

装备与成套技术

## 150 kN 双向拉伸试验机机架结构的非概率优化设计

关铂镔<sup>1,2</sup>, 张毅升<sup>1,2</sup>, 赵 哲<sup>2,3</sup>, 吴向东<sup>2</sup>, 万 敏<sup>2</sup>

(1. 中国运载火箭技术研究院空间物理重点实验室, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;  
3. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对传统方法设计的双向拉伸试验机结构笨重和精度不足的问题, 提出了结合 Kriging 模型和泰勒展开的非概率优化设计框架, 并将其应用于 150 kN 机架结构的轻量化设计。建立了机架结构的非概率优化模型, 并提出求解流程。对机架材料性能的不确定性进行了测试和表征, 并利用 Kriging 模型和泰勒展开对拓扑优化机架结构进行了不确定性分析。通过遗传算法对机架结构进行优化, 分析结果表明: 150 kN 机架的材料性能存在不确定性, 拓扑优化难以得到最佳轻量化机架结构, 且其确定性结果存在违反设计要求风险; 提出的非概率优化设计框架可有效实现结构轻量化并确保其严格满足设计要求, 经拓扑优化的 150 kN 机架实现了减重 12.95%。

**关键词:** 双向拉伸试验机; 非概率优化; 结构轻量化; 不确定性分析; 拓扑优化

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.022

**中图分类号:** TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 07-0173-10

## Non-probabilistic optimization design of frame structure for 150 kN biaxial tensile test machine

Guan Bobin<sup>1,2</sup>, Zhang Yisheng<sup>1,2</sup>, Zhao Zhe<sup>2,3</sup>, Wu Xiangdong<sup>2</sup>, Wan Min<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;  
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;  
3. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

**Abstract:** For the problem of heavy structure and insufficient precision of biaxial tensile test machine designed by the traditional method, the non-probabilistic optimization design framework combining Kriging model and Taylor expansion was proposed and applied to the lightweight design of 150 kN frame structure. Then, the non-probabilistic optimization model of frame structure was established, and a solution process was proposed. Furthermore, the uncertainty of frame material properties was tested and characterized, and the uncertainty analysis on the topological optimized frame structure was conducted by Kriging model and Taylor expansion. Finally, the frame structure was optimized by genetic algorithm, and the analysis results show that the material properties of 150 kN frame are uncertain, and it is difficult to obtain the optimal lightweight frame structure by topology optimization. Its deterministic result shows the risk of violating the design requirements. Thus, the proposed non-probabilistic optimization design framework effectively achieves the structure lightweighting and ensure that it strictly meets the design requirements, the 150 kN frame after topology optimization achieves a weight reduction of 12.95%.

**Key words:** biaxial tensile test machine; non-probabilistic optimization; structural lightweighting; uncertainty analysis; topology optimization

高端装备设计和高性能部件制造中的材料绝大部分处于复合应力状态, 难以通过单向拉伸试验准确描述。双向拉伸试验通过控制和改变两垂直方向的载荷比, 不仅可全面研究材料在双向应力状态下

的屈服行为, 还能准确获得材料在实际服役条件下的力学性能。目前, 双向拉伸试验已被广泛应用于金属板料的本构模型和成形极限研究中。

双向拉伸试验机是双向拉伸试验系统的重要组成部分, 其作为试验载体, 是双向拉伸试验的控制系统、传动系统、测量系统, 以及双向拉伸试样的重要物理依托。目前, 双向拉伸试验机按驱动方式可划分为两类: 统一驱动式和独立驱动式。统一驱动式双向拉伸试验机见图 1, 是指利用机械连杆或齿轮组作为传动装置对试样进行拉伸, 两个加载方

收稿日期: 2024-08-31; 修订日期: 2024-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875027)

作者简介: 关铂镔 (1996-), 男, 博士, 工程师

E-mail: 2725385673@qq.com

通信作者: 吴向东 (1970-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wuxiangdongbuaa@163.com

向不可单独控制,但通过合适的固定比例可实现不同加载比例<sup>[1-2]</sup>;独立驱动式双向拉伸试验机见图2,是指专门开发4个独立加载轴,通过控制系统实现相同加载方向的同步运动和垂直方向的比例同步<sup>[3-6]</sup>。“统一驱动式”通常基于现有单向拉伸试验或压缩机进行改造,其优点是成本低、控制简单,缺点是对零件加工和装配精度要求高,只能实现特

定比例加载,不利于研究复杂加载条件下的材料变形问题。“独立驱动式”控制复杂,研制成本高,体积大,但其动态性能好,控制精确,理论上可实现位移/载荷/应变的任意比例/非比例加载,有利于进行复杂加载路径下的材料变形行为研究。图2c和图2d为北京航空航天大学万敏团队研制的多个独立驱动式双向拉伸试验设备。

