

基于点阵结构的仿人机器人 下肢轻量化研究

顾大强

教授 | gudq@zju.edu.cn



顾大强

浙江大学 教授

- 浙江大学机械设计研究所副所长。
- 主要研究方向：机械设计、机器人技术、工程摩擦学。
- 主持完成国家自然科学基金项目2项，浙江省自然科学基金项目1项，国际和国内企业的科技开发项目20余项。
- 在机械装备与技术、机器人技术、医疗仪器等领域获国家发明专利21项。



孙思超

浙江大学机械学院 硕士研究生

- 浙江大学机械工程学院2019级硕士研究生。
- 目前研究方向为工业机器人以及仿人机器人等的设计和结构优化。

目录

CONTENTS

1

设计背景

2

机器人轻量化设计研究

机器人结构轻量化设计

机器人的轻量化设计为其在各个领域应用的一些难题提供了切实可行的解决方案，尤其是在安全性能、运动性能和能耗等方面。

轻量化目的

在保证机器人的强度和刚度条件下，减轻质量，可以获得更好的运动性能。

轻量化路径

1. 轻质材料
2. 结构优化
3. 轻质材料+结构优化



DLR-LWR
轻质碳纤维材料



LOLA机器人
大腿骨架优化前后

结构轻量化设计方法

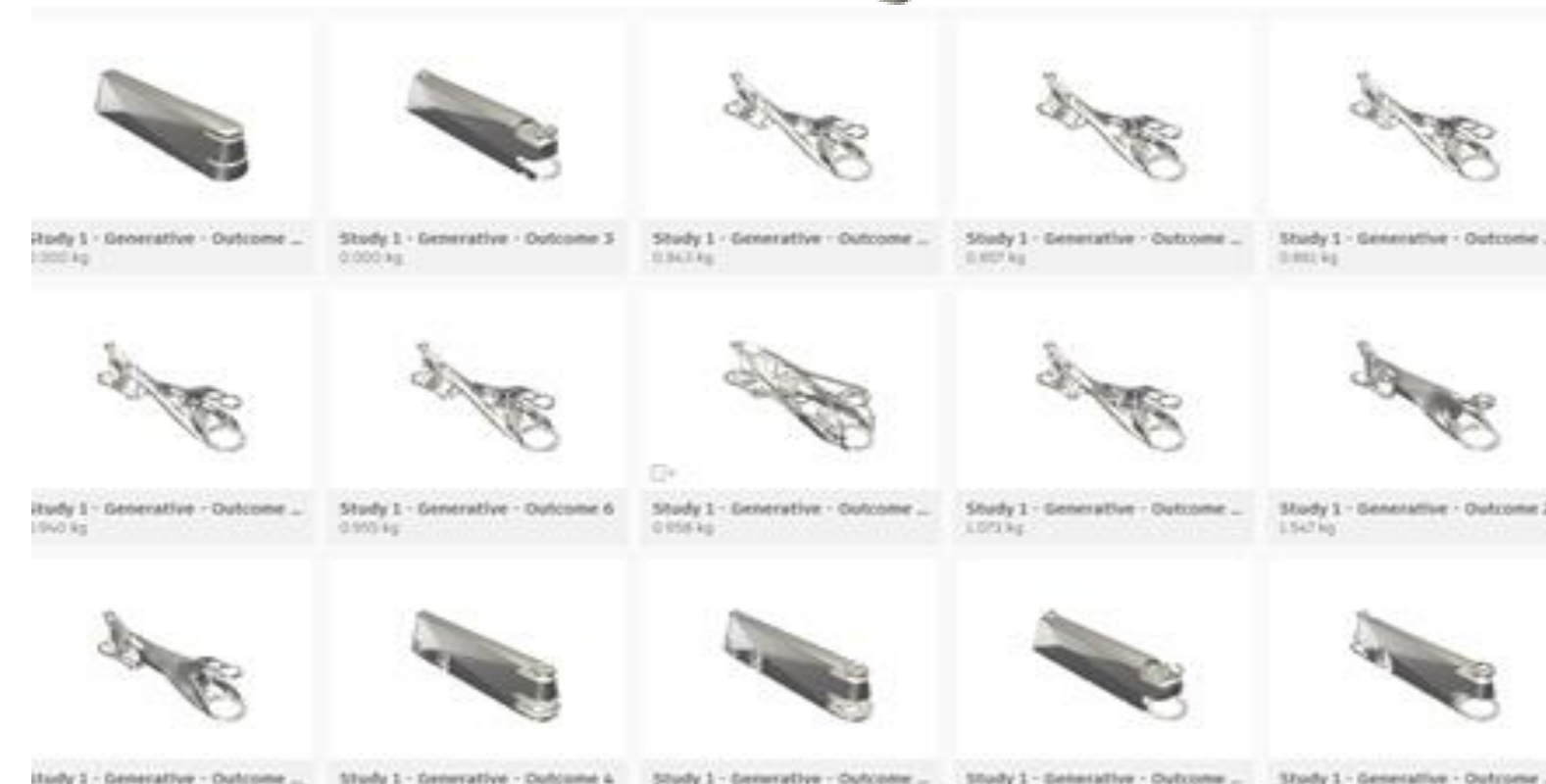
1. 拓扑优化

根据给定的设计要求，在规定区域内以一定的算法优化材料分布，从而实现轻量化目标。



2. 衍生式设计

模仿自然进化，根据给定的设计要求采用特定算法快速生成大量设计变体，以找到最佳的解决方案

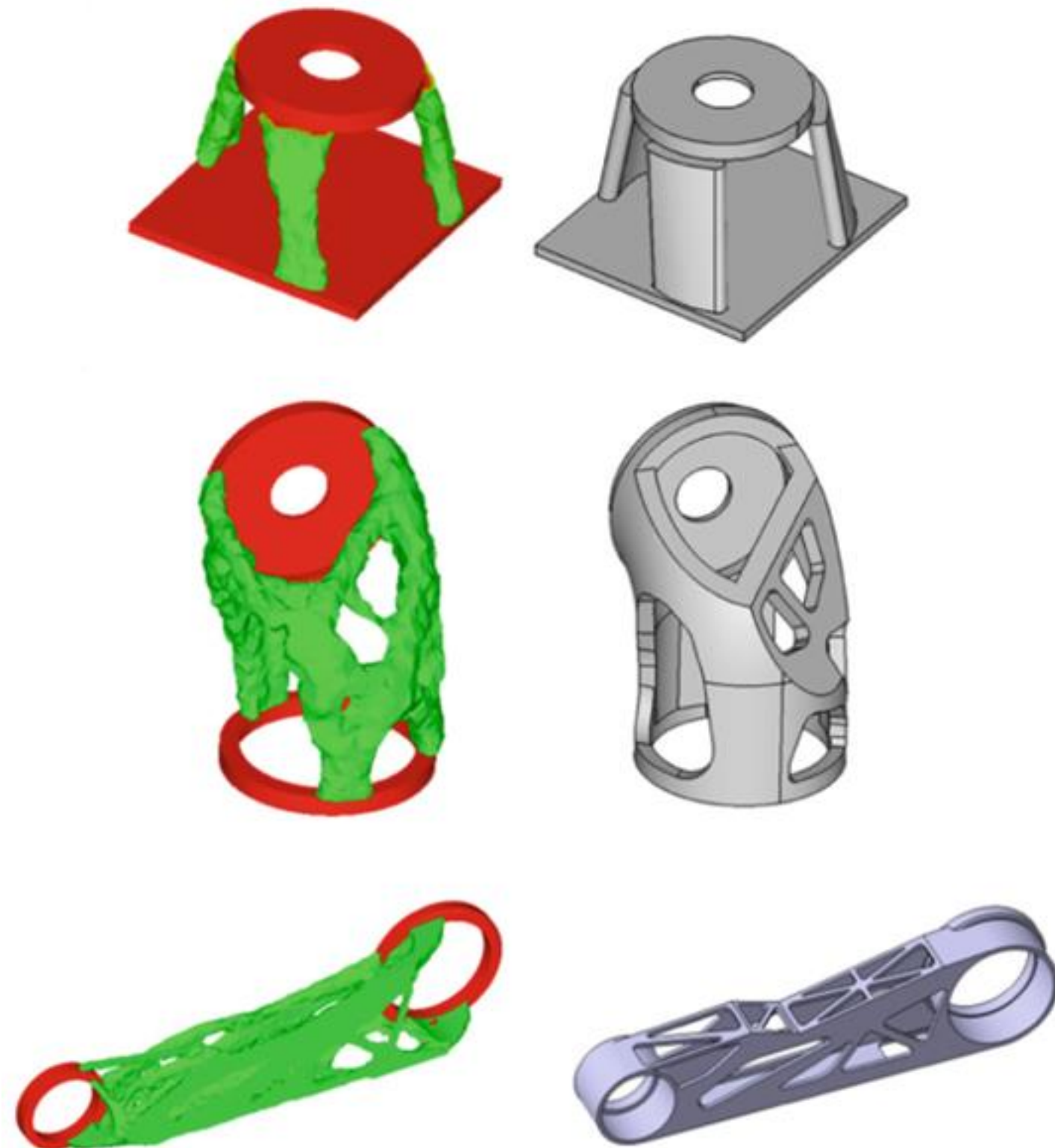


结构轻量化设计方法

根据结构轻量化对象不同，可以将轻量化设计方法分为：

整体优化

已知零件的受力以及约束情况，对零件整体尺寸和结构进行优化。



微结构优化

使用多孔结构替换零件需要优化的部分，从组成单元上对零件进行优化。



目录

CONTENTS

1

设计的背景

2

机器人轻量化设计

仿人机器人结构设计

以仿人机器人下肢作为对象进行初始结构设计



参考人体结构和
现有仿人机器人，
设计仿人机器人
下肢结构



质量小

强度大

负载高

运动性能好

图 1

轻量化设计方法

结构轻量化设计方法

1. 拓扑优化

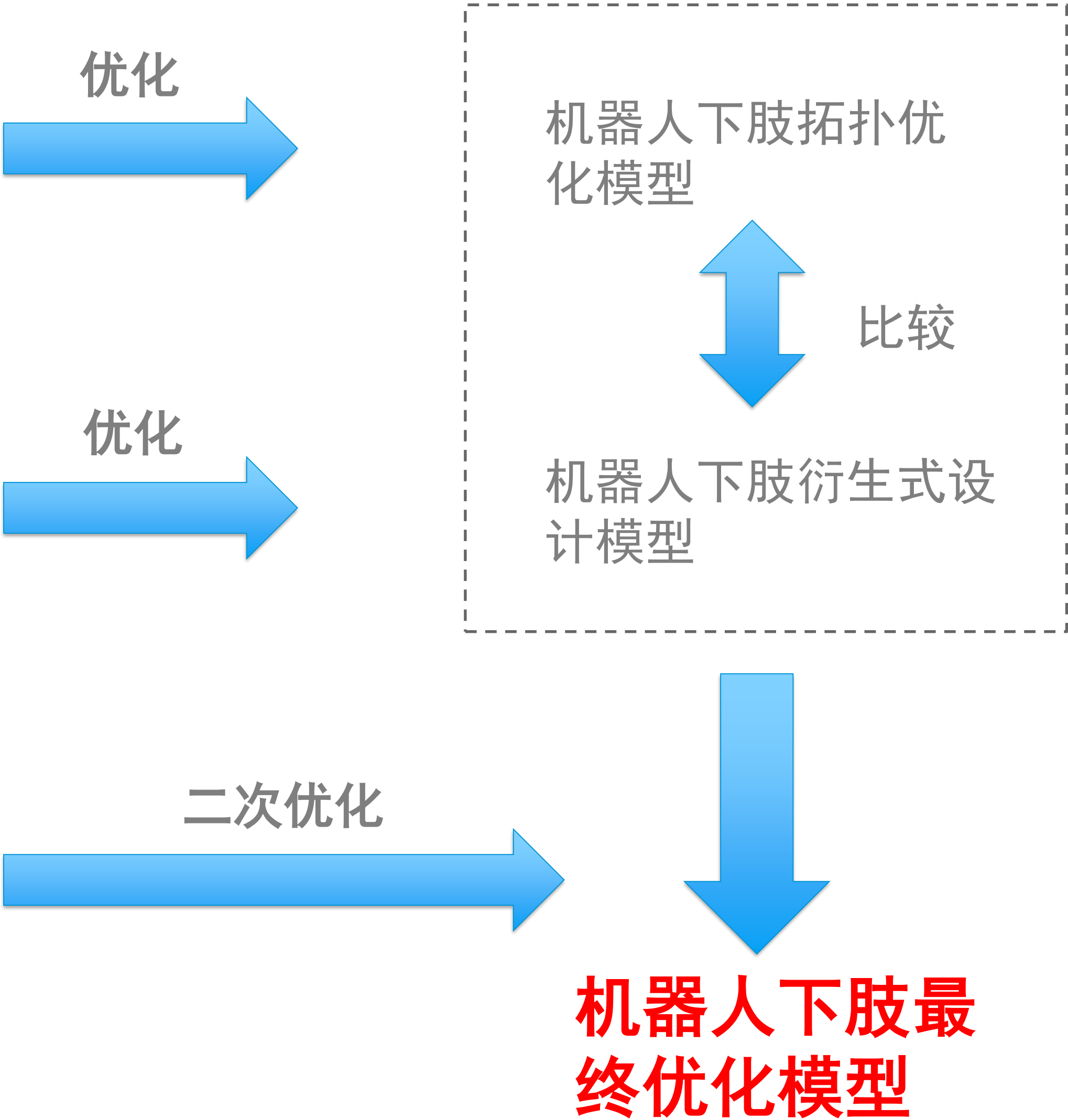
在规定区域内以一定的算法优化材料分布

2. 衍生式设计

使用遗传算法和深度学习算法，从设计空间中获得的成百上千个结果，再选择最合适的优化结果

3. 晶格结构优化

以晶格结构替换结构中的实心单元，用不同晶格结构获得不同的优化效果



轻量化效果分析

1. 强度、刚度分析

强度：抵抗破坏的能力

刚度：抵抗变形的能力



强度、刚度满足设计要求

2. 质量、载荷

最轻质量

质量—载荷比



更轻的质量

更高的负载

3. 运动性能

速度

灵活性



运动仿真

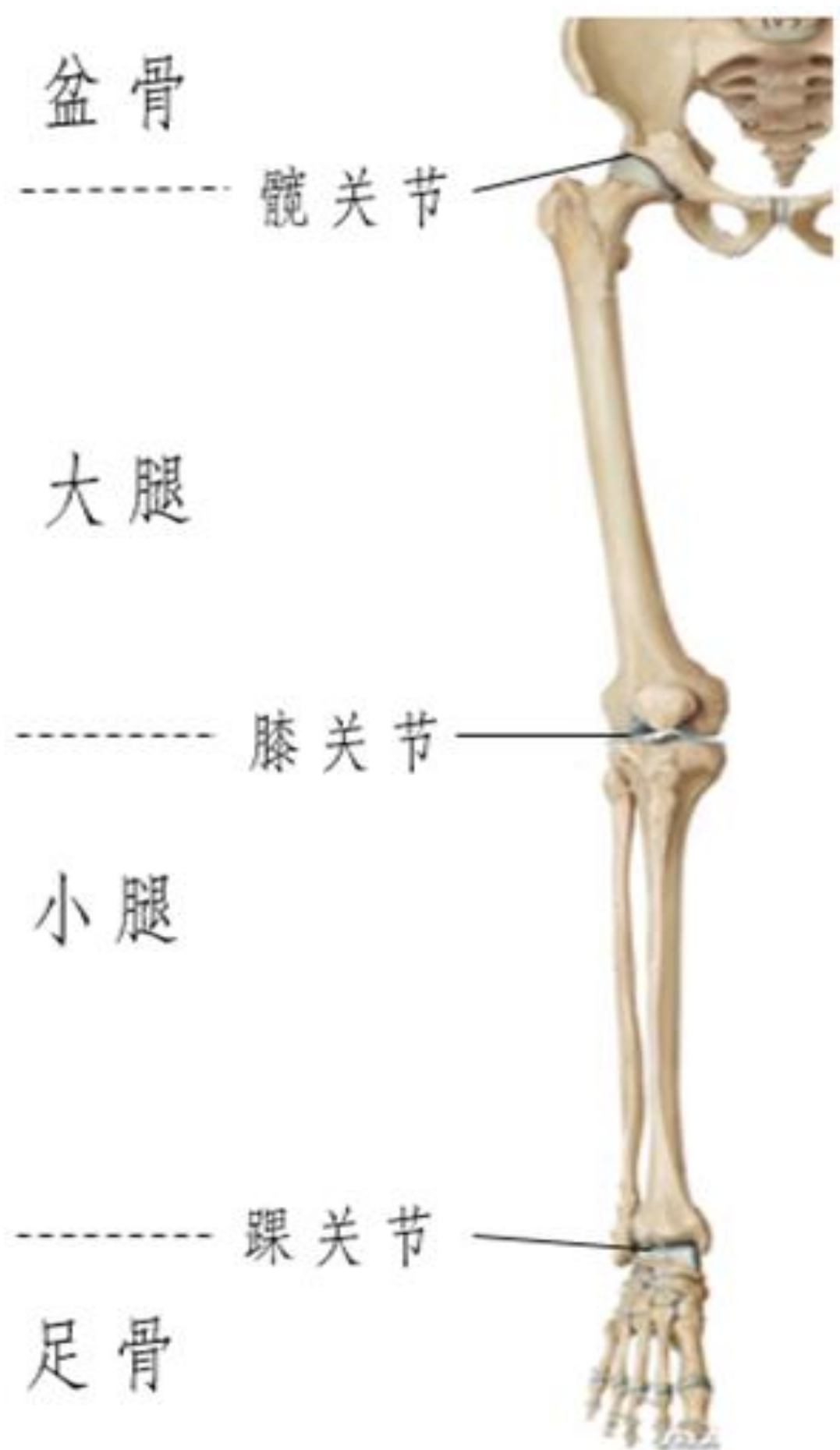
步态仿真

电机测试

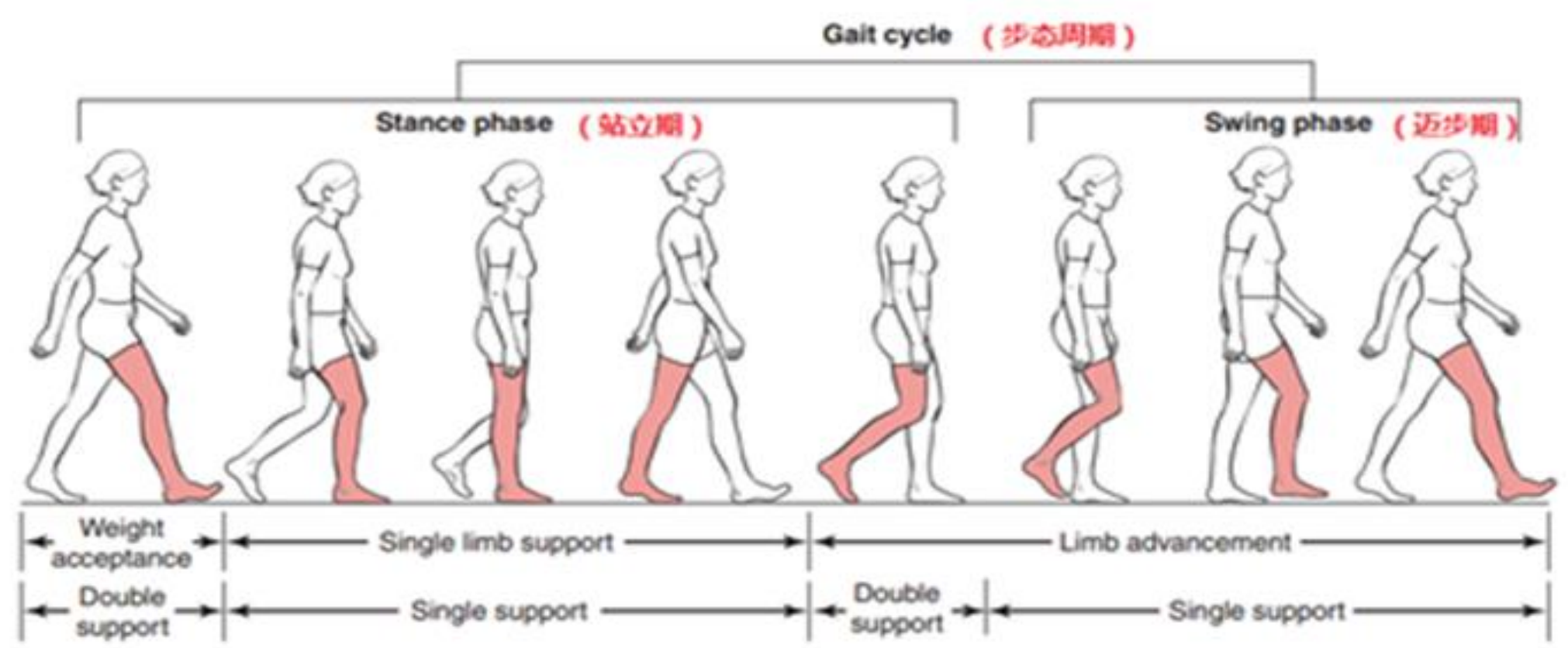
下肢结构

对人体仿生和机械驱动装置进行研究，进而设计机器人结构。

1. 人体下肢骨骼



2. 人类步行姿态



- 前进——髋关节、膝关节、踝关节屈伸
- 重心——髋关节、踝关节侧摆
- 转向——髋关节、踝关节旋转
- 蹬地——脚趾关节

轻量化设计

使用拓扑优化、衍生式设计、晶格结构优化三种方法对模型进行优化。

1. 拓扑优化

结构拓扑优化问题通常表示为：在一个或多个约束方程下，在设计域内找到最优的材料分布使得目标函数达到最小值。目前比较成熟的拓扑优化方法包括以下三种。

1.1 变密度法

以每个单元密度作为设计变量，假定各向同性材料的密度可以由0-1变化，再以密度相关的约束关系和目标函数来解决相应的优化问题。

1.2 水平集法

使用水平集函数描述结构的边界轮廓，根据相应的约束关系和目标函数修改边界轮廓，通过边界轮廓的演化来更新设计，最终达到优化目的。

1.3 渐进结构优化法

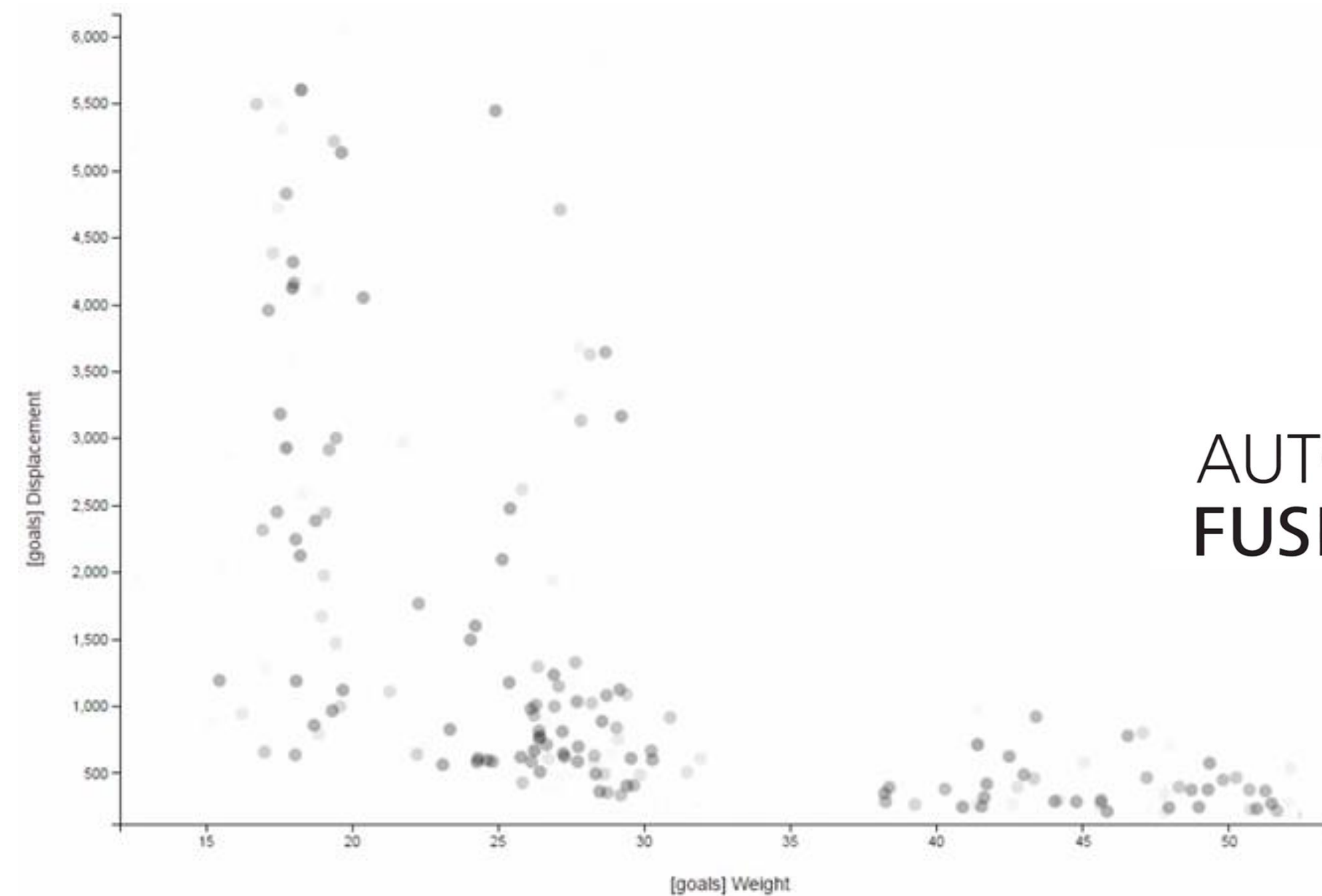
在设计域内逐步删除低应力材料完成优化，双向渐进结构优化法可以在设计域内同时添加和删除材料。

轻量化设计

2. 衍生式设计

目前国内Autodesk公司的Fusion360提供了一个较为成熟的衍生式设计平台。

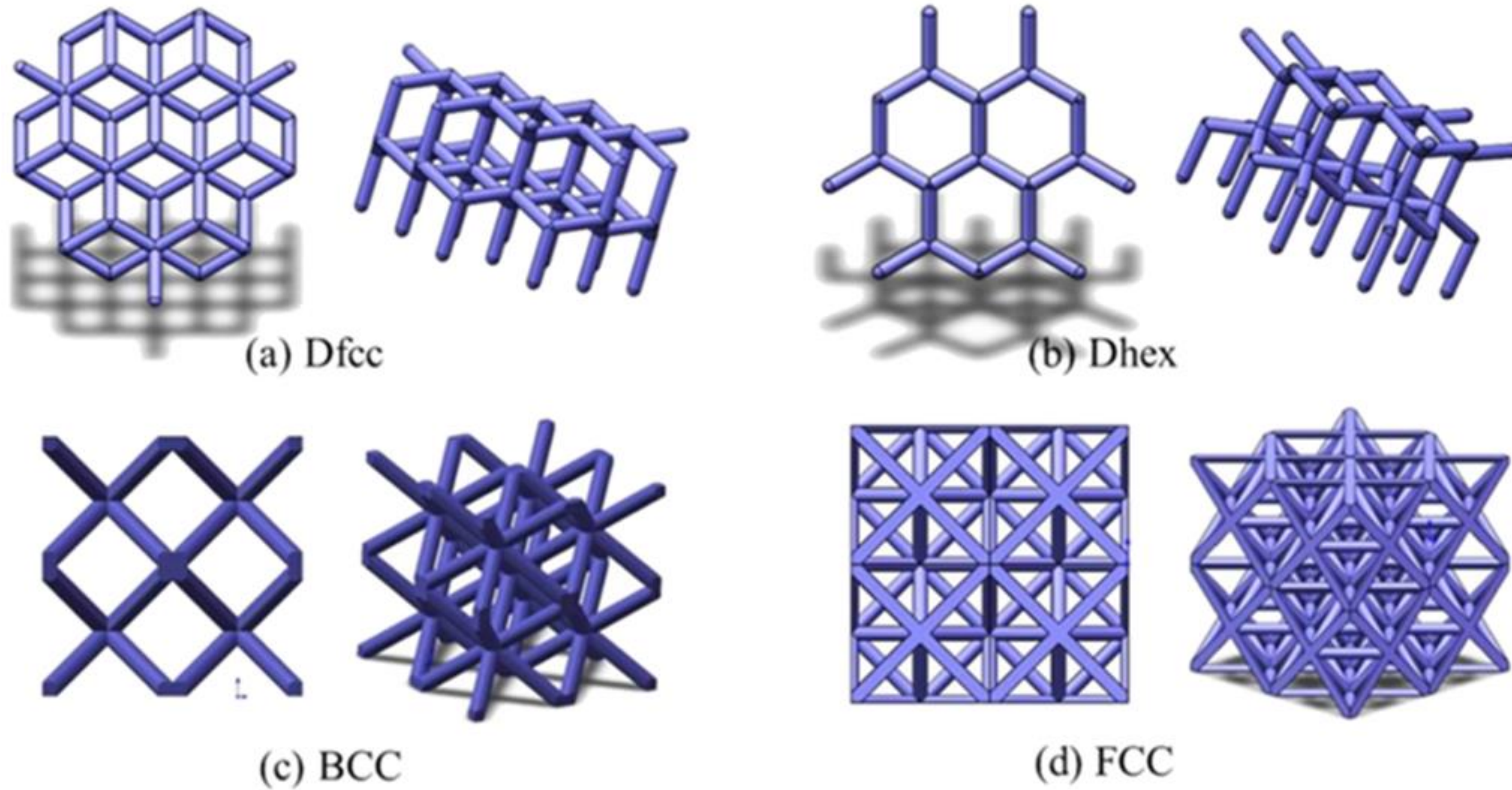
衍生式设计的具体步骤为：
参数设置+人工智能算法+云计算



用计算机代替人类，摆脱经验的束缚，对设计空间进行更充分的检索。

轻量化设计

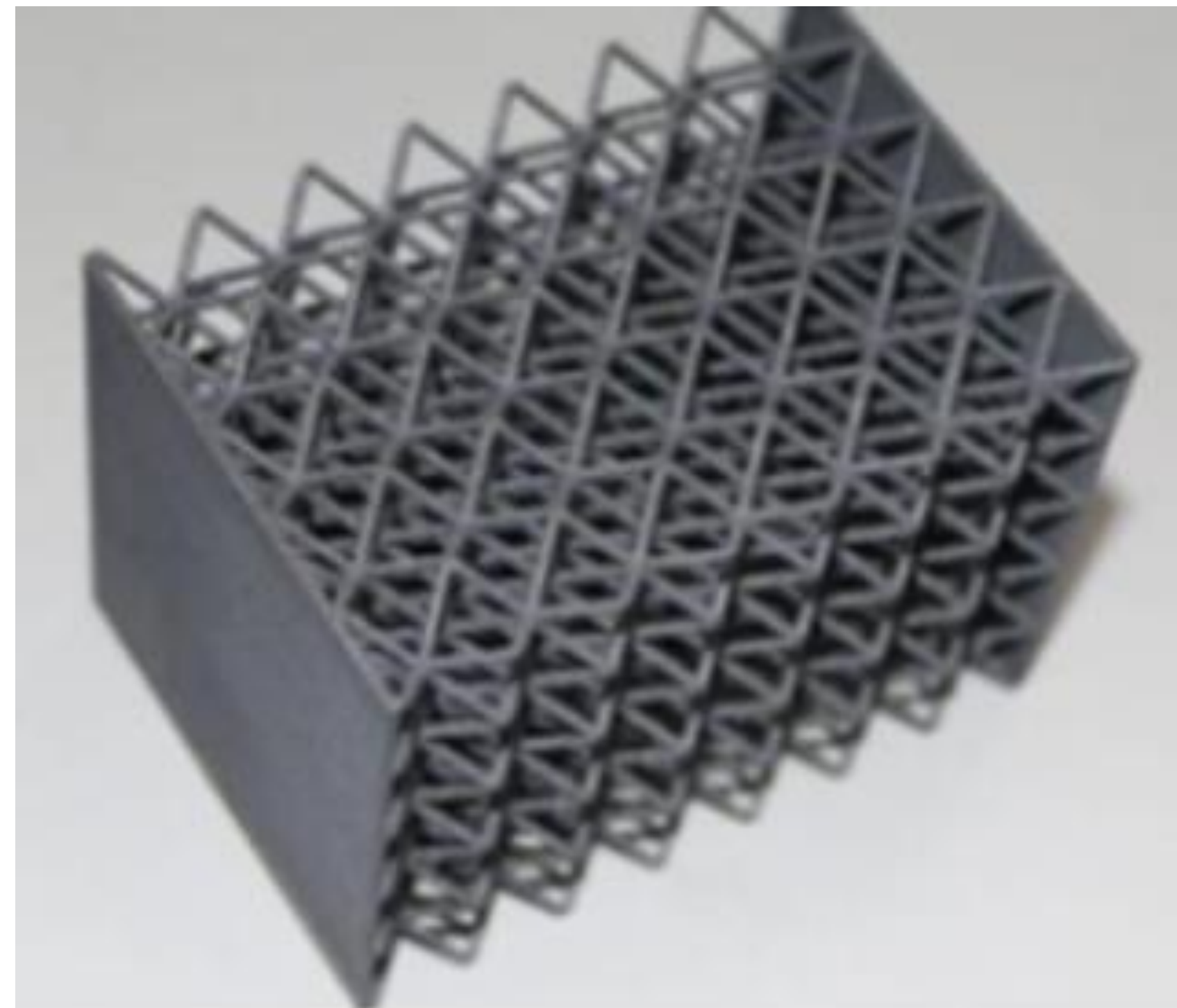
3. 晶格结构优化



利用晶格结构来替换实心结构

轻量化结构制造

优化后模型特征：曲面、镂空、网状



增材制造+机械加工处理

轻量化结构制造

常见金属3D打印技术

1. 选择性激光烧结（SLS）
2. 选择性激光熔化（SLM）
3. 电子束熔化（EBM）
4. 激光熔覆沉积技术（LENS）
5. 直接金属粉末激光烧结（DMLS）

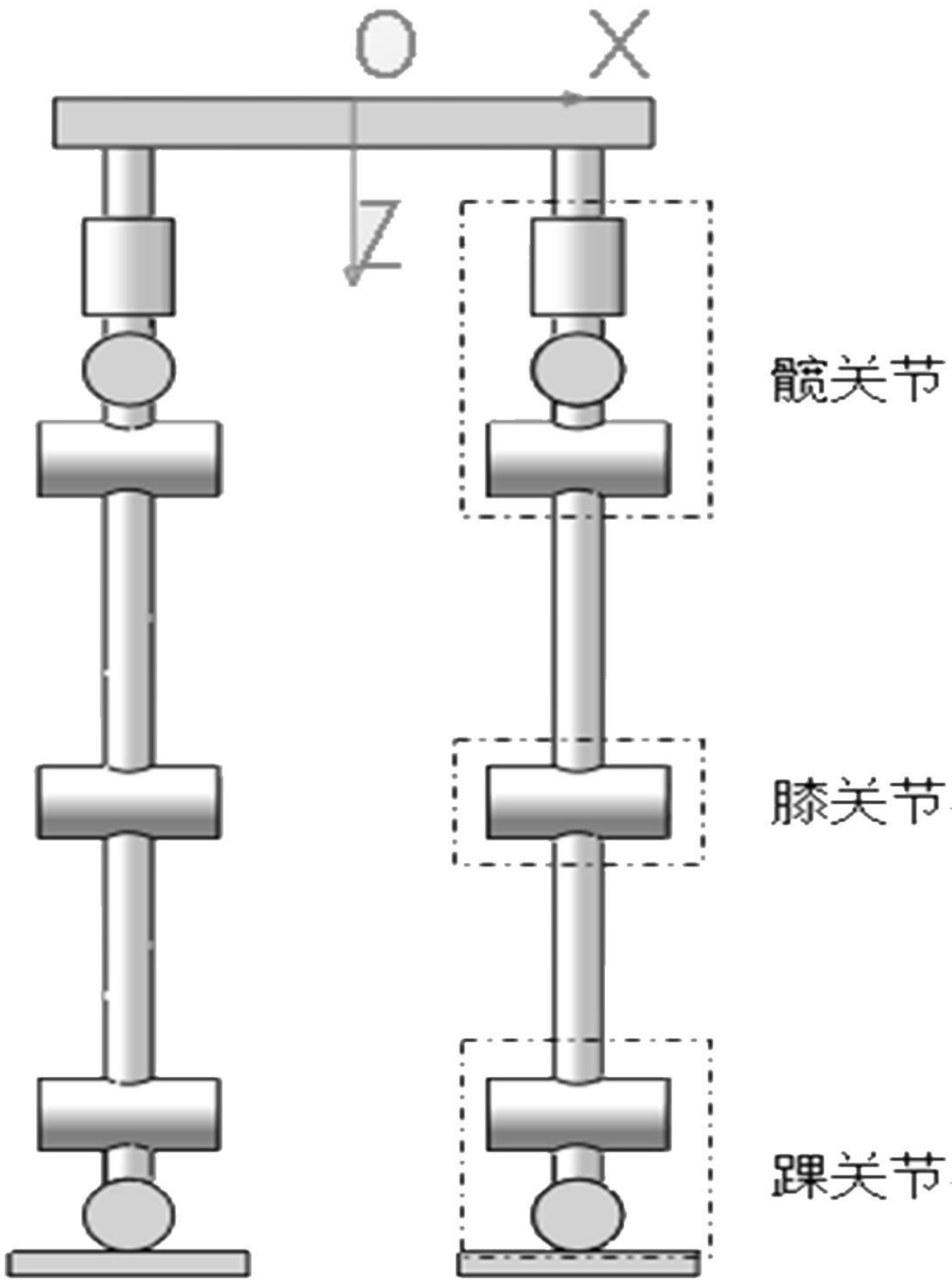
3D打印结构

1. 支撑——在结构设计中考虑支撑，减少支撑数量，或使支撑容易去除。
2. 精度——在结构设计中考虑3D打印的变形和打印精度，提前留下余量。



仿人机器人下肢结构

1. 自由度分配



设置自由度为：

- 绕X轴——俯仰
- 绕Y轴——偏摆
- 绕Z轴——旋转

关节	自由度	关节范围（°）
髋关节	俯仰	-125~42
	偏摆	-35~20
	旋转	-45~30
膝关节	俯仰	0~150
踝关节	俯仰	-75~42
	偏摆	-20~35

