠加 AI 方法,就会出现更深的问题:机器学习能否帮助识别复杂生命系统中的主导变量?能否从多模态数据中反演具有力学意义的参数?能否在机制边界不清的情况下保持预测可信?这些都不是单一航道能够回答的问题。

极端环境下的智能结构更是典型的并流问题。高温、冲击、辐照、氧化、疲劳和制造缺陷共同作用时,局部材料响应、非局部损伤演化、多场传输路径和 AI 辅助预测往往同时出现。此时,所谓新航道已经不再是某个方向单独前进,而是方法、对象、理论和验证共同组织成新的问题链。

因此,4 条航道的真正意义不在于给学科贴上 4 个标签,而在于帮助我们建立一套判断秩序:哪一类问题主要需要方法重组,哪一类问题主要需要对象拓展,哪一类问题主要需要理论基础重构,哪一类问题主要需要生命机制整合;更重要的是,什么时候这些航道已经开始交汇,什么时候交汇之后形成了新的主流?能够识别这种交汇与并流,才是真正的方向判断。

## 5 两个试验场:复杂工程问题与极端力学

如果说前面的 4 条航道更多回答“往哪里走”,那么复杂工程问题与极端力学更像是在回答“走不走得通,站不站得住”。

把复杂工程问题和极端力学称为试验场,并不是说所有原始创新都必须从工程需求中直接推出。力学史上的许多重要突破,往往首先来自对基本概念、基本变量、基本关系和数学结构的深层追问,然后才在工程和技术发展中显示出巨大力量。复杂工程问题的特殊意义,不在于替代基础研究,而在于把基础理论的适用边界、缺口和新生长点暴露出来。它不是基础研究的上级命令,而是基础研究的一面硬镜子。

我不把复杂工程问题理解为额外再加的一条热点,而更愿意把它看作检验新航道是否真正扎根真实对象、工程边界和系统约束的试验场。谁能在复杂系统中识别关键关联、提出主导问题、把结果重新嵌回系统里检验,谁的航道才不是纸上航道。这里真正重要的,不是项目越大越好,而是问题链是否真实、边界条件是否明确、方法体系是否可信、结果能否回到工程系统中经受检验<sup>[6-7]</sup>。在这个意义上,复杂工程问题不是理论的尾声,而往往是理论重新长出来的地方。

复杂工程问题尤其能够检验 4 条航道的真实含金量。AI for Mechanics 若不能进入制造—实验—服役—

维护的闭环,就容易停留在代理模型演示;智能超结构若不能承受承载、热管理、振动、冲击、疲劳和制造约束的共同检验,就容易停留在局部功能展示;非局部理论与多场耦合若不能解释真实损伤、失效、渗流、传热和结构演化,就容易停留在方程形式;生命力学若不能进入实验、临床、器械和功能评价闭环,就容易停留在概念扩展.复杂工程问题的价值,正在于它能把这些方向从“看上去很新”拉回“是否真正有用、可信、可推广”.

极端力学则是另一个更硬的试验场.极端环境、极端载荷、极端温度、极端速率、极端服役边界,是最严格的压力测试.很多方向在常规条件下都能写得很漂亮,但一进入极端环境就立刻暴露出边界.超高温陶瓷及其复合材料、高超声速飞行器热防护、再入环境下的热-力-化耦合、深海与极地装备中的低温和高压服役、核能与航空航天结构中的辐照和疲劳损伤,都说明一个问题:真正的前沿,若不能回到极端环境中的可验证问题,最终就难以形成学科的真正主航道<sup>[23]</sup>.

极端力学也进一步说明,需求牵引和原始创新之间并不是简单冲突关系.极端环境提出的往往不是常规工程优化问题,而是经典理论边界问题;材料参数是否仍然稳定,连续介质假设是否仍然适用,局部本构是否仍能描述损伤演化,多场耦合项是否可以忽略,实验验证是否还能获得可靠数据.这些问题一旦被推到极限,往往会反过来推动基础理论、数学方法和实验技术的原始创新.换言之,极端需求不是把研究拉向短期化,关键在于我们能否从中抽象出真正的基础问题.