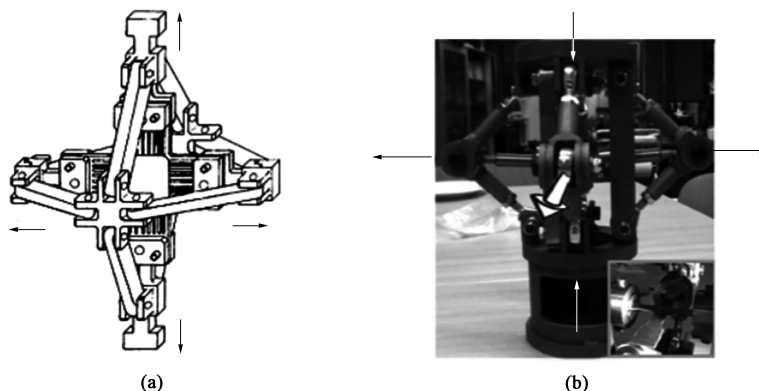


图1 统一驱动式双向拉伸试验装置

(a) 拉力装置 (b) 压力装置

Fig. 1 Unified drive biaxial tensile test device

(a) Tension device (b) Pressure device

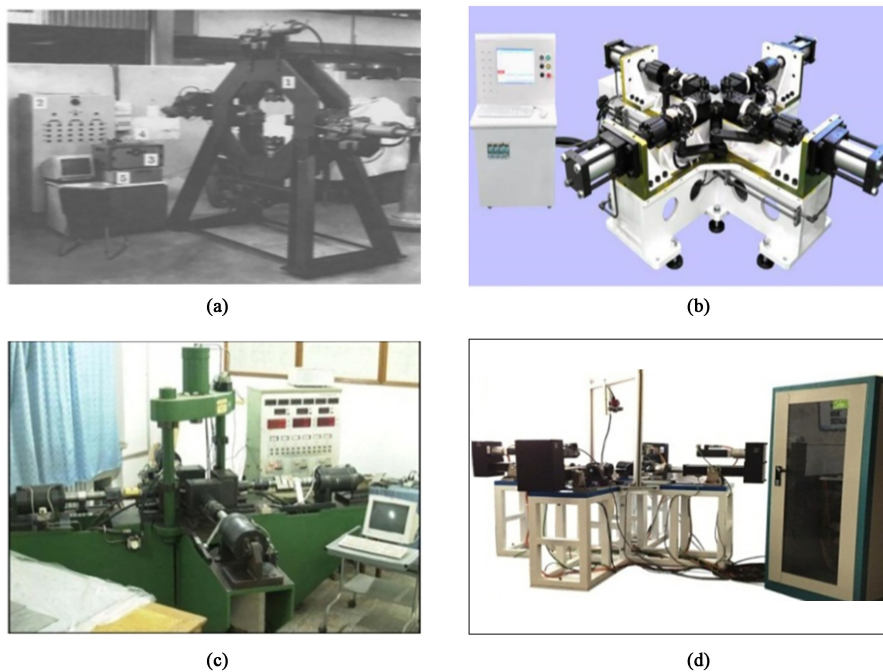


图2 独立驱动式双向拉伸试验装置

(a) 卧式装置 (b) 立式装置 (c) 液压驱动 (d) 电机驱动

Fig. 2 Independently drive biaxial tensile test device

(a) Horizontal device (b) Vertical installation (c) Hydraulic drive (d) Motor drive

上述双向拉伸试验机结构设计多采用传统的基于经验或数值模拟的结构设计方法,设计结果难以

满足试验机的结构性能要求,尤其在设计大载荷、高精度试验机时,容易导致设计者陷入设计盲区。

此外, 该方法所得的试验机结构通常不是最优方案, 即使达到设计指标也存在过多无效质量, 导致结构冗余、加工装配困难、成本高昂。

结构优化作为一种现代工程结构设计方法, 将最优化方法与数值模拟技术结合, 可在保持结构优良性能的同时实现显著减重。结构优化方法常被分为 3 类: 尺寸优化、形状优化和拓扑优化, 如图 3 所示。拓扑优化是结构优化设计领域目前最具发展前景的研究方向, 学者们对拓扑优化技术进行了大量研究, 主要从优化方法和应用对象两方面展开<sup>[7]</sup>。在优化方法方面, 学者们提出了多种拓扑优化方法, 包括变密度法、渐进结构优化法以及水平集法等, 这些方法促进了拓扑优化理论的发展及其在航空、航天、汽车等领域的应用。在应用对象方面, 学者们的研究按构型尺度可分为结构拓扑优化、

材料拓扑优化以及结构材料一体的多尺度拓扑优化, 这些研究丰富了结构设计内涵, 促进了结构优化设计方法的发展。进一步, 学者们利用拓扑优化和尺寸优化对结构轻量化设计展开了广泛研究。Zhao X H 等<sup>[8]</sup>利用拓扑优化对 12000 kN 精冲机机架结构进行了轻量化设计, 实现减重 13.66%, 并且优化后的机架结构承载性能得到提高。Ma H F 等<sup>[9]</sup>结合拓扑优化和尺寸优化, 实现了翻转车架结构减重 21.5%, 优化后的结构成功应用于 200 多辆桥梁检测车。Lu S B 等<sup>[10]</sup>将拓扑优化和尺寸优化应用于公交车车架结构的轻量化设计, 实现了减重 39.47%。Guan B B 等<sup>[11]</sup>结合拓扑优化和尺寸优化提出了一种新型结构轻量化设计方法, 并对 2000 kN 成形试验机上横梁进行了轻量化设计, 实现减重 30.43%。

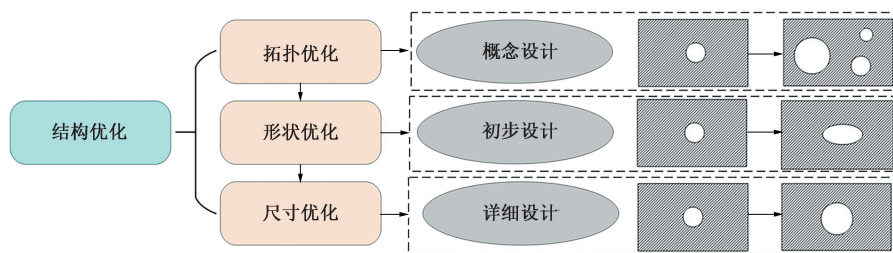


图 3 3 种结构优化技术

Fig. 3 Three kinds of structural optimization techniques

随着工程问题向精密化趋势发展, 设计人员开始考虑结构设计中的不确定性因素。实际上, 工程结构的研发、生产及报废全生命周期内充满了不确定性, 这些不确定性存在于结构的几何尺寸、材料属性、边界条件、外部载荷以及使用环境等方面。在传统结构设计方法中, 为了考虑不确定性因素的影响, 设计人员常基于经验或其他预定义因素重新表述设计约束, 以保持结构在面对不确定性时的冗余<sup>[12]</sup>。然而, 这种处理不确定性的结构设计方法过于粗糙, 无法系统、经济地提升结构设计性能。不确定性优化方法通过定量考虑不确定性因素的影响, 能够给设计人员提供更多关于不确定性的信息, 实现工程结构在不确定性因素影响下的最优设计。Wang X J 等<sup>[13]</sup>对结构设计中的可靠性优化设计和安全因子法进行了详细比较, 充分说明了不确定性优化方法的优势。在不确定性优化方法的理论研究基础上, 学者们进一步将其应用于工程结构轻量化设计。Meng Z 等<sup>[14]</sup>基于尺寸优化, 提出了一种非概率可靠性优化设计方法, 并将其应用于屈曲约束下