仿人机器人下肢结构

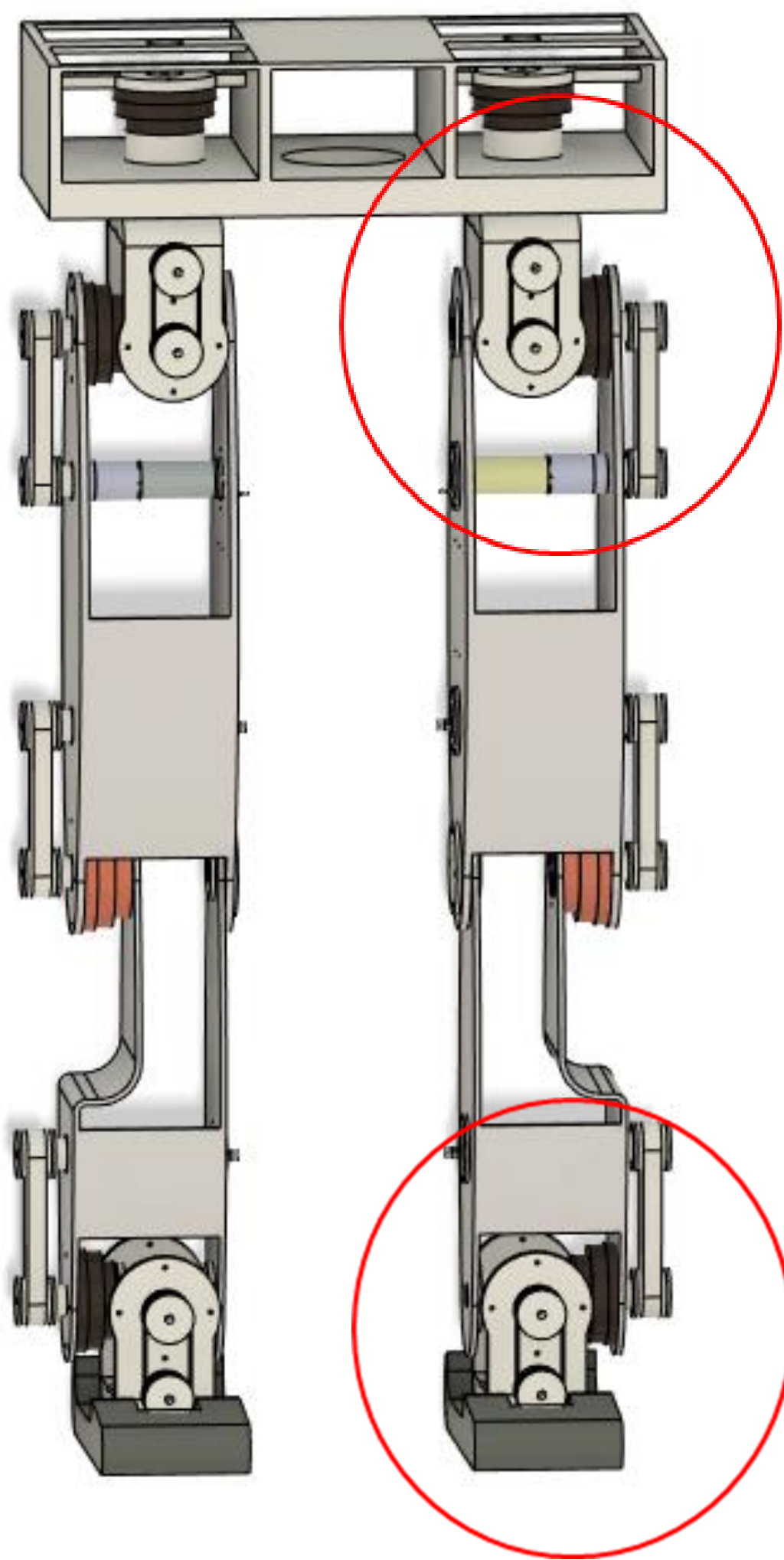
2. 驱动装置

- 电机驱动可以获得更好的调速性和可控性。
- 轻量化机器人结构主要是中低负载，电机驱动的输出足够。
- 与谐波减速器配合，获得高输出力矩。

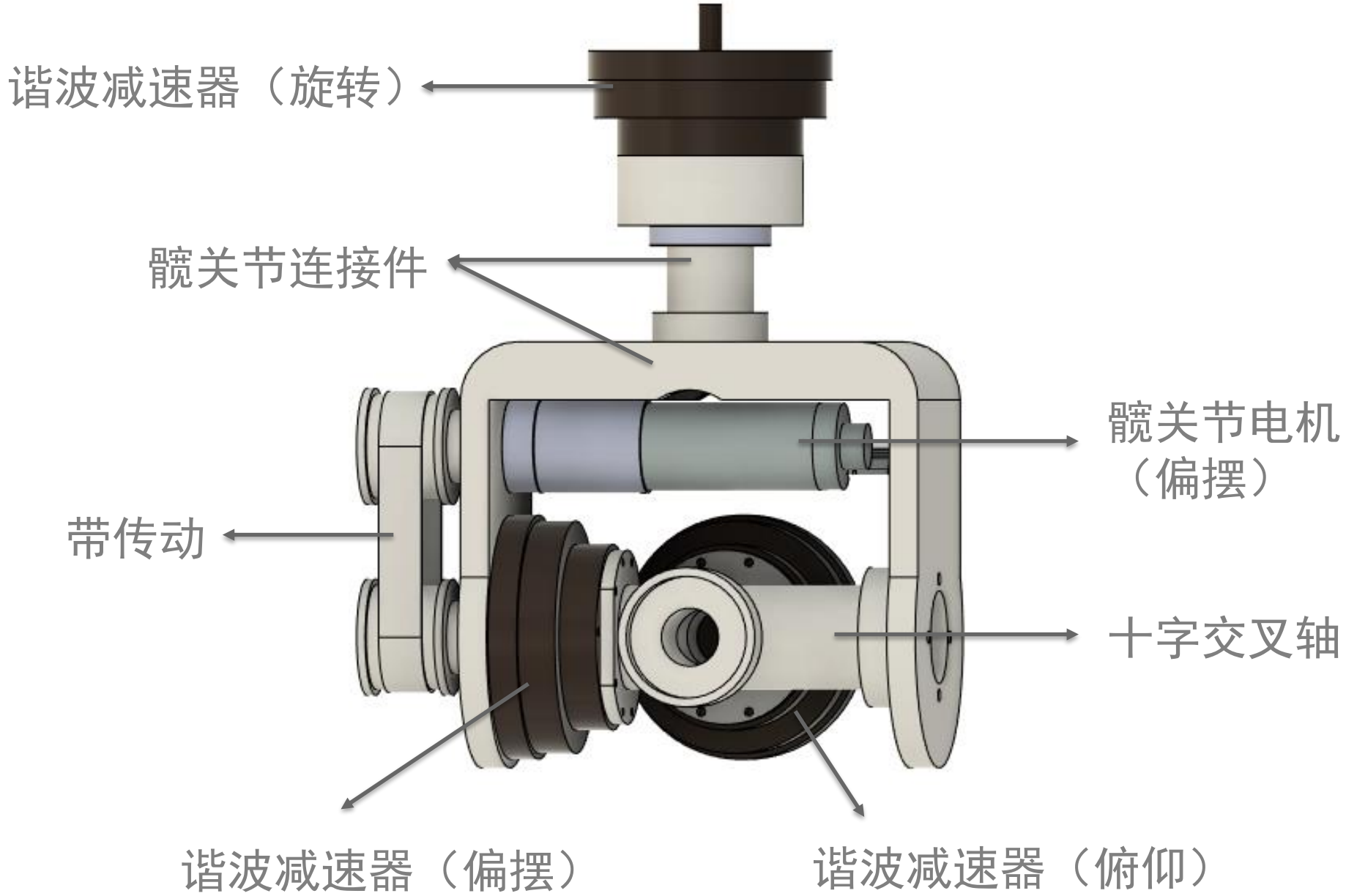


仿人机器人下肢结构

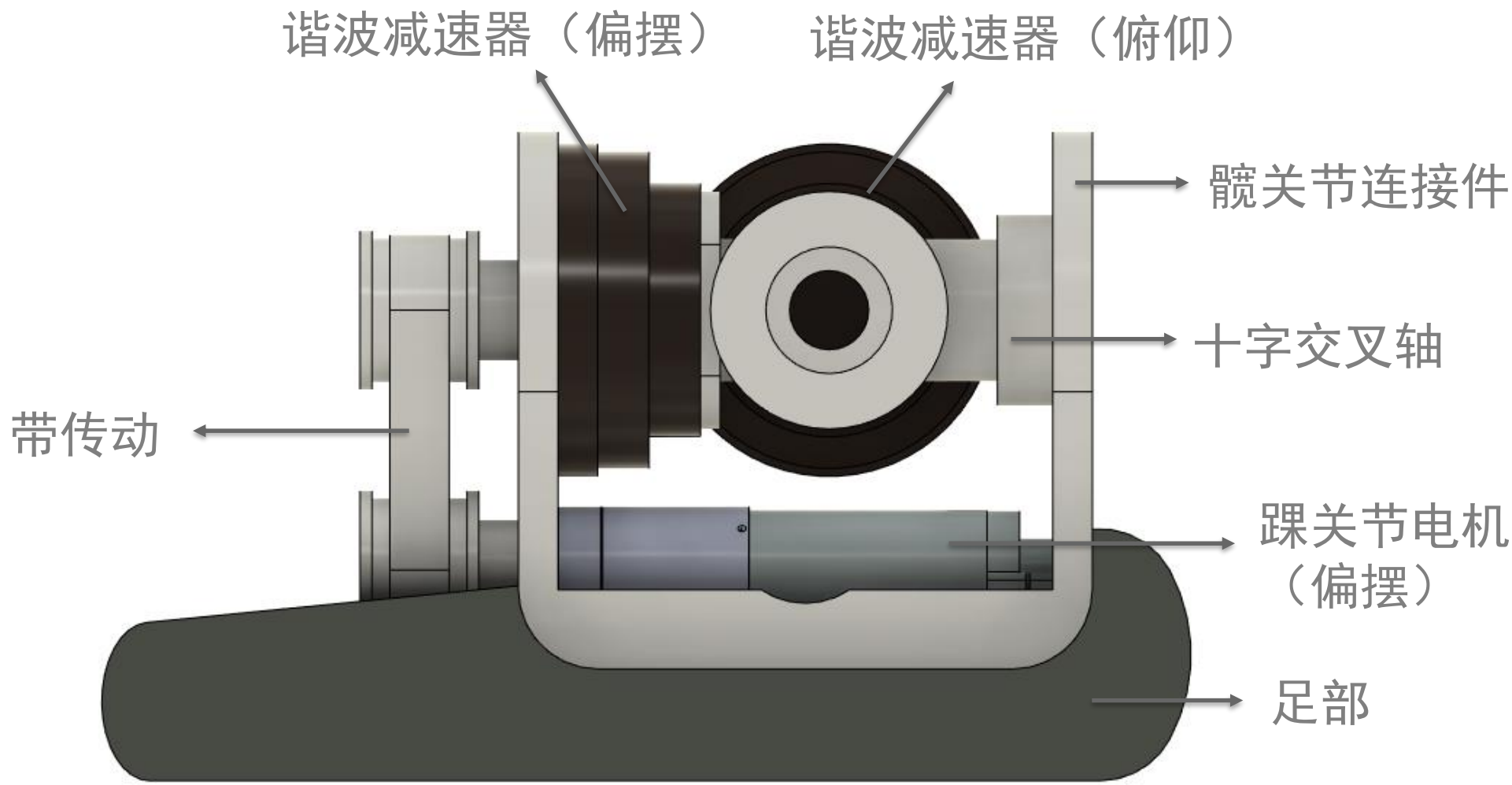
3. 下肢结构



髋关节



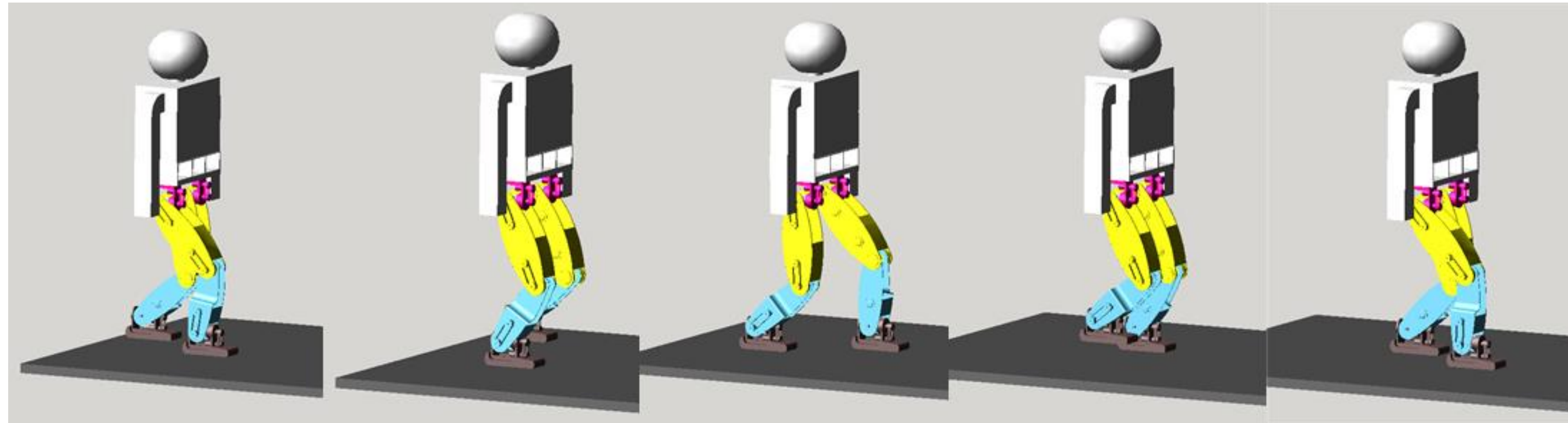
踝关节



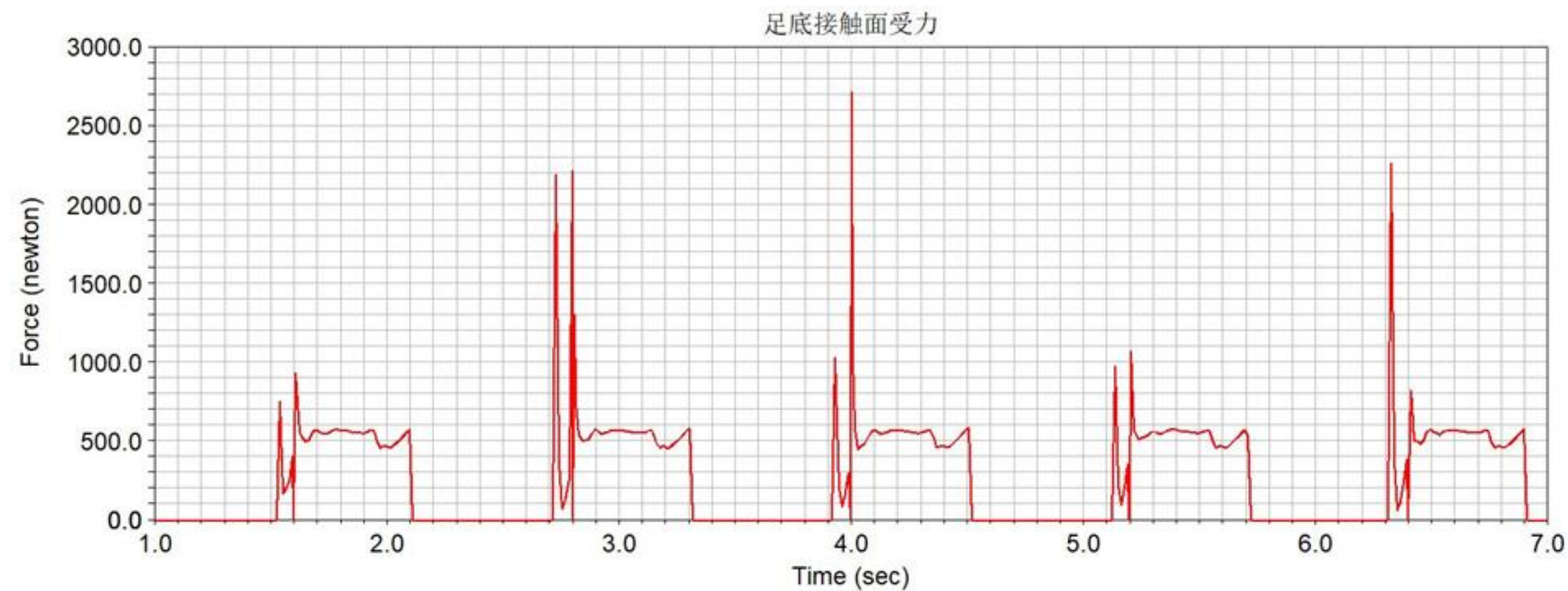
受力分析与建模

1. 约束、载荷分析

1.1 运动仿真



上半身为配重，
质量30KG。



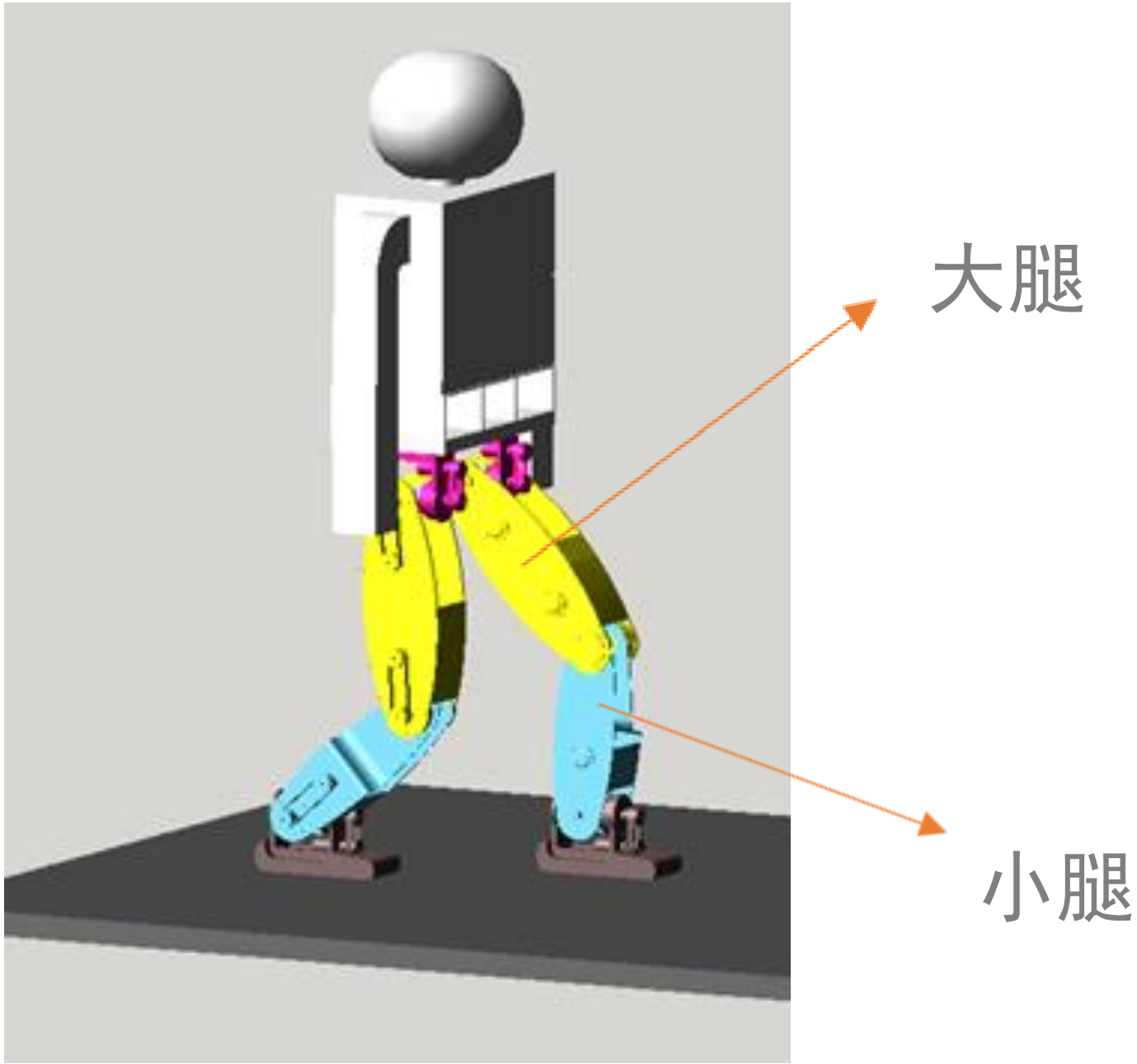
正常受力600N，
地面冲击平均
1200N。

1. 约束、载荷分析

1.2 受力分析

关节	自由度	运动范围 (°)
髋关节	俯仰	-13.28~46.61
	偏摆	-3.34~3.34
膝关节	俯仰	26.85~77.3
踝关节	俯仰	0~55.82
	偏摆	-3.34~3.34

步行前进中各关节运动范围



与地面碰撞发生冲击时，大腿骨处于最大偏转角度，小腿骨处于竖直状态。

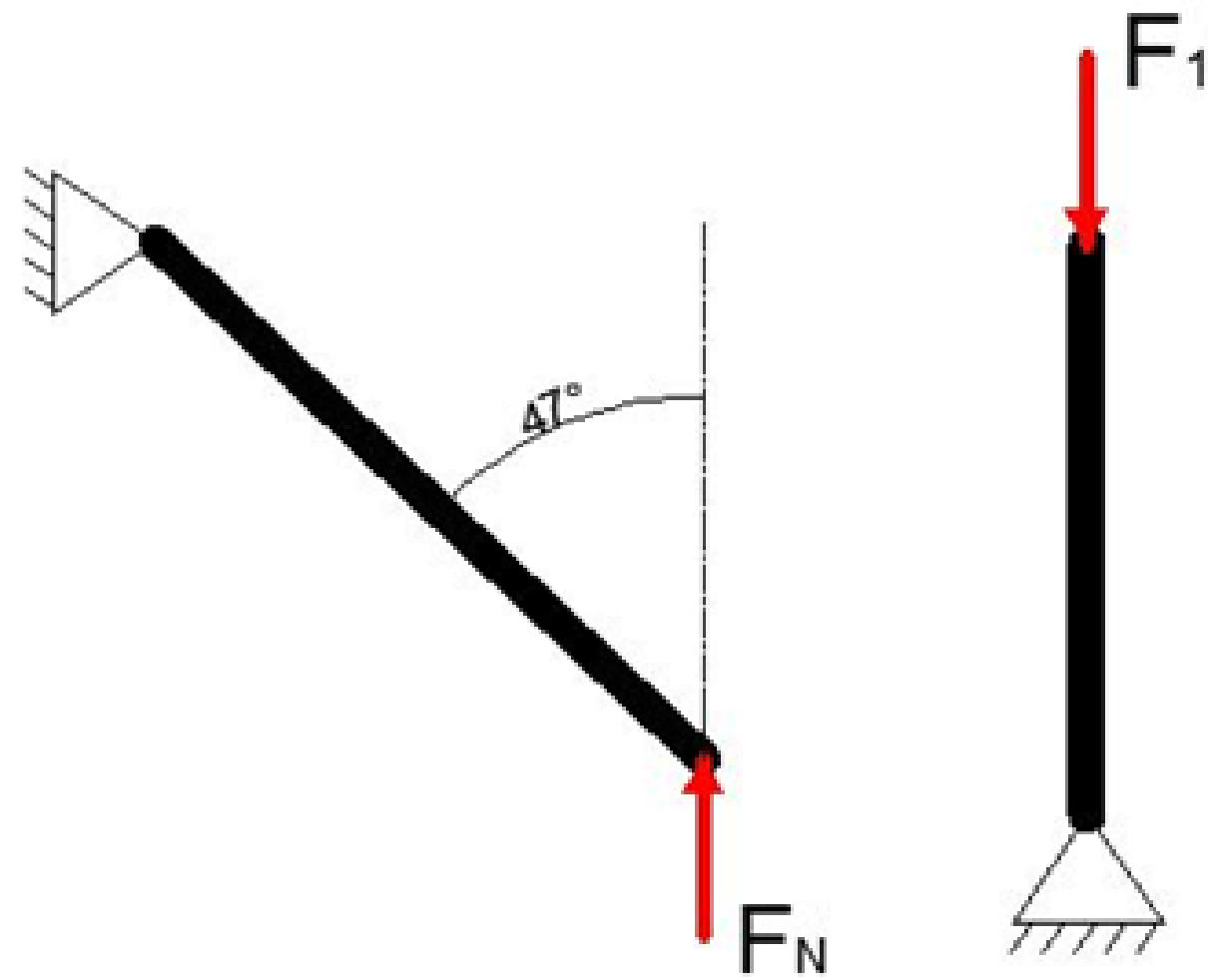
- 偏摆角度过于微小，忽略其对部件受力的影响。
- 得出大腿骨、小腿骨、足部最大受压和最大弯曲状态。

1. 约束、载荷分析

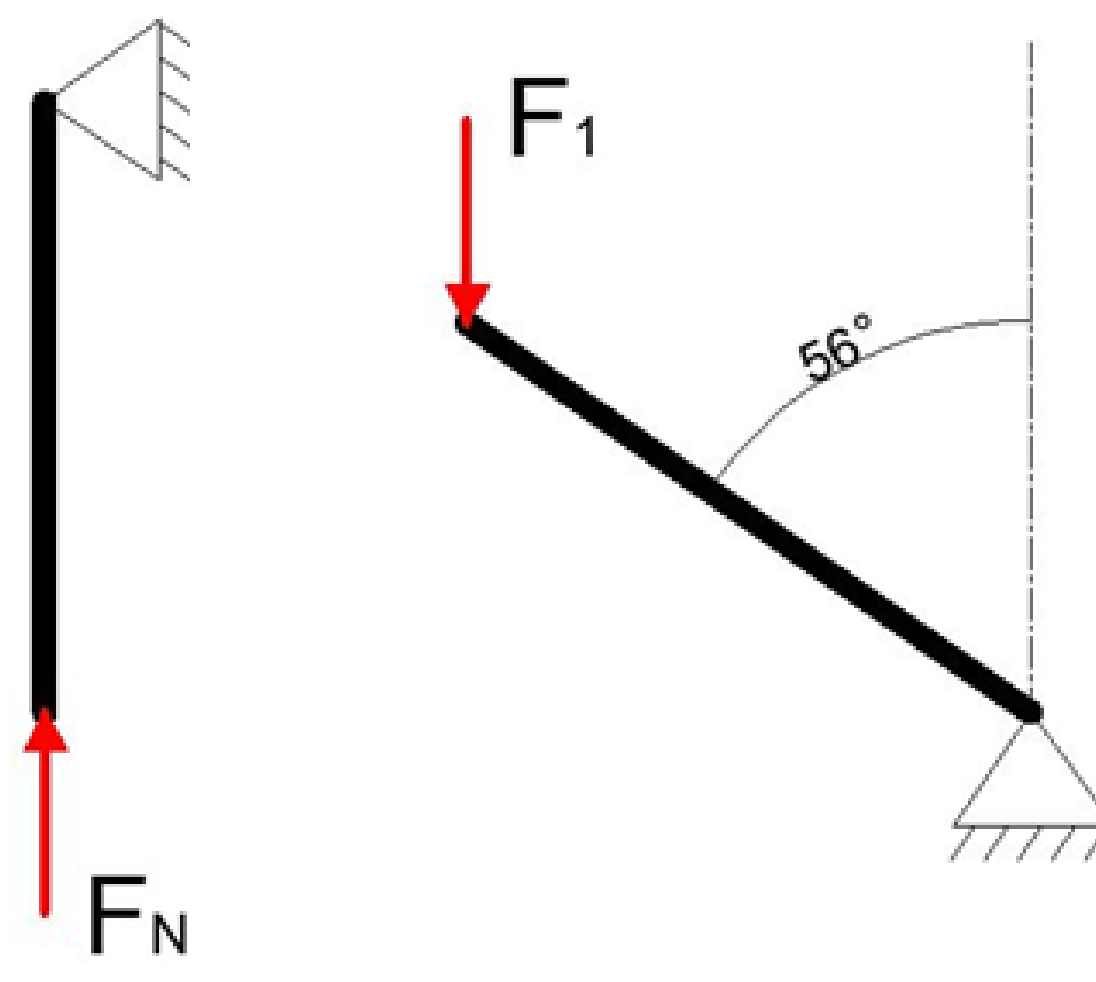
1.2 受力分析

$F_N = 1200\text{N}$

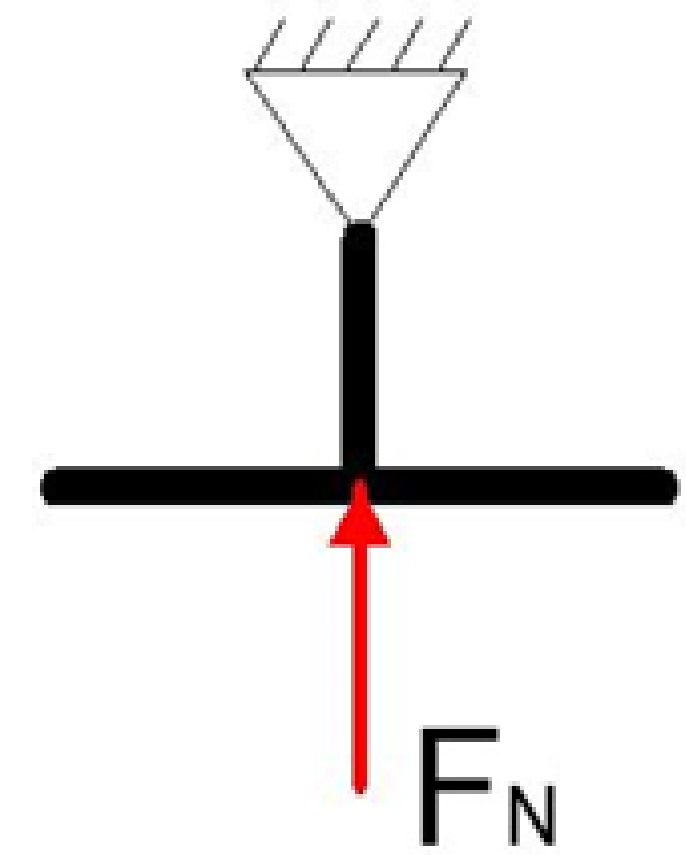
$F_1 = 600\text{N}$



大腿骨最大弯曲（左）和
最大受压（右）状态



小腿骨最大受压（左）和
最大弯曲（右）状态



足部最大受力状态

三个部件的主要约束、载荷状态

结构优化仿真研究

2. 拓扑优化

使用传统软件进行拓扑优化分析

传统的拓扑优化模块可以同时导入多个模型，但只能对一个应力仿真结果进行拓扑优化。

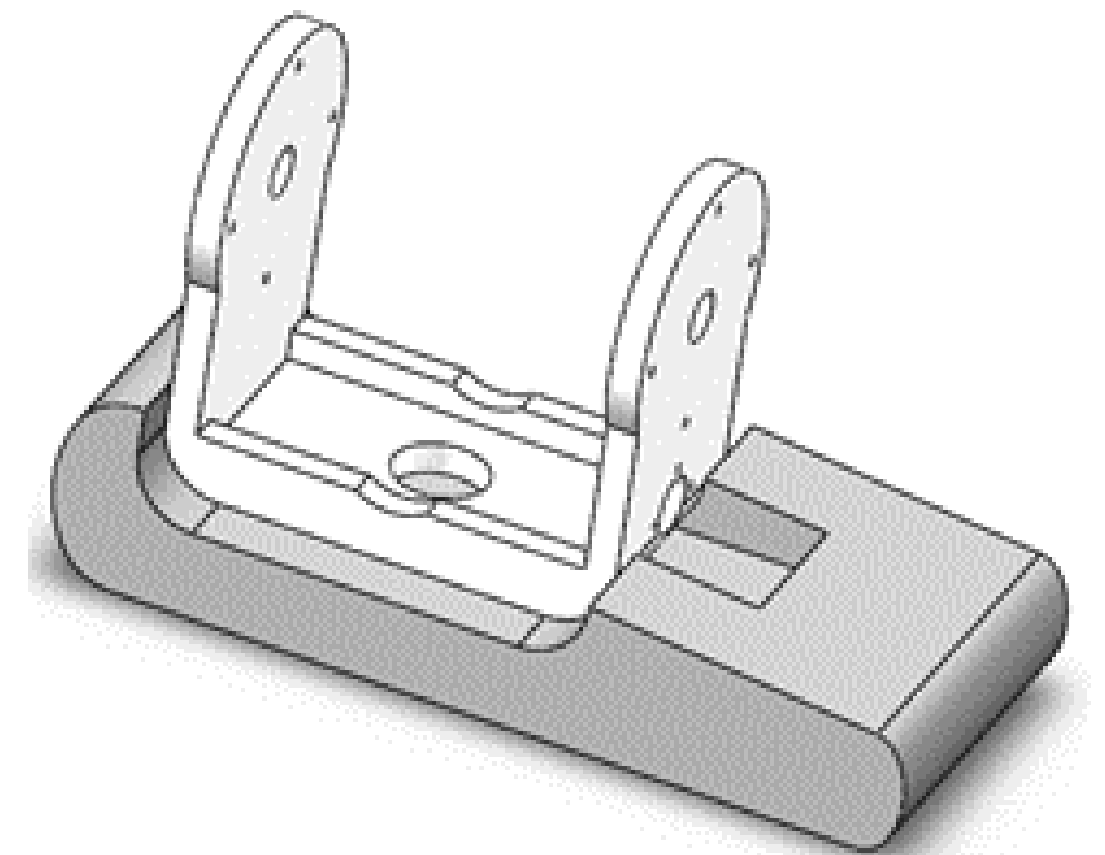
- 只能输入一种受力状态，需选择应力较大的受力情况进行拓扑优化。
- 主要参数：材料、约束、载荷、优化目标、制造方法、迭代次数、收敛精度



大腿骨



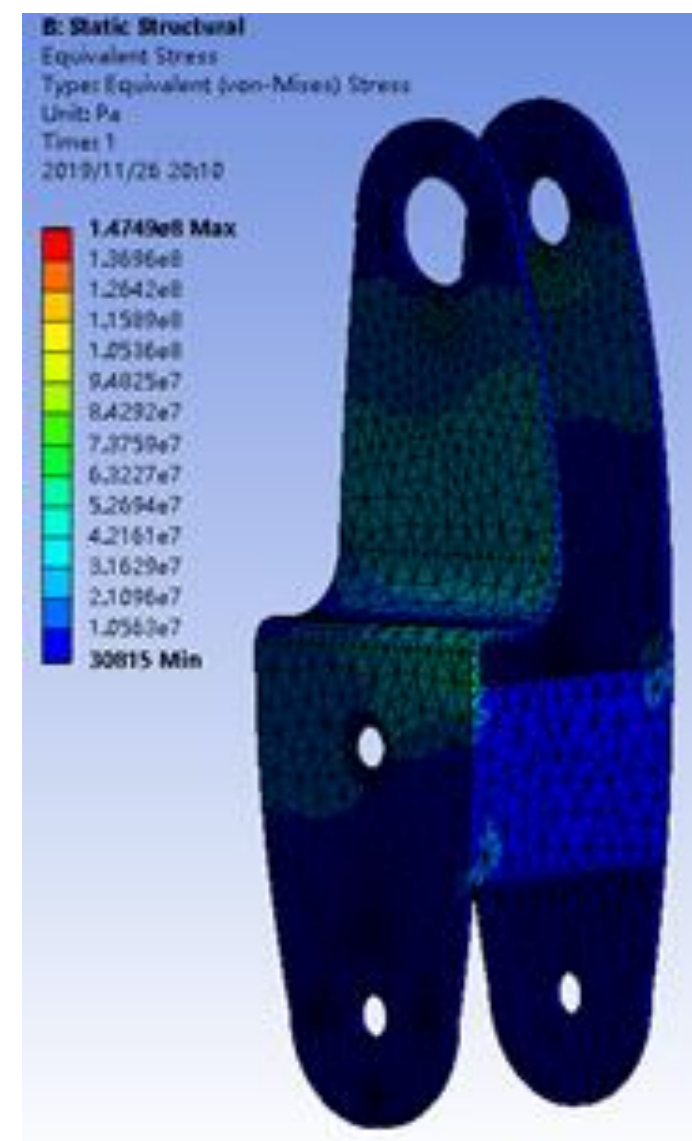
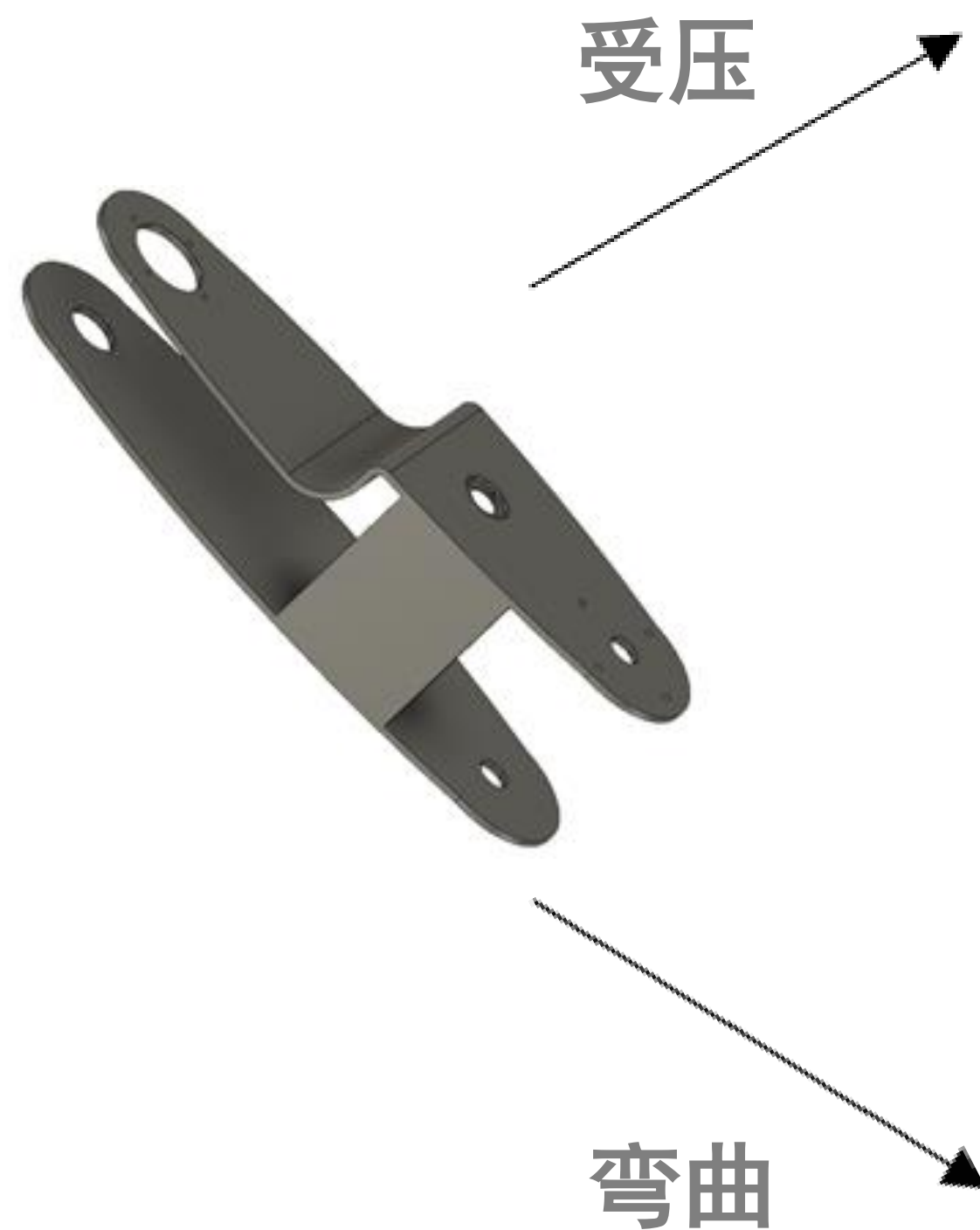
小腿骨



足部

2. 拓扑优化

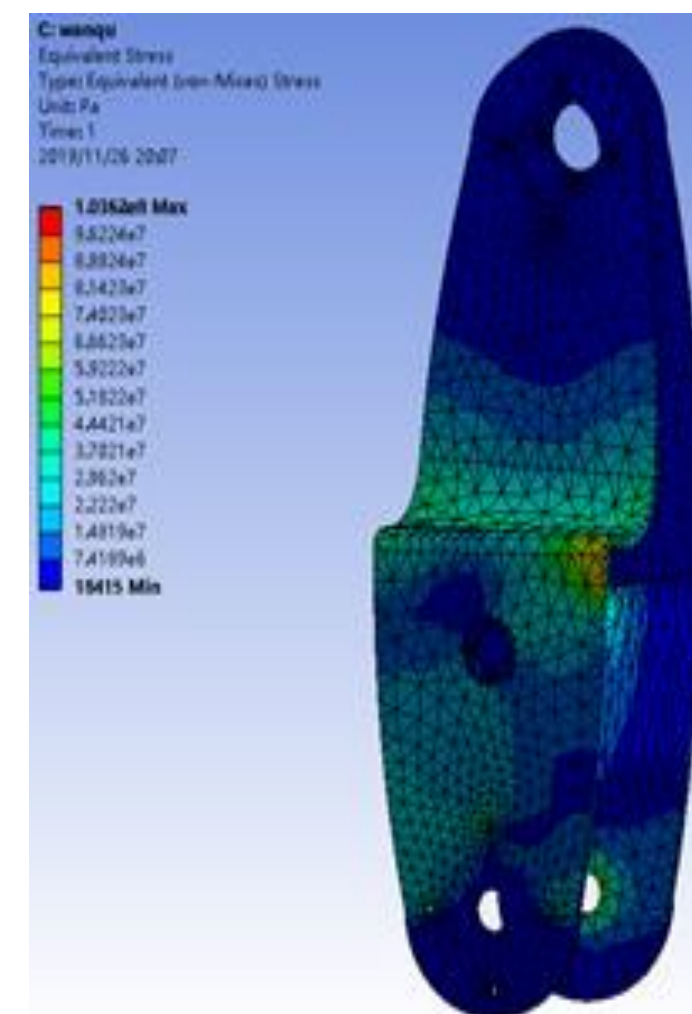
以小腿骨为例



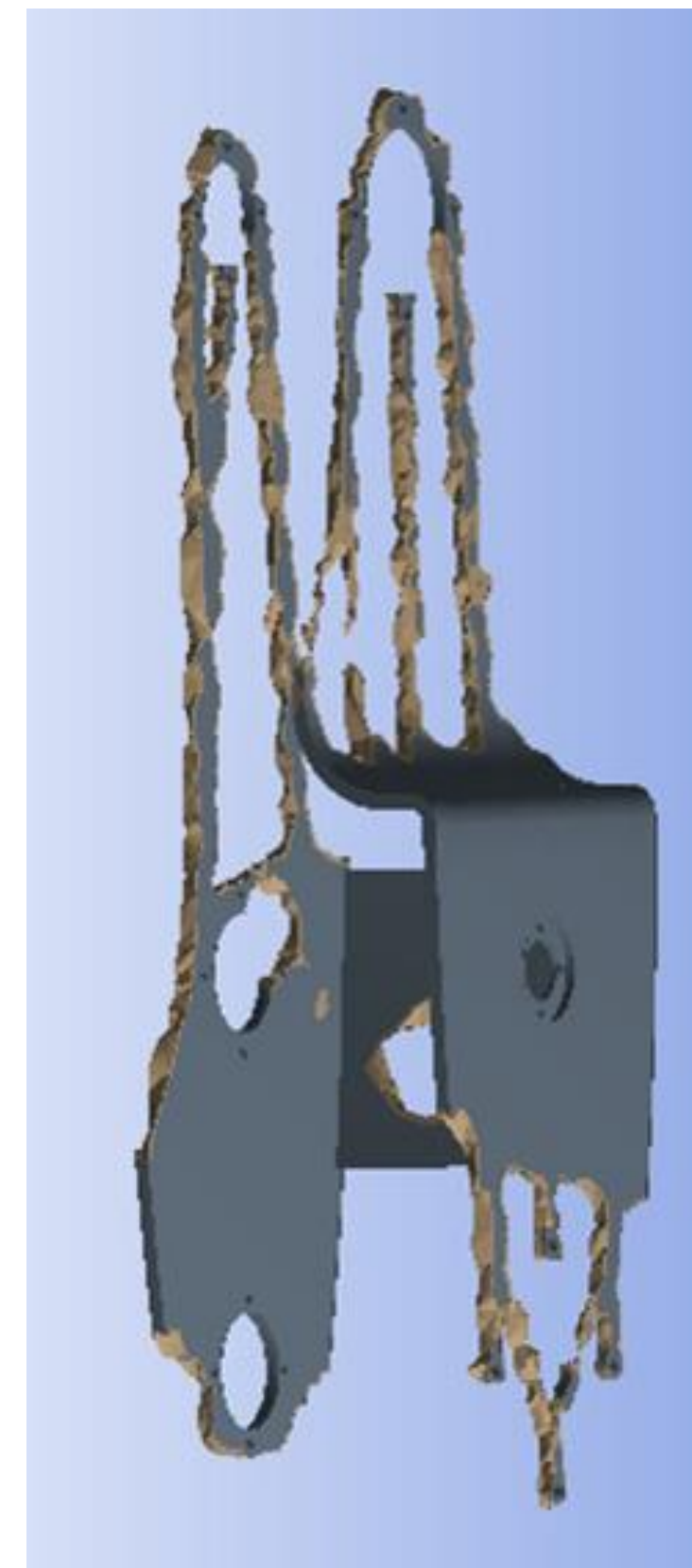
147Mpa

较危险

拓扑优化



104Mpa



➤小腿骨受压状态应力较大，作为优化状态

➤模型直接优化效果差，减重49%但形状不连续，危险系数较大

2. 拓扑优化

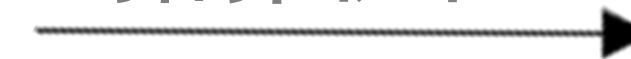
以小腿骨为例



预处理



拓扑优化

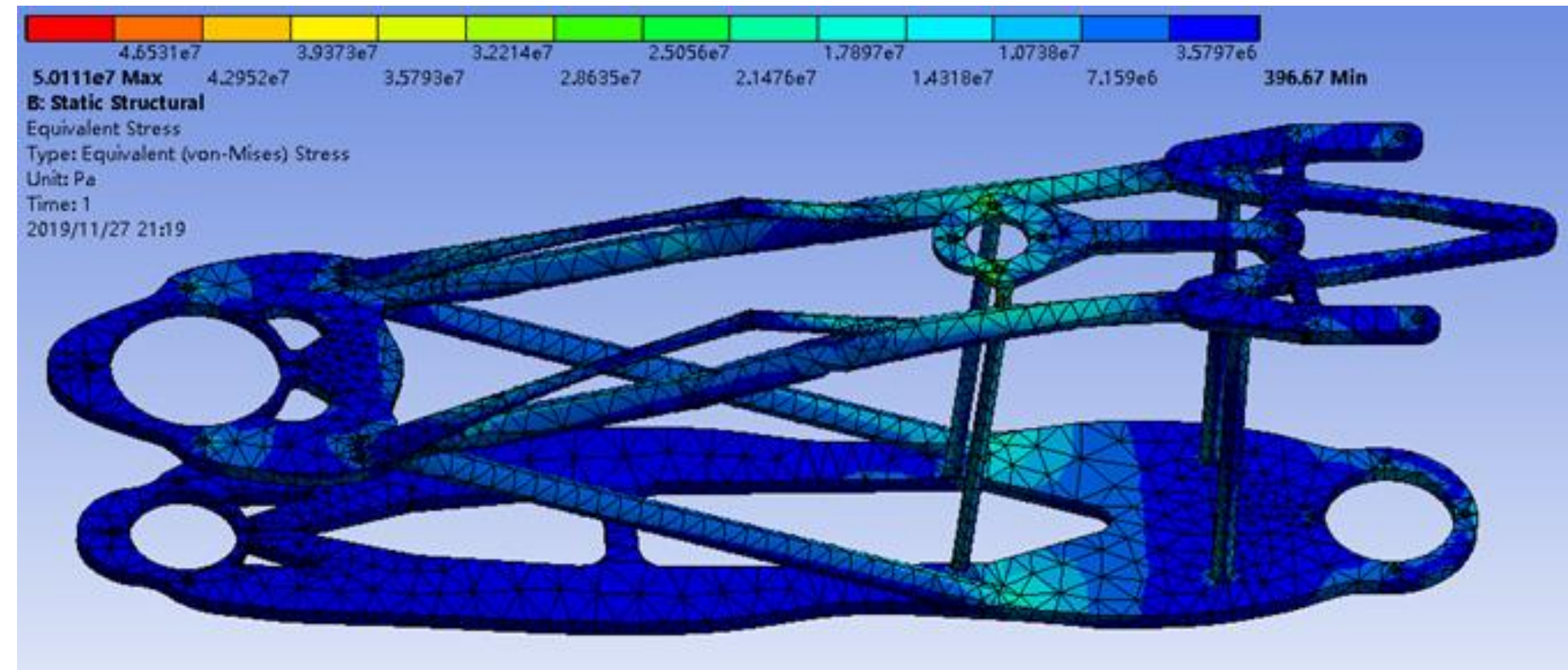
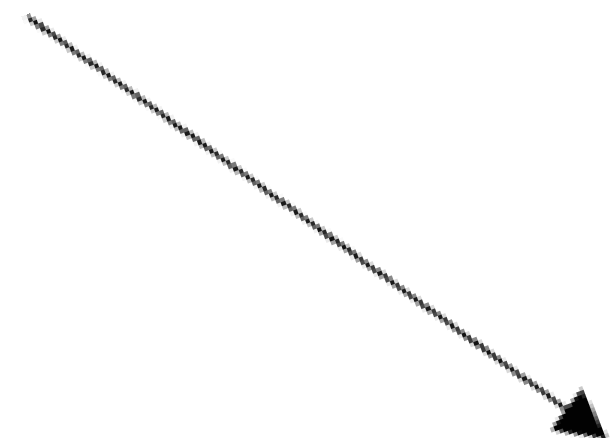
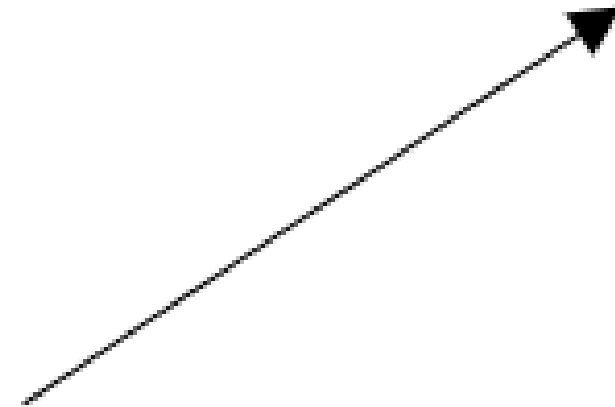