也正因为如此,我更愿意把复杂工程问题与极端力学看作“试验场”而不是“平行方向”.前者回答新航道是否能走进现实系统,后者回答新航道是否能经受最苛刻的边界条件.能同时经受这两类检验的方向,才更可能不是浪花.

## 6 期刊的使命:成为新航道的“水文测绘者”

过去,期刊的角色主要是成果发布平台:研究者做完工作,投稿、发表、传播.这个角色今天仍然重要,但已经远远不够.面对方向越来越多、热度变化越来越快、泡沫越来越容易膨胀的学术环境,一本真正有责任感的期刊,不能只做被动的结果接收器,而应当成为新航道的“水文测绘者”.

所谓“水文测绘者”,不是替学科宣布结论,而是识别水流的方向、深浅、边界和风险;不是替研究者规定路线,而是主动识别哪些方向正在形成、哪些问题正在变得关键、哪些方法正在走向成熟,更要主动辨认哪些热点真正回到了力学基础问题、可信方法体系和复杂工程检验场,然后通过专题组稿、综述约稿、学术会议和持续讨论,把这些信息及时、准确地传递给共同体.

也正因为如此,我愿意把办刊口径说得更明确一点:本刊当然欢迎新方向,但更看重这些新方向是否真正回到力学对象、力学问题和力学规律;本刊欢迎方法创新,但更看重这些方法是否能够建模、分析、计算、反演、优化、不确定性量化和工程验证提供可信支撑;本刊欢迎交叉研究,但更看重这种交叉是否形成新的问题链、机制链和验证链.那些真正面对极端环境、复杂边界、多层系统、含液结构、生命组织、先进复合材料、仿生多功能结构、智能设计与科学智能等新对象、新场景,并能把对象看深、机制讲透、验证压实的稿件,正是本刊希望持续扶持的方向.

但反面也必须说清楚.本刊不会简单追逐热词,也不应把传播热度误判为学科方向.只有热词、没有对象,只有方法、没有边界,只有局部指标改善、却动辄上升为“范式重构”,或者把交叉写成拼盘、把前沿写成包装,这类工作即使短期显得热闹,也难以真正把学科往前带.最值得警惕的,不是文章写得不够新,而是它把本来并不成立的方向幻觉包装得过于顺滑.期刊的责任,正在于帮助共同体把这种顺滑的方向幻觉重新拉回对象、机制、边界和验证之中.

期刊还应当“需求牵引”和“原始创新”之间保持清醒分寸.一方面,刊物不能脱离真实需求、复杂工程和时代问题自说自话;另一方面,刊物也不能把短期热点、项目需求和应用场景误当作唯一方向.真正负责任的办刊,不是简单地向需求靠拢,而是在需求中辨认基础问题,在基础研究中保护自由探索,在自由探索中发现可能改变未来的问题.对青年学者尤其如此:我们既要鼓励他们走向真实对象、真实边界和真实验证,也要给他们保留足够空间去追问暂时看不见应用的基本概念、基本方法和基本关系.

因此,期刊如果真要主动塑造新航道,至少可以在5个层面行动:第一,围绕“一个总纲、4条航道、两个

试验场”持续组织专题与专栏,而不是只在热点最热的时候跟进。第二,更积极地扶持“问题链型”稿件,而不只奖励“结果点型”稿件。真正有价值的工作,往往不只是给出一个结果,而是打开一条更长的问题链。第三,建立面向青年作者的方向训练环境,通过按语、专题导言、综述约稿、学术论坛和写作规范,帮助他们更早形成对象意识、边界意识、方法意识和验证意识。第四,把“可信性”真正写进新方向布局,使理论自洽、实验可复核、工程可检验成为判断新航道的重要尺度。第五,加强应用数学与力学之间的接口组织,鼓励数学方法在真实力学问题中显示力量,也鼓励力学问题反过来提出新的数学需求。