加筋壳结构的轻量化设计。Luo Z X 等<sup>[15]</sup>提出了考虑不确定性因素下反映结构安全性的极限承载概念, 构建了一种非概率可靠性优化设计方法, 并将其用于二维和三维实例的结构轻量化设计。不确定性优化方法在结构设计上的应用进一步推动了结构优化设计方法发展, 将结构设计推向“不确定范式下的设计”<sup>[16]</sup>。

采用传统设计方法的双向拉伸试验机结构设计不能充分发挥结构优化技术的优势作用, 设计结果难以达到最优。尽管文献 [17] 利用拓扑优化对 150 kN 机架结构进行了优化设计, 但其并未结合尺寸优化实现进一步减重且忽略了结构设计中的不确定性因素。为此, 本文在拓扑优化的基础上, 提出了结合全局 Kriging 模型和泰勒展开的非概率尺寸优化设计框架, 并将其应用于 150 kN 双向拉伸试验机机架结构的轻量化设计。

## 1 双向拉伸试验机简介

机架是双向拉伸试验机 (图 4) 的重要承载部



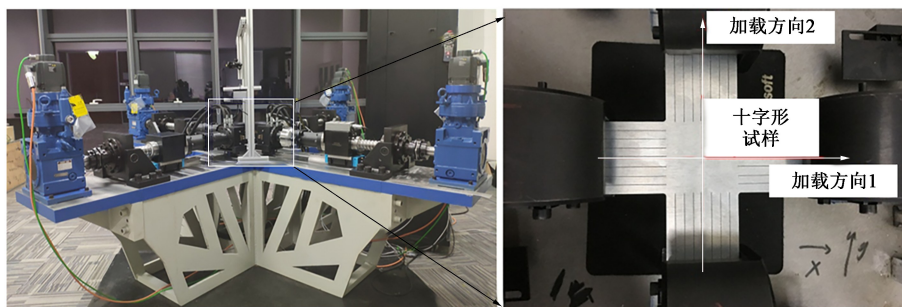


图 4 双向拉伸试验机

Fig. 4 Biaxial tensile test machine

件, 其结构及变形直接影响试验结果, 同时也是整机最重要的结构件, 是双向拉伸试验机结构轻量化设计的主要对象。下面对 150 kN 双向拉伸试验机机架结构进行介绍, 同时分析其关键结构设计要求。

### 1.1 机架结构

150 kN 双向拉伸试验机采用卧式主体结构形式, 机架为十字形布局, 机架主平面用于容纳传动

系统并保证试样的有效加载行程, 如图 5 所示。双向拉伸试验过程中, 由伺服电机-减速器-联轴器驱动滚珠丝杠旋转, 带动丝杠螺母作直线运动, 进而通过安装于丝杠螺母上的空心推杆实现试样的拉伸加载。由此看出, 十字形试样的加载载荷通过传动系统组件传递至滚珠丝杠支撑处, 进而通过轴承座传递至承载机架, 机架结构所承受载荷主要来自滚珠丝杠支撑处的拉力以及弯矩作用。

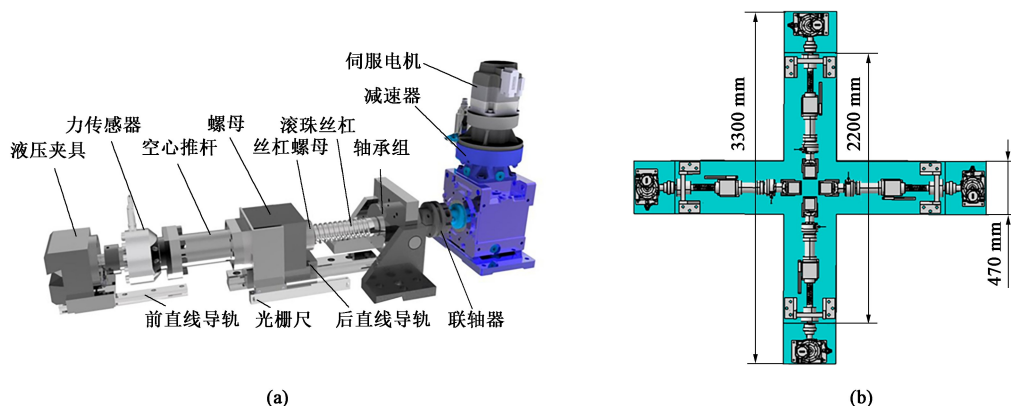


图 5 150 kN 机架结构形式

(a) 传动系统 (b) 主平面轮廓

Fig. 5 Structure form of 150 kN frame

(a) Transmission system (b) Principal plane contour

### 1.2 设计要求

双向拉伸试验要求十字形试样在同一平面内受载, 而刚度不足的机架结构将在试验过程中产生较大变形, 难以满足同一平面加载要求, 影响试验精度。因此, 在双向拉伸试验过程中, 十字形试样的 4 个夹持端应始终位于同一平面, 误差不大于  $\pm 0.1$  mm, 如图 6a 所示, 其中,  $H$ 、 $h$  分别为两个互相垂直的夹持端的中心高度, 此时各加载方向中心与试样中心处于同一直线, 可有效保证试验精度。据此, 双向拉伸试验机机架在最大试验载荷下垂直机架主平面方向的变形应处于  $\pm 0.1$  mm 范围内, 如

图 6b 所示, 这对应其刚度承载性能, 其中,  $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$  分别为特征点 A、B、C 的变形量。此外, 为保证机架结构在试验中的安全承载, 避免结构失效, 双向拉伸试验机机架在最大试验载荷下应保持在所用材料的屈服强度以内承载, 这对应其强度承载性能。