将模型修改为一整块的毛坯，去除会导致装配干涉部位的材料，修改优化目标。

- 最大迭代次数500，收敛精度0.1%，目标函数质量6%，制造方法不定。
- 最终迭代次数为43，优化结果质量为0.611kg，是优化前的5.851%，即原小腿骨质量的30.29%。

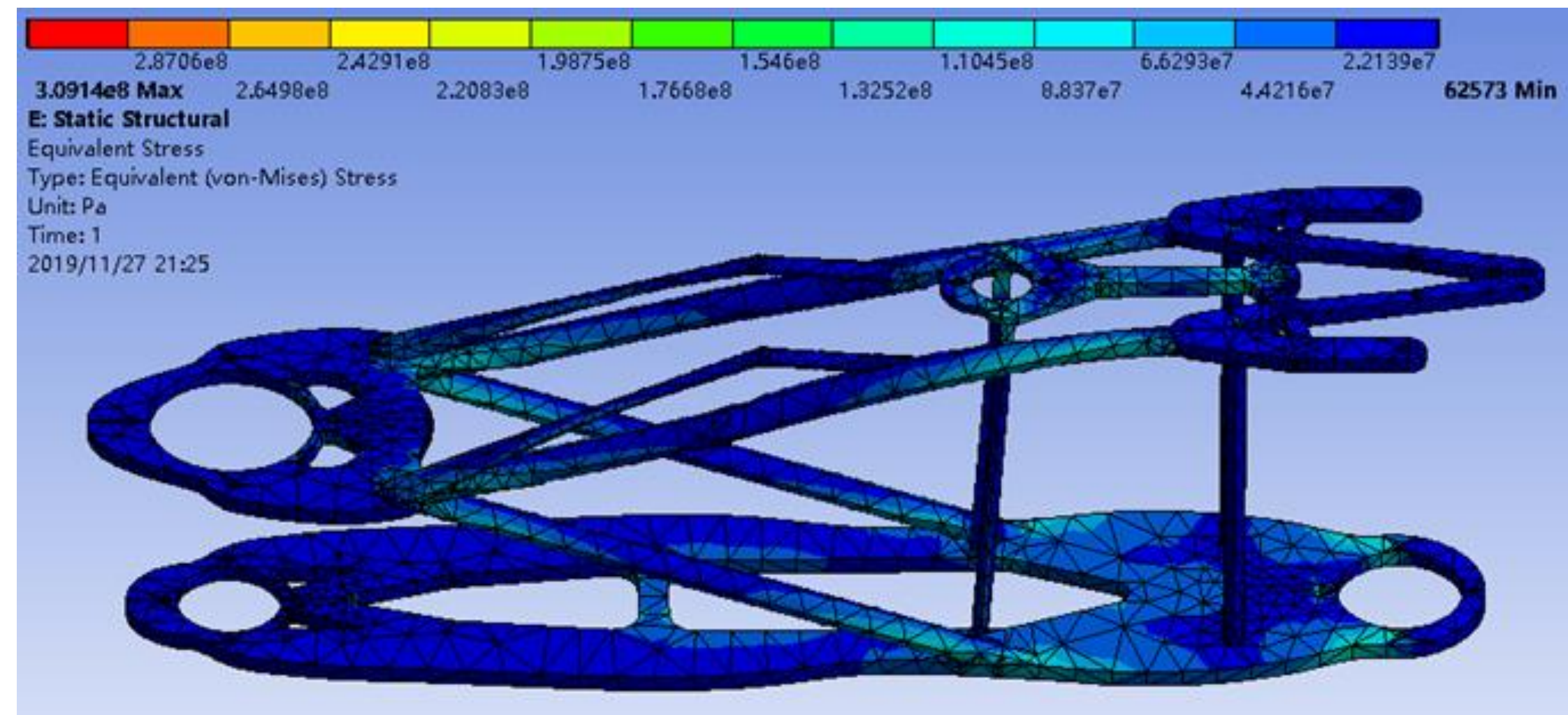
2. 拓扑优化

以小腿骨为例



50.1Mpa

承载能力
提升

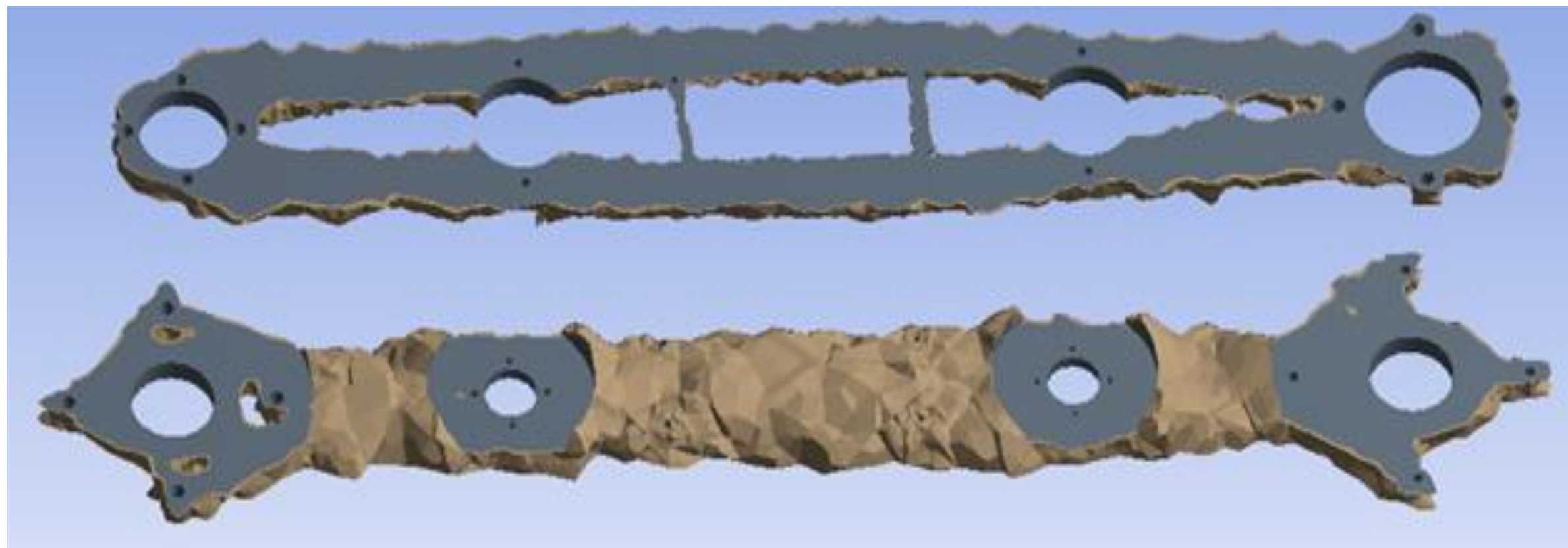


309Mpa

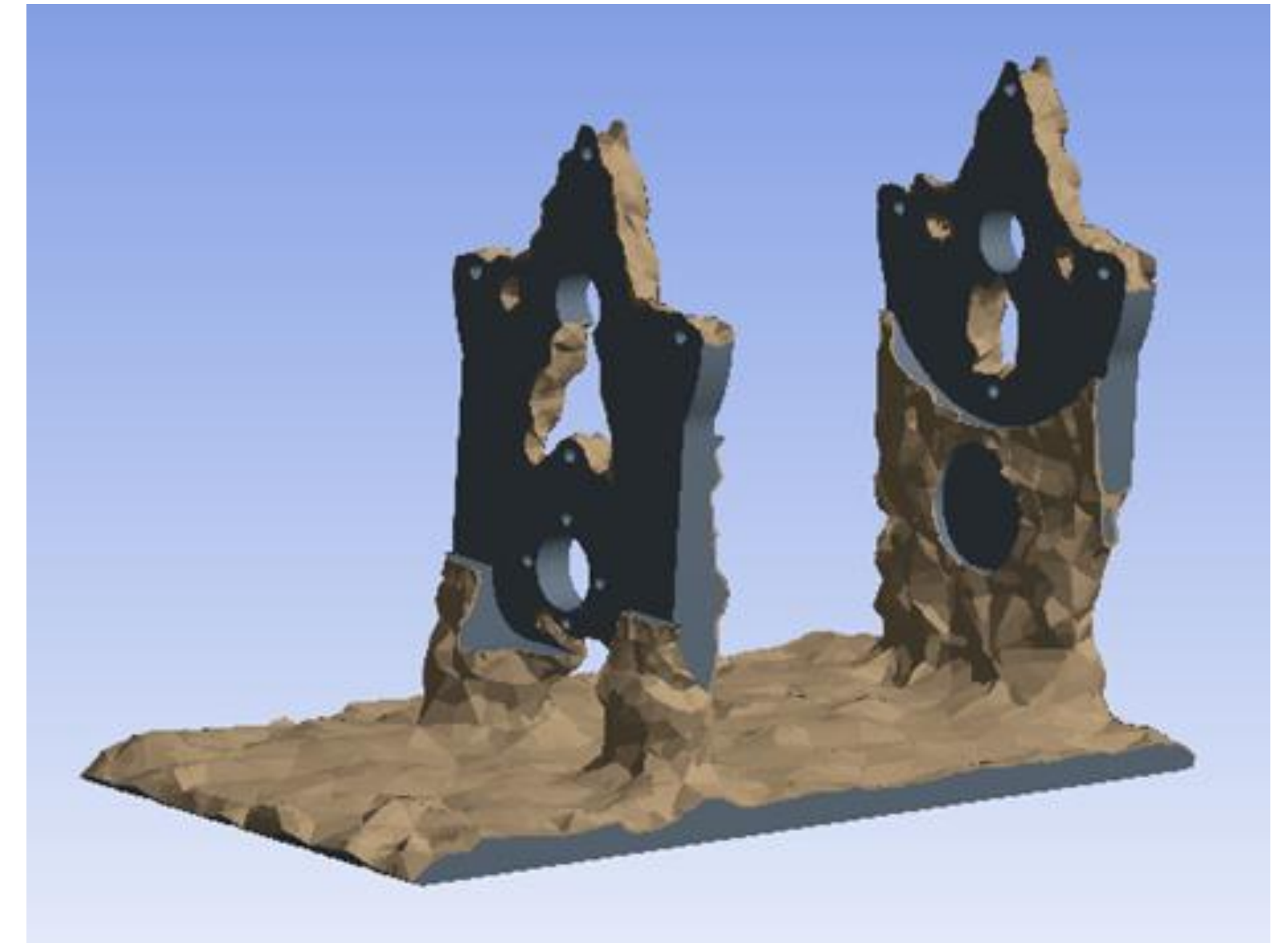
承载能力
下降

2. 拓扑优化

大腿骨和足部优化结果



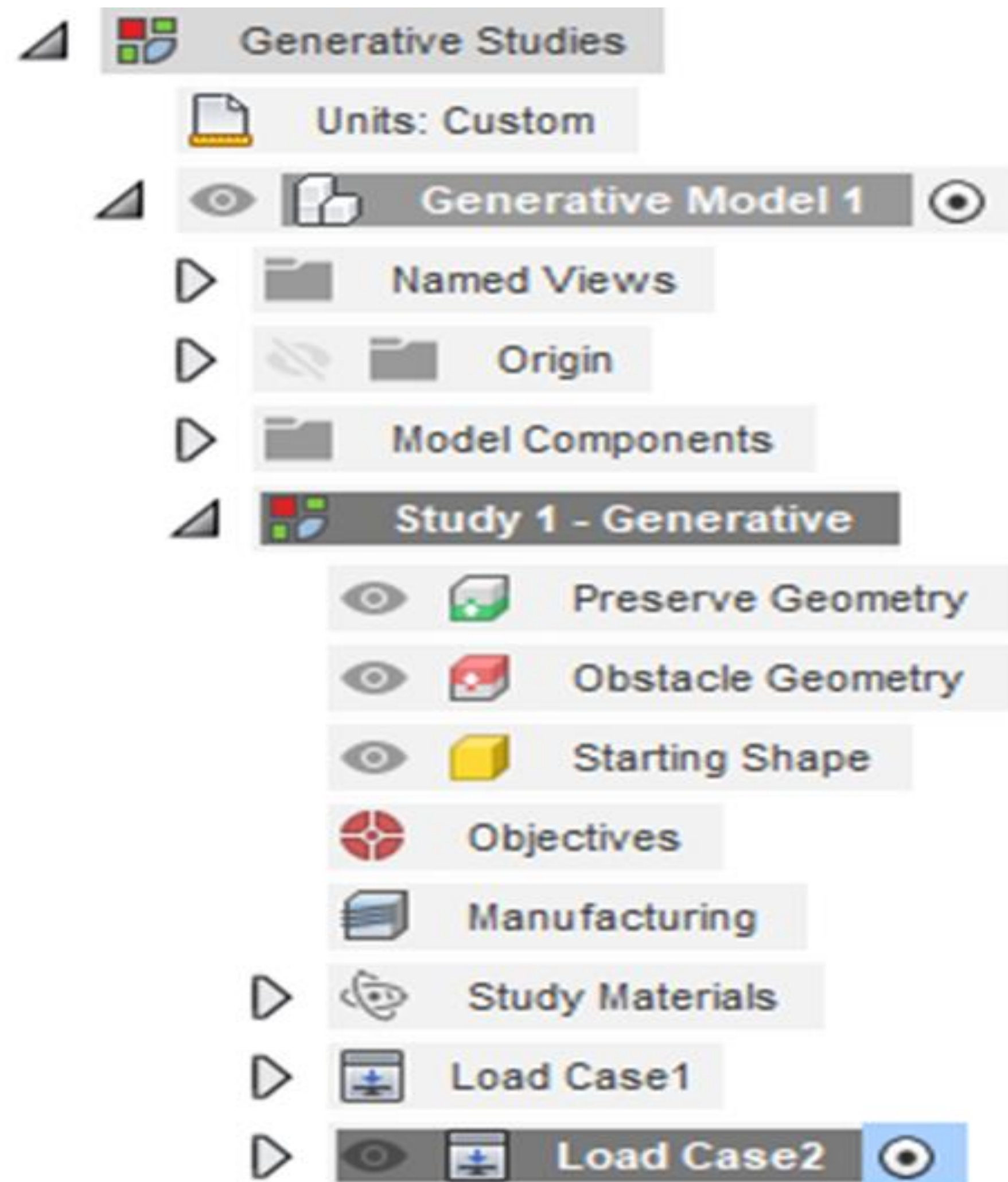
大腿骨优化迭代次数为27，优化后质量为1.00kg，为原来的32.6%。



足部优化迭代次数为19，优化后质量为1.35kg，为原来的39.5%。

3. 衍生式设计

使用Fusion360的Generative Design模块



➤不需要初始模型，仅需保留非优化部位

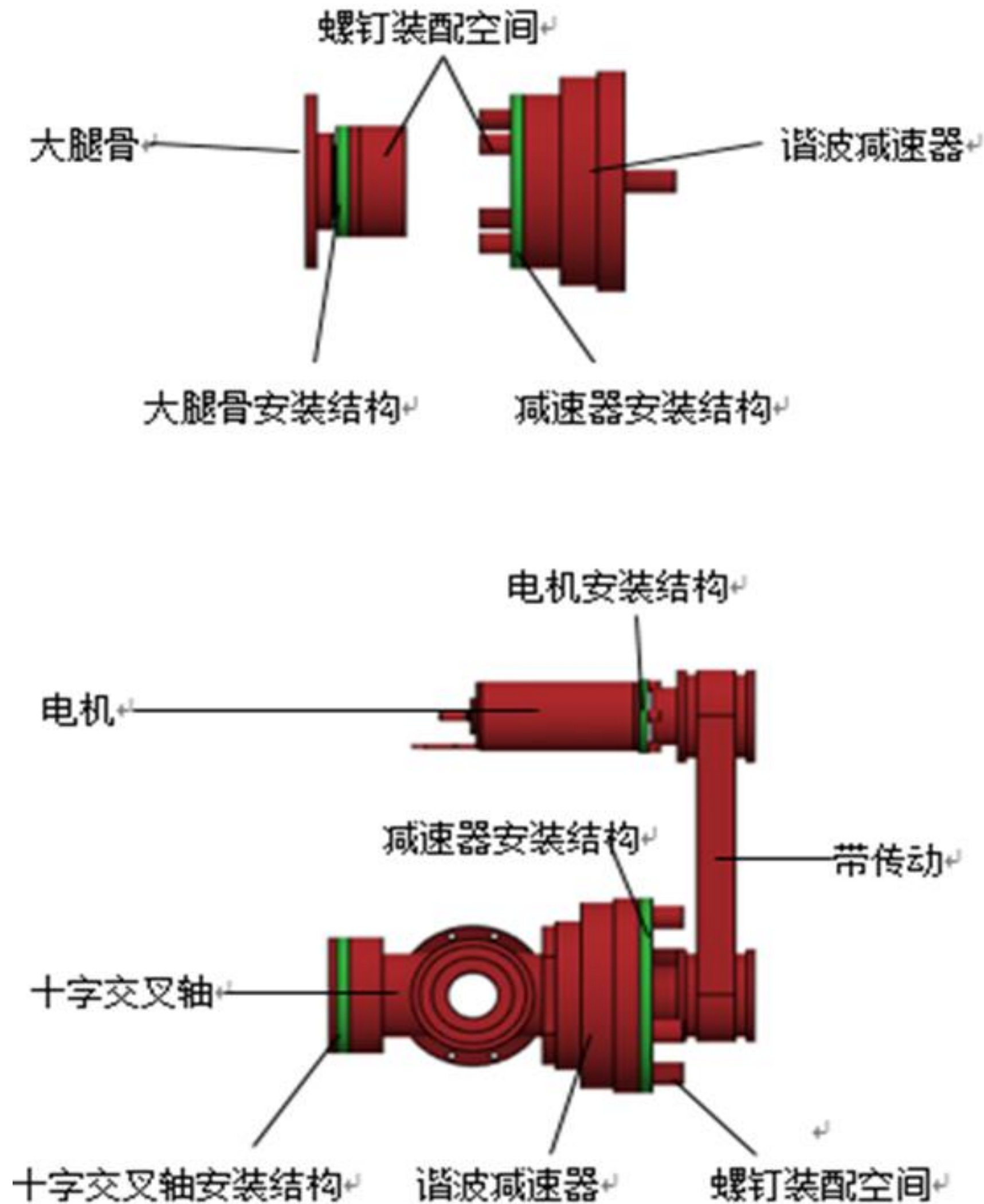
➤可以设置初始形状

➤可以输入多种受力状态

➤主要参数：材料、约束、载荷、优化目标、制造方法、安全系数

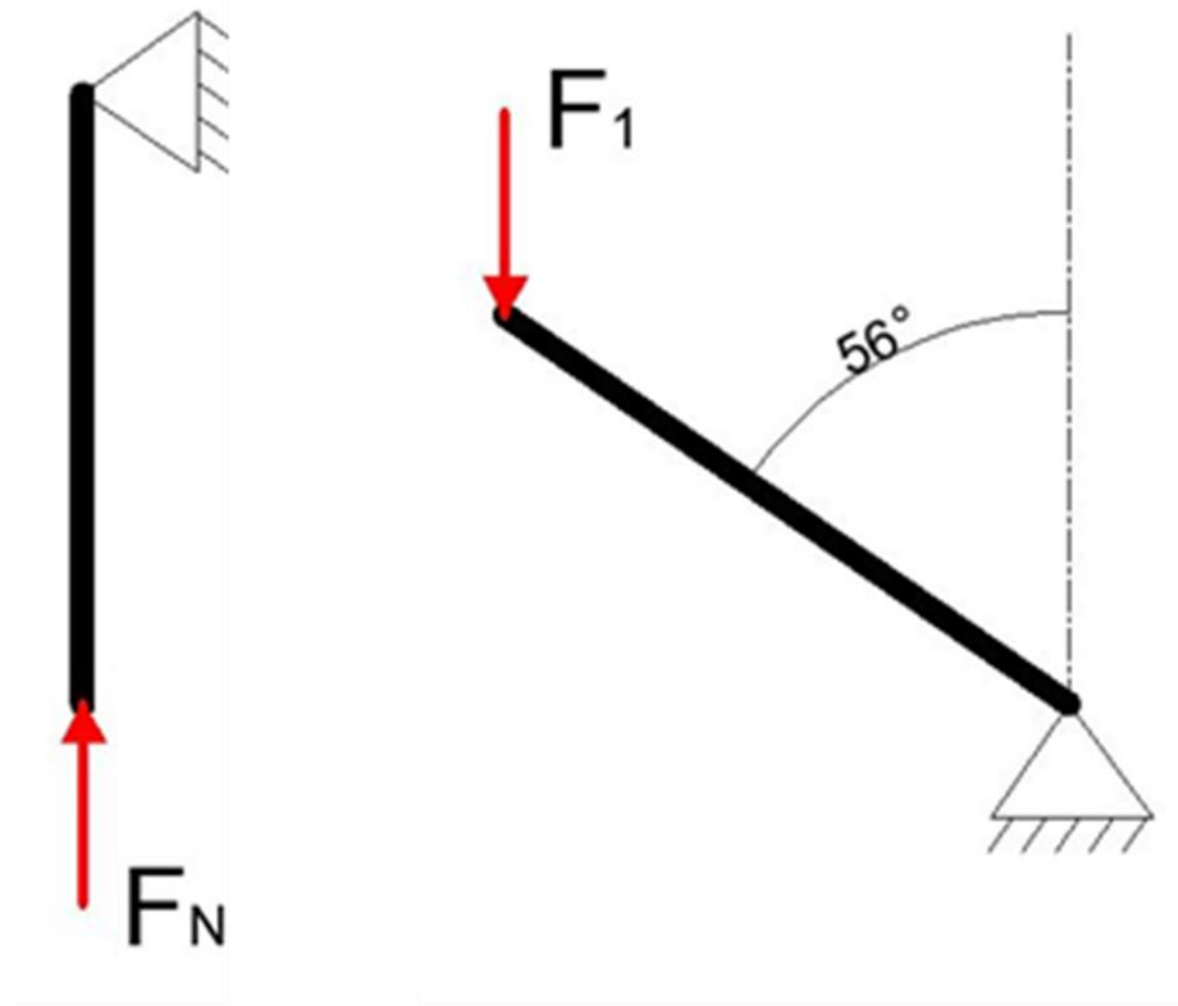
3. 衍生式设计

以小腿骨为例



模型：红色——障碍几何体
绿色——保留几何体

受力状态：



设计目标：质量最轻

安全系数：2.0

材料：高强度铝合金和金属3D打印材料

制造方法：增材制造，厚度 $>3\text{mm}$

3. 衍生式设计

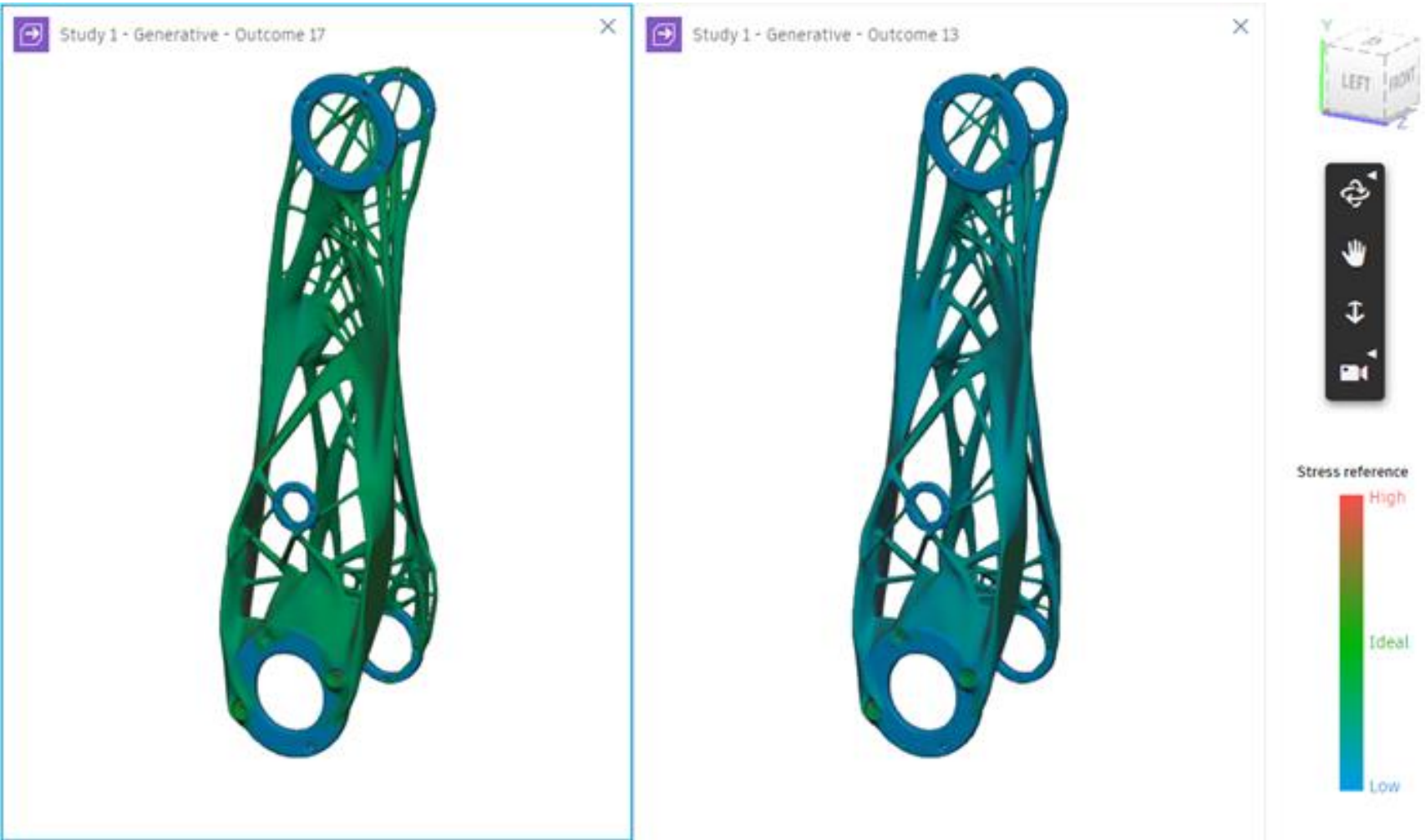
缩略视图

	Name	Tech-Preview	Processing status	Material	Manufacturing method	Volume (mm ³)	Mass (kg) ↓	Max von Mises stress (MPa)	Factor of safety limit	Min factor of safety	Max displacement global (mm)
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Converged	Aluminum 6061 T6 80 Ho...	Unrestricted	2.218e+5	0.599	156.5	2	2	1.28
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Converged	Aluminum 7175 T73 0 Ho...	Unrestricted	2.217e+5	0.621	223.2	2	2	1.34
	Study 1 - Generative - Outcome 9		Converged	Aluminum	Unrestricted	2.658e+5	0.718	137.5	2	2	1.13
	Study 1 - Generative - Outcome 1		Converged	Aluminum AISi10Mg	Unrestricted	2.98e+5	0.796	120	2	2	0.97
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Completed	Aluminum 7175 T73 0 Ho...	Additive	3.386e+5	0.948	223.5	2	2	10.42
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Completed	Aluminum 6061 T6 80 Ho...	Additive	3.566e+5	0.963	156.5	2	2	2.37
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Completed	Aluminum 6061 T6 80 Ho...	Additive	3.638e+5	0.982	156.5	2	2	5.81
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Completed	Aluminum 7175 T73 0 Ho...	Additive	3.528e+5	0.988	223.4	2	2	5.42
	Study 1 - Generative - Outcome ...		Completed	Aluminum	Additive	3.755e+5	1.014	137.5	2	2	5.08
	Study 1 - Generative - Outcome 5		Converged	Titanium 6Al-4V	Unrestricted	2.321e+5	1.028	394.8	2	2.24	0.79

属性视图



散点图



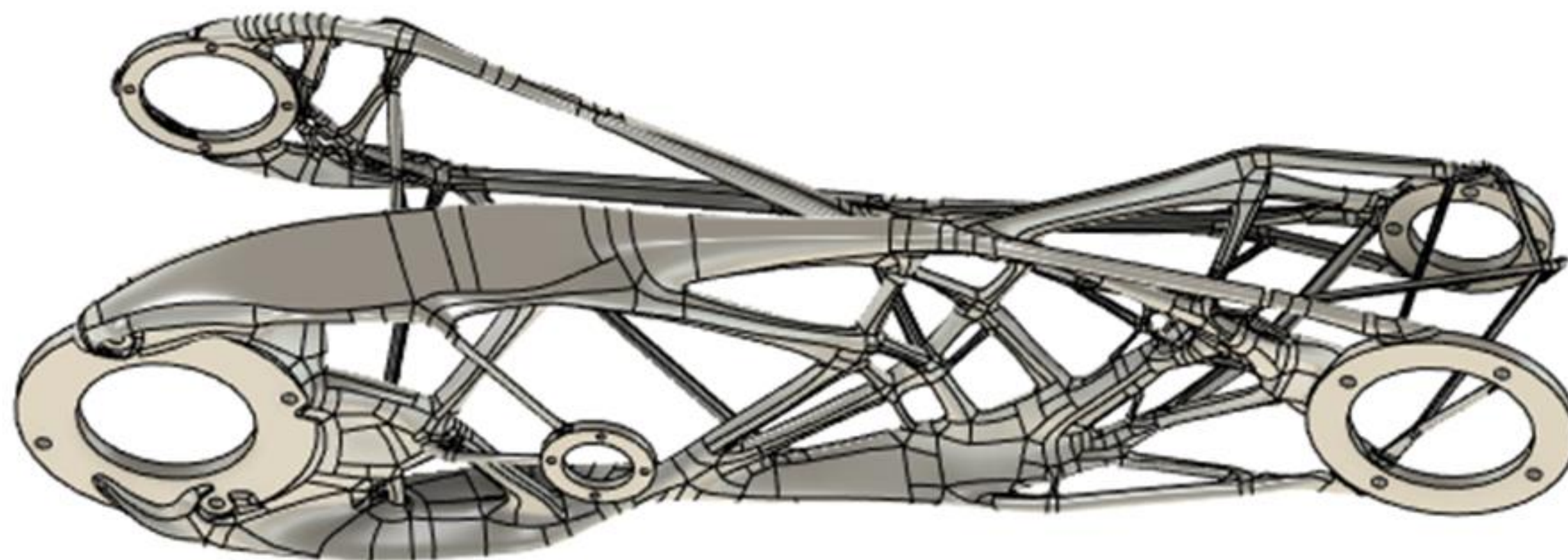
对比模块

3. 衍生式设计

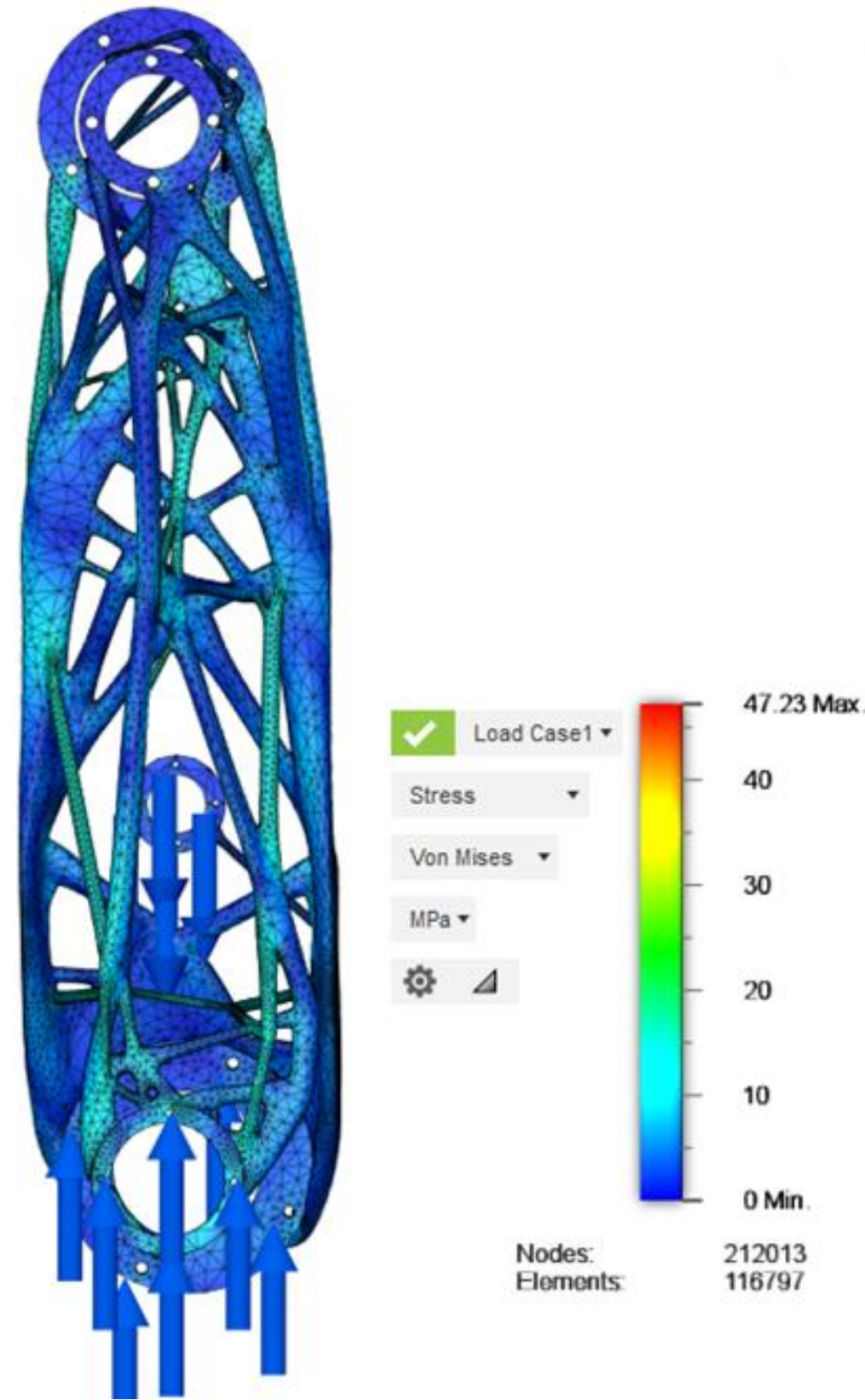


迭代过程:

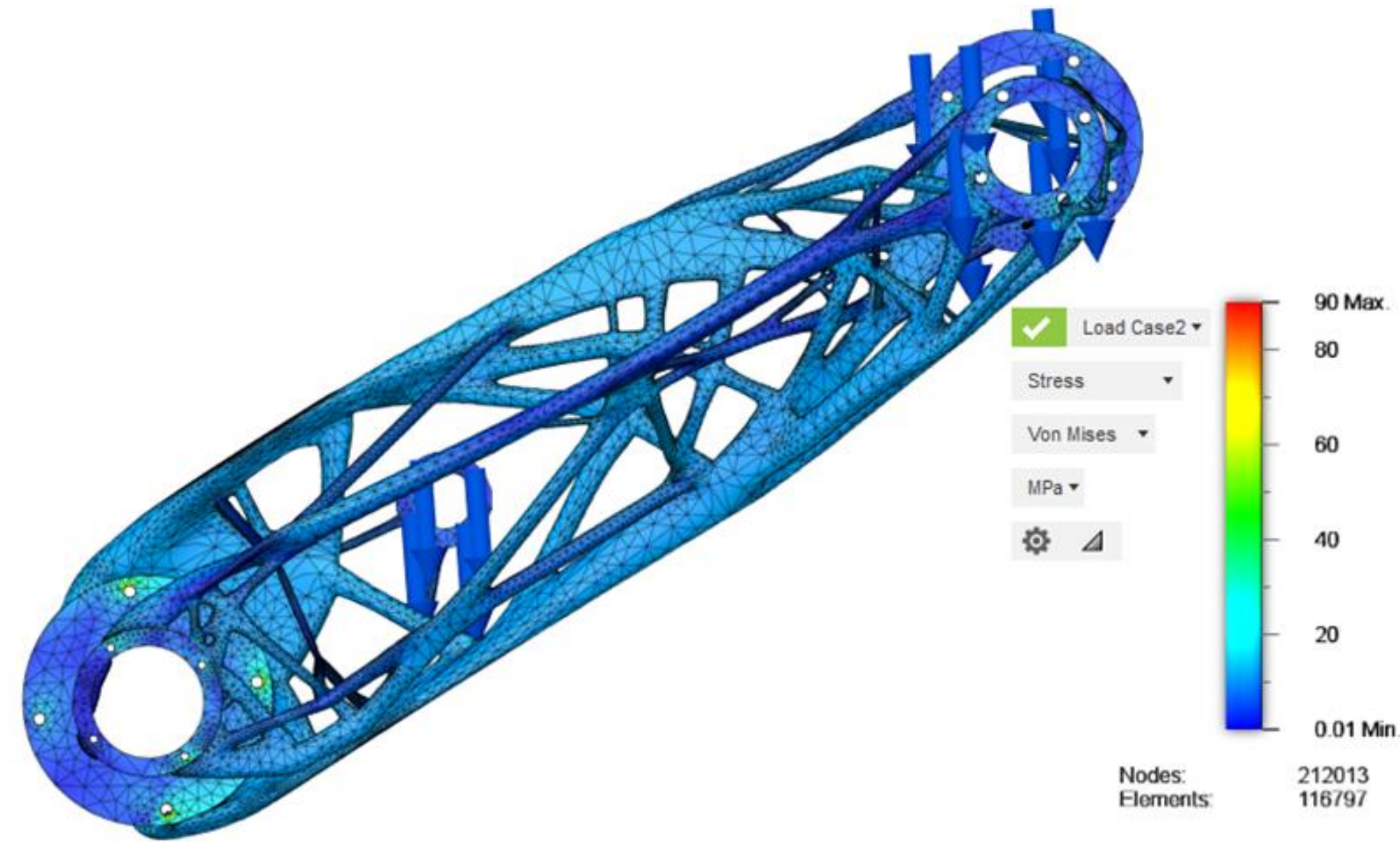
59次迭代



3. 衍生式设计



47.75Mpa



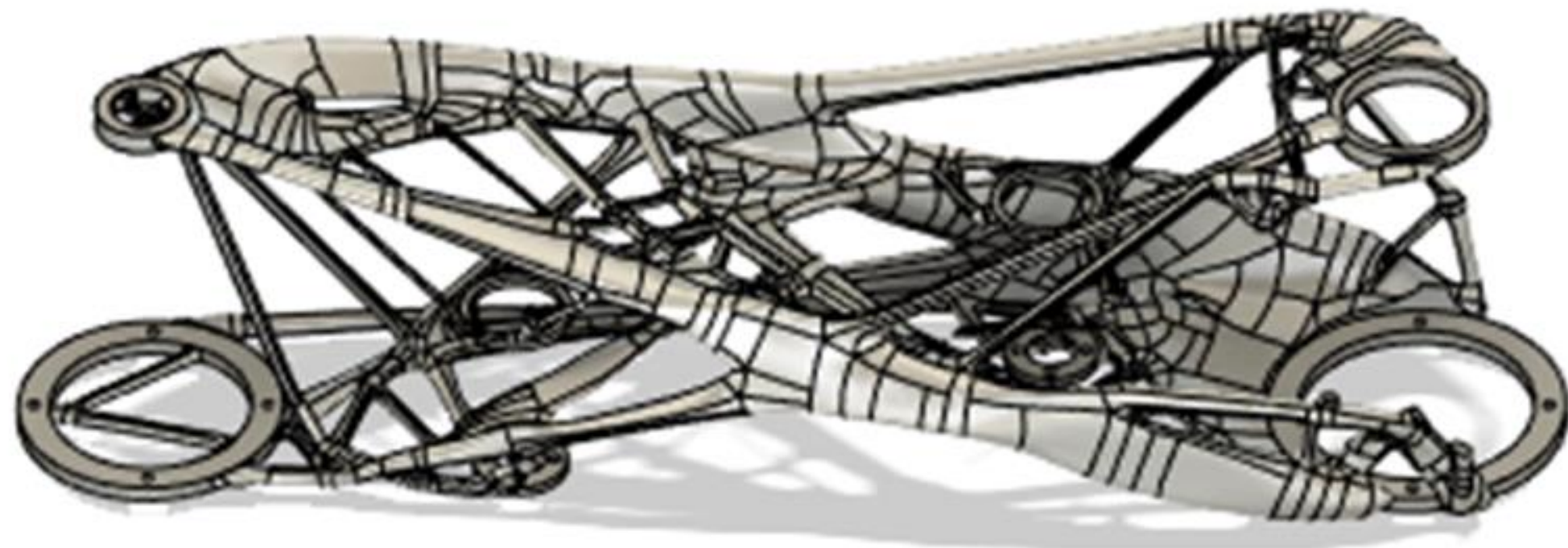
90Mpa

绿色 ✓ 表明零件完全可以承受此应力状态。

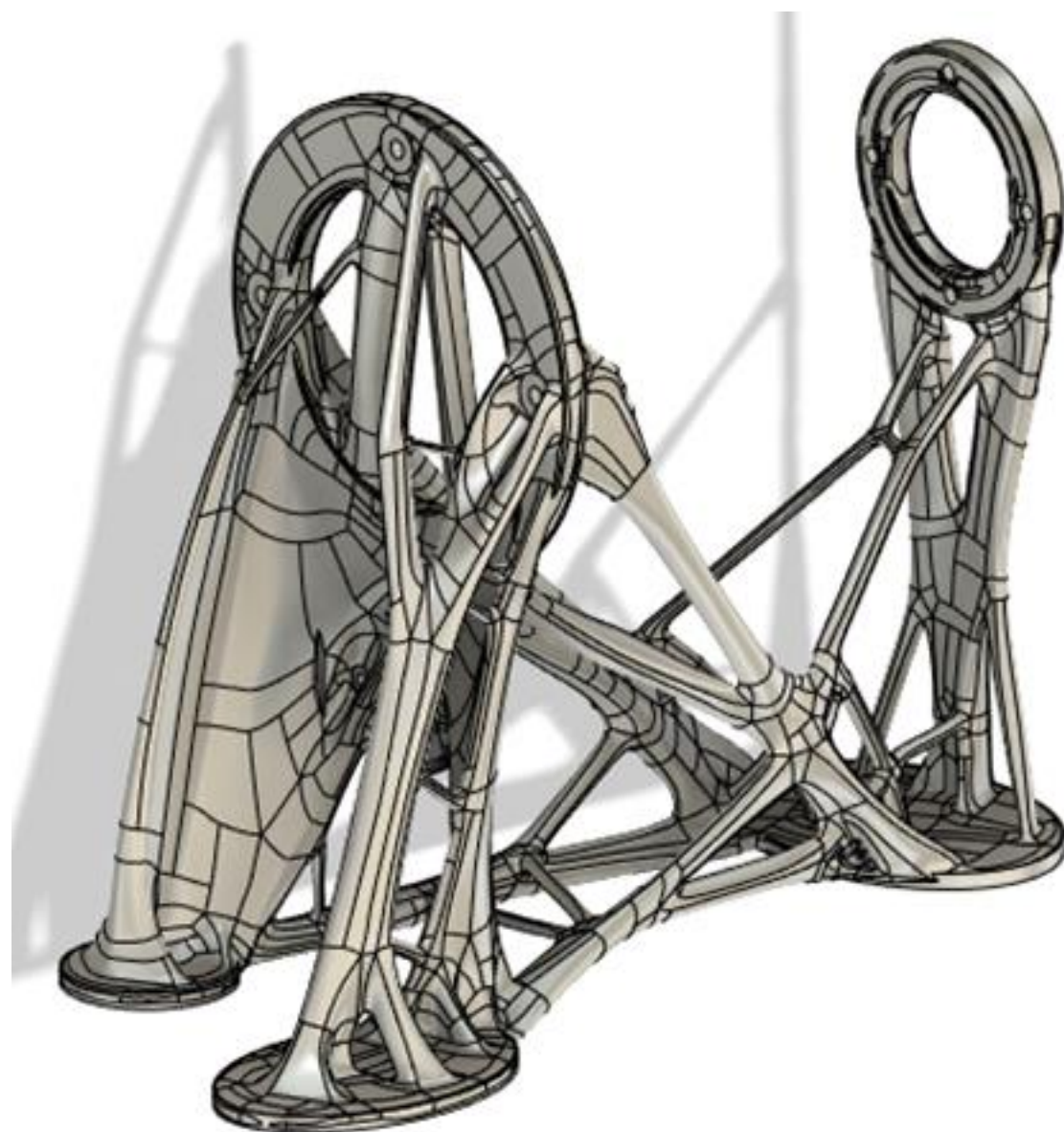
小腿骨衍生式设计模型最大应力为90MPa，最大位移为0.32mm，最小安全系数2.67，满足强度和刚度的要求。