从这个意义上说,办刊不只是“收稿—送审—录用”的流程,而是一种更深层的学科组织行为。一本刊物如果长期只做被动选择,很容易沦为热度的回声;只有当它有能力对主流、支流和泡沫作出更清楚的判断,并有意识地扶持主流、锤炼支流、识别泡沫,它才真正参与了学科航向的塑造。

## 7 结语:桥不会自己通向未来,航道也不会自动生成

写到这里,我真正想说的意思其实已经很清楚。今天最需要警惕的,不是没有方向,而是方向太多、新词太多、热闹太多,以至于主流和支流越来越容易被说混,河床和浪花越来越容易被看错。也正因为如此,方向问题不是一句“拥抱新技术”或“重视交叉融合”就能解决的,而必须回到几个更硬的判断上:对象是不是在变,问题链是不是在长,方法结构是不是在重排,验证标准是不是也在被重新拉紧。

我始终认为,方向不是跟出来的,而是辨出来的。跟着热闹走,方向很容易显得很多;真正辨一辨,才知道哪些值得长期投入,哪些只是阶段性波动。对《应用数学和力学》而言,这一点尤其重要。因为这本刊物若失去方向判断,就很容易在表面繁荣中慢慢漂离自己的主航道;反过来,若能始终把对象、问题、规律和方法支撑之间的关系压实,它就能在工具革命和学科重组持续发生的时候,不慌、不乱,也不轻易被浪花带走。

这种方向判断,既不能被热点裹挟,也不能被需求简化。热点能提醒我们哪里正在发生变化,但不能替我们判断河床是否重写;需求能暴露真实边界,但不能替代自由探索和原始创新。基础问题提供河床,自由探索开辟源头,真实需求暴露边界,复杂工程检验航道。若只讲基础而不看真实对象,学科容易封闭;若只讲需求而不尊重自由探索,学科容易短期化;若只讲工具而不回到机制,学科容易表面繁荣;若只讲交叉而没有验证,学科容易变成概念拼盘。应用数学与力学的新航道,恰恰应当在这些张力之间形成自己的判断秩序。

《桥仍在,河向前》<sup>[1]</sup>讨论的是根脉和方向感,《问题为王》要讨论的是起点,《创新为王》要讨论的是推进,而《河流的新航道》补上的是整个共同体如何重新辨认主轴。桥不会自己通向未来,航道也不会自动生成;它们都取决于我们是否有勇气把学术重心重新落回问题本身、机制本身、方法本身和真实边界本身。

愿本刊与同行一道,成为这条河上清醒的测绘者、坚定的开拓者和负责任的行船人。

**致谢** 本文在修改完善过程中得到南京航空航天大学熊克教授和西南交通大学李翔宇教授的有益建议,谨致谢忱。

### 参考文献(References):

- [1] 卢天健. 桥仍在,河向前[J]. 应用数学和力学, 2026, 47(1): i-iv. (LU Tianjian. The current runs while the bridge holds[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2026, 47(1): i-iv. (in Chinese))
- [2] 卢天健. 为什么科学研究必须坚持“四性”——关于重要性、必要性、创新性与可行性的几点思考[J]. 应用数学和力学, 2026, 47(4): 391-403. (LU Tianjian. Why scientific research must uphold the four essential criteria: reflections on significance, necessity, originality, and feasibility[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2026, 47(4): 391-403. (in Chinese))
- [3] WANG Y, ZOU G, GAO H. Mechano-X: a paradigm for mechanics-based interdisciplinary innovation[J]. *MechanoEngineering*, 2026, 1: 010801.
- [4] LU T J. What is MechanoEngineering? [J]. *MechanoEngineering*, 2026, 1: 010401.
- [5] 杨卫. 力学基本问题[M]. 北京: 科学出版社, 2024. (YANG Wei. *Basic Issues in Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2024. (in Chinese))
- [6] 胡海岩, 乔栋, 李翔宇, 等. 力学工程问题[M]. 北京: 科学出版社, 2024. (HU Haiyan, QIAO Dong, LI Xian-