## 2 优化模型建立

文献 [17] 利用分步式多阶段拓扑优化完成了 150 kN 机架结构的拓扑优化设计, 本文在其基础上

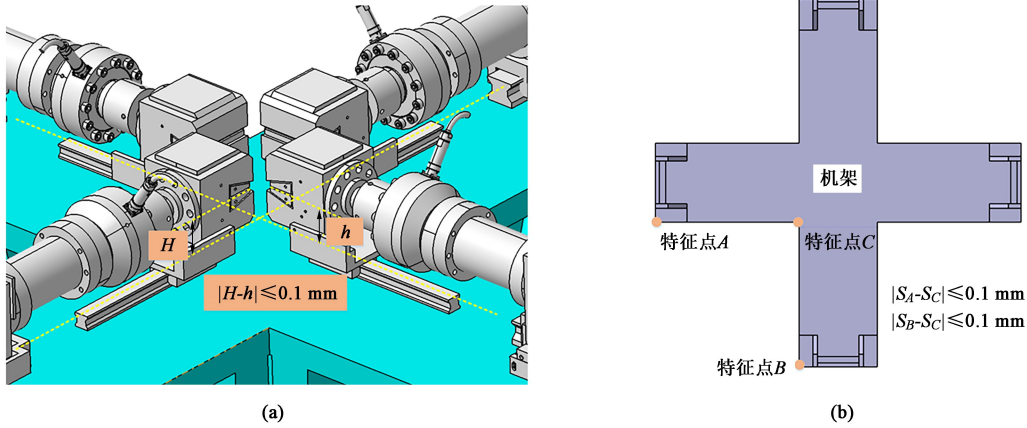


图 6 机架结构设计要求

(a) 夹持端 (b) 机架变形

Fig. 6 Structural design requirements of frame

(a) Clamping end (b) Frame deformation

建立机架结构的非概率优化设计模型, 以进一步提升其刚度性能和轻量化效果。

考虑机架结构设计及制造过程中的不确定性, 取其密度、弹性模量、泊松比和屈服强度为不确定变量, 以此保证最终设计机架结构的可靠性。进一步, 将机架结构变形时的最大应力和主平面最大挠度作为约束函数, 二者分别反映了其强度和刚度承载性能, 将机架结构重量作为目标函数, 最终构建的机架结构非概率优化设计模型如下:

$$\begin{cases} \min_d w(\mathbf{d}) \\ \text{s. t. } \eta_1[g_1(\mathbf{d}, \mathbf{X}_1) \geq 0] \geq \eta_{1, \text{target}} \\ \quad \eta_2[g_2(\mathbf{d}, \mathbf{X}_2) \geq 0] \geq \eta_{2, \text{target}} \\ \text{where } \mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) \\ \quad d_1 \in [60, 375], d_2 \in [1700, 1960], \quad (1) \\ \quad d_3 \in [10, 30], d_4 \in [40, 80], \\ \quad d_5 \in [80, 120] \\ \quad \mathbf{X}_1 \in \Omega_1(\mathbf{X}'_1, \mathbf{R}_1), \mathbf{X}'_1 = (P', E', \mu', R'_{eL}), \\ \quad \mathbf{X}_2 \in \Omega_2(\mathbf{X}'_2, \mathbf{R}_2), \mathbf{X}'_2 = (P', E', \mu') \end{cases}$$

式中:  $w(\mathbf{d})$  为目标函数, 代表机架结构重量, 可由其体积和材料密度得到;  $\mathbf{d}$  为机架结构的尺寸设计变量, 如图 7 所示;  $\mathbf{X}_1$  和  $\mathbf{X}_2$  分别为机架结构设计中最大应力和主平面最大挠度约束响应中的不确定变量, 包括密度  $P$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  以及屈服强度  $R_{eL}$ ;  $g_1(\mathbf{d}, \mathbf{X}_1)$  和  $g_2(\mathbf{d}, \mathbf{X}_2)$  为约束函数, 二者分别代表机架结构变形时的最大应力和主平面最大挠度响应, 其中主平面最大挠度响应以图 6b 中特征点 A 和特征点 C 的挠度差表征;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为机架结构的刚度和强度非概率可靠性指标;

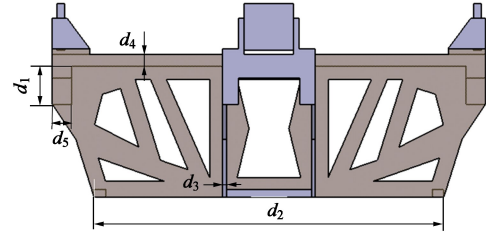


图 7 机架结构非概率优化设计变量

Fig. 7 Design variables of frame structural non-probabilistic optimization

$\eta_{1, \text{target}}$  和  $\eta_{2, \text{target}}$  分别为人为设定的强度和刚度非概率可靠性要求值;  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分别为机架结构最大应力和主平面最大挠度响应中的非概率凸模型;  $\mathbf{X}'_1$ 、 $\mathbf{X}'_2$  及  $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$  分别为凸模型的边缘区间和相关矩阵, 上标  $I$  代表该变量为区间变量。

### 3 非概率求解框架

针对式 (1) 中的非概率优化设计问题, 本节提出基于全局 Kriging 模型和泰勒展开的求解框架。其中, 框架内层构建设计变量和不确定变量的全局 Kriging 模型, 并利用泰勒展开获取结构响应边界; 框架外层利用遗传算法生成当前设计变量种群, 并利用适应度排序法则寻求最佳设计变量。本节提出的求解框架如图 8 所示, 具体说明如下。