3. 衍生式设计

大腿骨和足部衍生式设计结果



大腿骨设计结果质量为0.958kg，为原来的31.2%，最大应力127MPa。



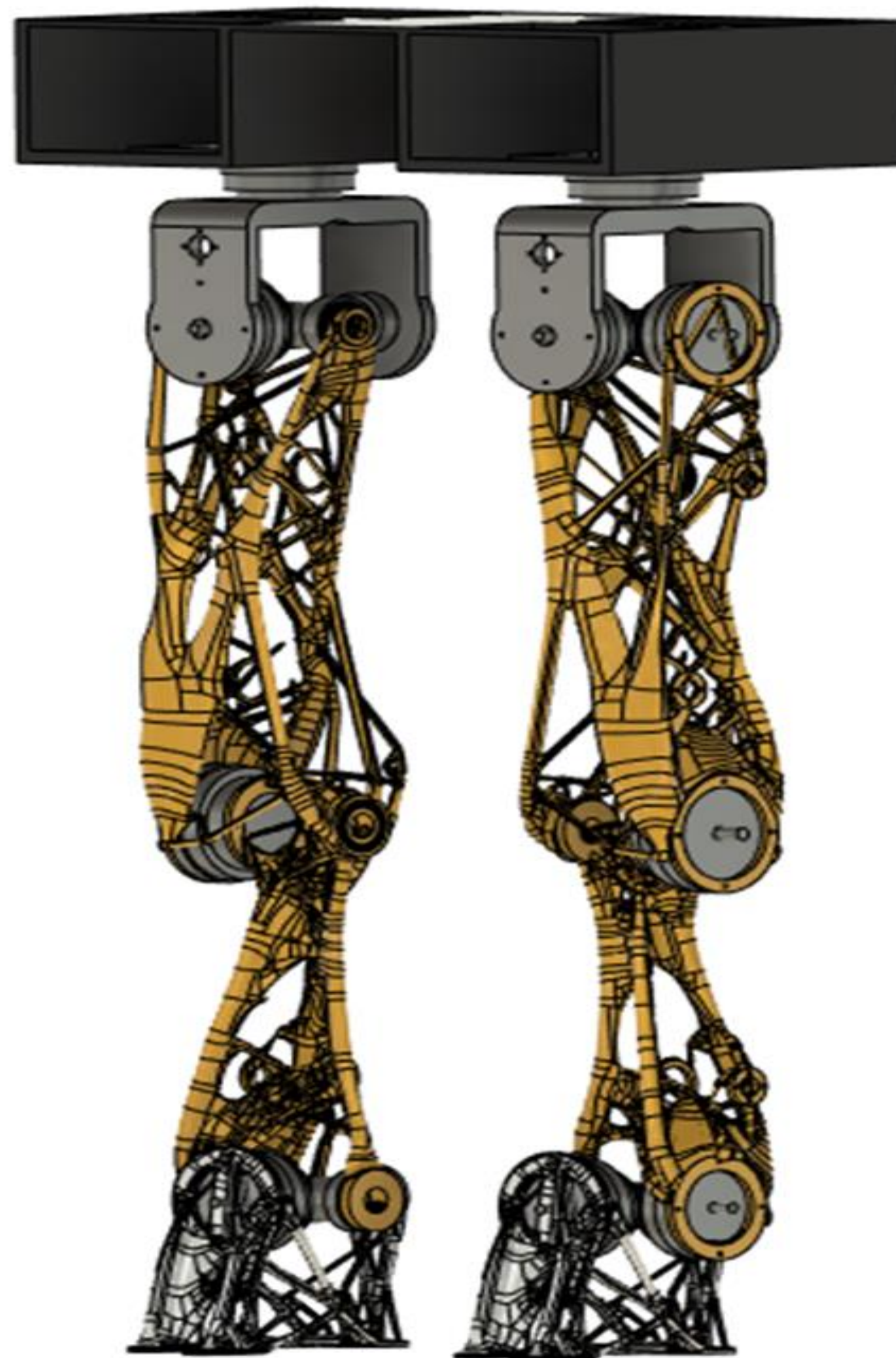
足部设计结果质量0.358kg，为原来的10.5%，最大应力21.8MPa。

3. 衍生式设计

拓扑优化与衍生式设计结果对比

机器人结构	优化方法	质量（kg）	轻量化比例	最大应力（Mpa）
大腿骨	拓扑优化	1.00	32.6%	189.7
	衍生式设计	0.958	31.2%	127
小腿骨	拓扑优化	0.611	30.29%	309.1
	衍生式设计	0.576	28.6%	90
足部	拓扑优化	1.35	39.5%	83.7
	衍生式设计	0.358	10.5%	21.8

3. 衍生式设计

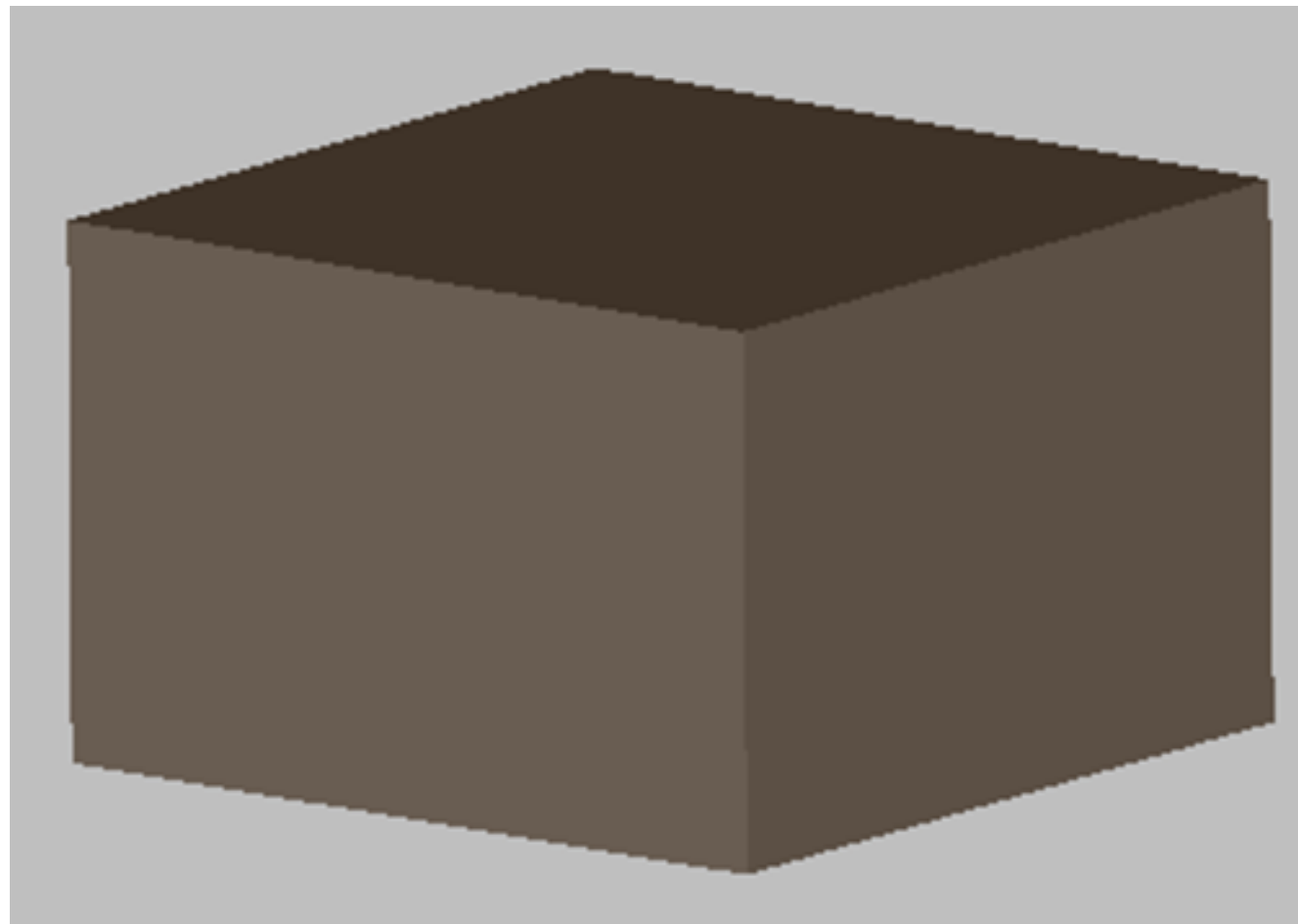


衍生式设计
仿人机器人下肢
结构效果图

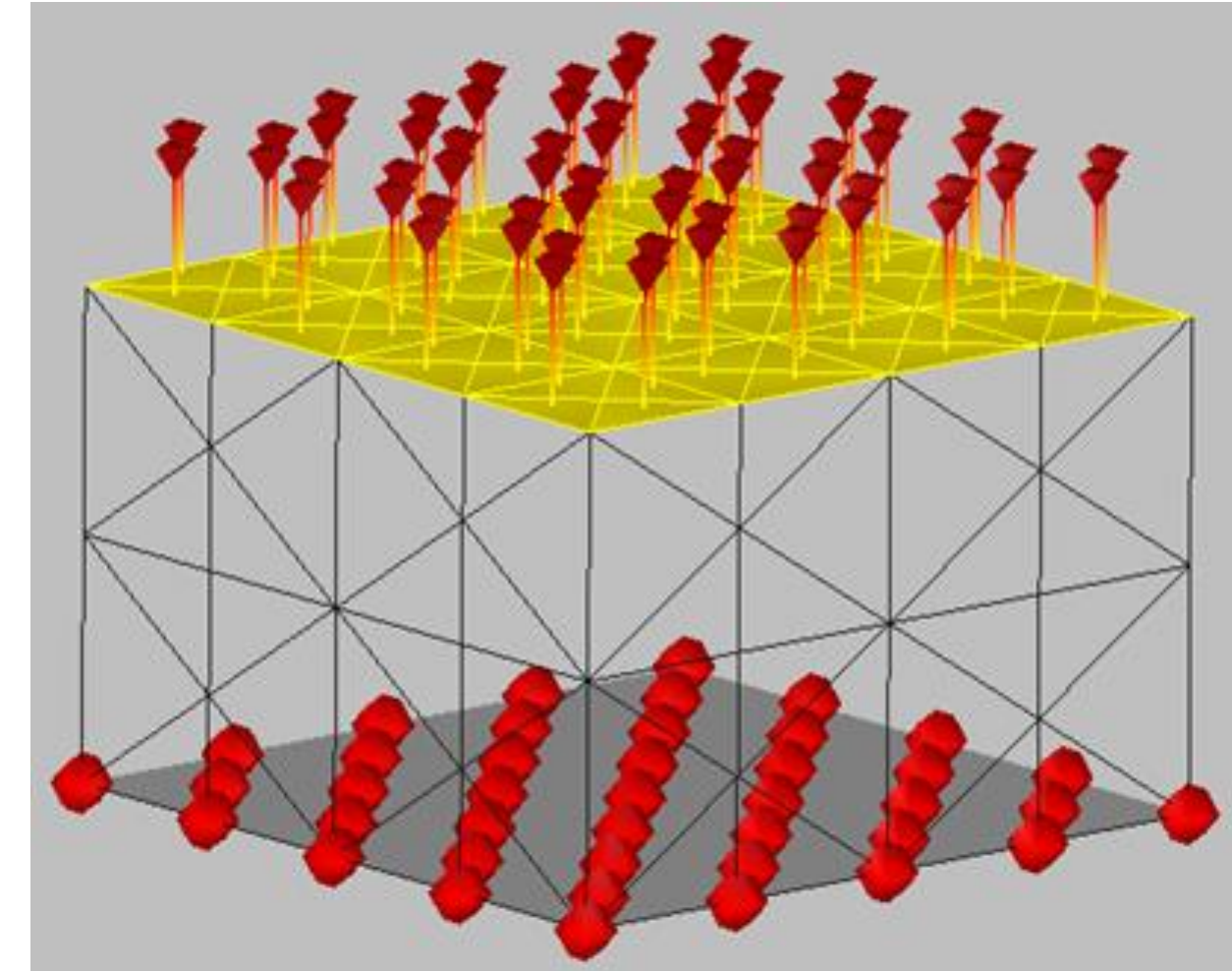
4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能

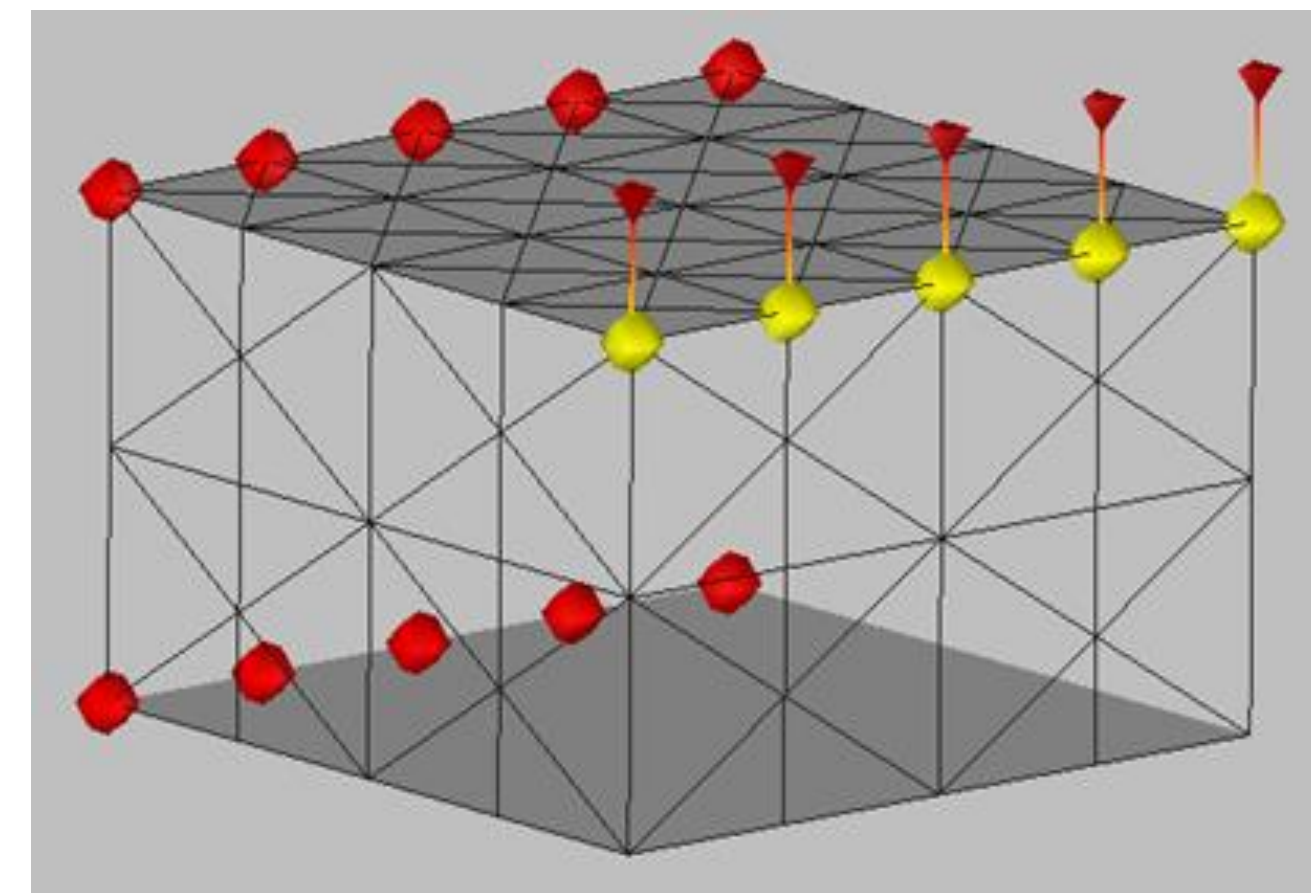
取20*20*15的样本对晶格结构进行强度分析：



晶格结构的材料选用AlSi10Mg，单元大小为6*6*6，八面体支柱，支柱半径为1，可在1~2范围优化，两表面厚度为1。



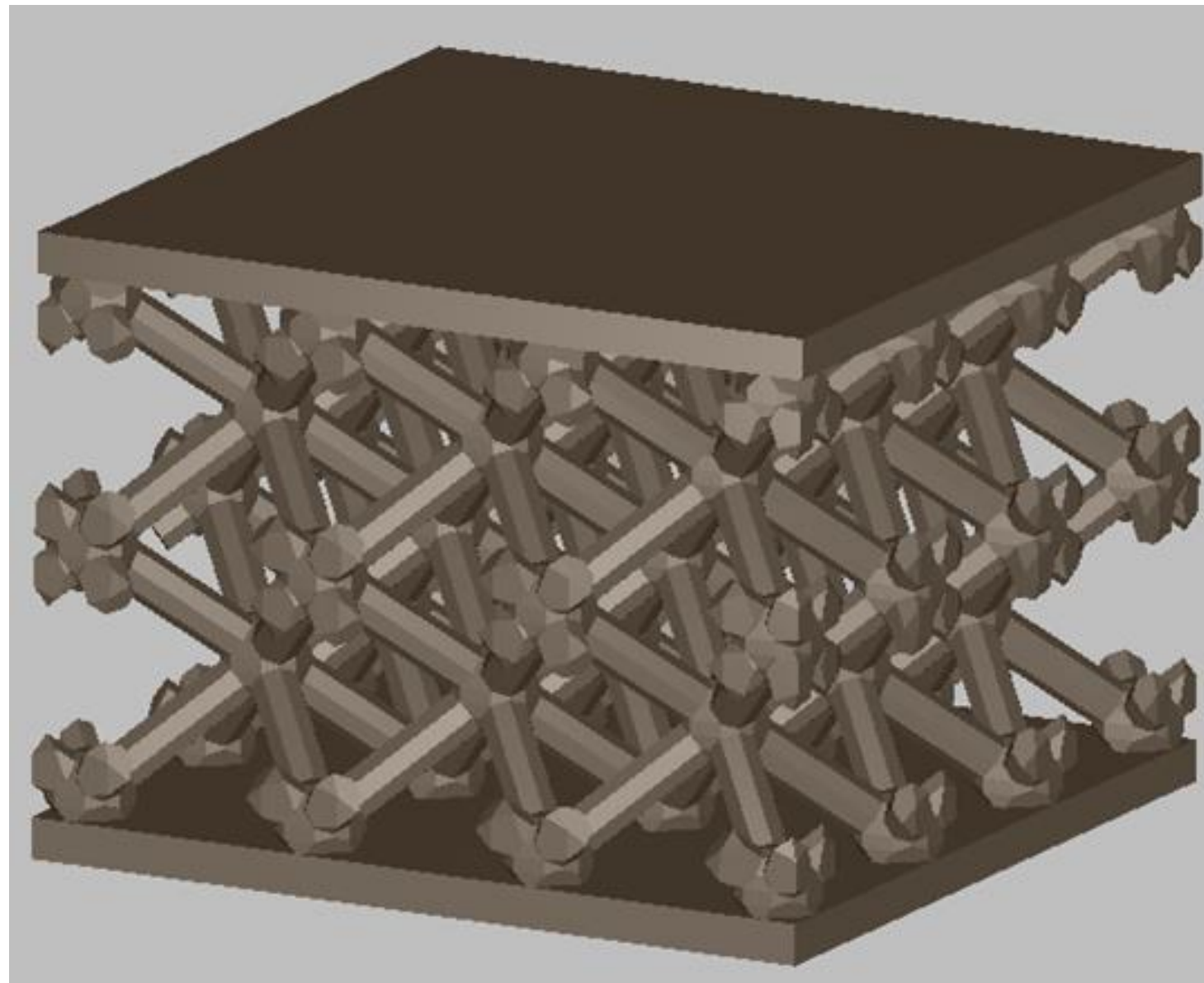
受压状态：下表面固定，上表面均布压力共1200N



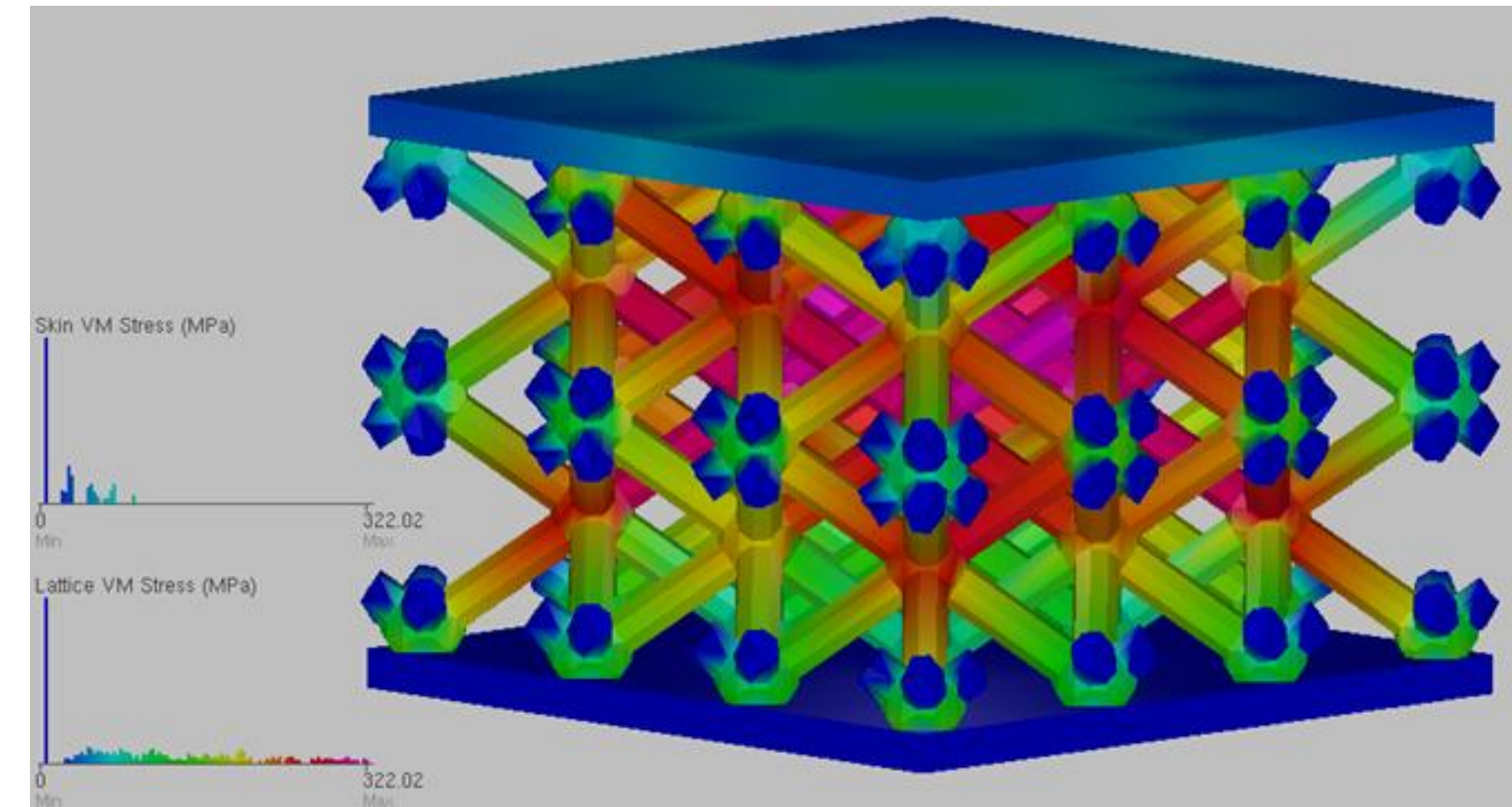
弯曲状态：一侧固定，另一侧上表面施加100N

4. 晶格结构优化

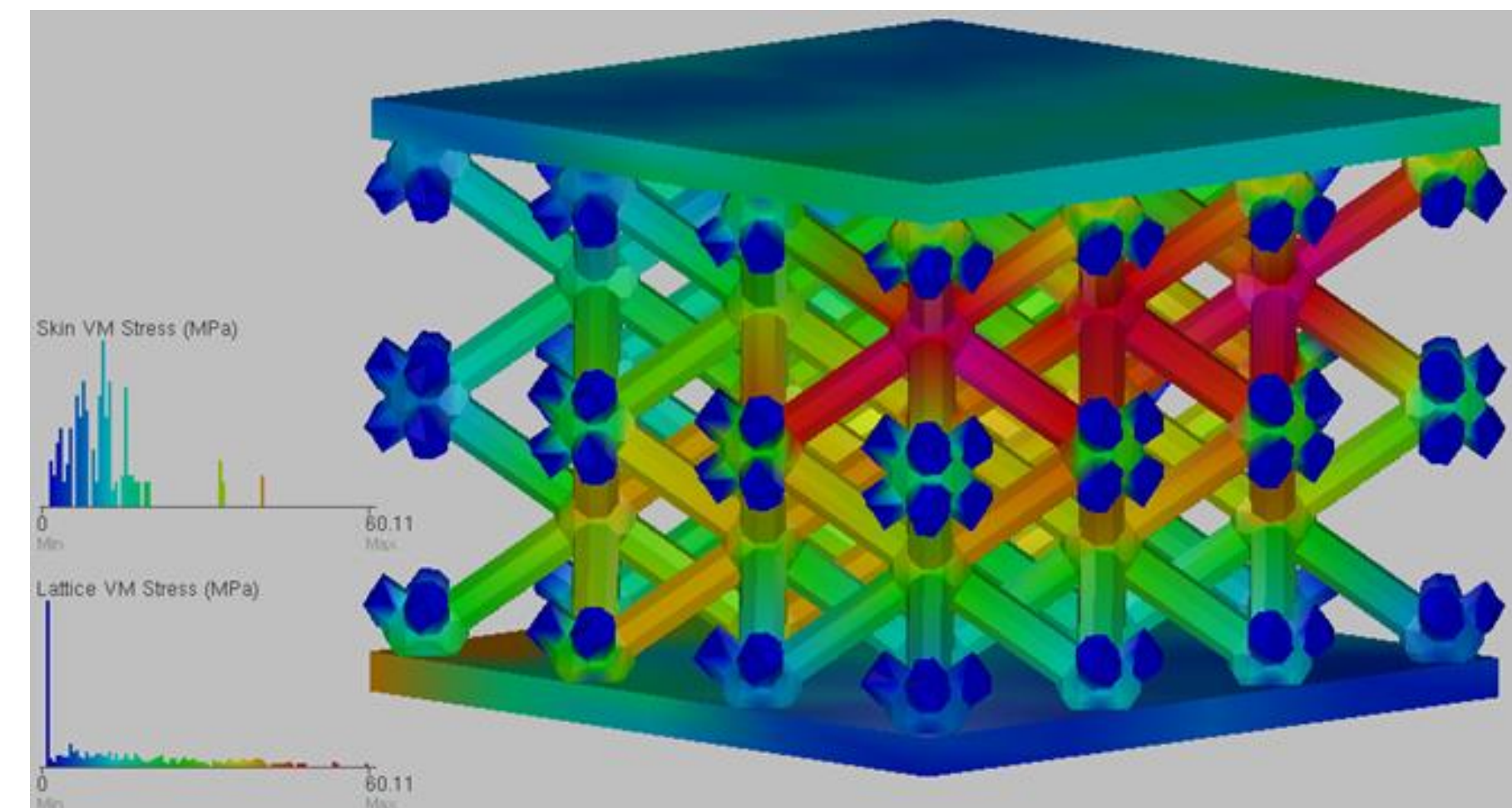
4.1 晶格结构的力学性能



X晶格，体积为 1640mm^3
 体积为原来的27.33%



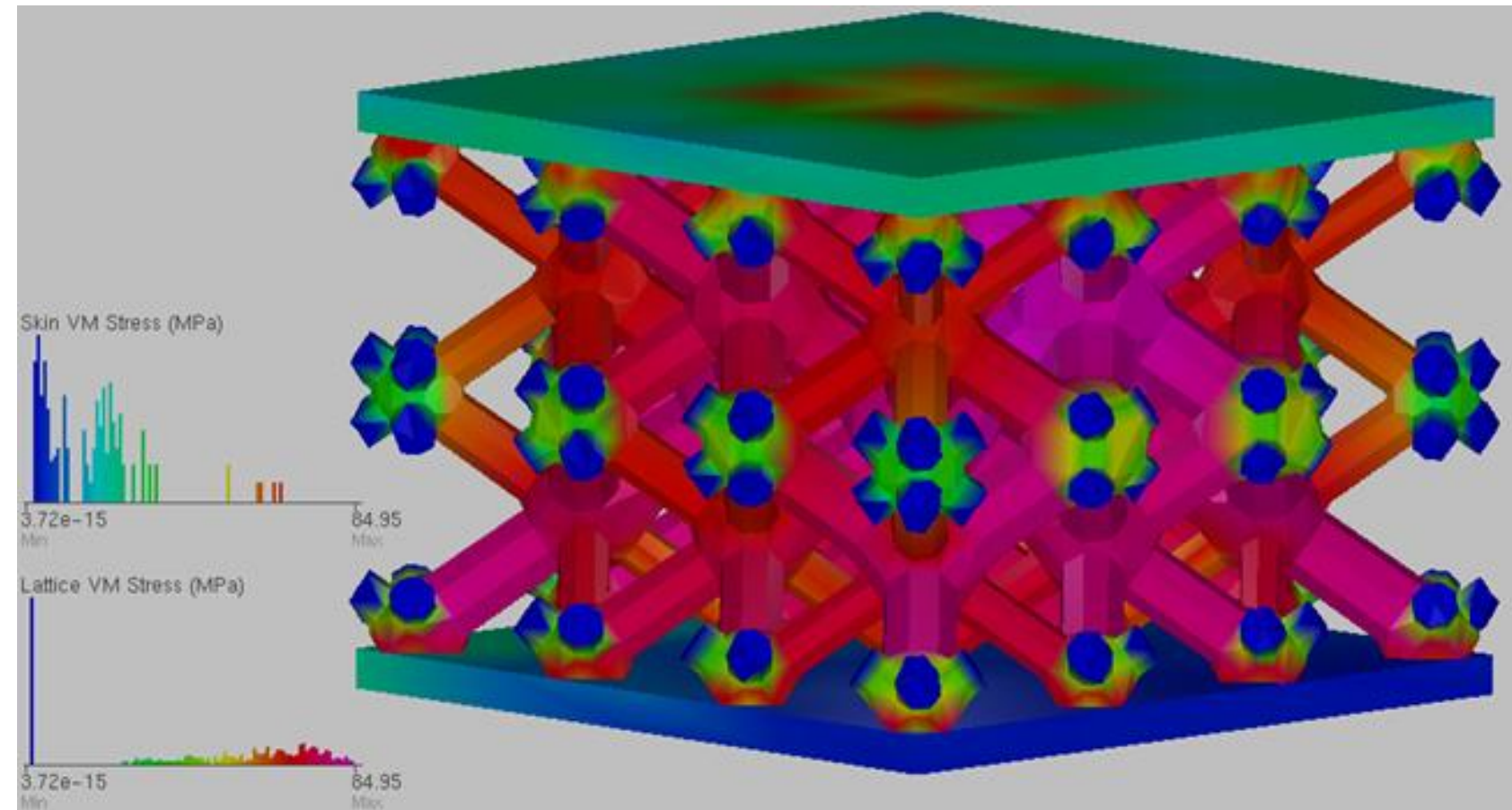
受压状态，最大应力322.02Mpa



弯曲状态，最大应力60.1Mpa

4. 晶格结构优化

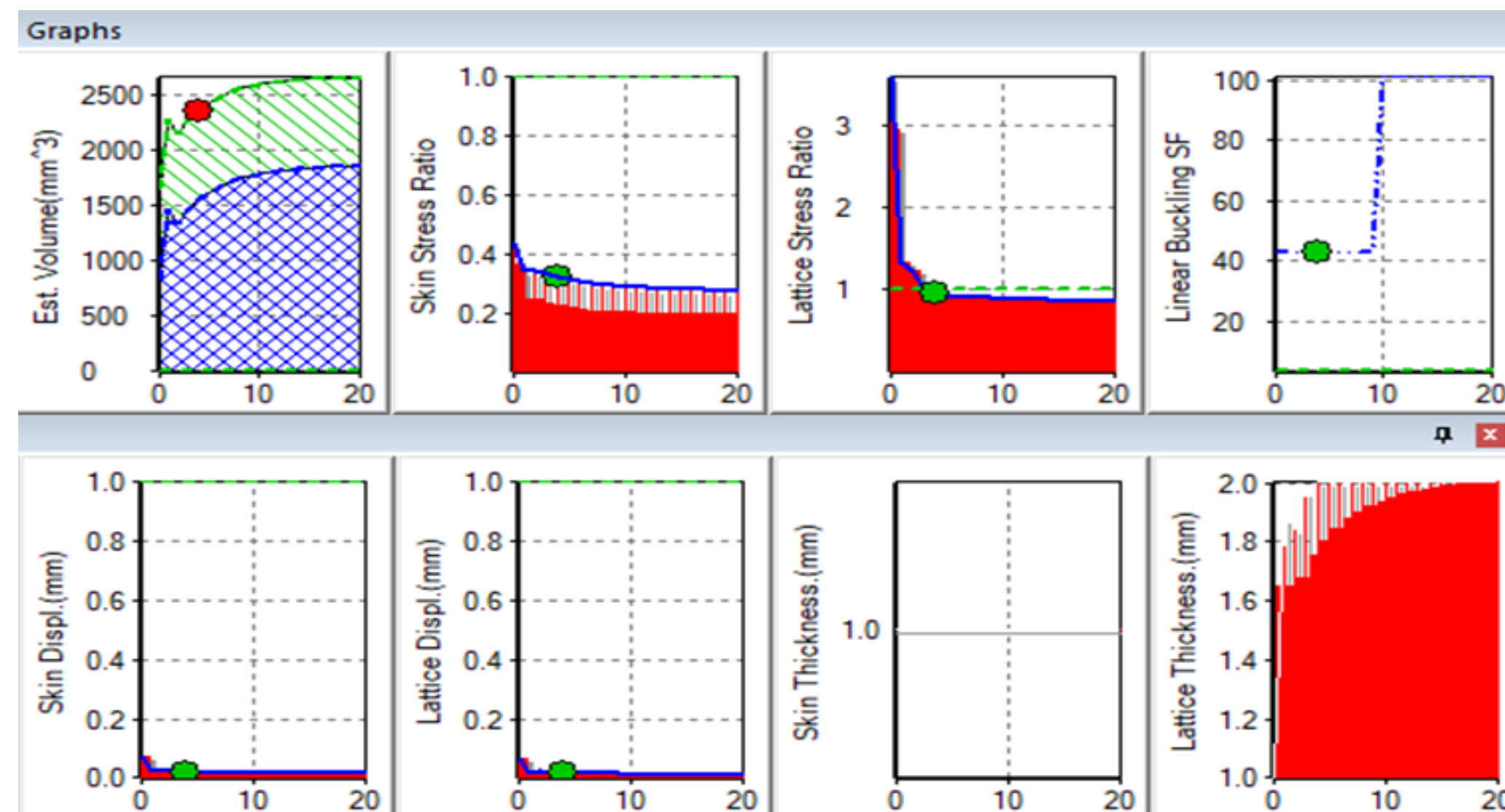
4.1 晶格结构的力学性能



根据AlSi10Mg材料性能，设置优化目标，晶格的目标应力为90MPa，迭代次数20次，支柱厚度每次变化0.2mm。

优化后体积为2355mm³，为原来的39.35%

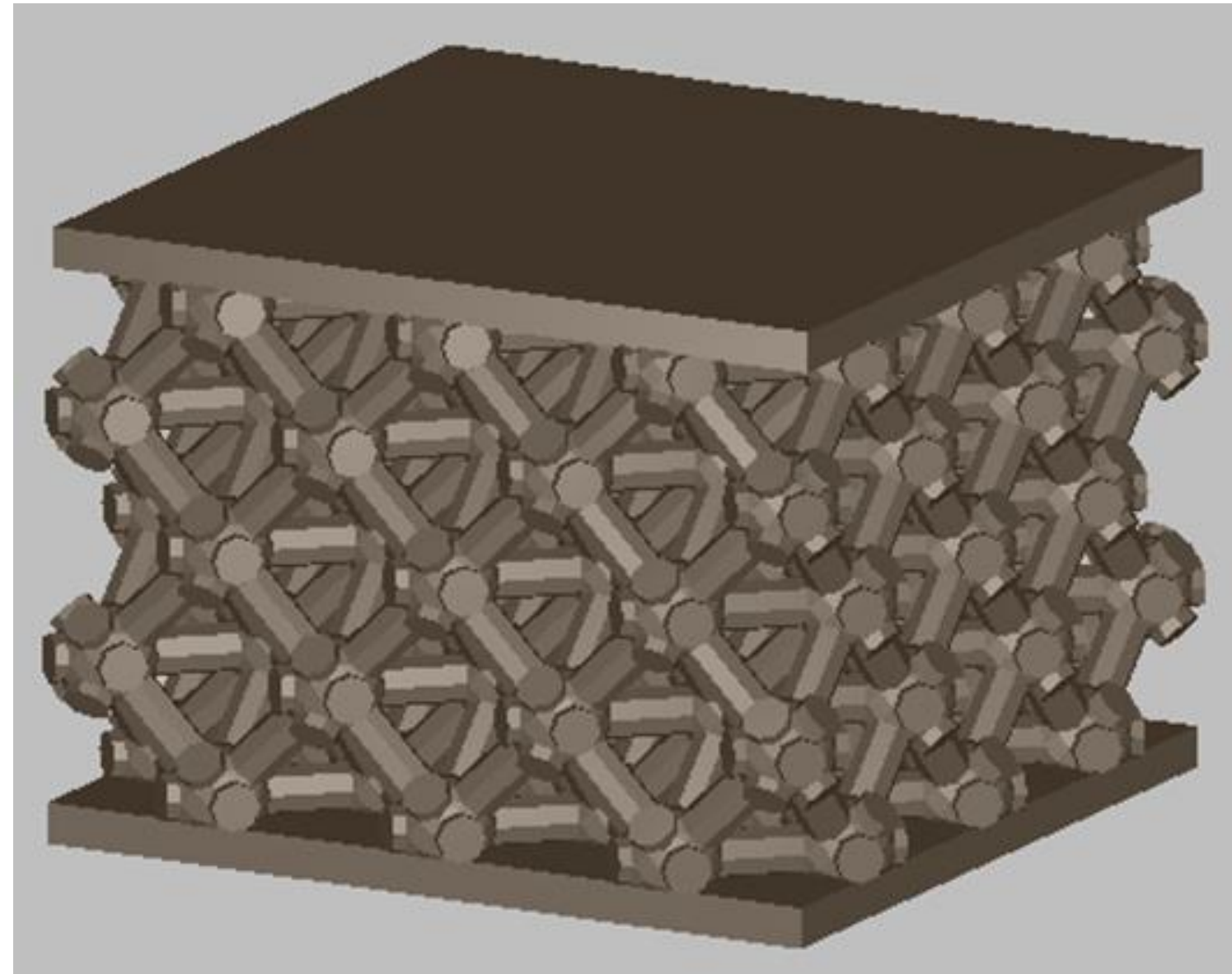
● ● 表示最优结果



- 图1 体积，提升至2355
- 图2 表面应力比，降至0.33
- 图3 晶格应力比，降至0.94
- 图4 线性屈曲，提高至43
- 图5 表面位移，接近0
- 图6 晶格位移，接近0
- 图7 表面厚度，不变
- 图8 支柱厚度，平均2

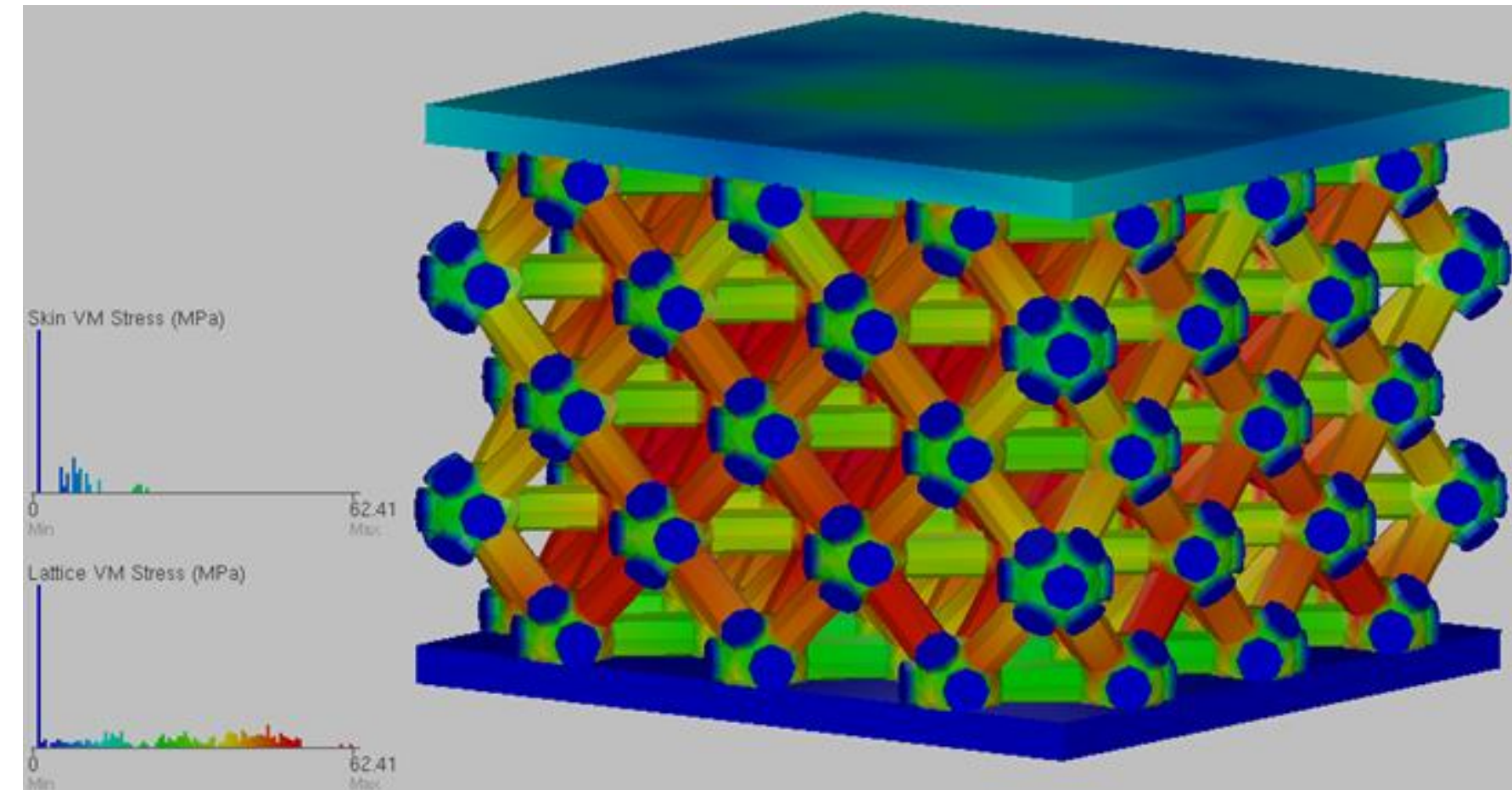
4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能