- gyu, et al. *Engineering Issues in Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2024. (in Chinese))
- [7] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957, **8**(3): 97-104. (QIAN Xuesen. On technological science[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1957, **8**(3): 97-104. (in Chinese))
- [8] BAI J, WANG Y, JEONG H, et al. Towards the future of physics- and data-guided AI frameworks in computational mechanics[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2025, **41**(7): 225340.
- [9] THAWON I, VO D, BUI T Q, et al. Physics-informed neural networks: current progress and challenges in computational solid and structural mechanics[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2026, **146**(2): 1-10.
- [10] ANI A, NAKKA R, SUBHASH G, et al. Machine learning for computational fracture and damage mechanics: status and perspectives[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2026, **332**: 111778.
- [11] HERRMANN L, KOLLMANNBERGER S. Deep learning in computational mechanics: a review[J]. *Computational Mechanics*, 2024, **74**(2): 281-331.
- [12] ZHAO Y, LI H, ZHOU H, et al. A review of graph neural network applications in mechanics-related domains [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, **57**(11): 315.
- [13] DORNHEIM J, MORAND L, NALLANI H J, et al. Neural networks for constitutive modeling: from universal function approximators to advanced models and the integration of physics[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2024, **31**(2): 1097-1127.
- [14] IRANSHAHI K, BRUN J, ARNOLD T, et al. Digital twins: recent advances and future directions in engineering fields[J]. *Intelligent Systems with Applications*, 2025, **26**: 200516.
- [15] 康瑞, 李雪, 孟晗, 等. 轻巧-承力-功能一体化超结构: 概念、设计及应用[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(8): 949-973. (KANG Rui, LI Xue, MENG Han, et al. Ultralight, compact, and load-bearing multifunctional meta-structures: concept, design and applications[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(8): 949-973. (in Chinese))
- [16] WANG H, YANG Y, ZHOU X, et al. Rational design of mechanical bio-metamaterials for biomedical applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2026, **156**: 101545.
- [17] MA Q, FENG Z R, HOU J, et al. Artificial intelligence with metasurfaces: from intelligent design to intelligent computing[J]. *Photonix*, 2026, **7**(1): 23.
- [18] ZHANG H, KANG L, CAMPBELL S D, et al. Data driven approaches in nanophotonics: a review of AI-enabled metadevices[J]. *Nanoscale*, 2025, **17**(41): 23788-23803.
- [19] DORDUNCU M, REN H, ZHUANG X, et al. A review of peridynamic theory and nonlocal operators along with their computer implementations[J]. *Computers & Structures*, 2024, **299**: 107395.
- [20] KALUKULA Y, CICCONE G, MOHAMMED D, et al. Unlocking the therapeutic potential of cellular mechanobiology[J]. *Science Advances*, 2025, **11**(44): eaea6817.
- [21] LIU Z, CHEN G, JO M S, et al. Mechanomedicine[J]. *Nature Reviews Bioengineering*, 2026, **4**(3): 216-235.
- [22] 孙学超, 刘少宝, 林敏, 等. 生物热-力-电生理耦合学[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(6): 651-669. (SUN Xuechao, LIU Shaobao, LIN Min, et al. The bio-thermo-mechano-electrophysiology[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(6): 651-669. (in Chinese))
- [23] LIU Y, WANG H, HAO J, et al. Key materials for extreme high-temperature environments: ultra-high-temperature ceramics and their composites[J]. *Extreme Materials*, 2025, **1**(1): 38-66.