步骤 1: 根据结构优化对象的设计要求和实际条件, 选取设计变量和不确定变量, 确定目标函数和约束函数, 建立优化模型。

步骤 2: 基于步骤 1 选定的不确定变量, 获取

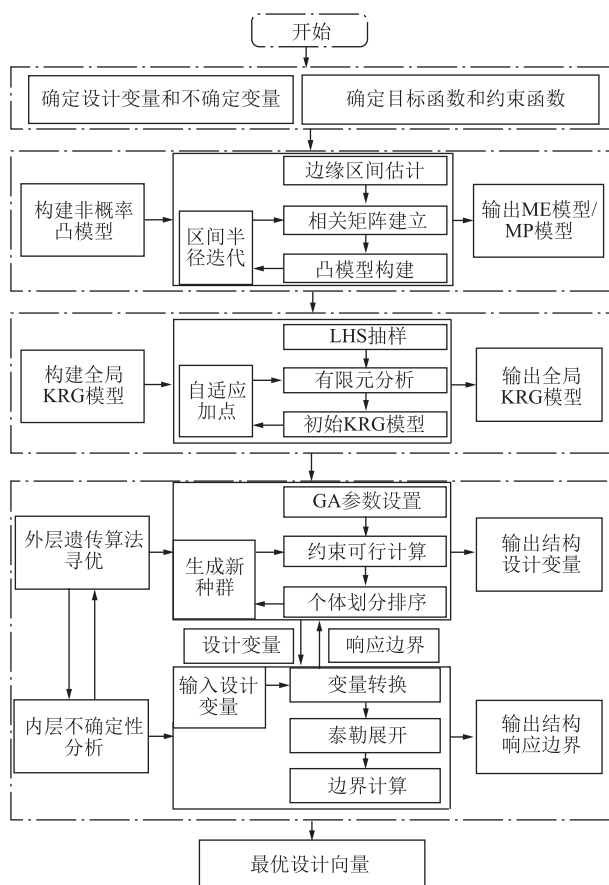


图 8 非概率优化求解框架

Fig. 8 Non-probabilistic optimization solution framework

不确定变量的样本数据, 利用灰色数学方法估计不确定变量的初始边缘区间, 利用基于样本数据的相关系数方法建立不确定变量的相关矩阵, 进而构建表征不确定变量的非概率凸模型并评估其体积大小和对样本数据的闭包性。通过自适应迭代修正边缘区间半径, 最终得到体积最小且包围所有样本数据的非概率凸模型。该步骤的非概率凸模型包括平行六面体 (Multidimensional Parallelepiped, MP) 模型和椭球 (Multidimensional Ellipsoid, ME) 模型<sup>[18]</sup>。

步骤 3: 基于步骤 1 选定的设计变量和步骤 2 构建的非概率凸模型, 在由设计变量和不确定变量构成的混合空间内, 利用拉丁超立方抽样 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 技术抽样, 建立结构优化对象的有限元分析模型并在每个样本处进行有限元分析, 获取每个样本的结构响应。根据初始样本及其对应响应, 构建初始 Kriging (KRG) 模型。并评估其全局拟合精度。通过修正后面向全局探索的最小期望准则自适应确定新增样本并更新 KRG 模型, 最终输出全局内拟合精度较高的 KRG 模型。

步骤 4: 在步骤 2 和步骤 3 的基础上, 利用双

层嵌套循环框架寻求最优设计变量。框架外层利用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 将设计变量传递给内层, 框架内层利用泰勒展开完成不确定性分析并将响应边界传递给外层。具体地, 设置 GA 优化参数 (种群代数、最大迭代数、交叉概率和变异概率) 并生成第一代种群 (每个个体对应一个设计向量), 计算每个个体的约束可行判别矢量并基于其划分可行和不可行设计向量。进一步, 利用优劣排序法则对设计向量进行分组排序, 输出适应度最高的个体并评估收敛条件<sup>[19]</sup>。通过交叉和变异生成新一代种群个体并重新排序, 最终输出最优设计向量。其中, 每个个体的约束可行判别矢量计算需要调用内层不确定性分析。具体地, 将非概率凸模型中的不确定变量转换为标准不确定变量, 同时将结构响应函数进行转换。进一步, 利用泰勒展开将转换后的结构响应函数在每个标准不确定变量处进行一阶展开并计算结构响应边界<sup>[20]</sup>, 该响应边界将返回给外层 GA, 用于设计向量划分和排序。

步骤 5: 步骤 4 迭代结束后, 输出最优结果。

根据上述求解框架, 步骤 1 中的优化模型的建立已在本文第 2 节完成, 其余步骤将在下文展开, 包括非概率凸模型构建、不确定性分析和优化求解 3 部分。

## 4 机架轻量化应用研究

根据图 8 所示框架, 首先构建 150 kN 机架结构设计不确定变量的非概率凸模型。在此基础上, 构建 150 kN 机架结构最大应力和主平面最大挠度响应的全局 KRG 模型, 并对拓扑优化结果进行不确定性分析。进一步, 利用遗传算法对式 (1) 所示的优化问题进行求解, 并与拓扑优化结果进行对比分析。

### 4.1 凸模型构建

本节对机架结构优化设计中的不确定性因素进行定量描述, 即建立其最大应力和主平面最大挠度响应中的非概率凸模型。考虑到工程结构设计中材料性能多存在不确定性, 因此, 为了确保机架结构设计的安全, 对 150 kN 机架结构所用材料的性能参数进行试验以准确描述其不确定性, 单向拉伸试验过程如图 9 所示, 试验结果如表 1 所示。

进一步, 考虑到机架结构设计中相关与不相关的不确定变量共存, 采用 MP 模型对表 1 所示的材料性能参数不确定性进行表征。根据图 8 所示方法, 分别建立机架结构最大应力和主平面最大挠度响应中的 MP 模型, 结果分别如式 (2) 和式 (3) 所示。