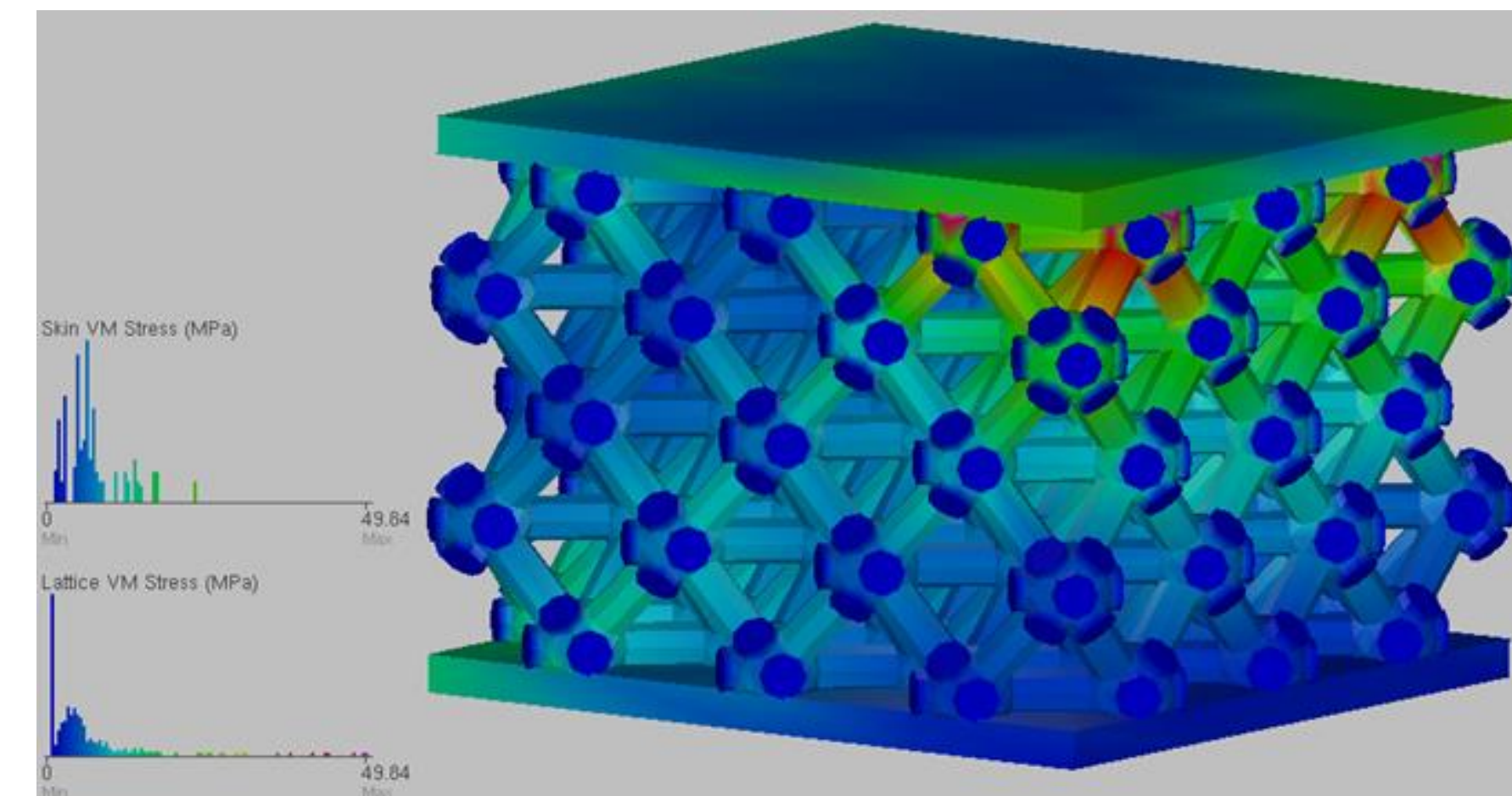


FCC晶格，体积为 2785mm^3

体积为原来的46.42%



受压状态，最大应力62.41Mpa

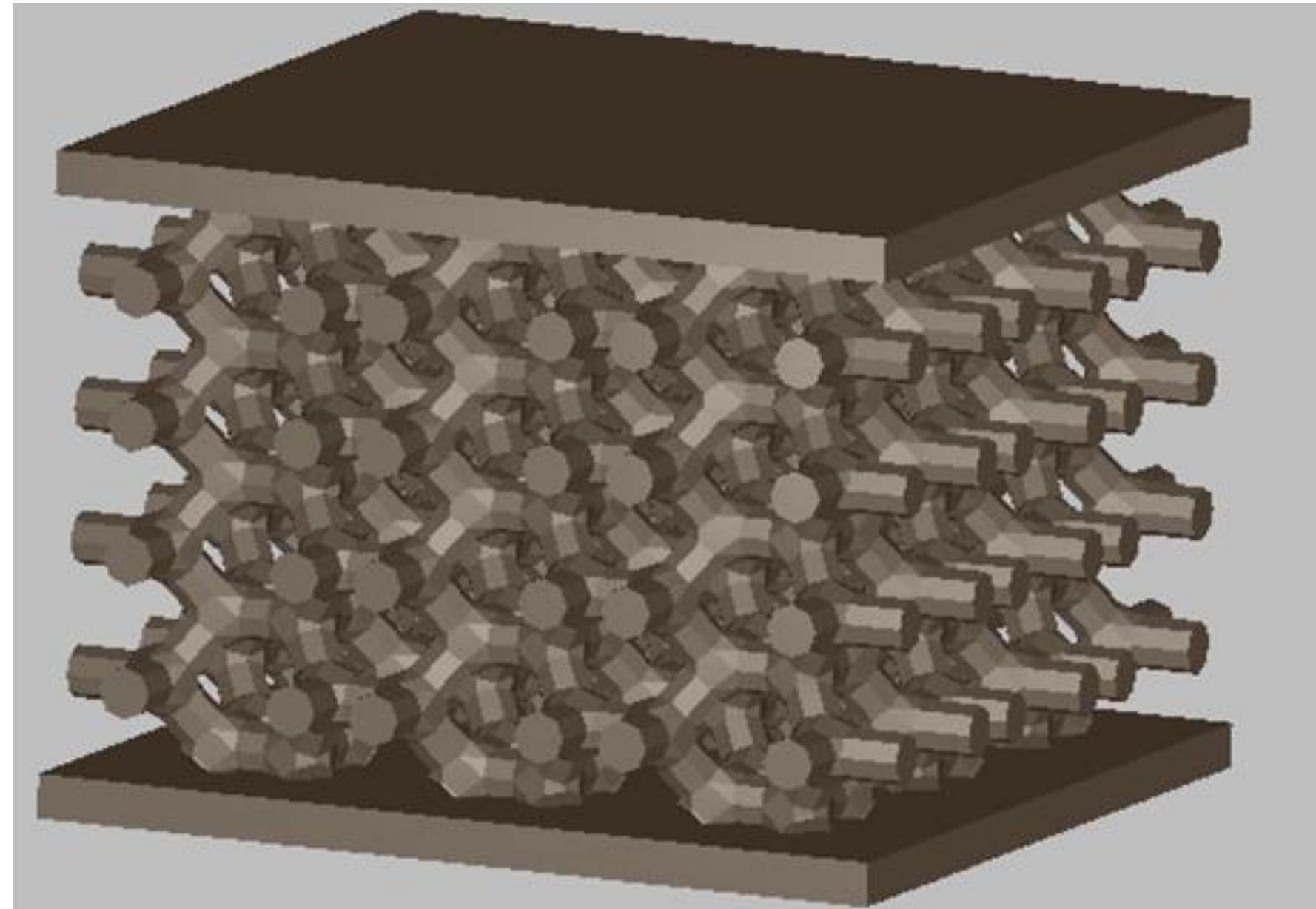


弯曲状态，最大应力49.84Mpa

不需要
优化

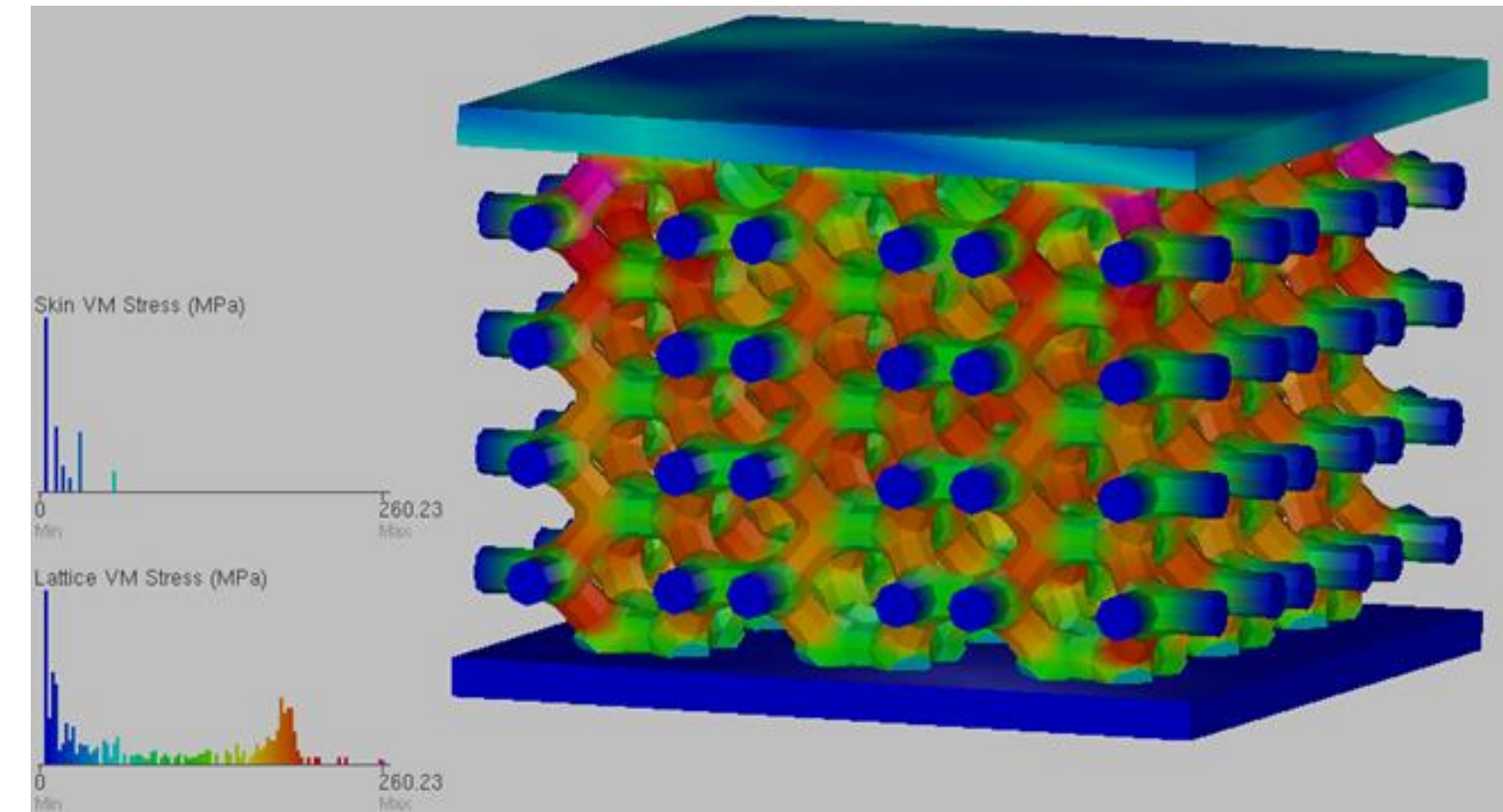
4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能

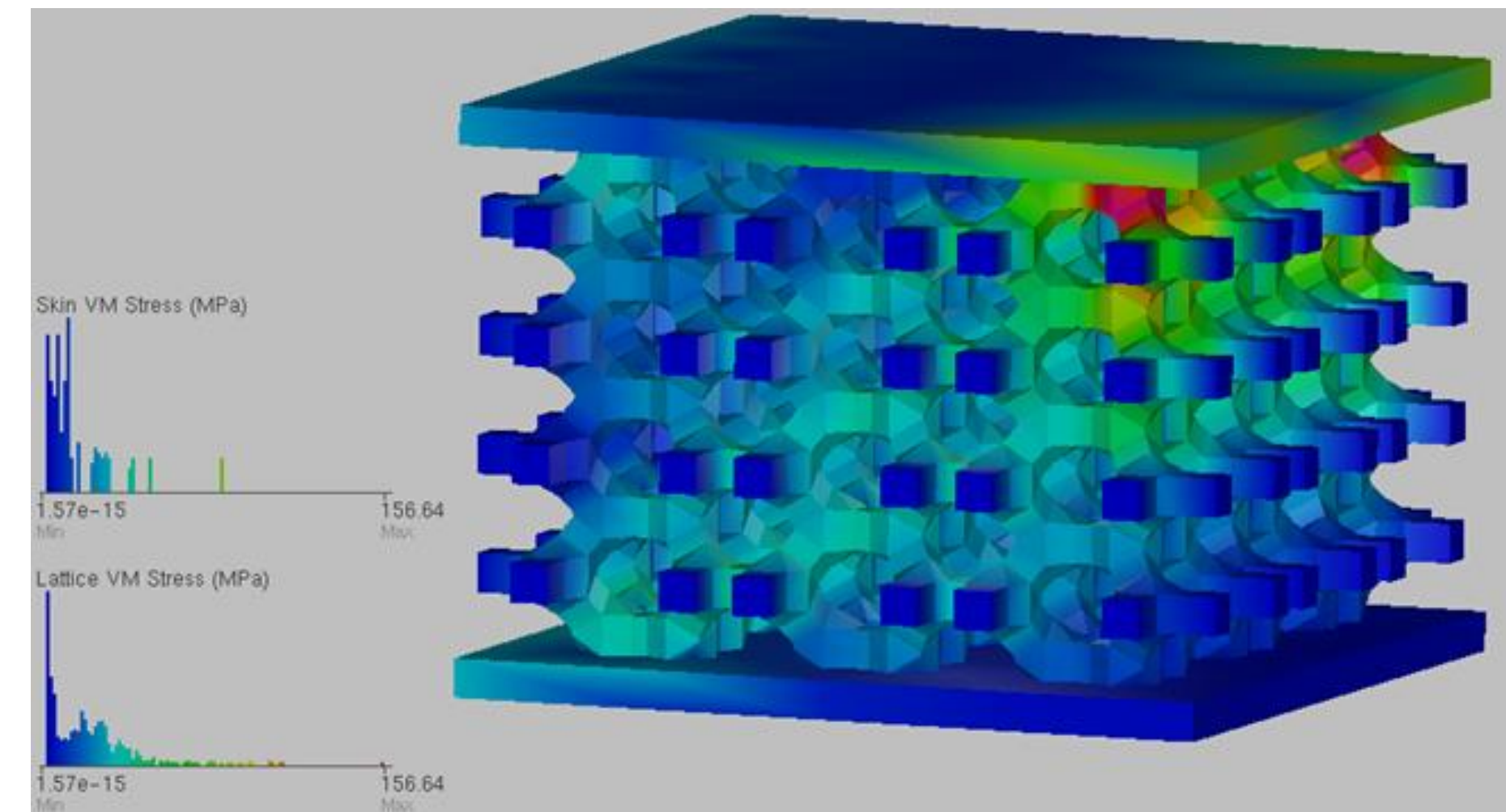


Hex晶格，体积为1994mm³

体积为原来的33.23%



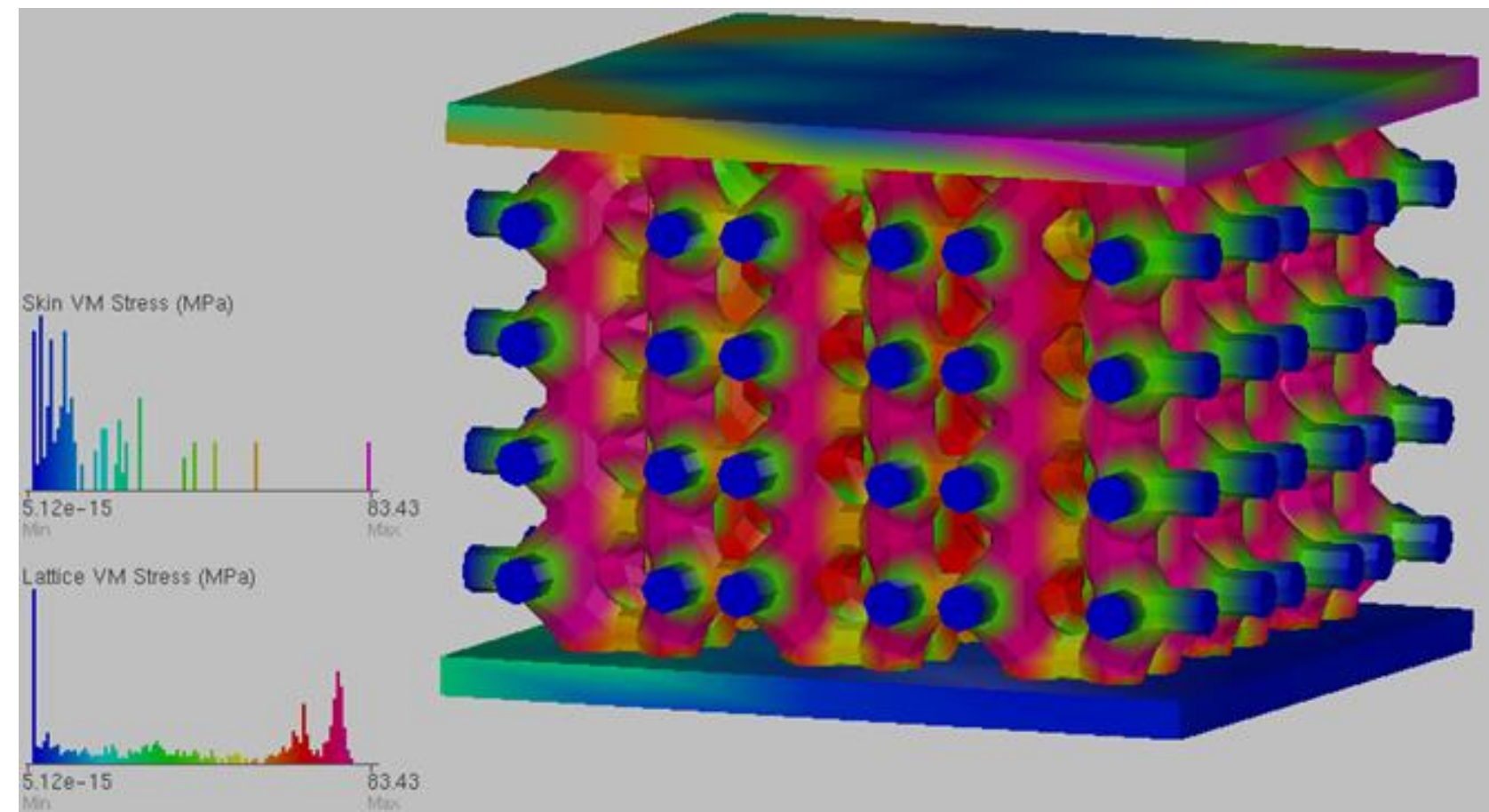
受压状态，最大应力260.23Mpa



弯曲状态，最大应力156.64Mpa

4. 晶格结构优化

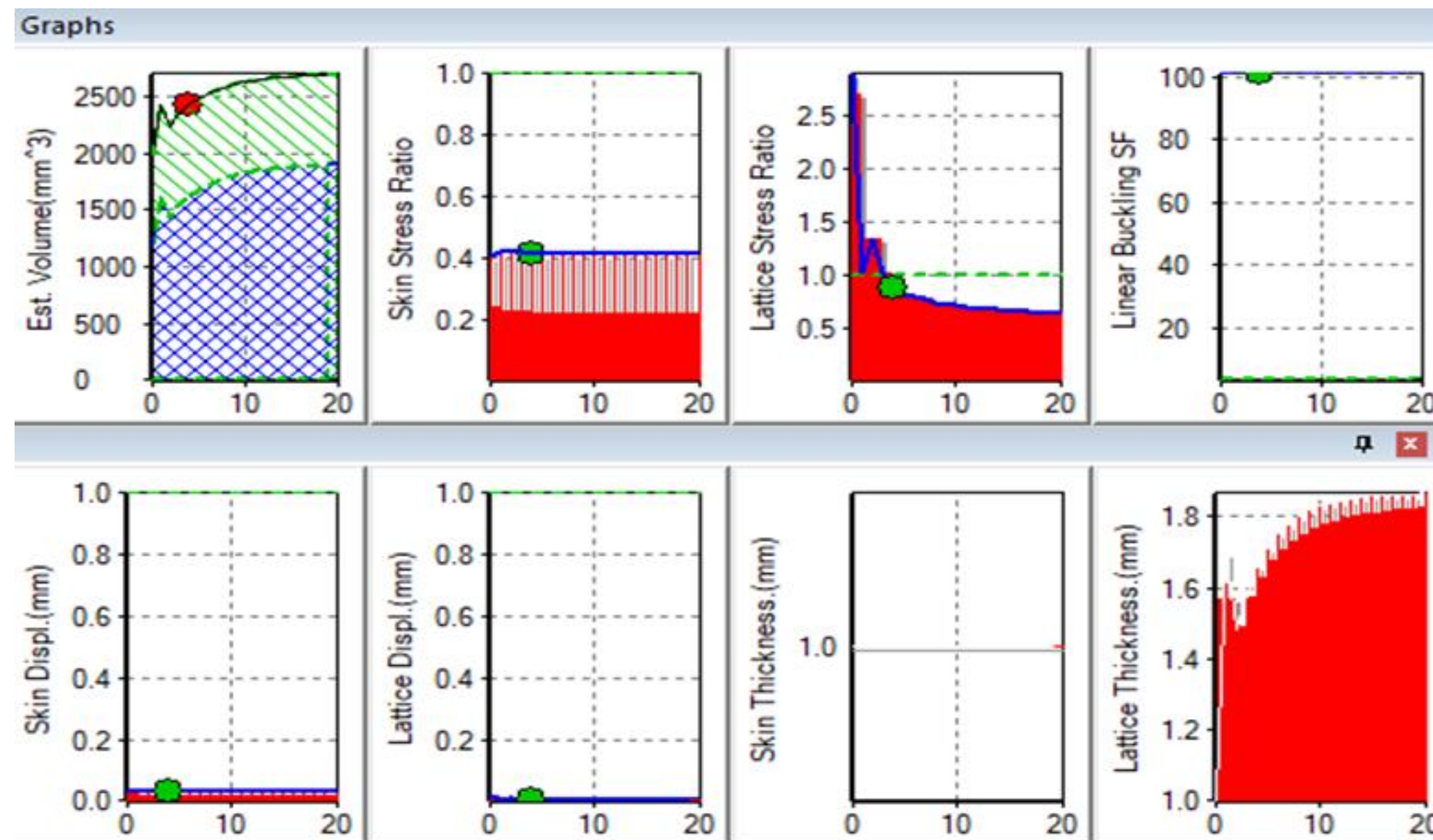
4.1 晶格结构的力学性能



根据AlSi10Mg材料性能，设置优化目标，晶格的目标应力为90MPa，迭代次数20次，支柱厚度每次变化0.2mm。

优化后体积为2415mm³，为原来的40.25%

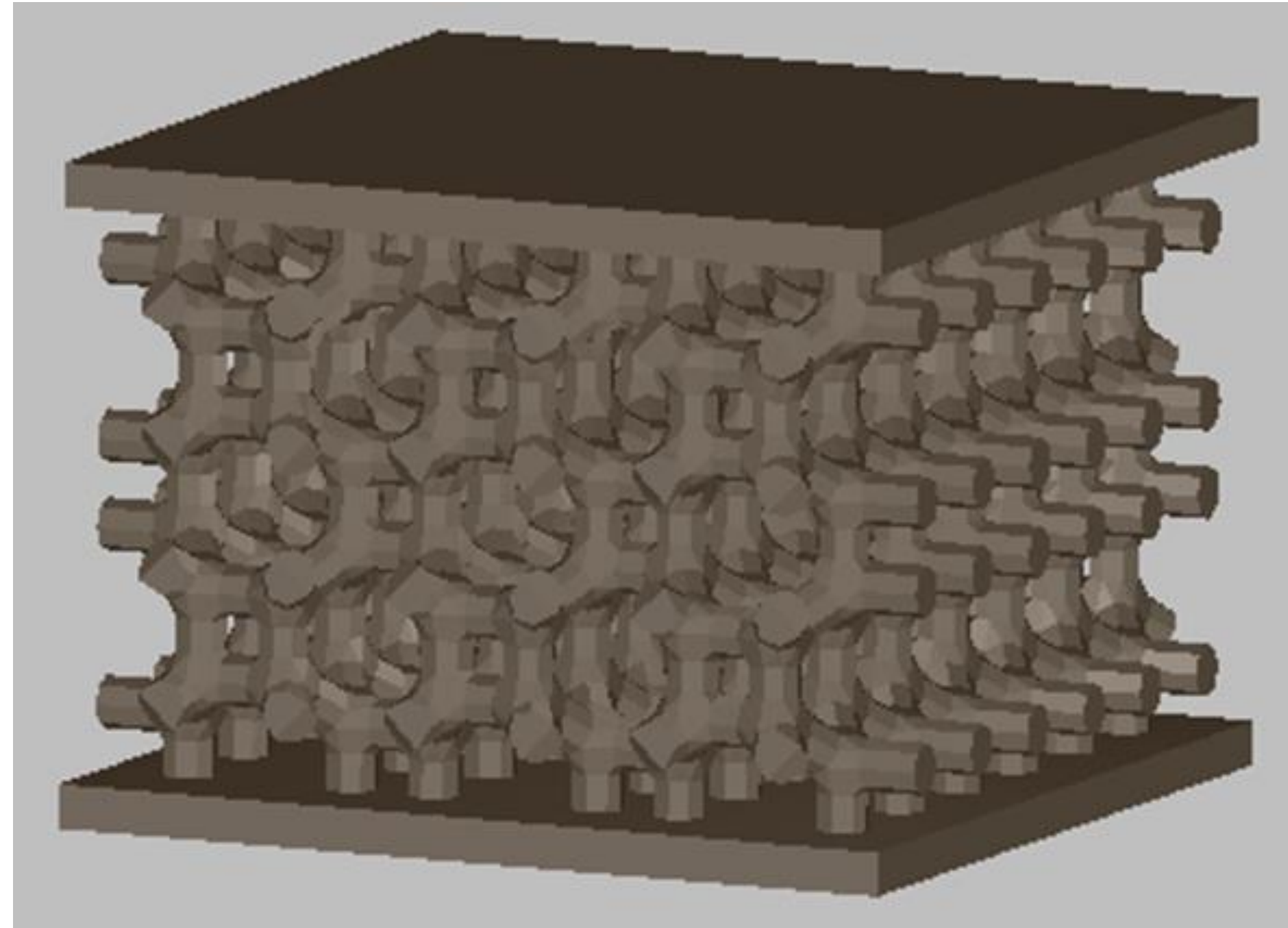
● ● 表示最优结果



- 图1 体积，提升至2415
- 图2 表面应力比，0.42
- 图3 晶格应力比，降至0.87
- 图4 线性屈曲，101
- 图5 表面位移，接近0
- 图6 晶格位移，接近0
- 图7 表面厚度，不变
- 图8 支柱厚度，平均1.66

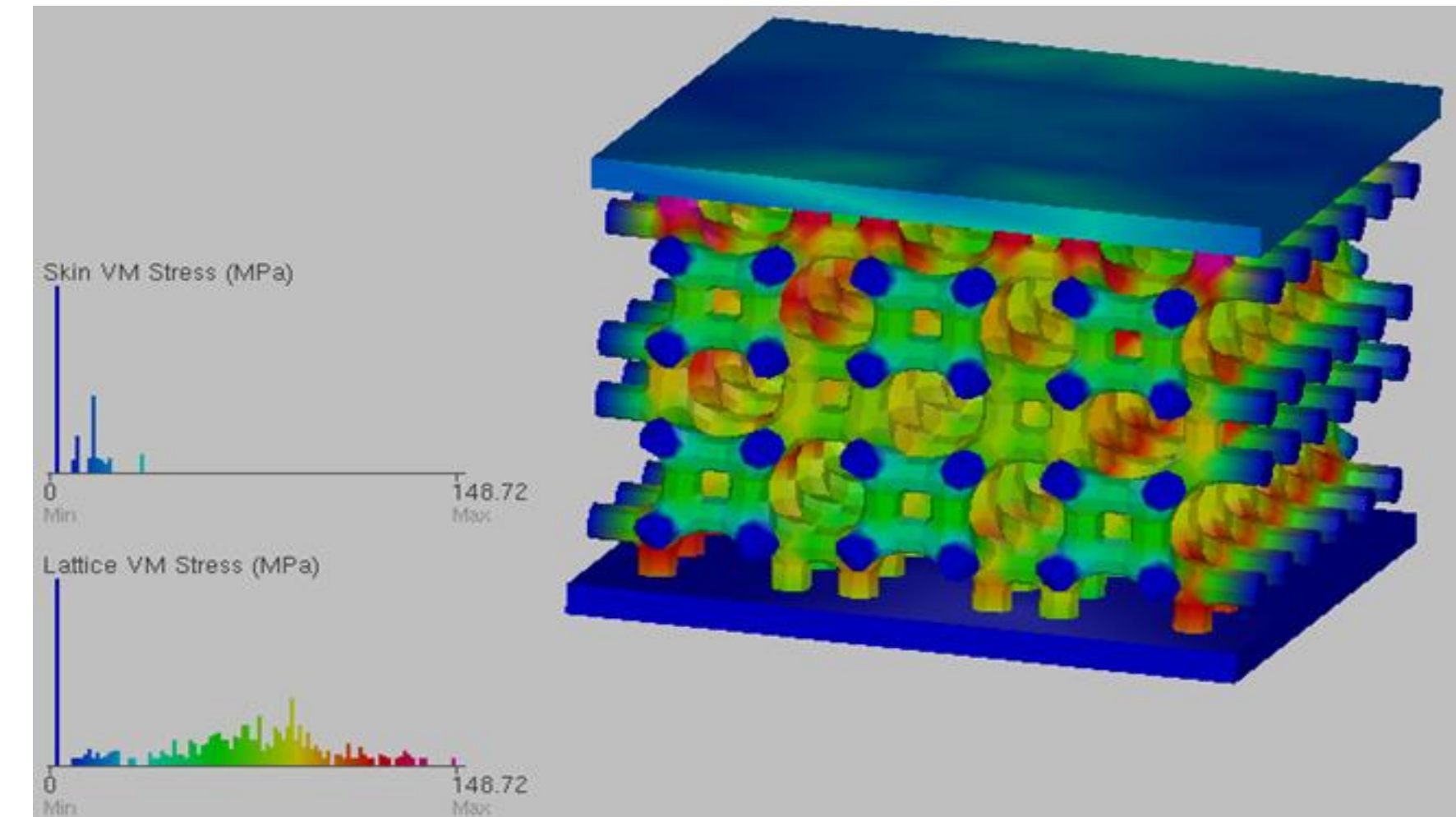
4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能

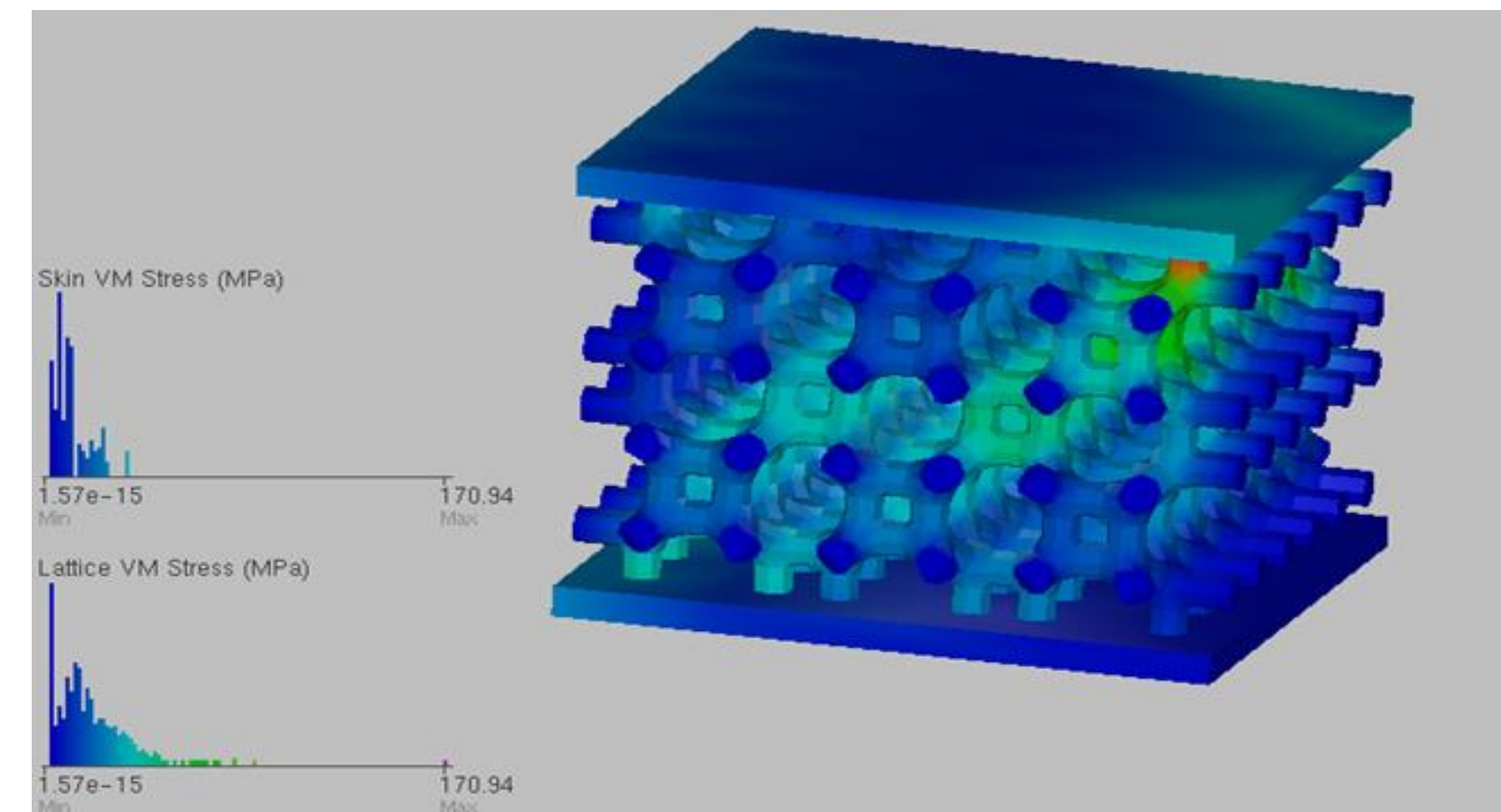


Hex晶格（Z），体积为1976mm³

体积为原来的32.93%



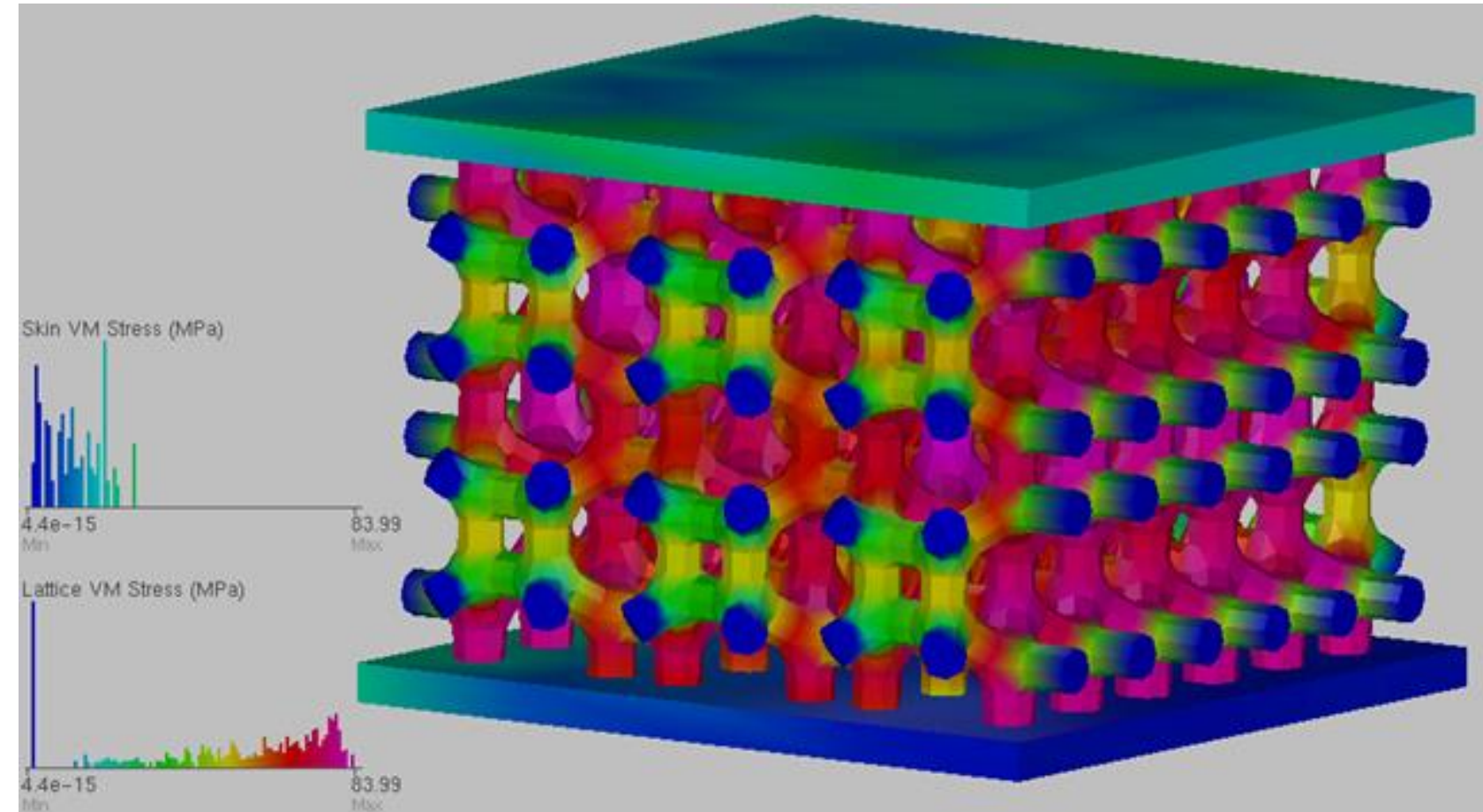
受压状态，最大应力148.72Mpa



弯曲状态，最大应力170.94Mpa

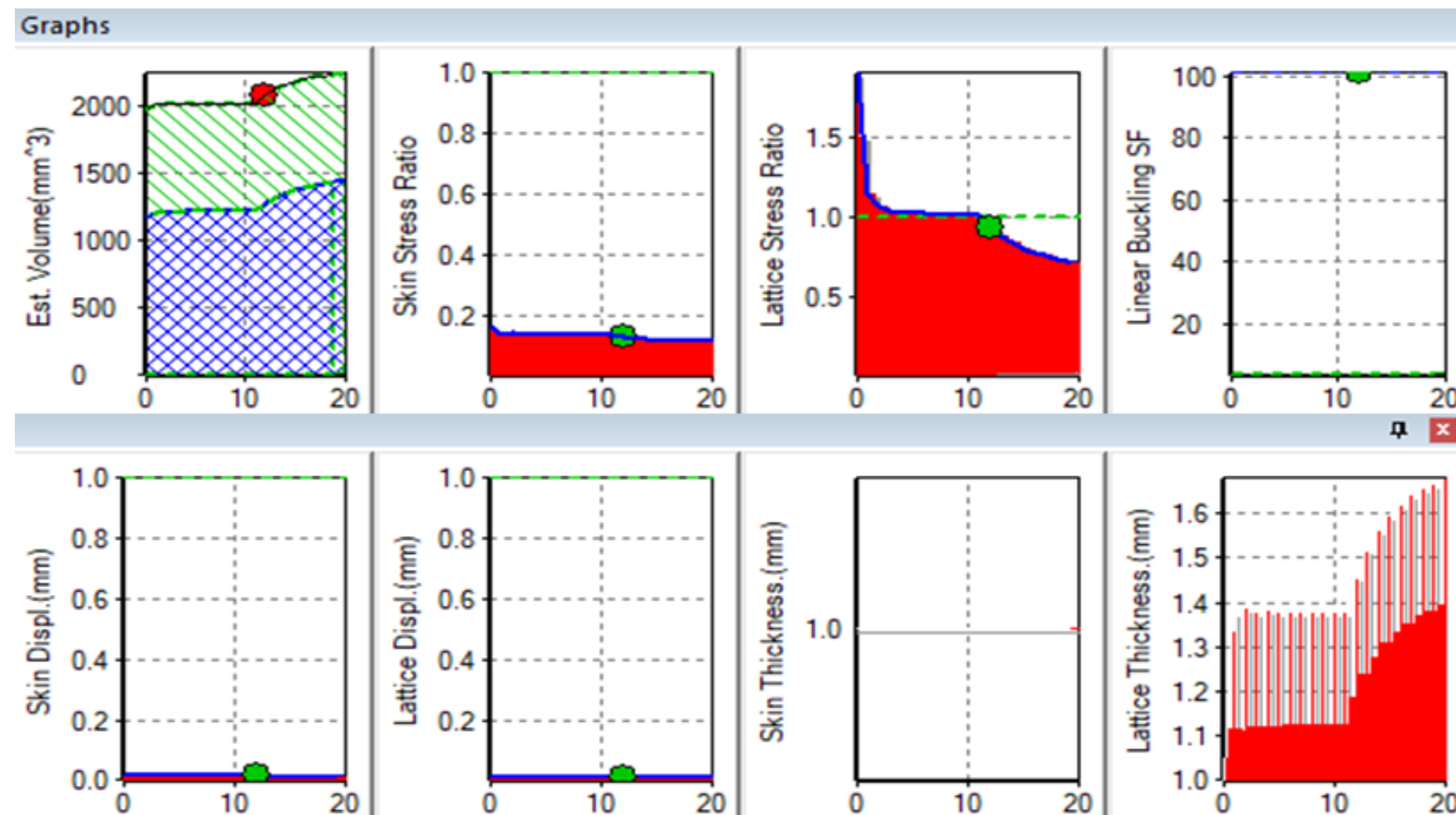
4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能



根据AlSi10Mg材料性能，设置优化目标，晶格的目标应力为90MPa，迭代次数20次，支柱厚度每次变化0.2mm。

优化后体积为2078mm³，为原来的34.63%



● ● 表示最优结果

图1 体积，提升至2078

图2 表面应力比，降至0.13

图3 晶格应力比，降至0.93

图4 线性屈曲，101

图5 表面位移，接近0

图6 晶格位移，接近0

图7 表面厚度，不变

图8 支柱厚度，平均1.46

4. 晶格结构优化

4.1 晶格结构的力学性能

几种晶格的比较：

晶格类型	体积（mm3）		最大应力（MPa）
	优化前	优化后	
X	1640	2355	84.95
FCC	2785	2785	62.41
Hex	1994	2415	83.43
Hex（Z）	1976	2078	83.99

- 力学性能上，FCC晶格在压缩和弯曲状态下性能较好
- 优化效果上，Hex晶格（Z）优化后体积最小，优化效果最好

4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

以小腿骨为例

步骤：

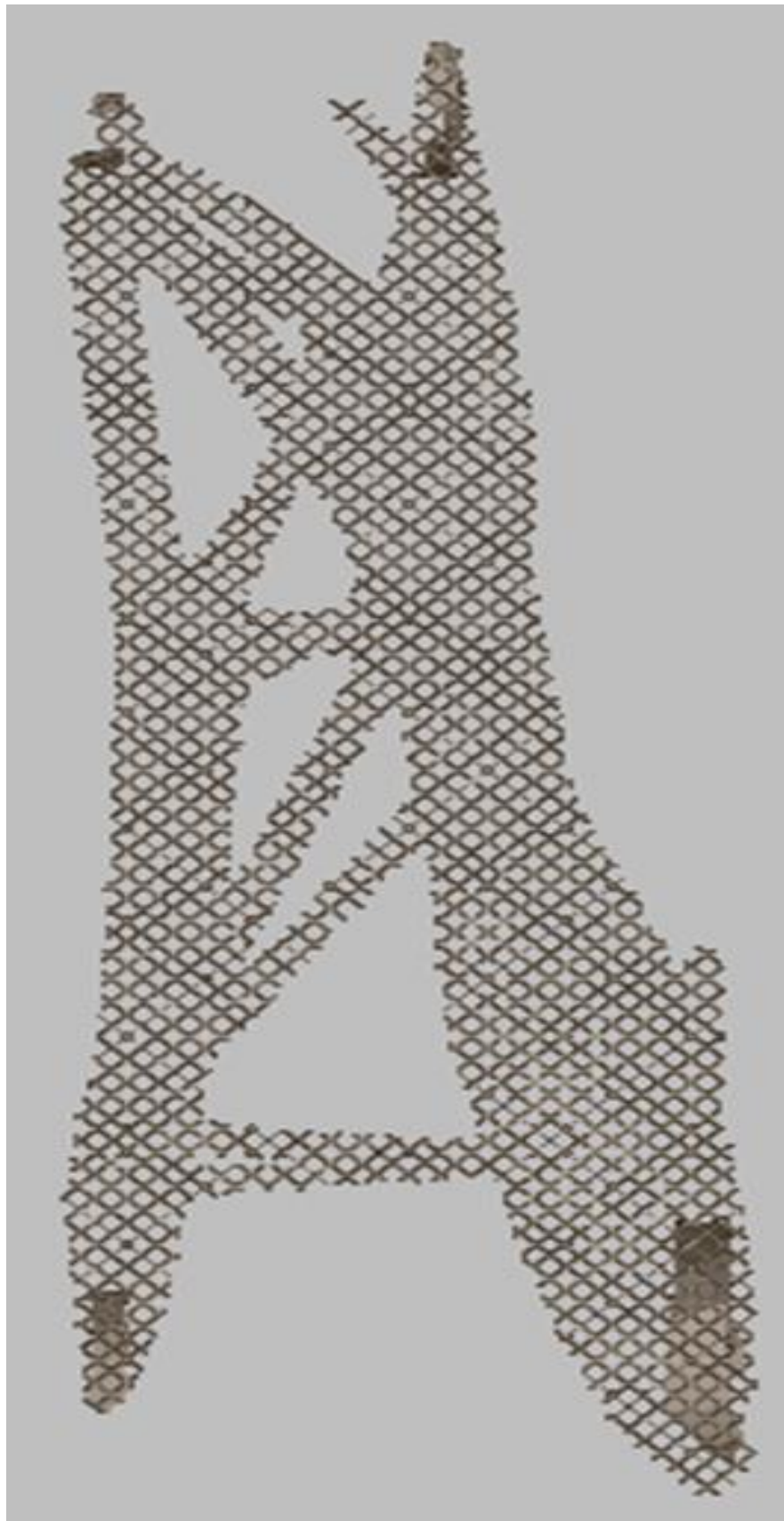
1. 将小腿骨上的保留几何体去掉
2. 模型导入Netfabb
3. 修复网格：去除孔和翻转三角形、减小网格数，修改网格三角形使得所有三角形内角 $>10^{\circ}$
4. 模型输出到Optimization Utility进行优化



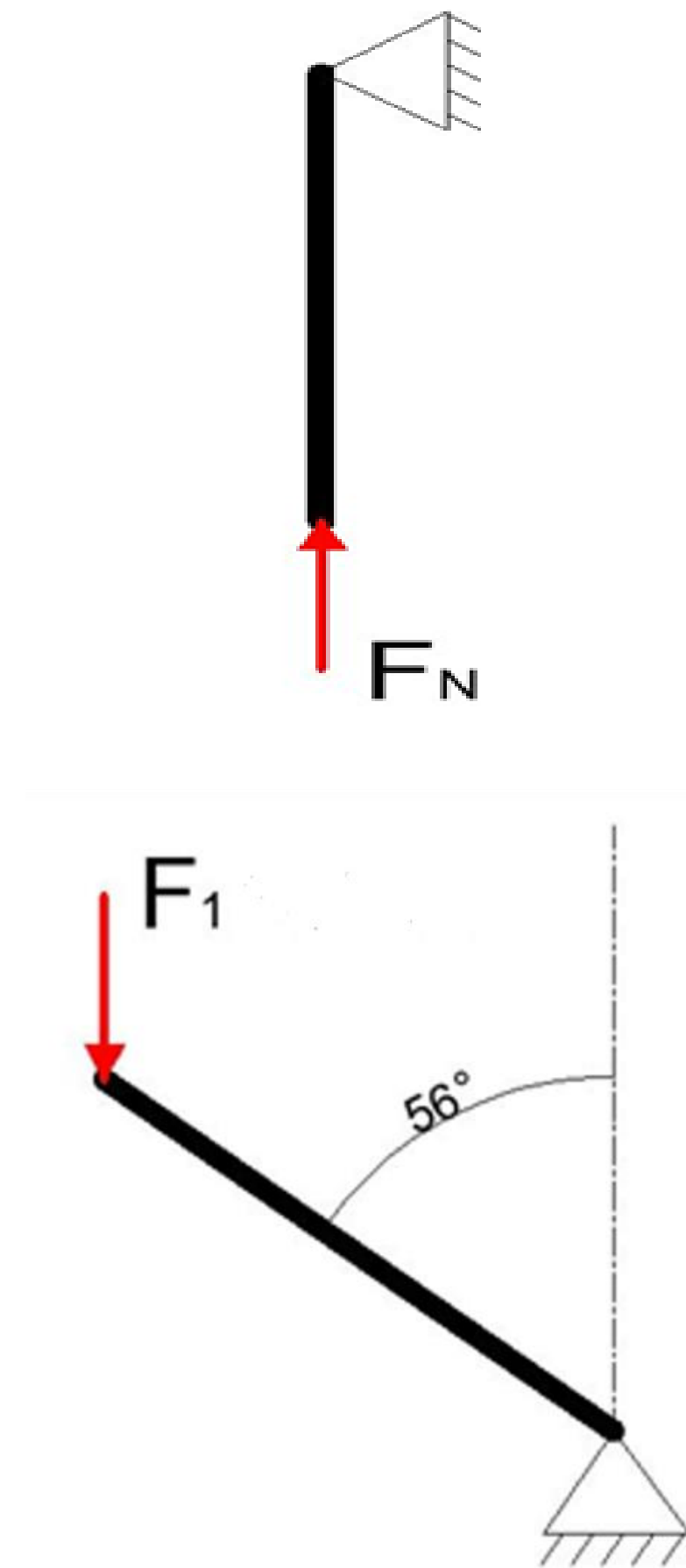
衍生式设计
结构网格过多，
合并网格时部分
结构向外扩展，
使模型体积增
加。

4. 晶格结构优化

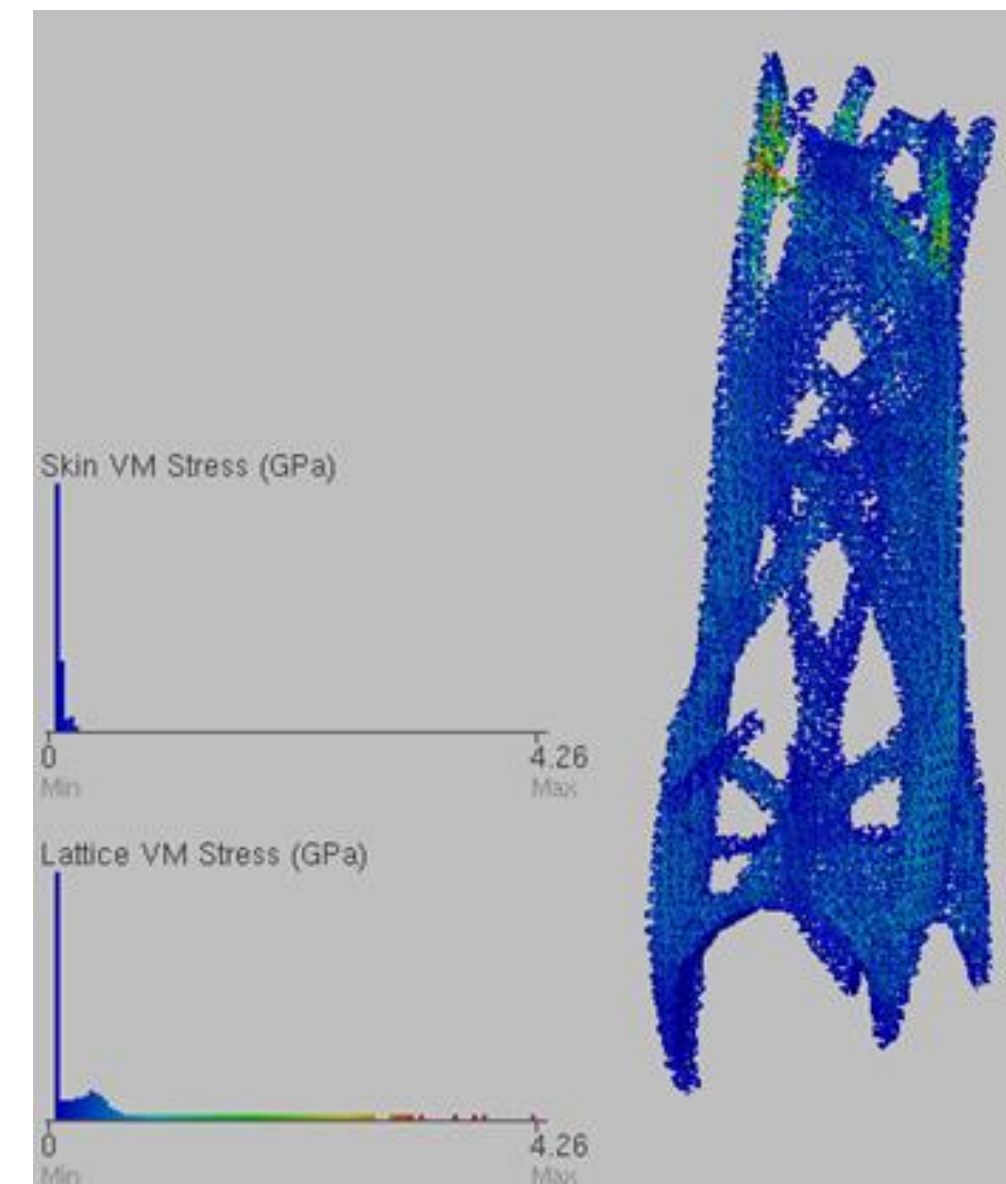
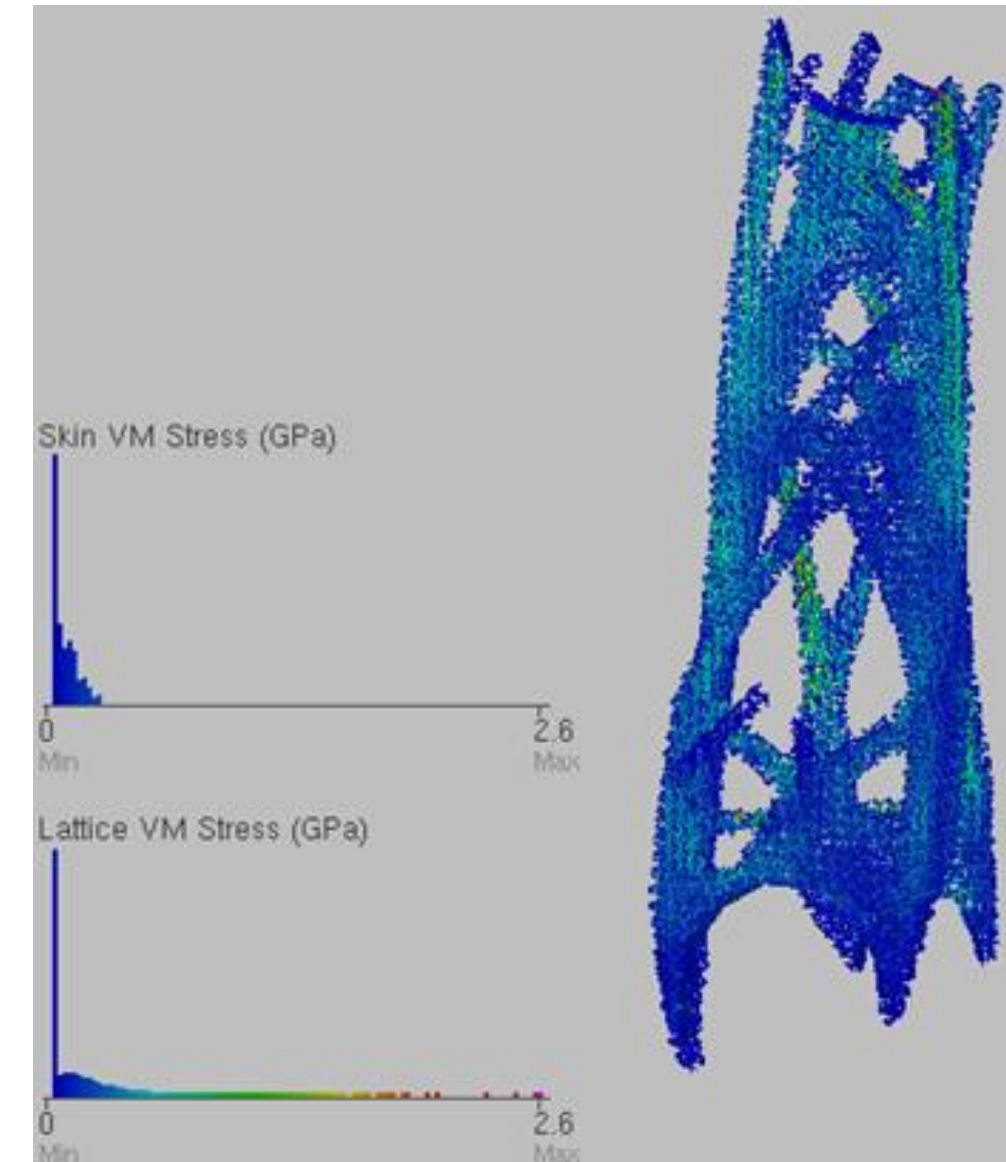
4.2 晶格结构的下肢优化



采用6*6*6的X晶格



受力状态



被优化模型
中部分支撑梁
截面积太小，
优化后出现单
晶格单元，强
度远远不够。

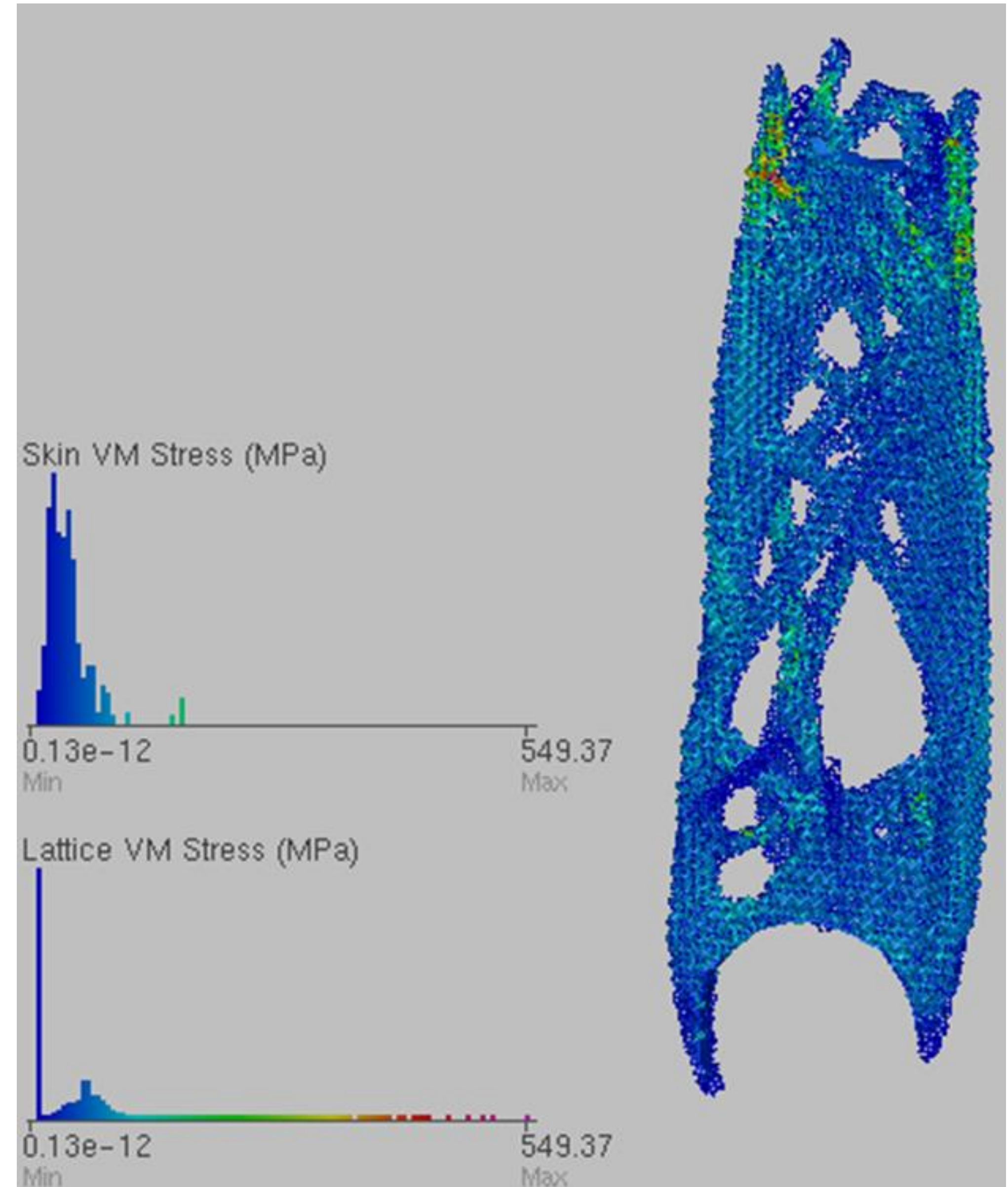
4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

直接优化后，最大应力 549.37MPa，远大于安全应力，优化效果不好。

解决方案：

1. 改用其他晶格
2. 使用更小的单元尺寸
3. 给截面积较小的梁添加外表面
4. 危险点添加晶核

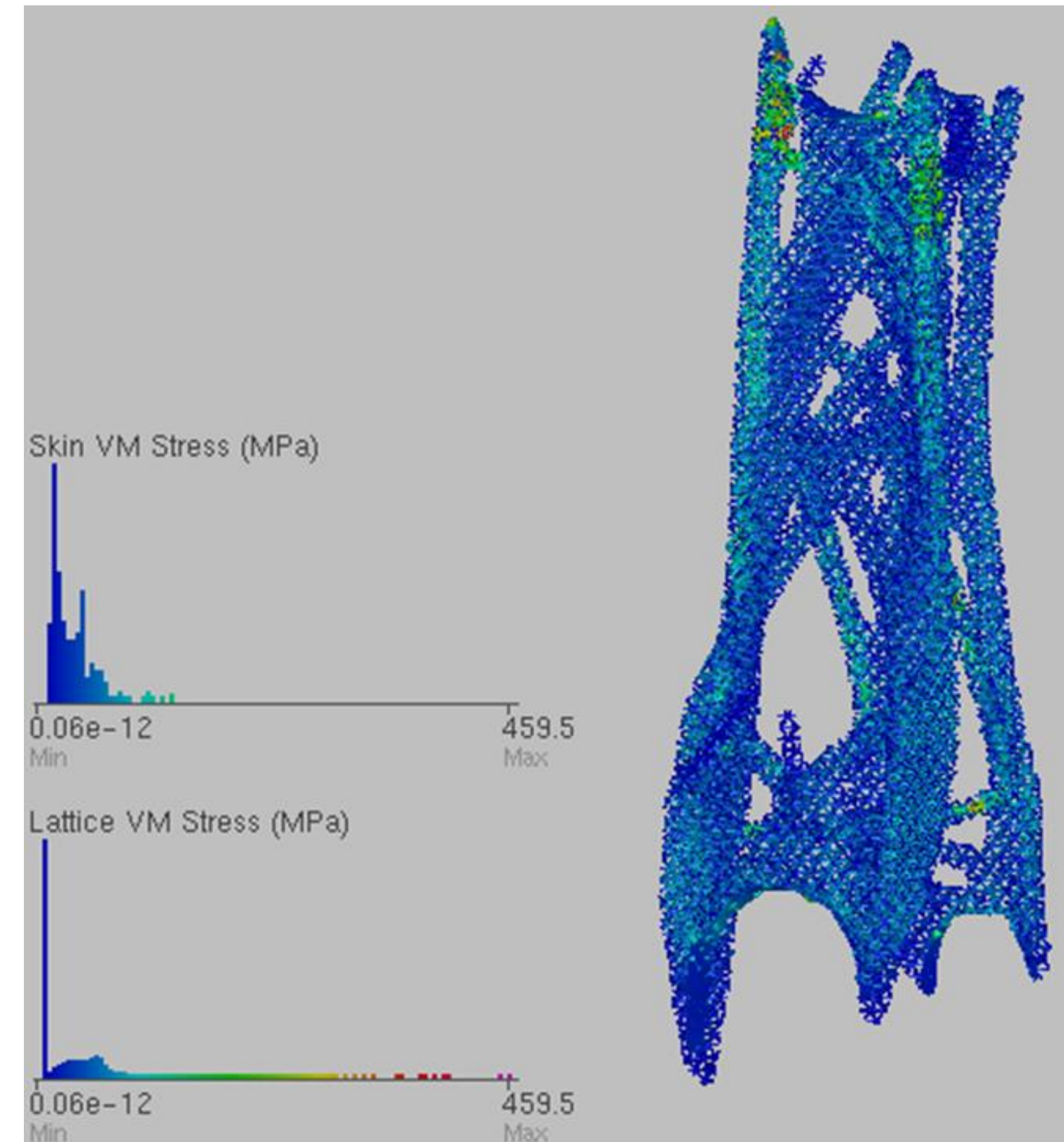


4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化



1. 改变晶格类型，使用FCC晶格，由于单元内支柱较密集，易发生干涉，单元尺寸增大为8*8*8。



优化后最大应力459.5MPa，强度不足

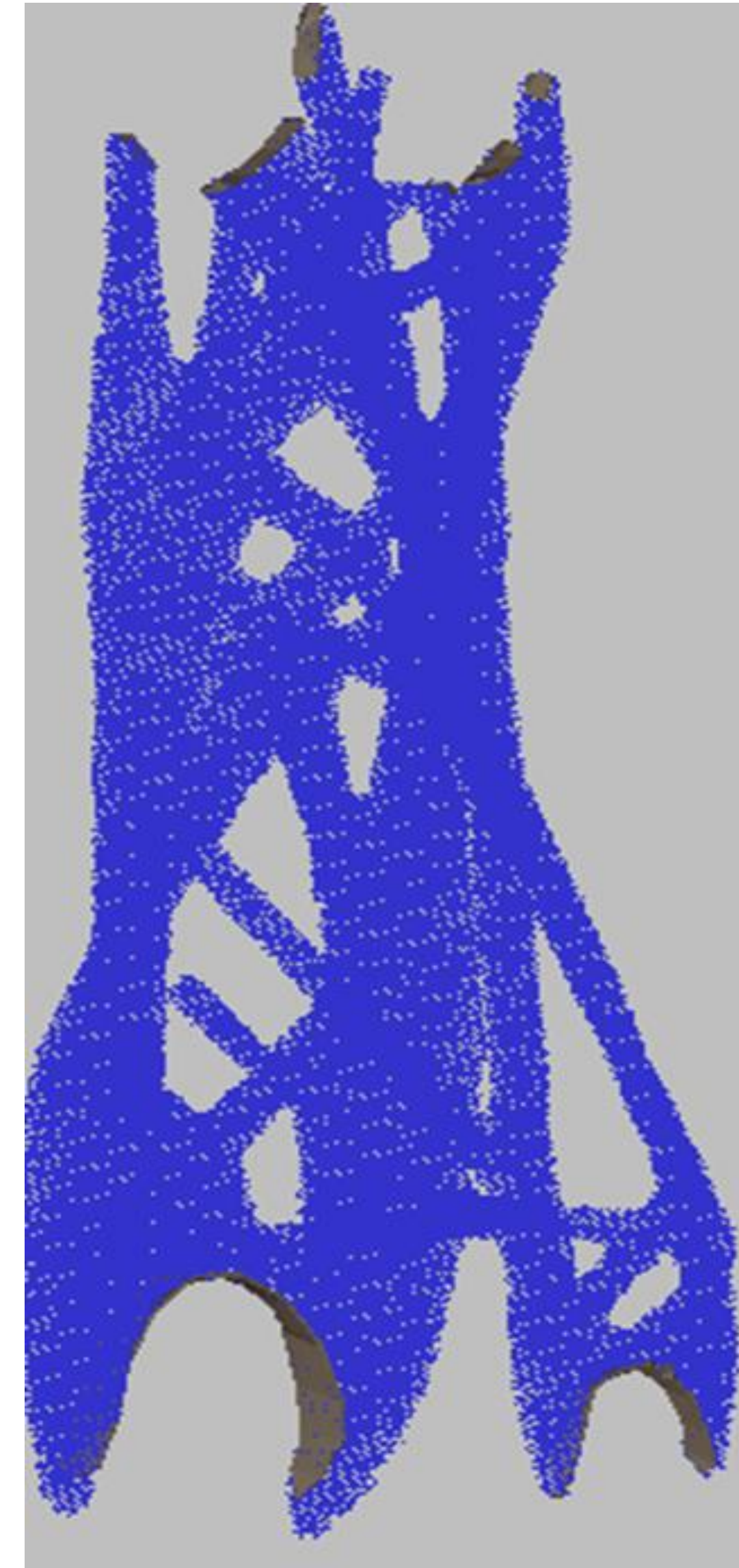
危险点与X晶格相同，考虑其他方案

4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

2. 改变单元大小，使用4*4*4单元

单元过小会导致晶格支柱互相干涉，软件无法生成模型，模型优化效果也无法实现，考虑其他方案。



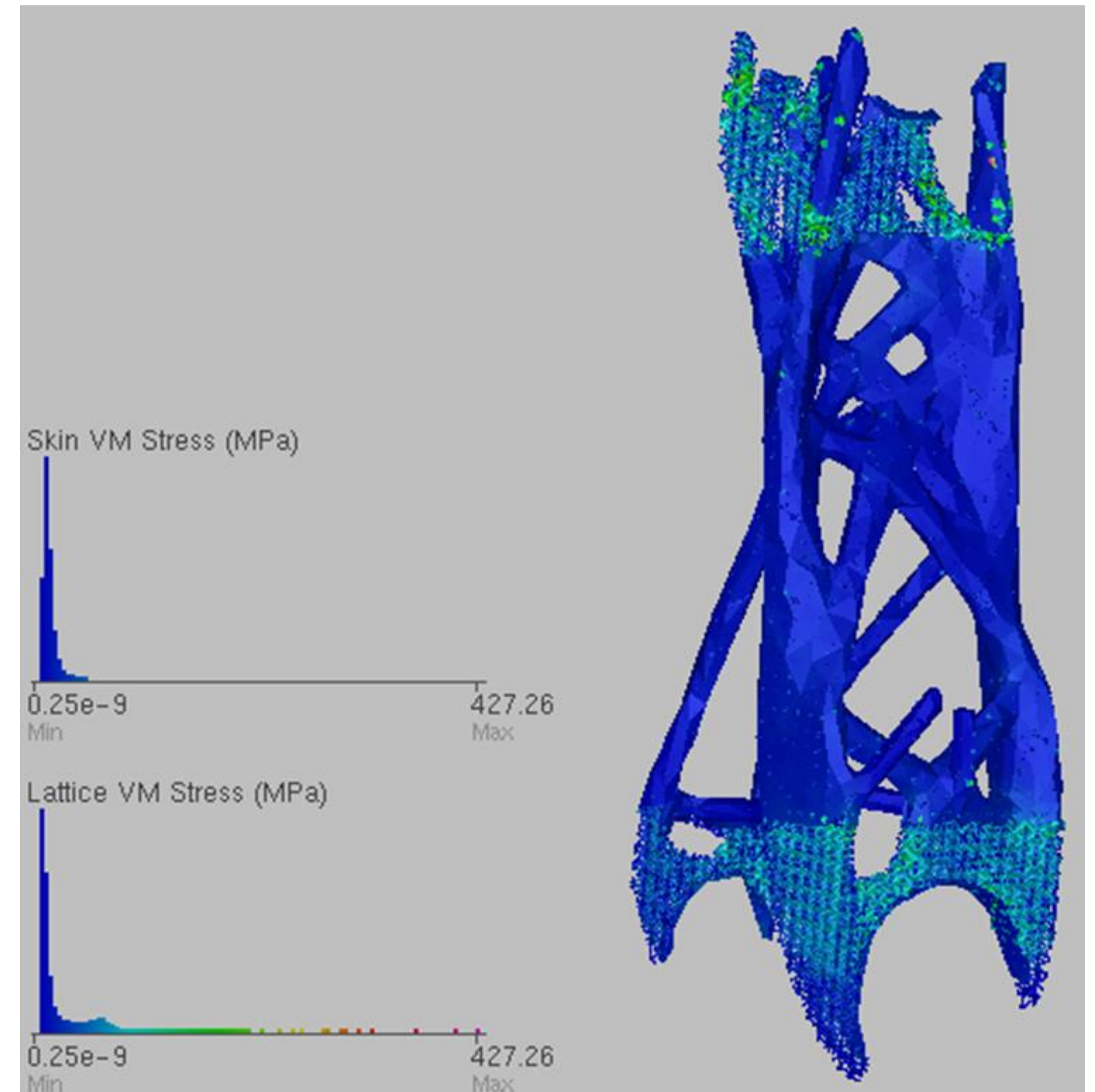
4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

3. 给截面积较小的梁添加外表面。

由于网格较多，直接将目标及其周围的结构全部包裹。表面厚度为2mm。

最大应力427.26MPa，仍未达到安全应力范围，因此考虑第四种方案。



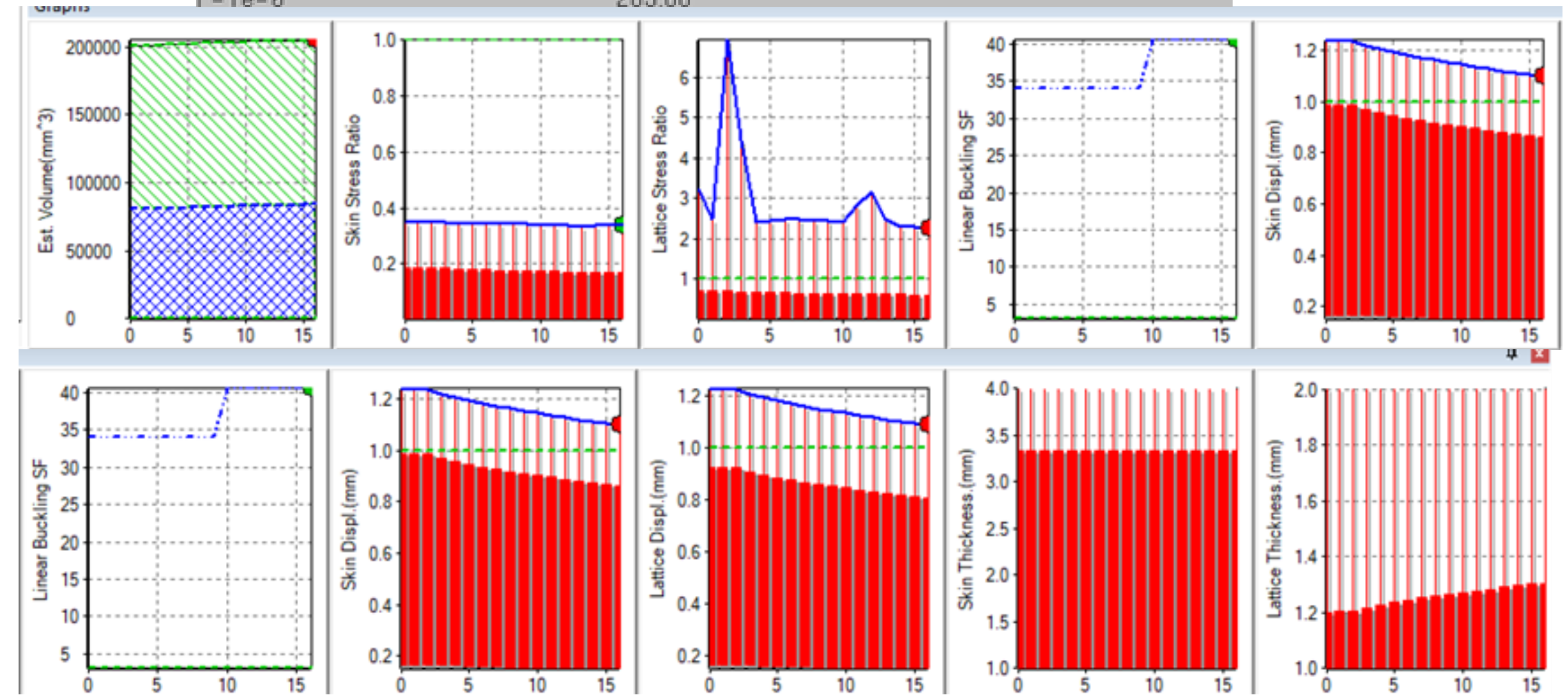
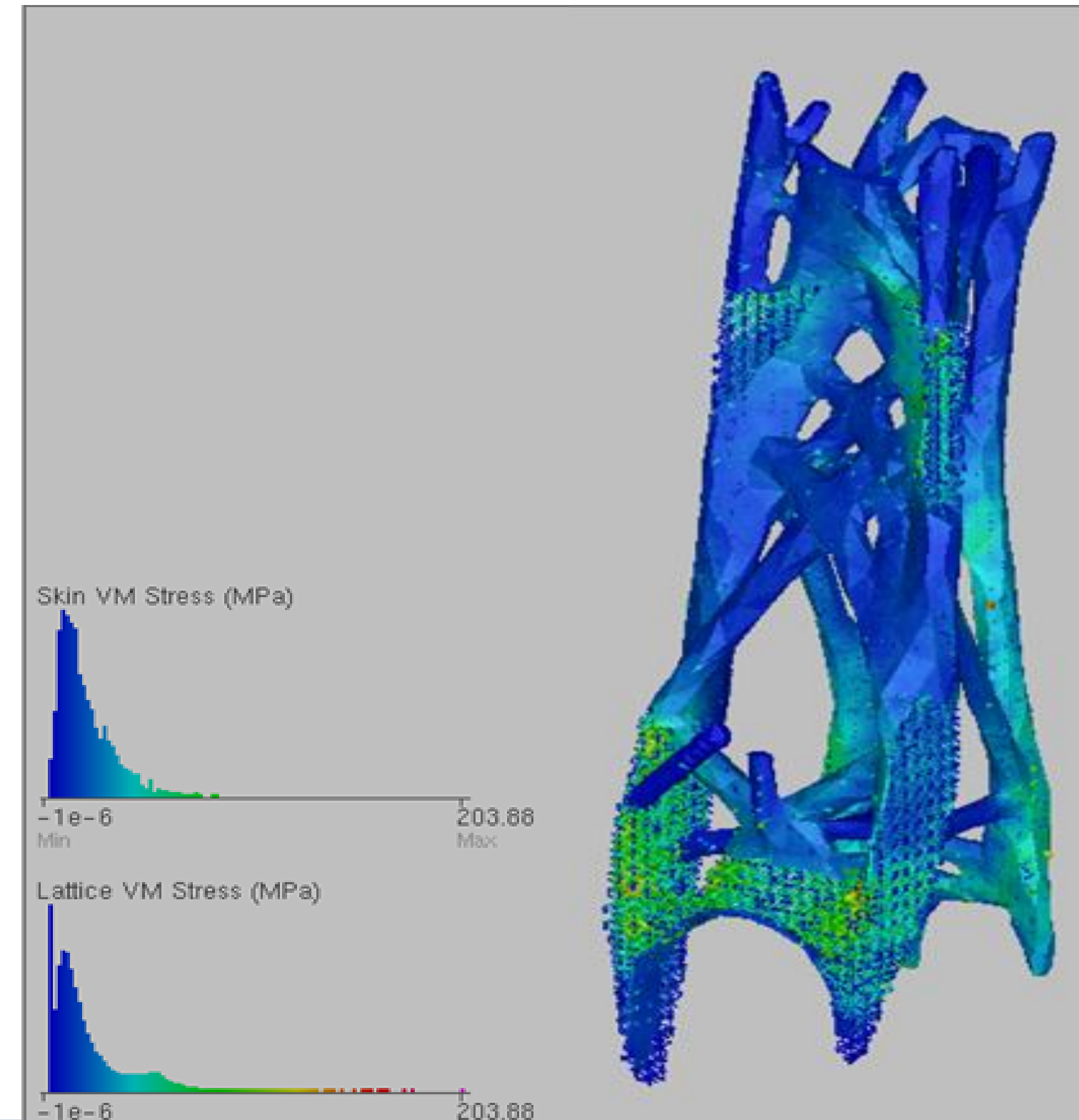
4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

4. 危险点加晶核，同时给截面积较小的梁添加外表面。晶核尺寸为8*8*8，外表面厚度为1。

最大应力203.88MPa，处于安全应力范围，但未达到安全疲劳强度

质量比0.424，最大位移1.1mm



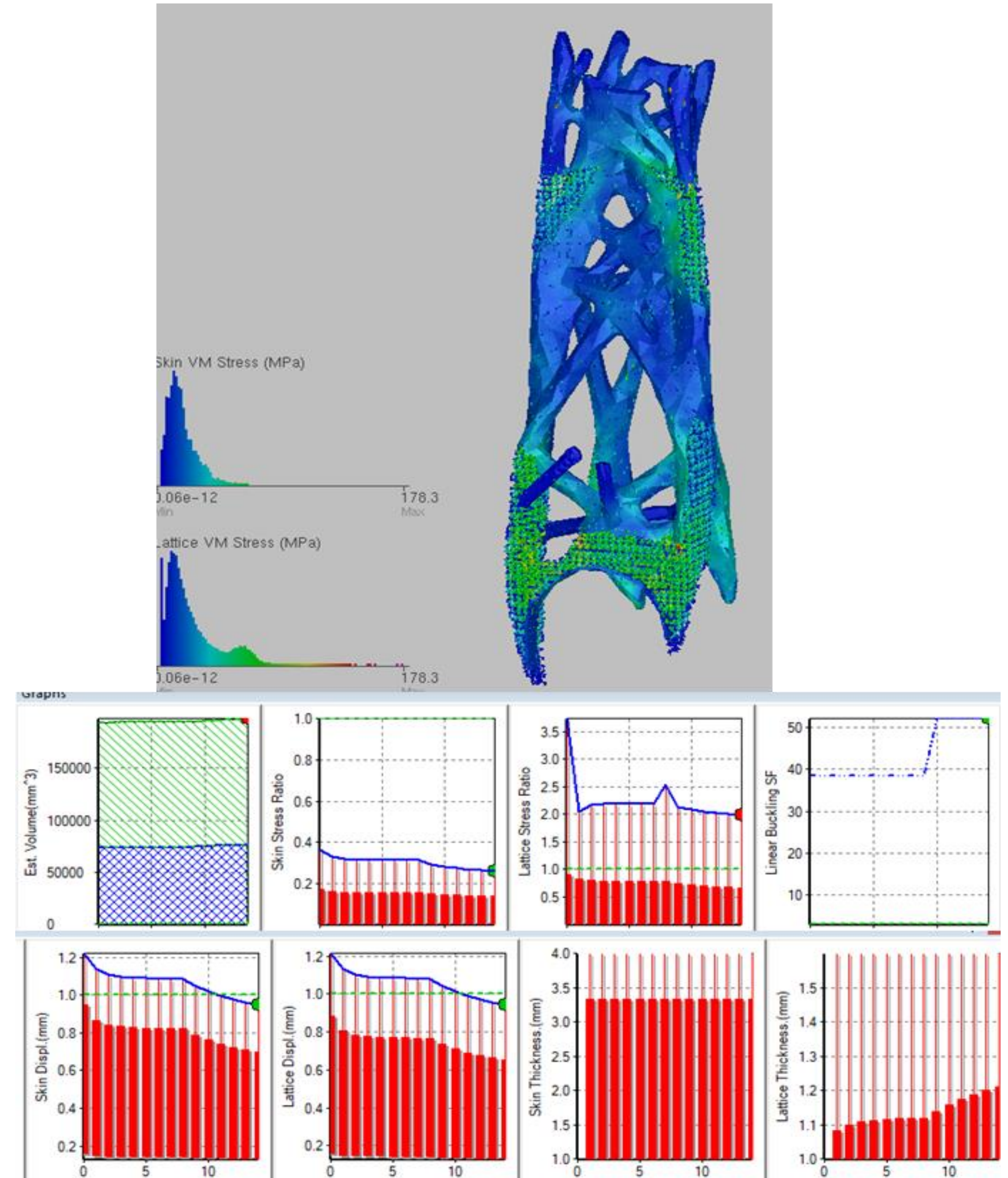
4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