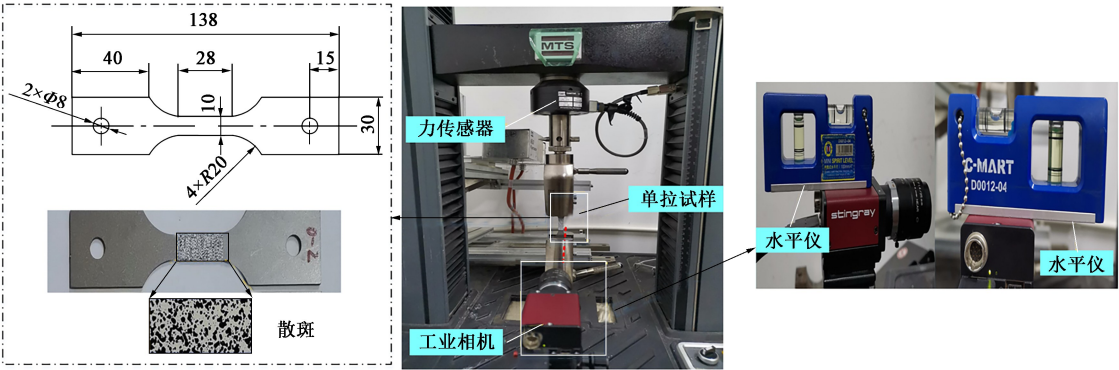


图 9 单向拉伸试验示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of uniaxial tensile test

表 1 150 kN 机架所用材料性能参数

Table 1 Material property parameters used in 150 kN frame				
序号	弹性模量/GPa	密度/( $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	屈服强度/MPa
1	180.00	7.275	0.26	195.39
2	170.99	7.237	0.29	209.42
3	179.80	7.447	0.32	171.62
4	197.89	8.174	0.33	188.23
5	183.73	7.919	0.32	213.50
6	211.40	8.360	0.25	180.69
7	181.59	7.832	0.25	192.72
8	207.30	7.437	0.32	198.36
9	218.04	7.956	0.31	208.16
10	213.24	8.182	0.31	255.32
11	214.92	7.497	0.28	202.24
12	208.14	7.260	0.27	210.56

$$\boldsymbol{\Omega}_1 = \left\{ \begin{pmatrix} P \\ E \\ \mu \\ R_{eL} \end{pmatrix} \left| \left| \begin{pmatrix} 1.4747 & -0.0161 & 0 & 0.0018 \\ -0.5305 & 0.0466 & 0 & -0.0037 \\ 0 & 0 & 15.2672 & 0 \\ 0.1275 & -0.0081 & 0 & 0.0177 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P - 7.71 \\ E - 197.26 \\ \mu - 0.29 \\ S - 201.75 \end{pmatrix} \right| \right| \leq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\Omega}_2 = \left\{ \begin{pmatrix} P \\ E \\ \mu \end{pmatrix} \left| \left| \begin{pmatrix} 1.6847 & -0.0161 & 0 \\ -0.5616 & 0.0482 & 0 \\ 0 & 0 & 18.8006 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P - 7.71 \\ E - 197.25 \\ \mu - 0.29 \end{pmatrix} \right| \right| \leq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (3)$$

4.2 不确定性分析

本节建立 150 kN 机架结构最大应力和主平面最大挠度响应的全局 Kriging 模型，并在其基础上利用泰勒展开对拓扑优化结果进行不确定性分析，揭示不确定性对机架结构承载性能的影响。

4.2.1 全局 Kriging 模型的建立

文献 [17] 对双向拉伸试验机有限元模型的边

界条件进行了分析和试验验证，本节在其基础上建立 150 kN 机架结构的有限元模型，并进一步构建机架结构最大应力和主平面最大挠度响应的全局 Kriging 模型。由于载荷 4 : 0 下机架结构的主平面挠度响应较大，因此，本节构建载荷 4 : 0 下的机架最大应力和主平面最大挠度响应全局 Kriging 模型。

首先，利用 LHS 在由设计变量和不确定变量构

成的混合空间内获得一定数量的初始样本并计算其真实响应,在此基础上构建初始 Kriging 模型并自适应新增样本以提高其全局拟合精度,进行多次迭代直至其精度满足要求。进一步,利用 LHS 随机生成测试样本并计算其真实响应,利用简单相关系数表征 Kriging 模型的全局拟合效果。其中,机架结构最大应力和主平面最大挠度响应的 Kriging 模型在初始样本和最终样本下的拟合精度如图 10 所示。可以看出,两响应的初始 Kriging 模型的全局拟合效果较差,相关系数  $R^2$  仅为 0.9087 和 0.8892,自适应新增样本后,二者全局拟合效果提高,均达到了 0.95 以上,可用于机架结构的非概率优化设计。

#### 4.2.2 刚度性能的不确定性分析

考虑到机架结构设计中刚度承载性能的重要性,

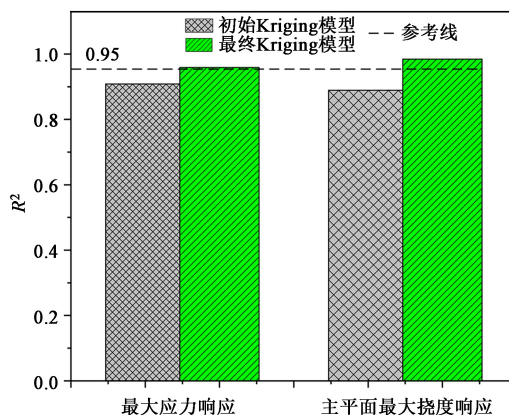


图 10 Kriging 模型构建精度

Fig. 10 Accuracy of constructed Kriging model

基于文献 [17] 拓扑优化后的几何重构结果 (图 11), 对机架结构主平面最大挠度响应进行不确定性分析。

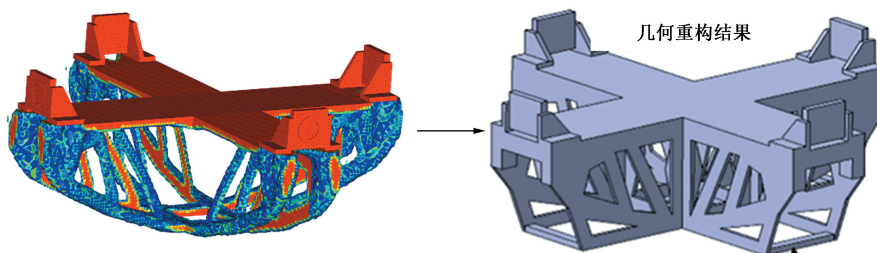


图 11 拓扑优化几何重构结果

Fig. 11 Geometry reconstruction result for topological optimization

利用全局 Kriging 模型和泰勒展开在式 (2) 所示的 MP 模型内进行不确定性分析,得到机架结构主平面最大挠度响应区间为  $[0.090 \text{ mm}, 0.1357 \text{ mm}]$ 。同时,以响应极值对应的材料性能参数对机架结构进行有限元分析,结果如图 12 所示。可以看出,在

材料性能存在不确定性时,拓扑优化机架结构存在误差超出设计要求  $0.1 \text{ mm}$  的风险。其原因在于,文献 [17] 中的拓扑优化结果通过确定性优化得到,忽略了材料性能的不确定性。因此,在不确定性影响下,确定性拓扑优化机架结构可能违反设计要求,需

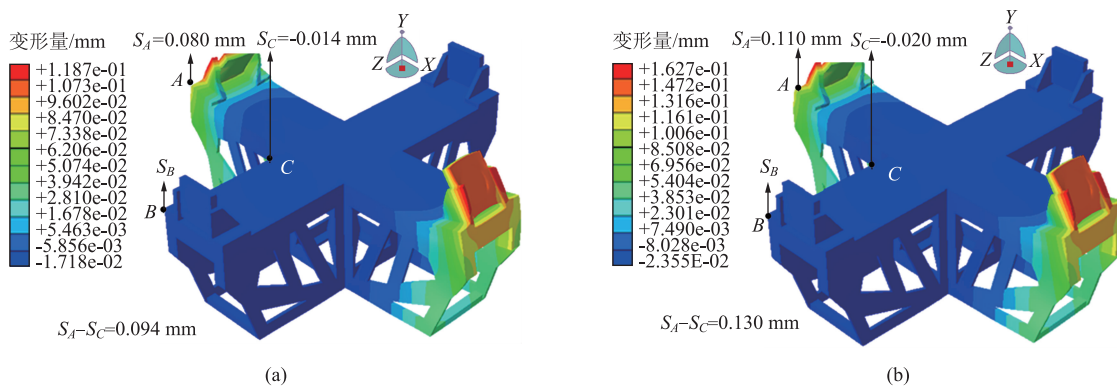


图 12 有限元分析结果

(a) 最小响应 (b) 最大响应

Fig. 12 Results of finite element analysis

(a) Minimum response (b) Maximum response



要进一步的不确定性优化设计，这同时也说明了不确定性分析与优化在工程结构设计中的重要性。

4.3 优化结果分析

在前述 MP 模型和 Kriging 模型基础上，利用图 8 所示的框架求解机架结构的非概率优化设计问题，结果如表 2 所示。

表 2 150 kN 机架非概率尺寸优化设计结果  
Table 2 Non-probabilistic dimensional optimization design result of 150 kN frame

尺寸参数	拓扑优化结果	非概率尺寸优化结果
$d_1/\text{mm}$	195	266
$d_2/\text{mm}$	1776	1893
$d_3/\text{mm}$	20	21
$d_4/\text{mm}$	60	40
$d_5/\text{mm}$	100	91
机架质量/kg	1769	1540

经过非概率优化设计后，机架结构质量从拓扑重构后的 1769 kg 降低至 1540 kg，实现了进一步减重 12.95%。此外，在载荷比例为 4 : 0 和 4 : 4 下对非概率优化前后的机架结构刚度进行对比，二者在最大试验载荷 150 kN 下的主平面变形结果如图 13 所示。可以看出，非概率优化后，机架结构在两个载荷比例下的主平面最大挠度均超过 0.1 mm，严格满足设计要求，这充分表明了继拓扑优化后进行非概率优化的必要性和有效性。

5 结论

(1) 150 kN 双向拉伸试验机机架结构所用材料在性能参数上存在不确定性，利用 MP 模型可对其进行有效表征。

(2) 拓扑优化技术难以实现 150 kN 双向拉伸试验机机架结构的最佳轻量化，且机架确定性拓扑

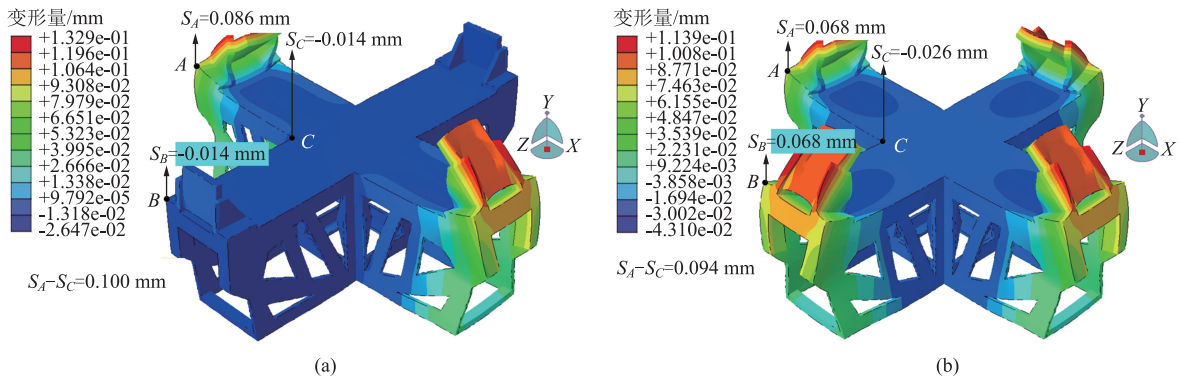


图 13 不同载荷比例下有限元验证结果  
(a) 4 : 0 (b) 4 : 4

Fig. 13 Finite element verification results under different load ratios

优化无法避免不确定性因素影响，优化结果存在违反设计要求的风险。

(3) 本文提出的非概率优化设计框架可有效实现工程结构的最佳轻量化设计，并确保优化结果严格满足设计要求。经本文方法，150 kN 双向拉伸试验机机架在拓扑优化后实现了进一步减重 12.95%

参考文献：

[1] Ferron G, Makinde M. Design and development of a biaxial strength testing device [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1988, 16 (3): 253–256.  
[2] Tasan C C, Hoefnagels J, Quak G, et al. In-plane biaxial loading of sheet metal until fracture [A]. 11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied [C]. Orlando, Florida, USA, 2008.