在之前的基础上，改用Hex (Z) 晶格，单元尺寸8*8*8。

最大应力178.3MPa，处于安全应力范围。

质量比0.408，最大位移0.95mm

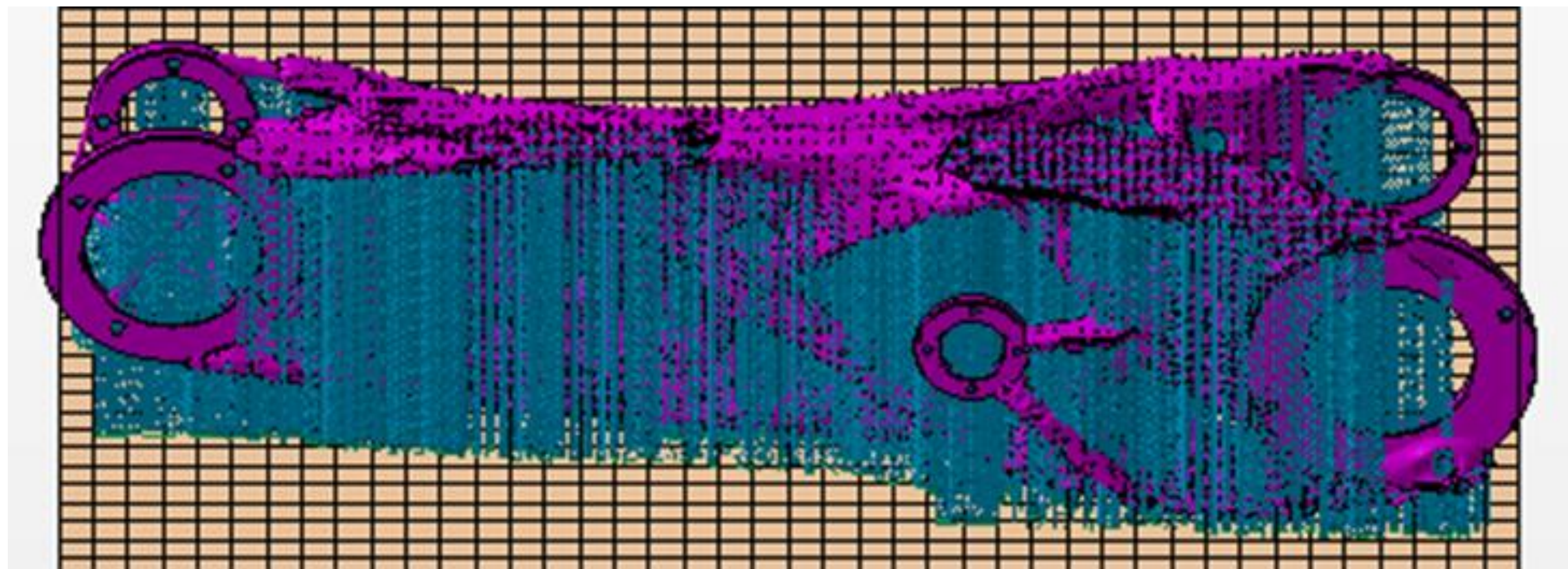
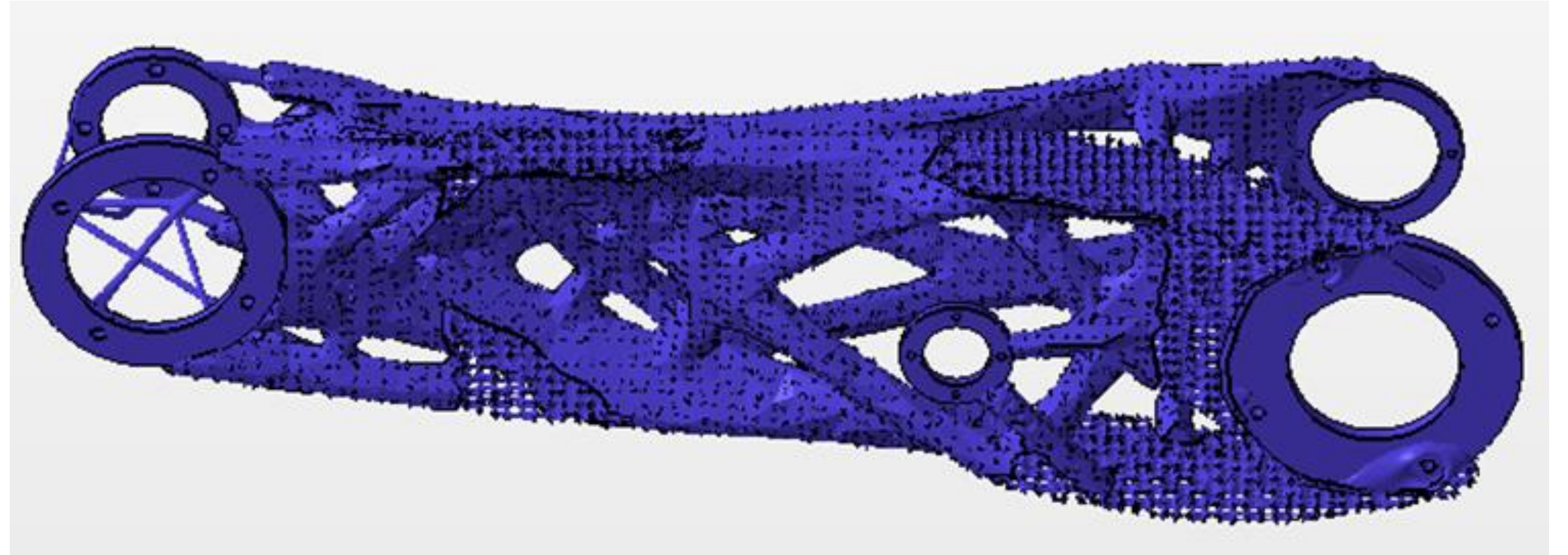


4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

以Hex (Z) 晶格优化结果为例，完善模型。

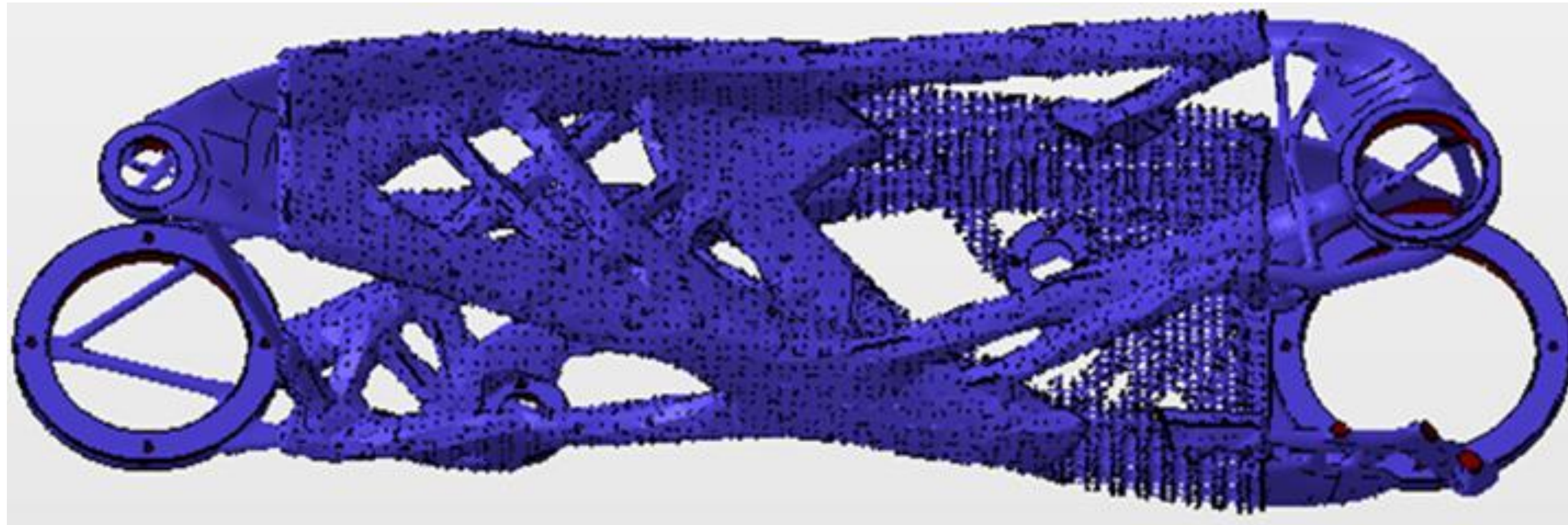
质量比0.454，满足强度要求，刚度略微下降，不考虑疲劳失效。



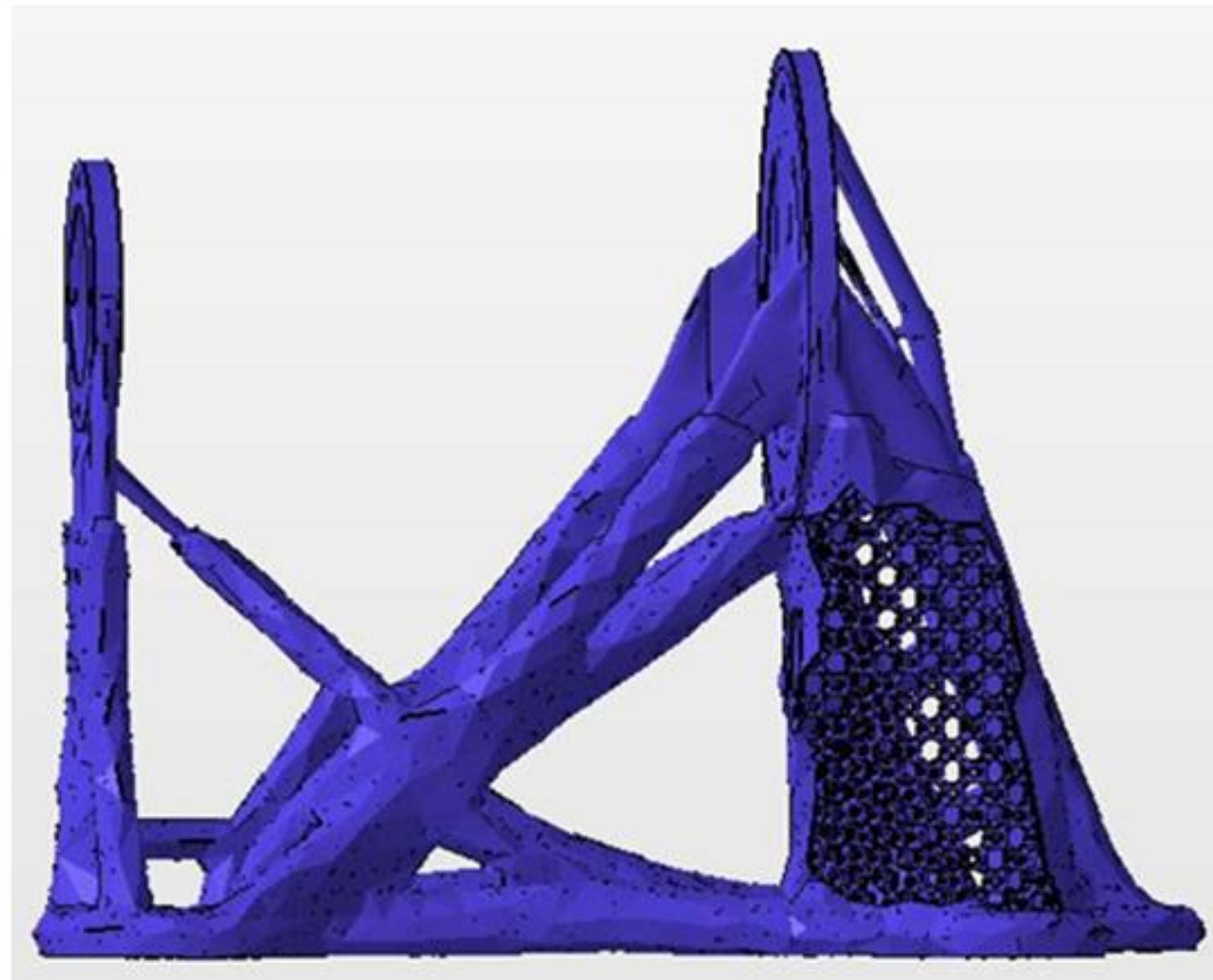
制造方式选择SLM制造支撑

4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化



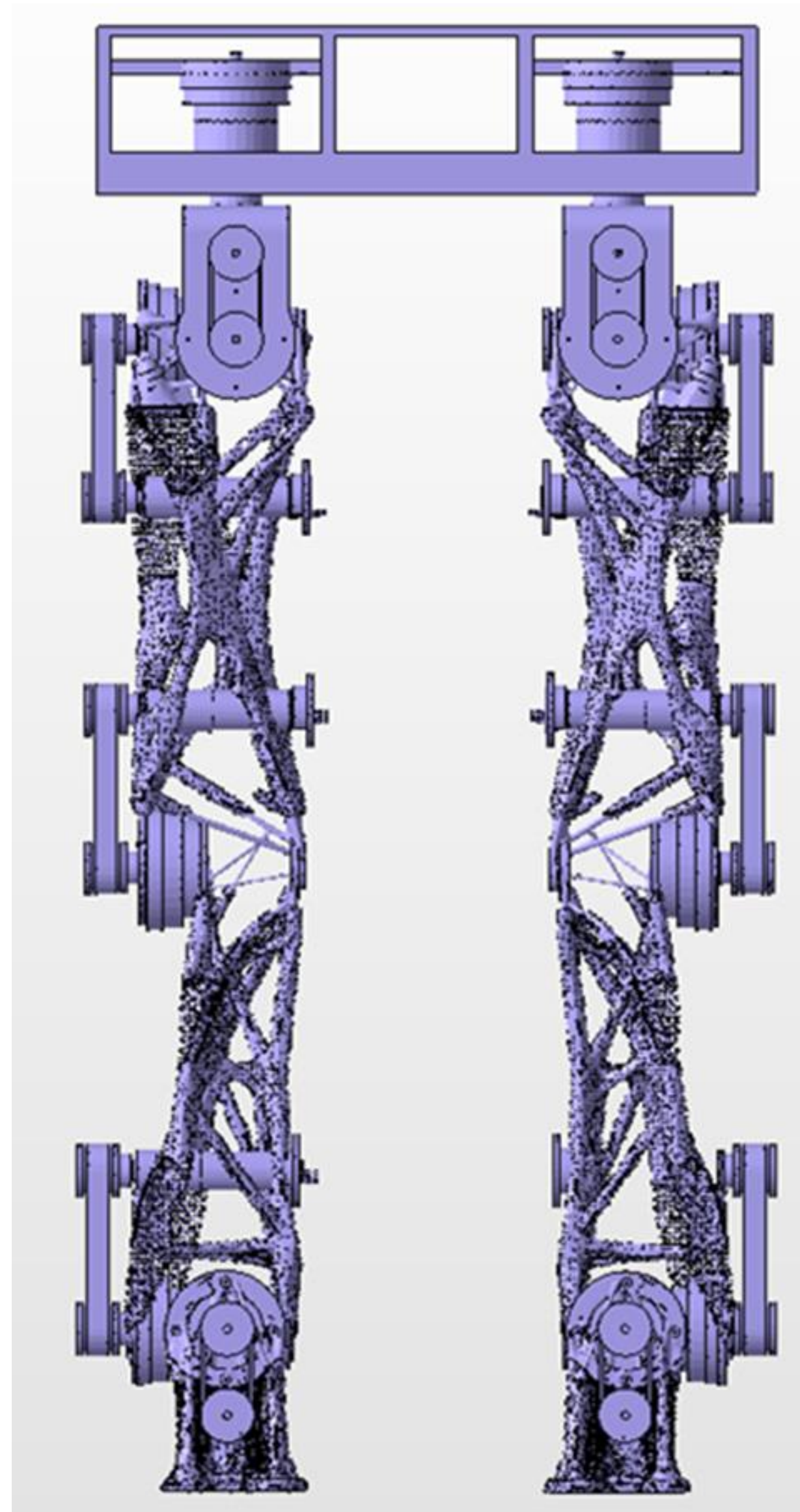
大腿骨晶格结构优化模型



足踝部晶格结构优化模型

4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化



仿人机器人下肢
晶格结构优化效果图

4. 晶格结构优化

4.2 晶格结构的下肢优化

模型制造仿真（以小腿骨为例）

由于模型较大，超出一般金属打印平台尺寸，因此将零件拆分为两部分分别进行打印。



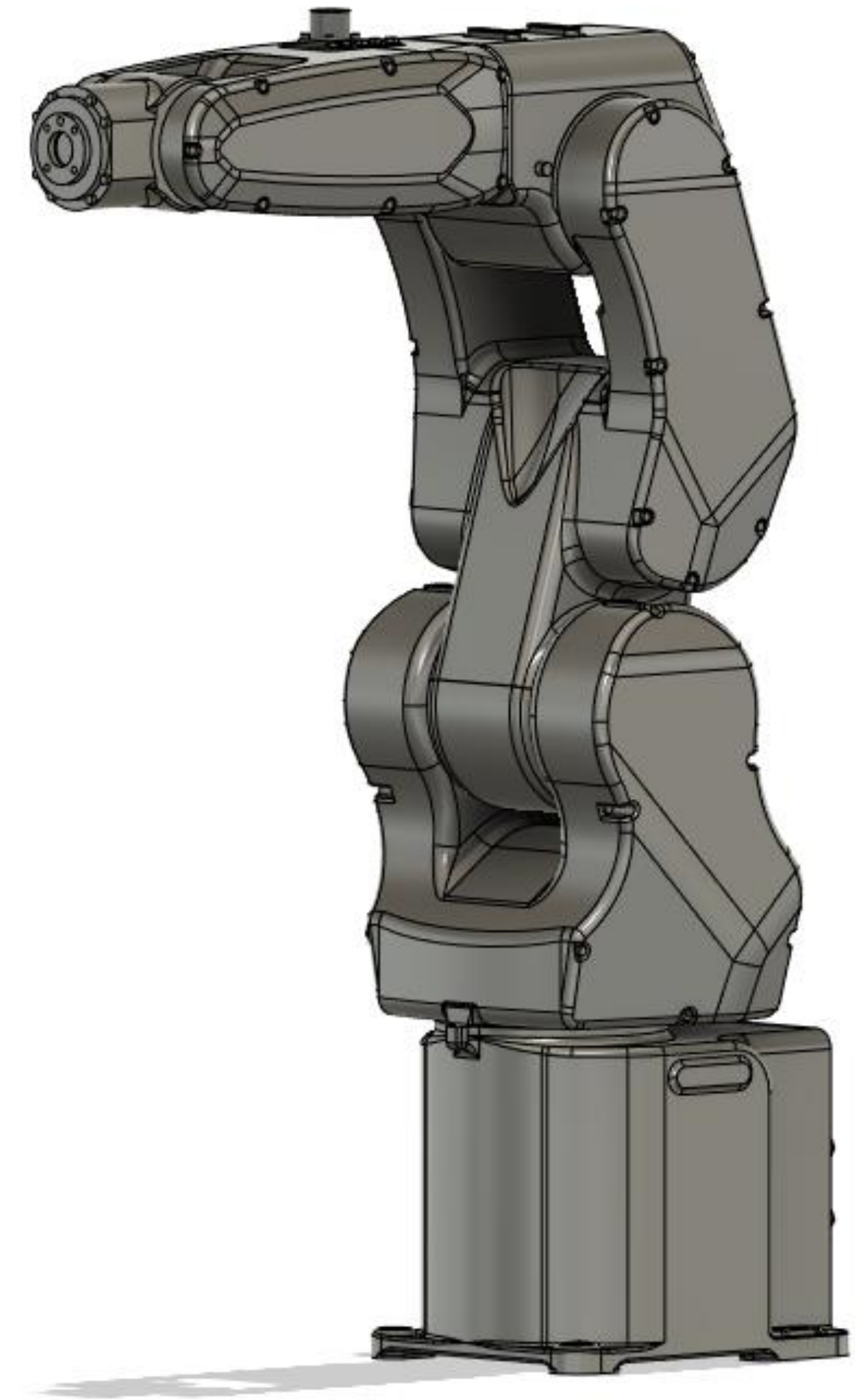
工业机器人结构轻量化设计

选用某工业机器人作为轻量化设计的目标，该机器人具有6个自由度，有效载荷为3kg，重复定位精度为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，适用环境为 $0\sim 45^{\circ}\text{C}$ ，本身自重127kg。

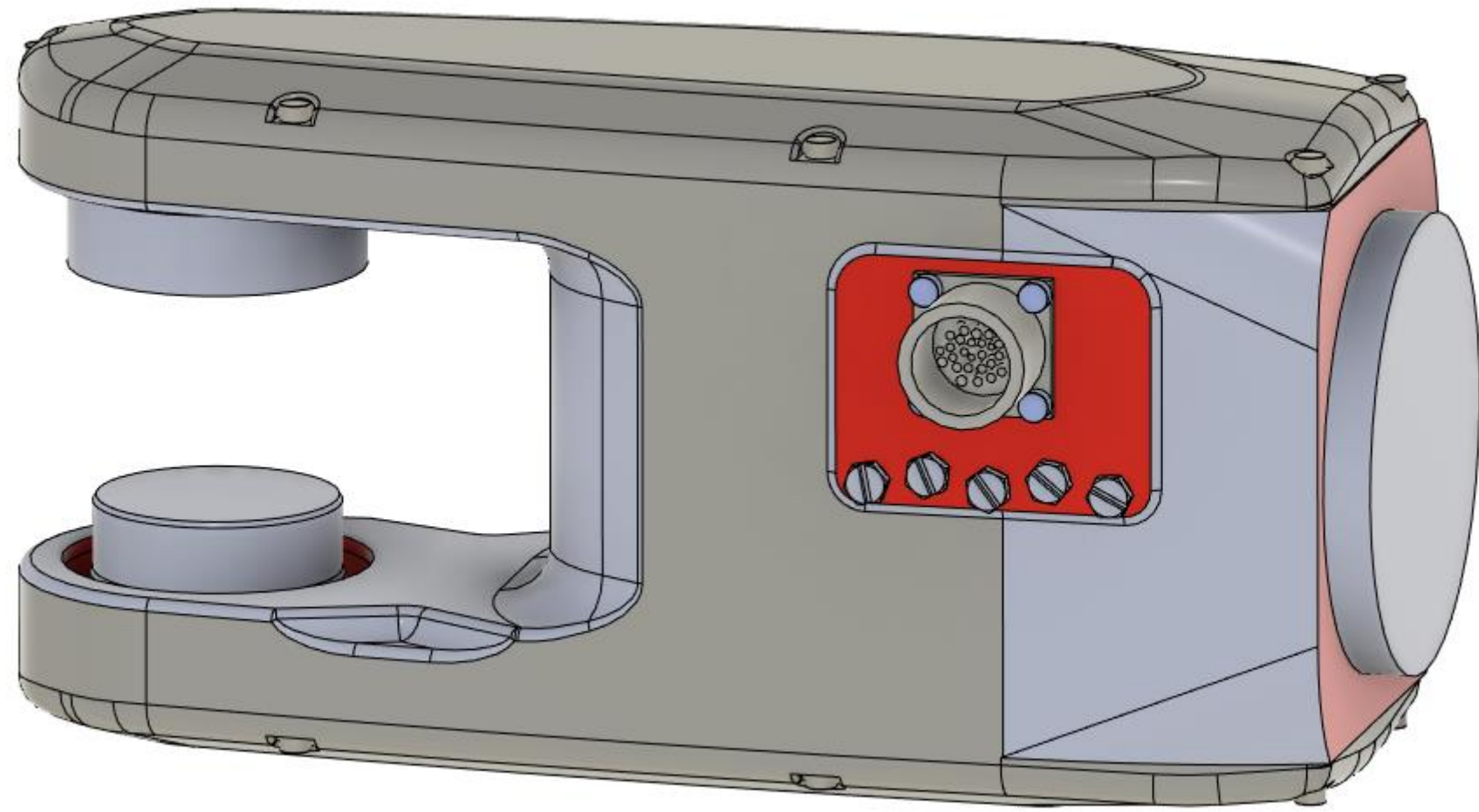
计划通过结构优化来减轻工业机器人机械臂的外壳重量，提升控制系统精度，提高机械臂关节运动灵活性，延长电机续航。

将机器人模型导入到Fusion360中，然后将机器人的整体模型拆分成各部件模型，从上到下共有6个部件，分别命名为机械手、手臂1、手臂2、手臂3、手臂4和底座以及插线。

对于其中的机械手构件和底座构件，**不做结构优化处理**。

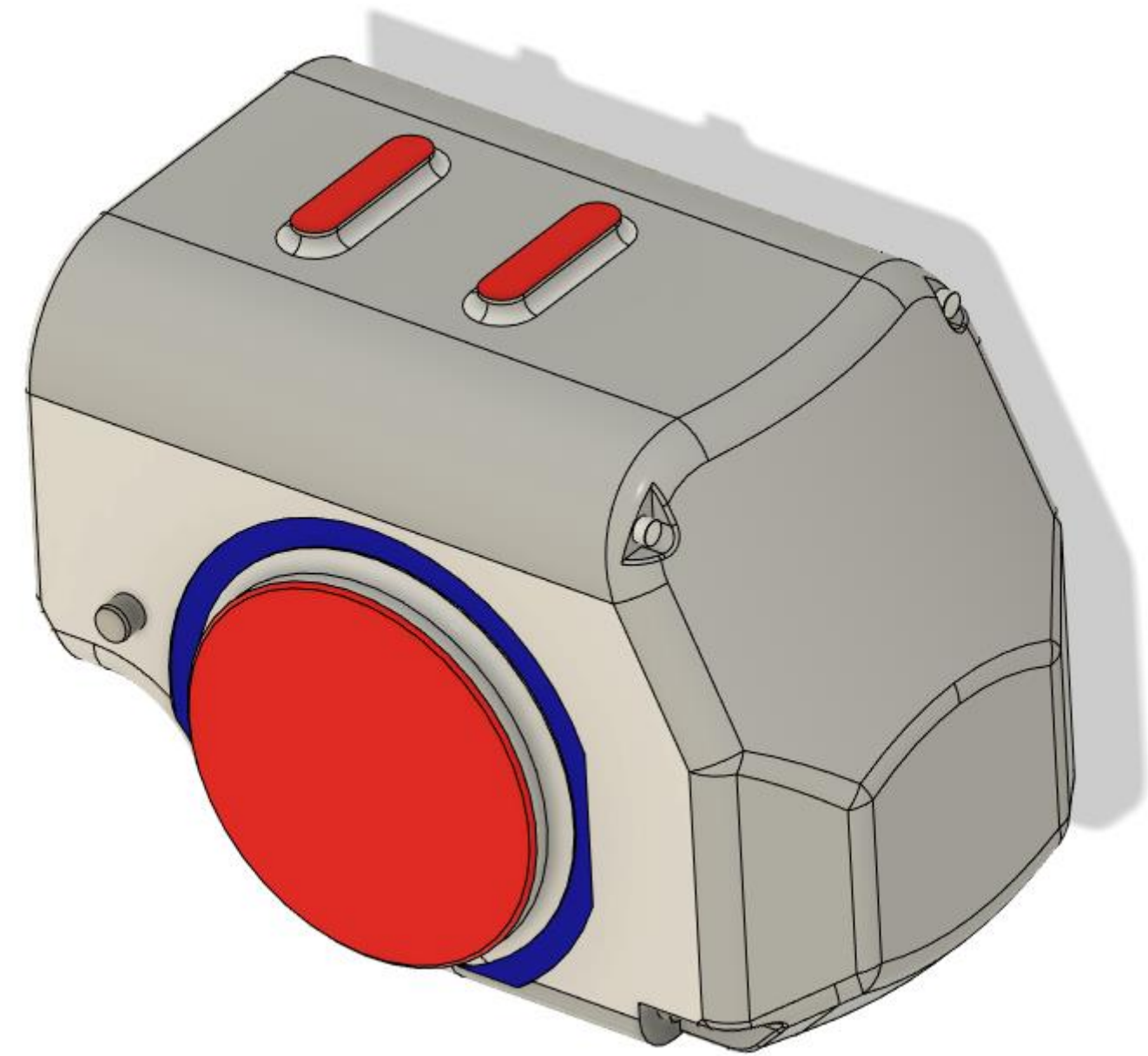


1. 建模



手臂1部件

手臂1部件，形状比较狭长，连接部分比较容易区分，所以保留其连接功能的部分，对整个外壳部分进行**衍生式设计**。

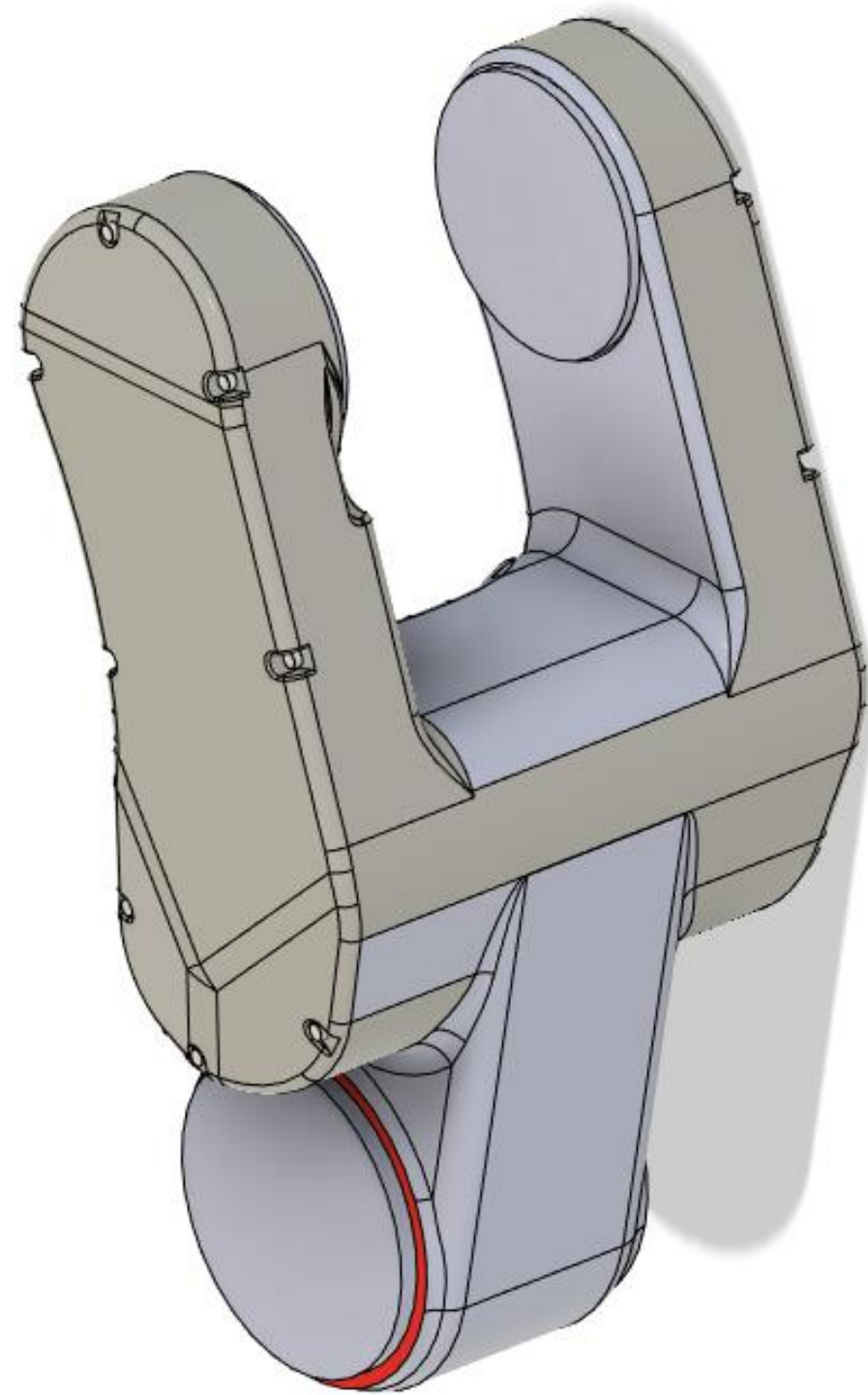


手臂2部件

手臂2部件，形状比较粗短，有一对突出的连接轴，难以区分前后的连接部分，不易进行衍生式设计，需要针对性地进行**晶格结构形状优化**。

1. 建模

对于手臂3和手臂4，形状较为相像，保留好相互连接的关节部分，对整体外壳进行**衍生式设计优化**，降低其自身重量，保留其自由度与运动方向特性。



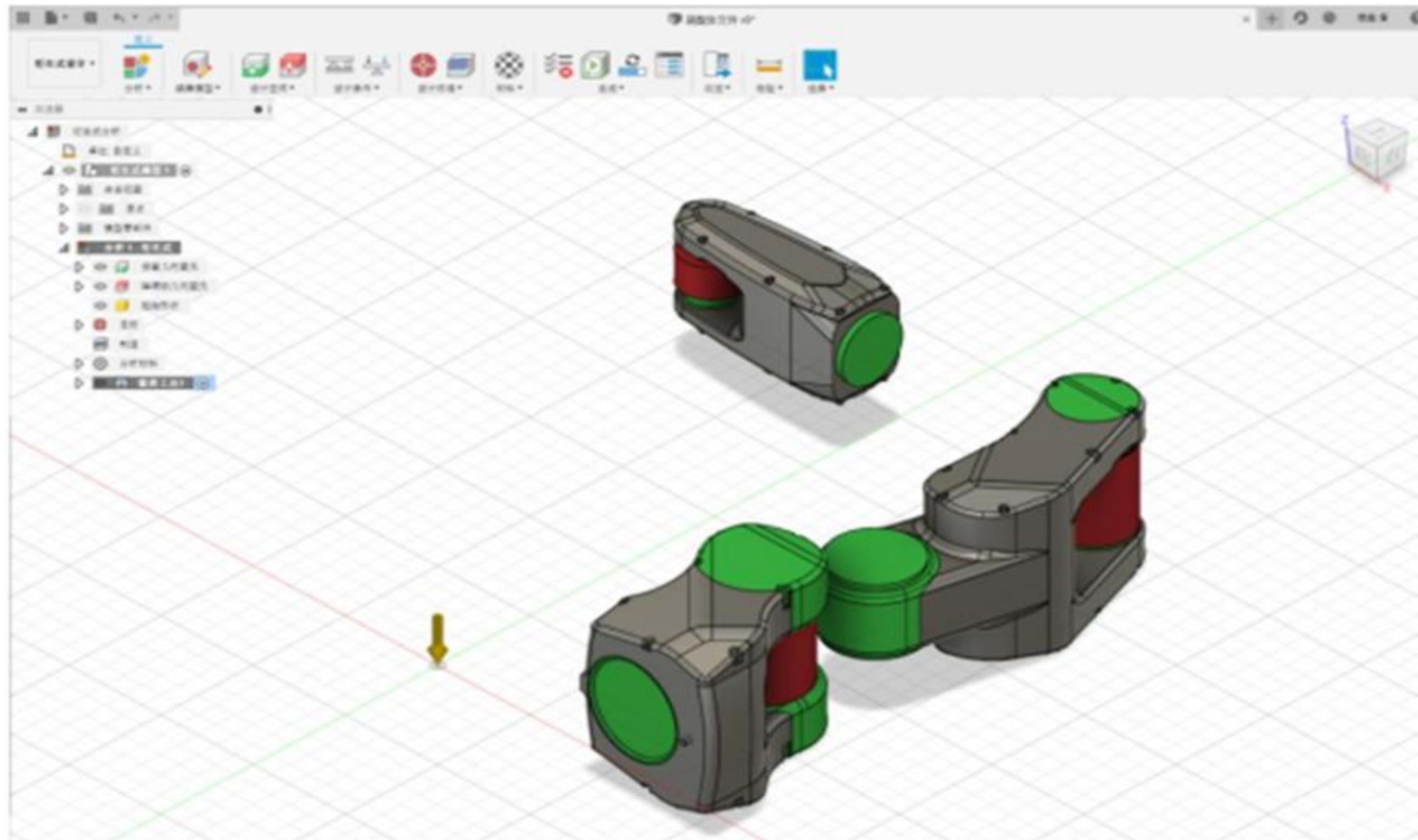
手臂3部件



手臂4部件

2. 衍生式设计

2.1 划分手臂模型实体



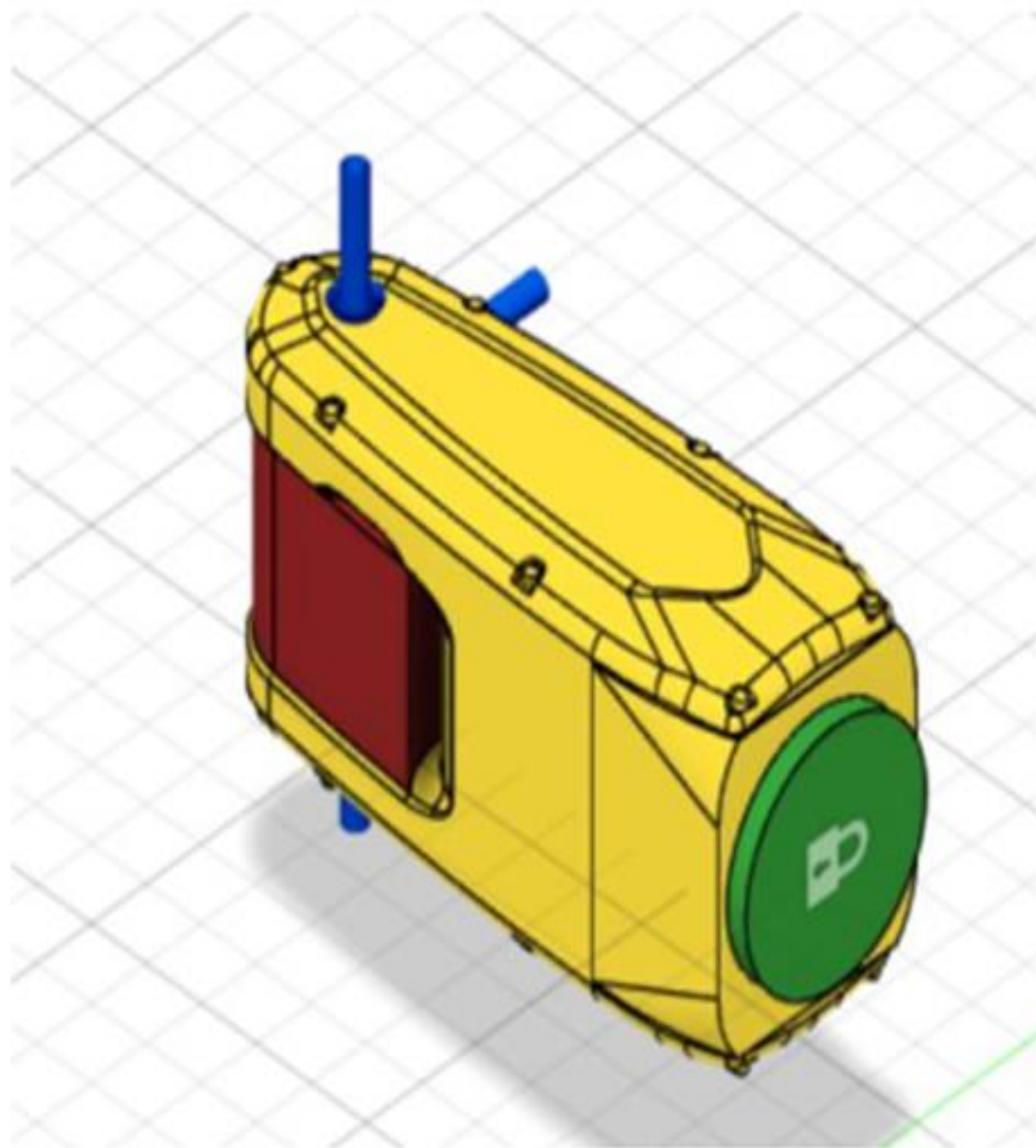
➤绿色部分为衍生式设计的保留区

➤红色部分为衍生式设计的障碍区

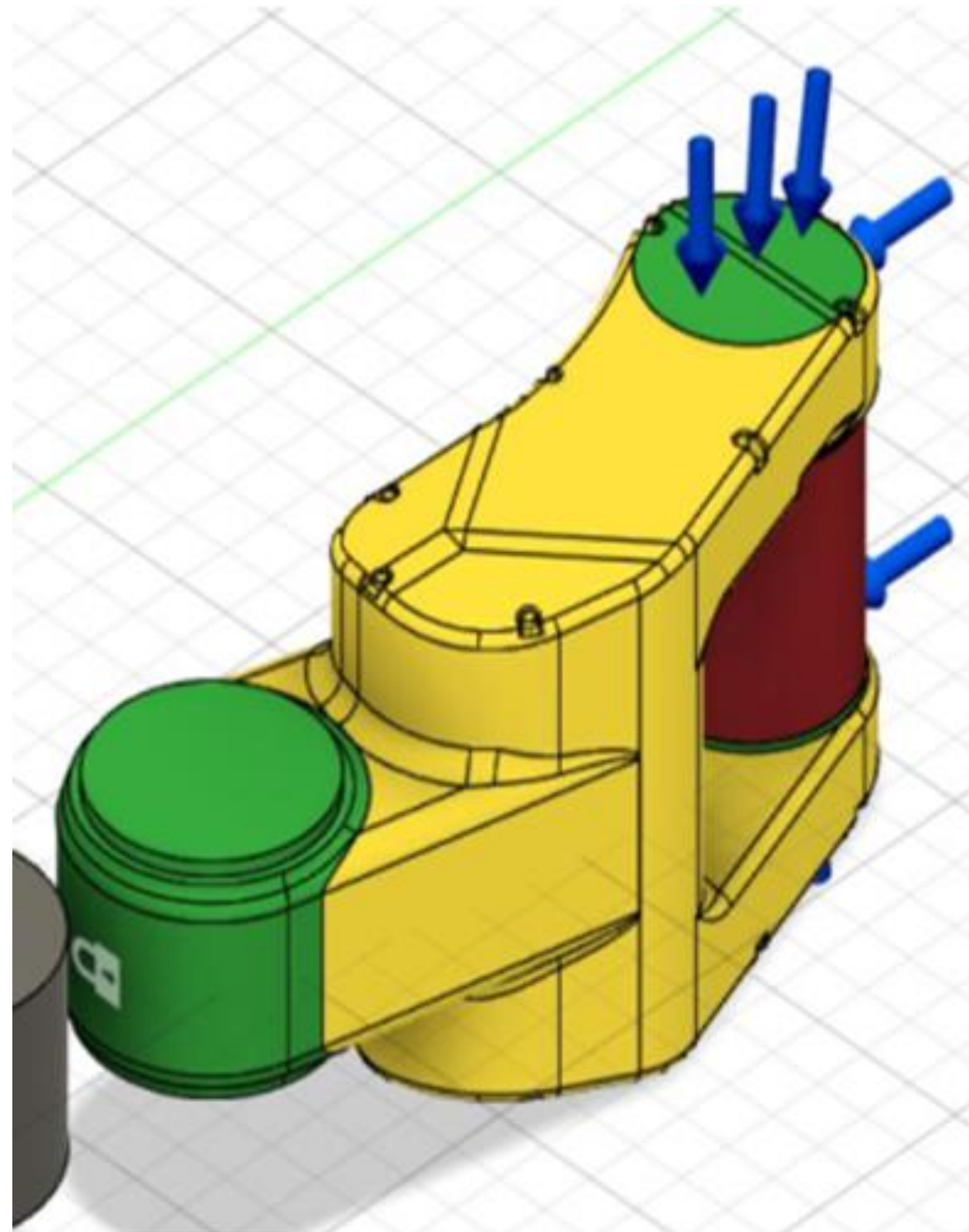
2. 衍生式设计

2.2 施加约束与载荷

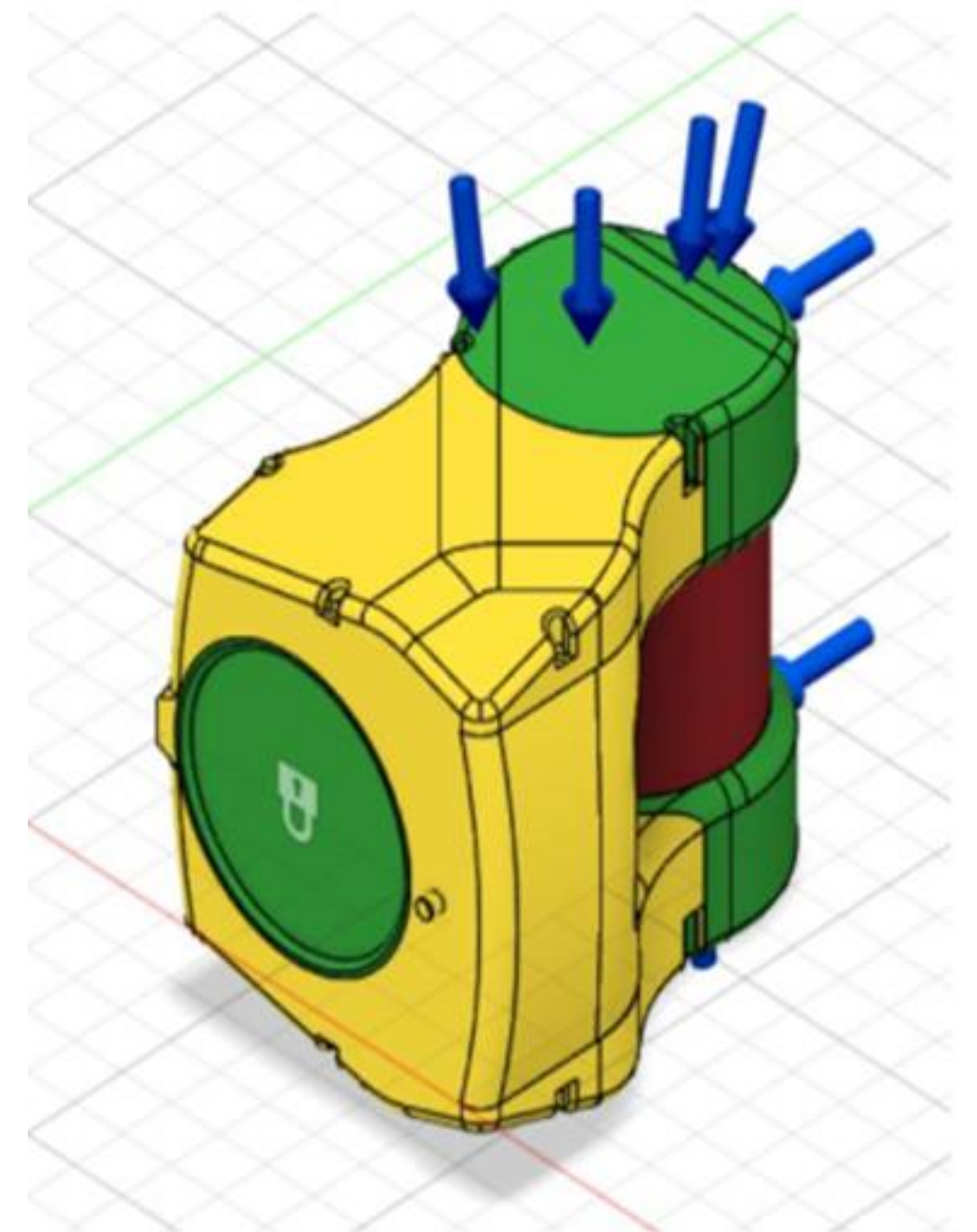
完成约束与载荷后示意图



手臂1



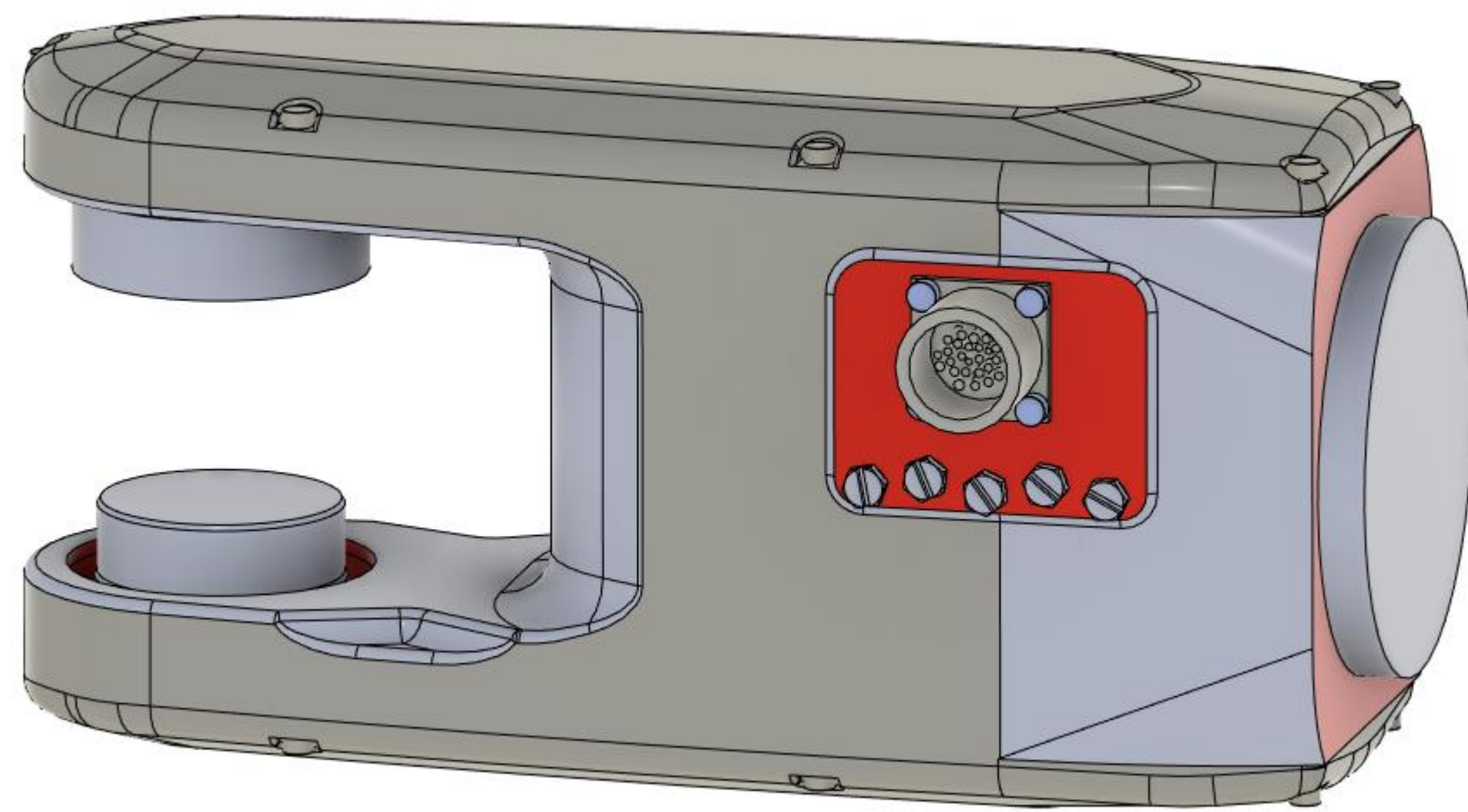
手臂3



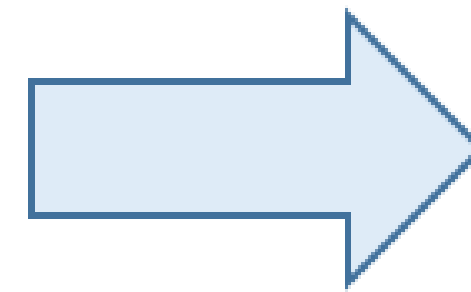
手臂4

2. 衍生式设计

2.3 设计结果筛选



手臂1部件

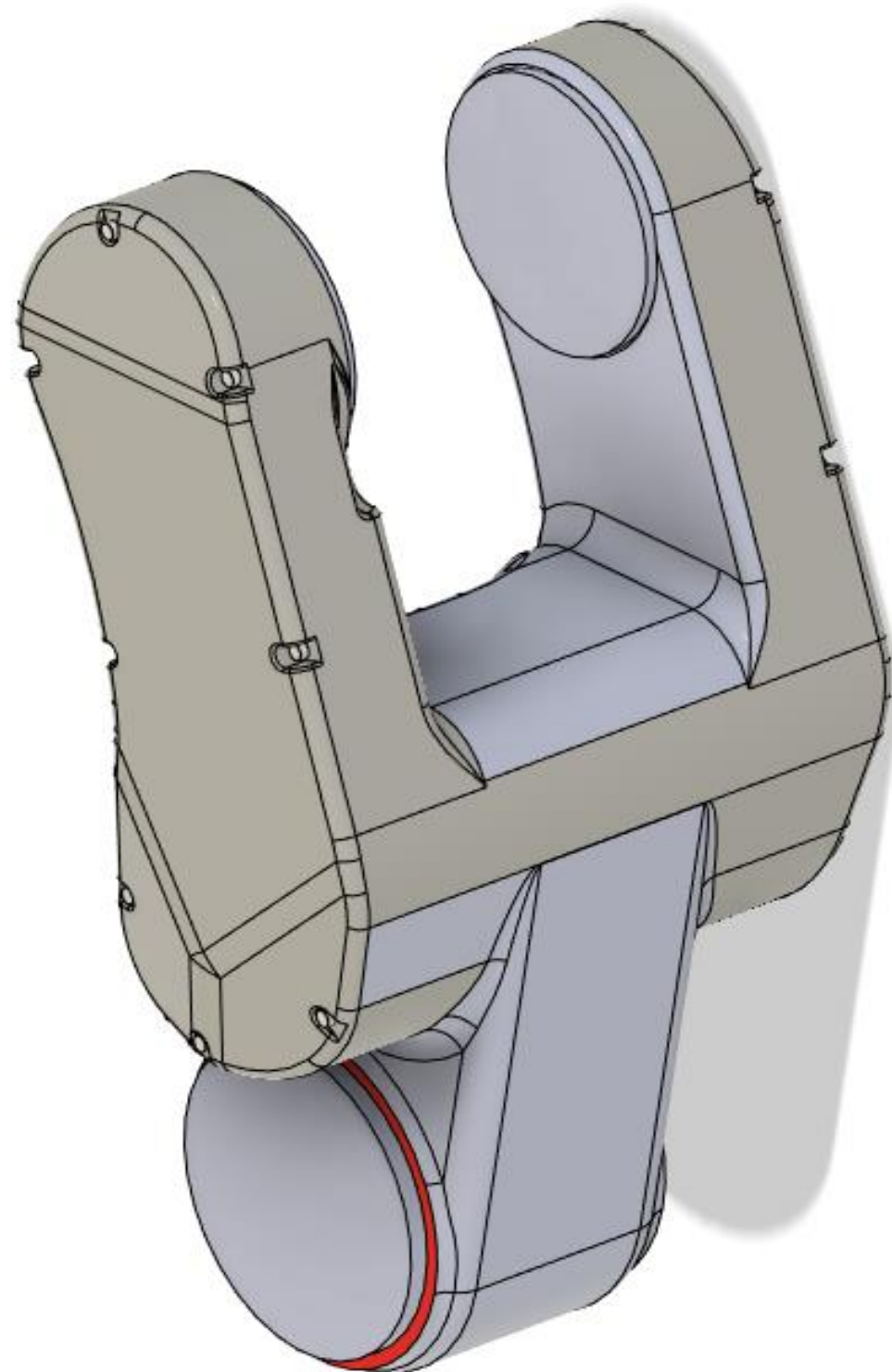


手臂1设计结果

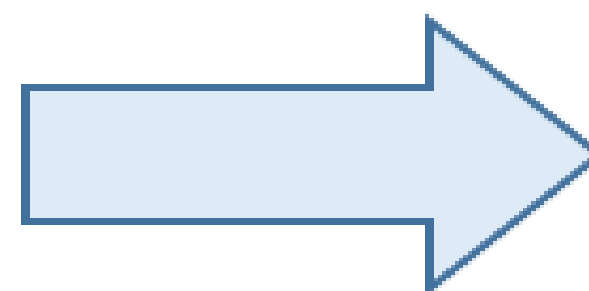
该方案经过42次迭代由优化区的外壳形状优化而来，总体积为178700 mm³，手臂模型总质量为1.403kg，最大等效应力为5.1MPa，安全系数为40.52。

2. 衍生式设计

2.3 设计结果筛选



手臂3部件



手臂3设计结果

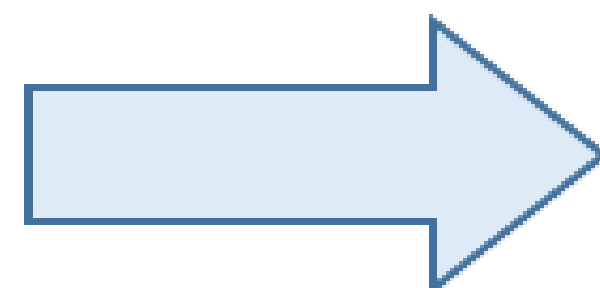
该方案经过22次迭代，总体积为1831000 mm³，总质量为14.375kg，最大等效应力283.7MPa，保证了2.0的安全系数。

2. 衍生式设计

2.3 设计结果筛选



手臂4部件



手臂4设计结果

该方案经过11次迭代由手臂外壳形状优化而来，总体积为1529000 mm³，模型总质量为12.006kg，最大等效应力高达354.6MPa，保留2.0的安全系数。

2. 衍生式设计

2.4 模型优化效果对比

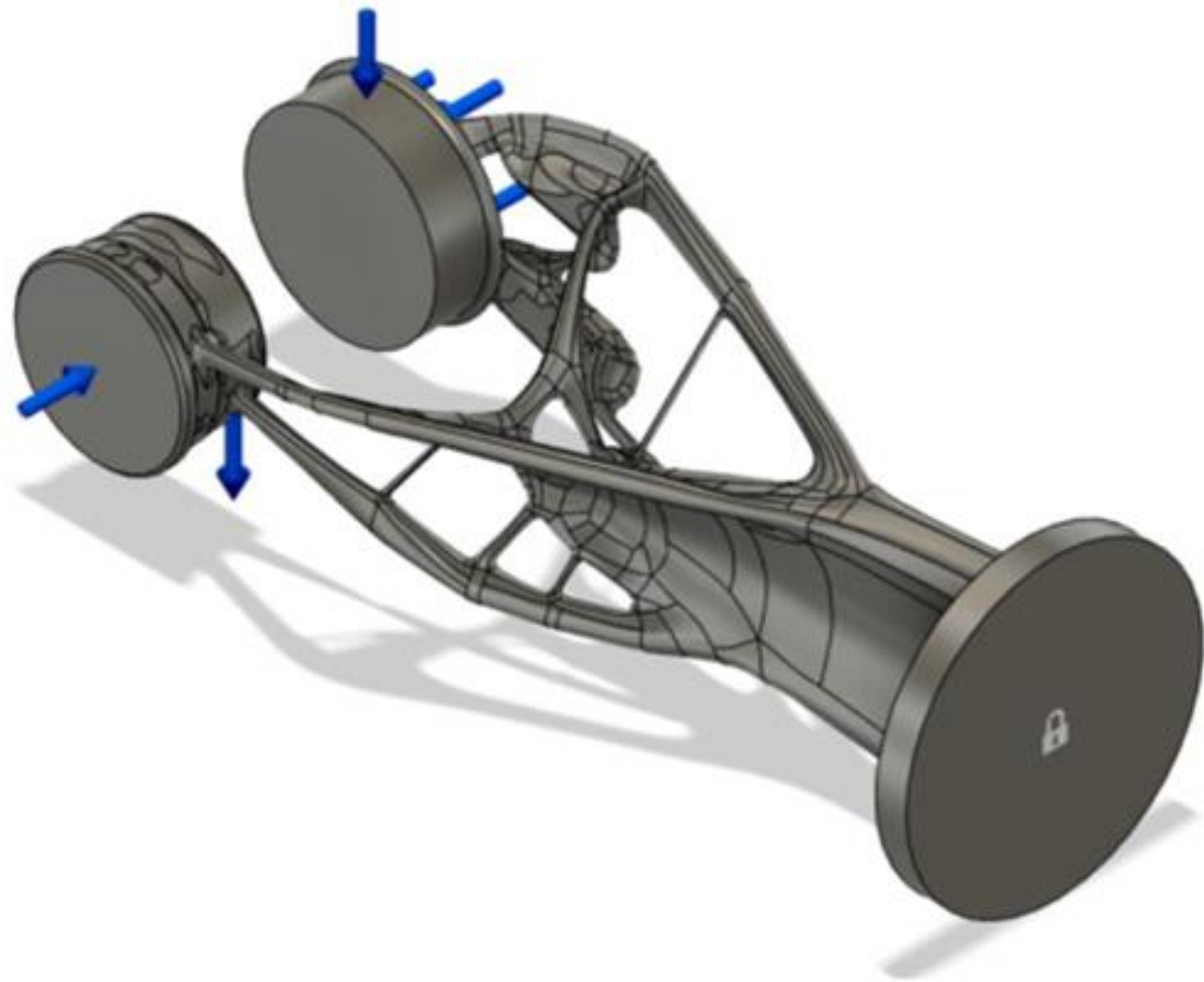
部件名称	质量（kg）	长度尺寸（mm）
手臂1模型	7.82（优化前）	254
	1.40（优化后）	254
手臂3模型	39.58（优化前）	405
	14.38（优化后）	405
手臂4模型	19.25（优化前）	245
	12.01（优化后）	245

经过衍生式设计后，与原始方案的参数对比可知，手臂1模型优化后重量减少了82%，手臂3模型优化后重量减少了64%，手臂4模型优化后重量减少了38%，优化效果均十分明显。

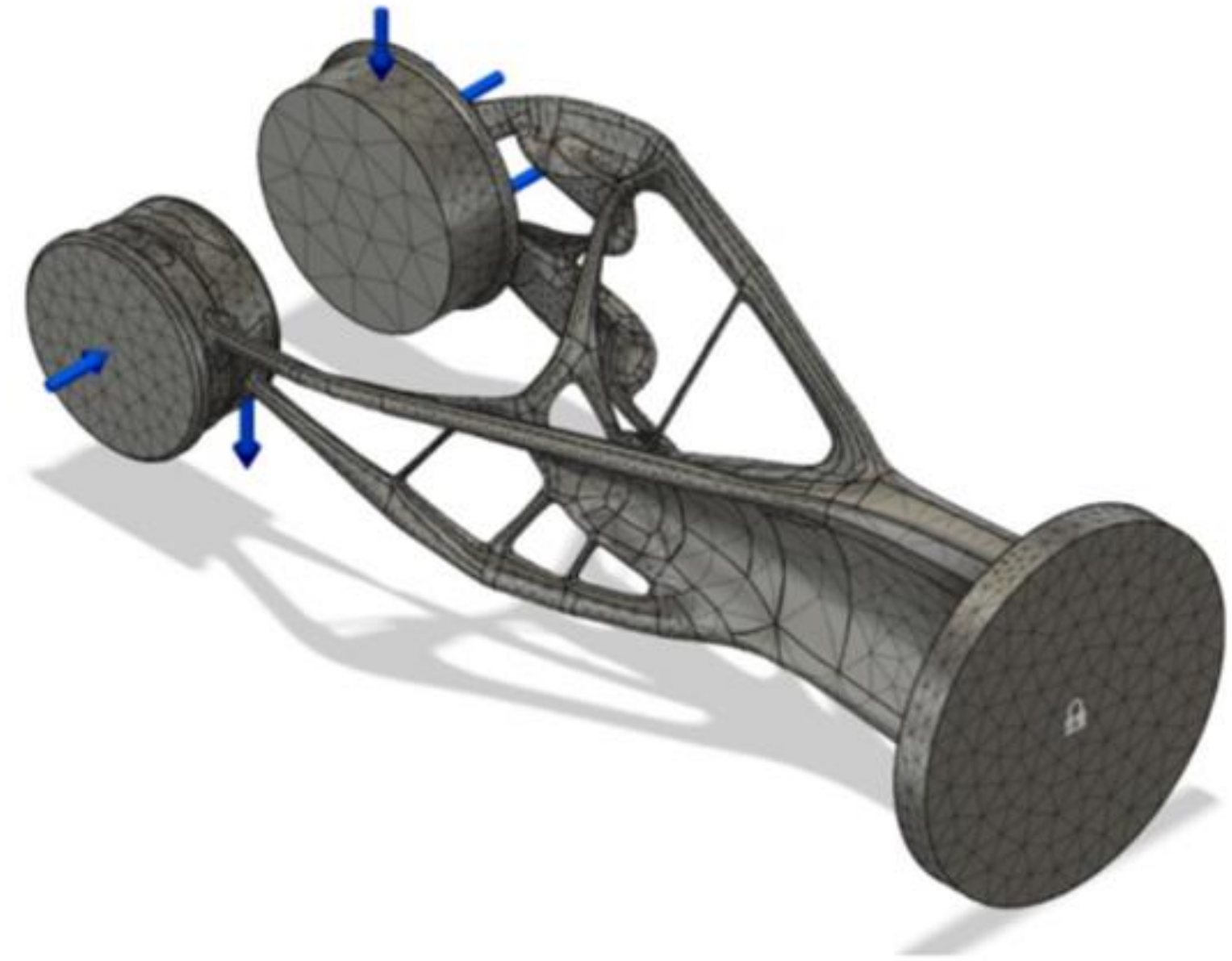
3. 设计结果仿真

以手臂1模型为例进行衍生式设计结果仿真。

根据设定工况条件添加约束与载荷，选择钢材料，为模型划分好网格，进行衍生式设计结果仿真。

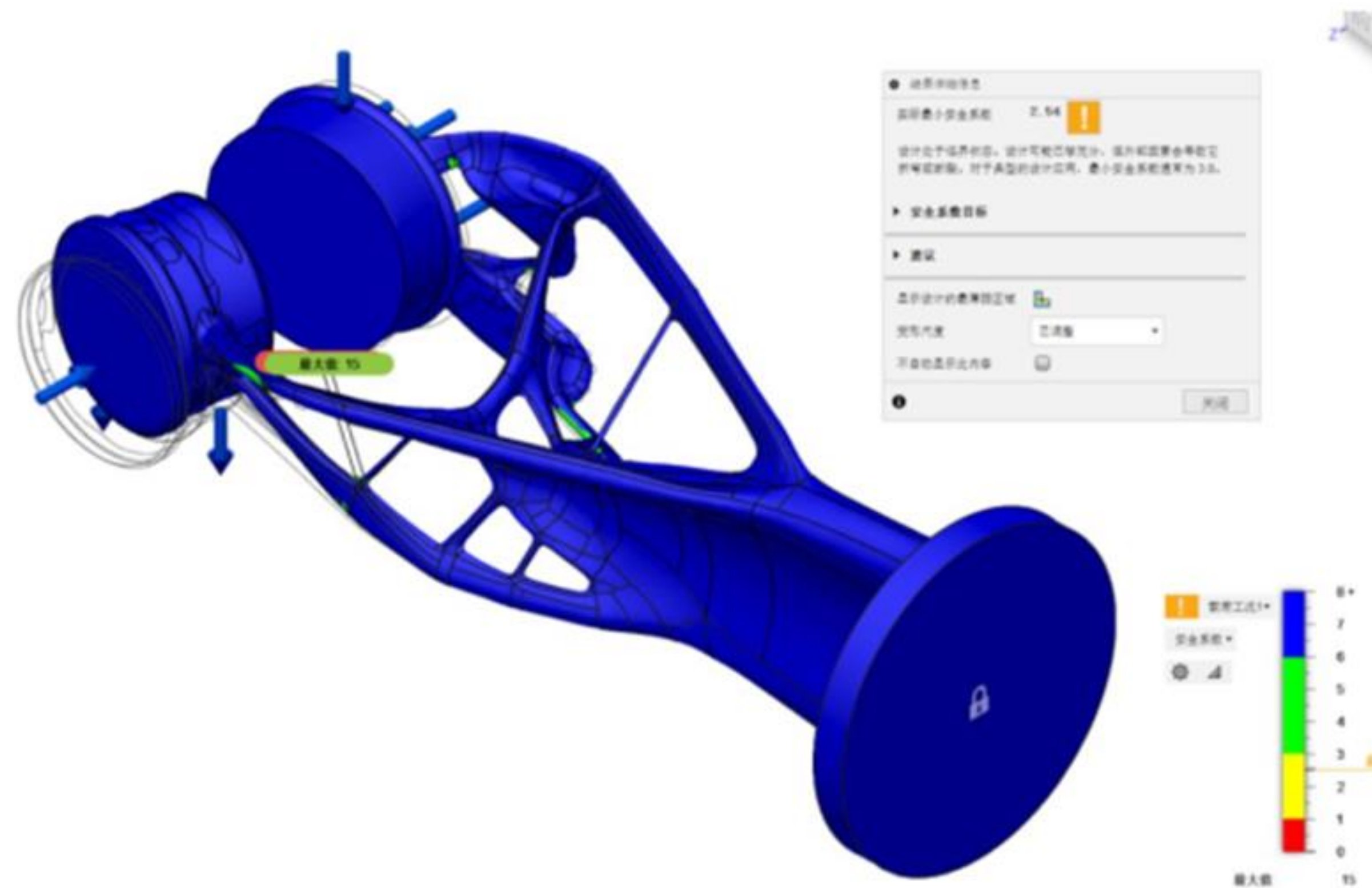


衍生式设计优化模型



模型添加网格

3. 设计结果仿真

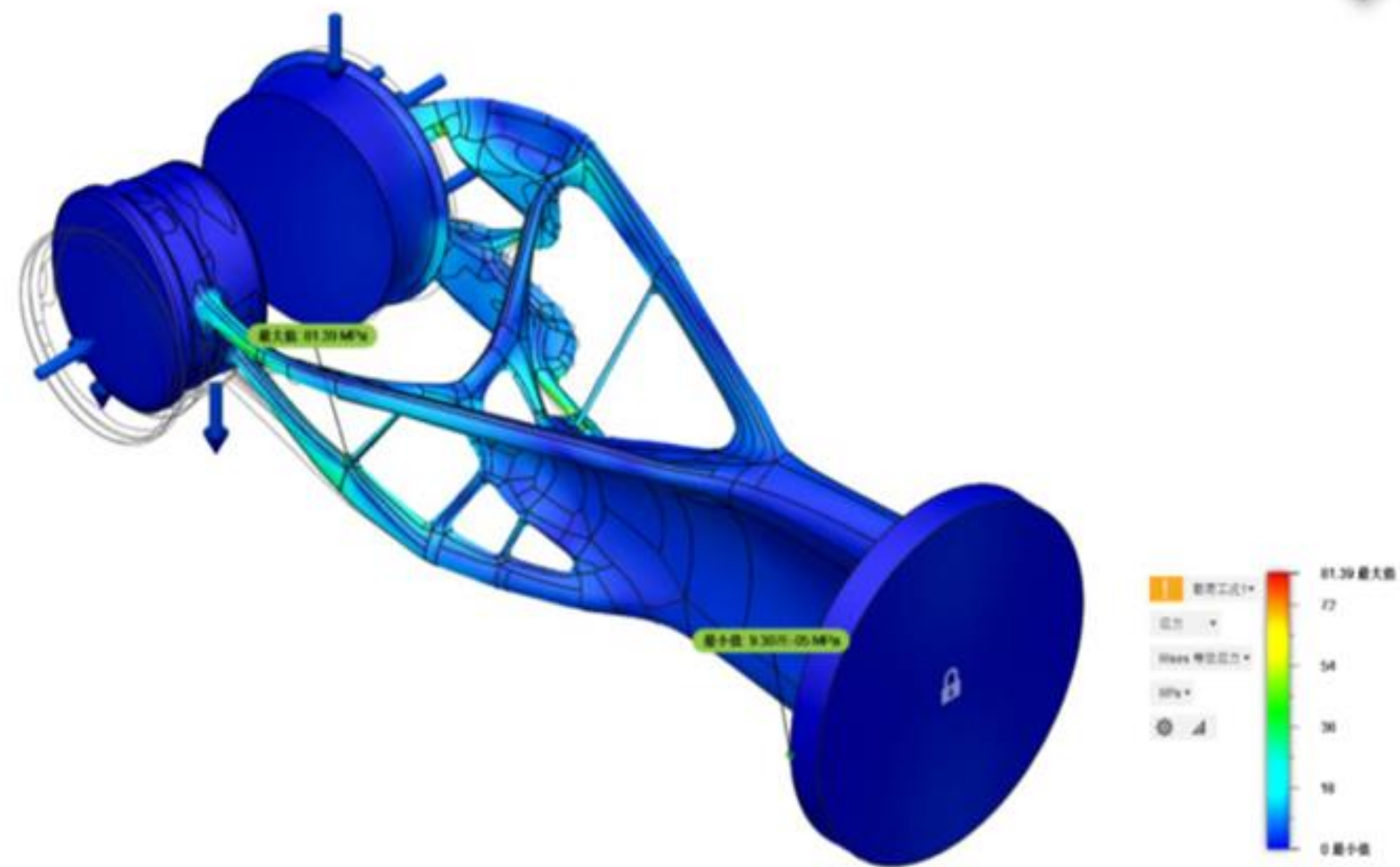


➤ 框架上所有部分安全系数至少都大于2.5。

➤ 连接保留区的桁架部分安全系数较低，主体中安全系数较高。

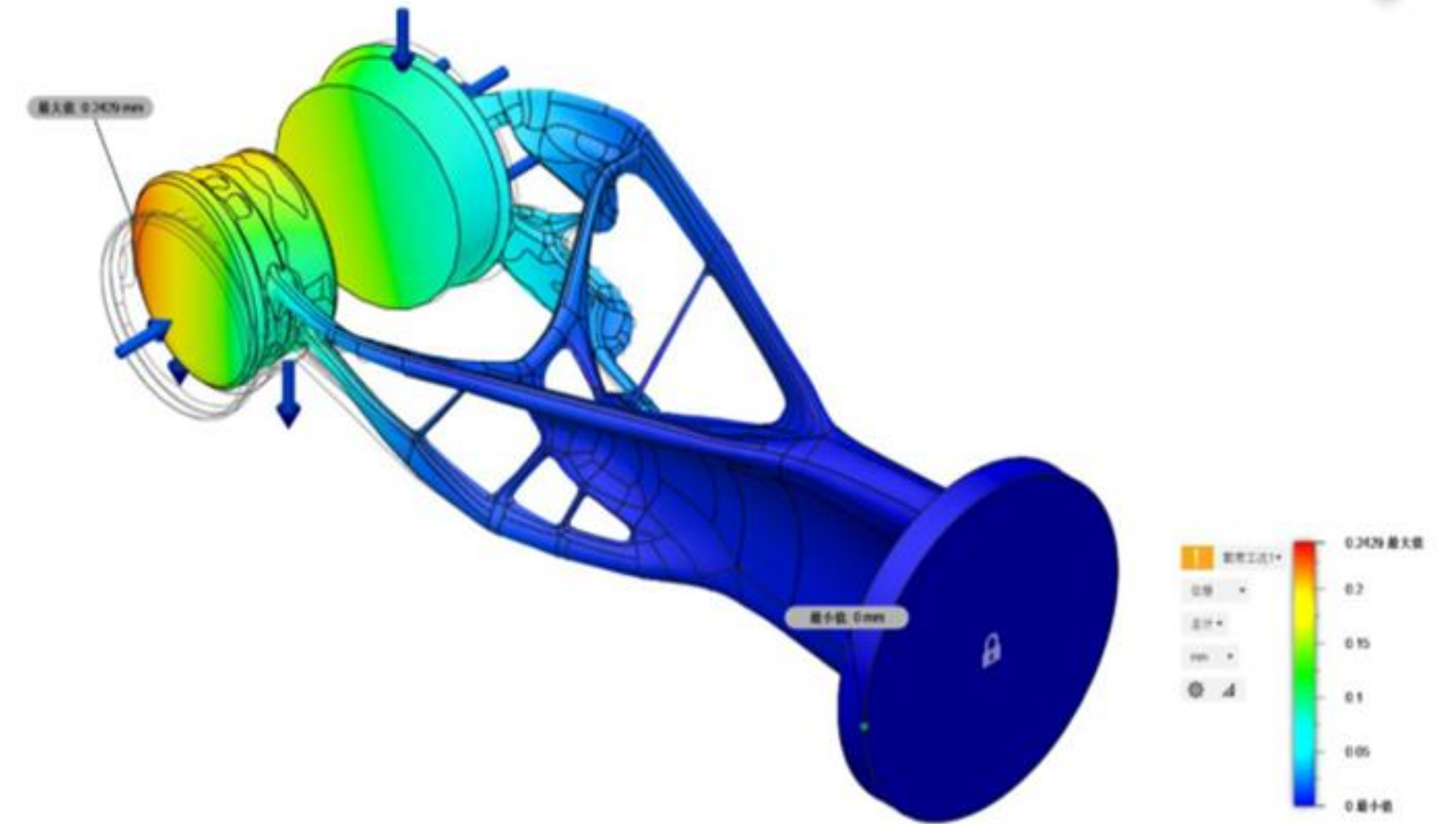
安全系数分布图

3. 设计结果仿真



应力分布图

最大应力为81.3Mpa，高应力部分位于前段连接保留区关节部分。

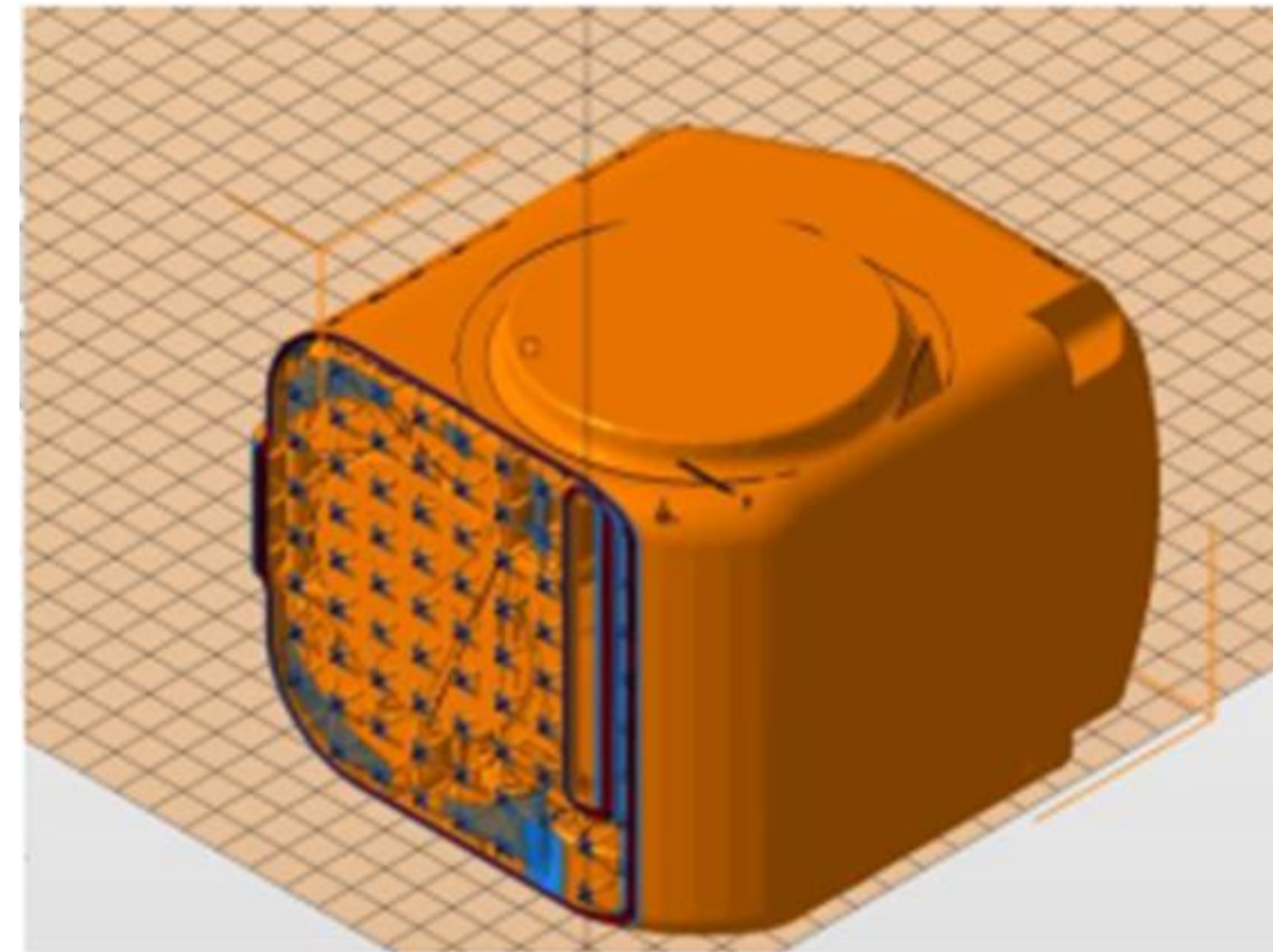


位移量分布图

最大位移量为0.2425mm，出现在手臂1前端关节部分。

4. 晶格结构优化

4.1 X型晶格结构

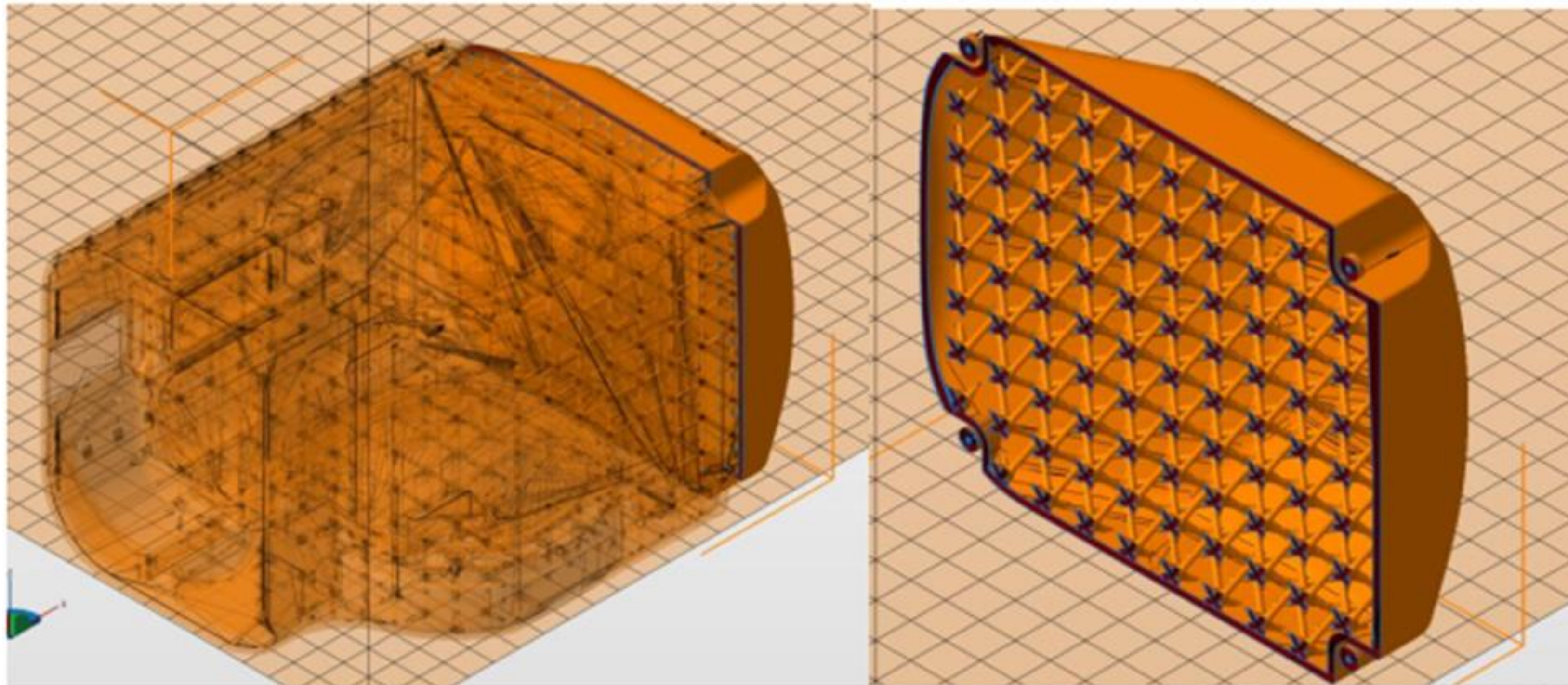


经过X类型晶格的晶格结构优化后，手臂2模型的体积大幅度减少，完成减重目标，但是模型复杂度有所提升。

如果材质是均匀的，X晶格结构优化能减少手臂2模型58.9%的重量，也能保证正常工作负载要求。

4. 晶格结构优化

4.2 W型晶格结构

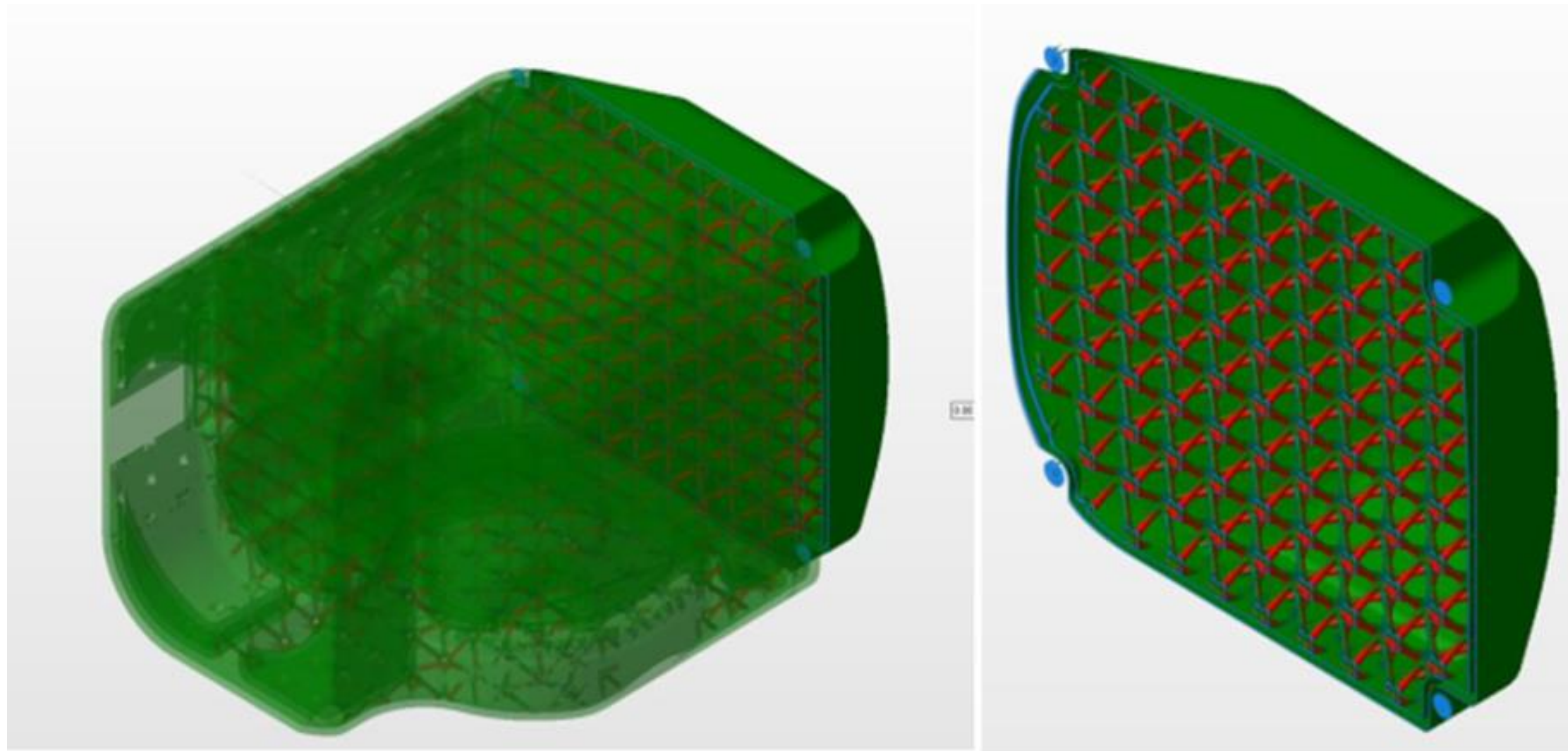


W型晶格结构生成模型

经过W型晶格优化后，手臂2模型体积为 439.61 cm^3 ，所有表面积为 5036.97 cm^2 ，整个模型组成的三角形数目达1485788，模型复杂程度较高，导致生产成本较大。

4. 晶格结构优化

4.3 两种晶格网格比较



➤ 红色—X型网格结构

➤ 绿色—W型网格结构

X型、W型网格对比合成图

1. X型网格更为规整，承受负载更为均匀；而W型网格结构不规则，对应力变化表现较差；
2. 两种结构单位网格大小相同，都为12.25mm，能在手臂2模型外壳均匀地分布，使得模型体积减少，基本完成轻量化设计目标。

5. 总结

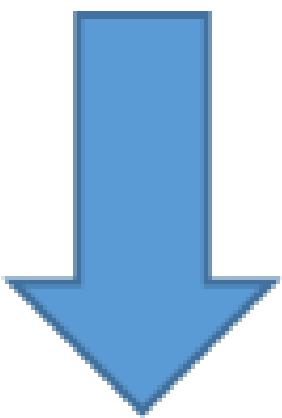
轴数	6轴
有效载荷	3kg
重复定位精度	±0.02mm
环境温度	0~45℃
本体重量	27kg
能耗	1kw
安装方式	任意角度
功能	装配、物料搬运
最大臂展	593mm
本体防护等级	IP40
电柜防护等级	IP20

工业机器人参数表

对于形状较细长的手臂1、3、4部件进行**衍生式设计**，减轻手臂构件重量，提升其工作时的灵活性。



对于形状较粗短的手臂 2 部件，对手臂外壳部分进行**晶格结构优化**，减轻了外壳模型重量，也保证了结构强度。



机器人质量降低了30.6%，其工作灵活性提高，实现了轻量化设计的目标。

致谢

本报告的内容包含了本课题组葛海波同学、詹穗鑫同学、肖展钊同学在机器人轻量化设计中所做的工作，在此一并致谢。

THANKS!



Autodesk 和 Autodesk 标识是 Autodesk, Inc. 和/或其子公司和/或其关联公司在美国和/或其他国家或地区的注册商标或商标。所有其他品牌名称、产品名称或者商标均属于其各自的所有者。Autodesk 保留随时调整产品和服务、产品规格以及建议零售价的权利，恕不另行通知，同时 Autodesk 对于此文档中可能出现的文字印刷或图形错误不承担任何责任。

© 2020 Autodesk, Inc. 保留所有权利 (All rights reserved)。