[3] Boehler J P, Demmerle S, Koss S. A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials [J]. Experimental Mechanics, 1994, 34 (1): 1–9.  
[4] ISO 16842: 2021, Metallic materials—Sheet and strip—Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece [S].  
[5] Wu X D, Wan M, Zhou X B. Biaxial tensile testing of cruciform specimen under complex loading [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168 (1): 181–183.  
[6] 熊晶洲, 万敏, 孟宝, 等. 基于多轴同步控制的微尺度双向伺服加载系统 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45 (1): 174–182.  
Xiong J Z, Wan M, Meng B, et al. Micro-scaled biaxial loading test system based on multi-axis synchronous control [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45 (1): 174–182.  
[7] 高亮, 邱浩波, 肖蜜, 等. 优化驱动的设计方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.

- Gao L, Qiu H B, Xiao M, et al. Optimization-driven Design Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [8] Zhao X H, Liu Y X, Hua L, et al. Finite element analysis and topology optimization of a 12000 kN fine blanking press frame [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54 (2): 375–389.
- [9] Ma H F, Wang J X, Lu Y N, et al. Lightweight design of turnover frame of bridge detection vehicle using topology and thickness optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59 (3): 1007–1019.
- [10] Lu S B, Ma H G, Xin L, et al. Lightweight design of bus frames from multi-material topology optimization to cross-sectional size optimization [J]. Engineering Optimization, 2019, 51 (6): 961–977.
- [11] Guan B B, Wan M, Wu X D, et al. Lightweight design process considering assembly connection and non-probabilistic uncertainty with its application to machine structural design [J]. Engineering Optimization, 2023, 55: 1060–1081.
- [12] Wen Y, Chen X Q, Luo W C, et al. Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47 (6): 450–479.
- [13] Wang X J, Shi Q H, Fan W C, et al. Comparison of the reliability-based and safety factor methods for structural design [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 72: 68–84.
- [14] Meng Z, Hao P, Li G, et al. Non-probabilistic reliability-based design optimization of stiffened shells under buckling constraint [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94: 325–333.
- [15] Luo Z X, Wang X J, Shi Q H, et al. UBC-constrained non-probabilistic reliability-based optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63 (1): 311–326.
- [16] Acar P. Recent progress of uncertainty quantification in small-scale materials science [J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100723.
- [17] Zhang Y S, Wu X D, Guan B B, et al. Application and practical validation of topology optimization technology for the frame of biaxial tensile testing machine [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62 (3): 1519–1533.
- [18] Ni B Y, Jiang C, Huang Z L. Discussions on non-probabilistic convex modelling for uncertain problems [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 59: 54–85.
- [19] Guan B B, Wan M, Wu X D, et al. Non-probabilistic optimization model of engineering structures with dependent interval variables [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 102: 285–304.
- [20] Jiang C, Zhang Q F, Han X, et al. Multidimensional parallelepiped model-A new type of non-probabilistic convex model for structural uncertainty analysis [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2015, 103 (1): 31–59.

## 全国锻压标准化技术委员会八届五次会议暨 2025 年度标准审查会在湖北省武汉市成功召开

全国锻压标准化技术委员会（以下简称“锻压标委会”）于 2025 年 6 月 13 日—15 日在湖北省武汉市组织召开了“全国锻压标准化技术委员会八届五次会议暨 2025 年度标准审查会”。出席会议的委员、代委员 60 人，顾问 1 人，特邀代表 55 人，共 116 人。会议分别由锻压标委会主任委员李亚军、副主任委员金红主持。

会上，锻压标委会主任委员李亚军，副主任委员吴玉坚、王云飞、金红，秘书长魏巍为 9 位新增委员颁发了聘书。魏巍秘书长代表秘书处总结了锻压标委会 2024–2025 年的工作，并汇报了 2025–2026 年度的工作计划。与会委员深入研讨后认为，锻压标委会后续工作应紧密贴合国家产业政策导向、行业技术发展需求及各类标准研究课题，积极探索标准化服务企业、服务经济与服务社会的创新路径。会议进一步明确，锻压标准宣贯培训与实施情况调研将作为重点工作持续推进，旨在全面推广新技术标准，并实时跟踪标准落地成效。

在主任委员李亚军、副主任委员赵震、吴玉坚、王云飞的主持下，会议审查了 3 项国家标准《钢质模锻件 金相组织评级图及评定方法》、《铝合金法兰锻件 通用技术规范》、《钛合金板材超塑成形和扩散连接 工艺规范》和 1 项行业标准《钢质楔横轧件 公差及机械加工余量》送审稿。并讨论了 4 项国家标准《高强度钢强力旋压件 通用技术规范》、《铝合金喷丸成形件 通用技术规范》、《钛合金等温锻件 通用技术规范》、《钢质内高压成形件 通用技术规范》，1 项行业标准《阀门阀体多向精密模锻件 工艺编制原则》，以及 1 项团体标准《冲压企业绿色工厂评价技术规范》。

会议期间，副主任委员金红主持审议并通过了锻压标委会今后 2、3 年标准制修订工作计划。江苏大洋精锻有限公司、南昌航空大学、武汉理工大学、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、湖北三环锻造有限公司等 5 家单位向与会代表汇报了拟申请立项标准的目的和意义、必要性以及主要技术内容等。

在全体与会代表的共同努力下，本次会议顺利完成全部议程。在此，谨向所有为会议成功举办付出辛勤努力的代表致以诚挚谢意！

全国锻压标准化技术委员会