

基于SolidWorks Simulation的多目标优化设计 ——以手机支架为例

谷 灌^{1*}, 王 笑^{1#}, 刘智强^{2#}

¹浙江师范大学行知学院, 浙江 金华

²浙江师范大学工学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年5月26日

摘 要

手机支架用于手机、平板等电子产品的支撑, 形式多样, 市面上的产品存在结构力学性能冗余、轻量化与功能适配性不足的问题, 本文以6061铝合金钣金手机支架为研究对象, 提出一种基于SolidWorks软件仿真模块Simulation的参数化多目标优化设计方法。以初始支架三维模型对其进行静力学有限元分析, 得到应力、位移和安全系数结果, 存在极大轻量化空间; 在此基础上采用单因素试验法开展参数敏感性分析, 取板材壁厚、支撑角度、背板倾角、散热孔直径等关键参数对结构质量、变形量、安全系数计算影响权重, 筛选出4个关键优化变量, 确定其合理设计区间; 以质量最小为优化目标, 以安全系数1.2~2、最大变形量 ≤ 2 mm为约束条件, 确定多目标优化数学模型, 完成迭代求解, 获得最优参数组合; 最后, 对优化后结构进行性能验证、功能设计与加工工艺性分析。优化结果表明: 支架质量从原来的0.189 kg降至优化后的0.083 kg, 减重率达56.1%, 最大变形量0.4609 mm, 最小安全系数1.463, 完全满足设计要求, 同时兼顾了散热、充电等人机功能需求, 适合钣金批量加工的工艺性要求。本文为小型钣金支撑结构的轻量化设计与性能优化提供了可行性的分析与工程实现路径。

关键词

SolidWorks Simulation, 手机支架, 参数敏感性分析, 多目标优化, 轻量化设计, 钣金结构

Multi-Objective Optimization Design Based on SolidWorks Simulation

—Application to a Mobile Phone Holder

Guan Gu^{1*}, Xiao Wang^{1#}, Zhiqiang Liu^{2#}

¹Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

²College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Mobile phone holders are widely used to support portable electronic devices including mobile phones and tablet computers, with a rich variety of structural forms available on the commercial market. However, existing products generally suffer from redundant structural mechanical properties, insufficient lightweight design, and poor functional adaptability. Taking a sheet metal mobile phone holder used 6061 aluminum alloy as the object, this paper proposes a parametric multi-objective optimization design method based on the SolidWorks Simulation. Static finite element analysis (FEA) was performed on the 3D model of the initial holder, and the stress, displacement, and safety factor (SF) results were obtained, which confirmed that the original structure had significant lightweight potential. On this basis, the single-factor test method was adopted to conduct parametric sensitivity analysis. The influence weights of key parameters (including sheet thickness, support angle, backplate angle, and heat dissipation hole diameter) on the structural mass, deformation, and safety factor were calculated. Accordingly, 4 core optimization variables were screened out, and their reasonable design intervals were determined. A mathematical model for multi-objective optimization was established, with minimum mass as the optimization objective, and safety factor ranging from 1.2 to 2 and maximum deformation ≤ 2 mm as the constraint conditions. Iterative solution was completed to obtain the optimal parameter combination. Finally, performance verification, functional design, and manufacturability analysis were carried out on the optimized structure. The optimization results show that the mass of the holder is reduced from 0.189 kg to 0.083 kg, with a weight reduction rate of 56.1%. The optimized structure features a maximum deformation of 0.4609 mm and a minimum safety factor of 1.463, which fully meets the design requirements. Meanwhile, the optimized scheme takes into account ergonomic functional requirements such as heat dissipation and charging, and satisfies the manufacturability requirements for mass sheet metal processing. This paper provides a feasible analytical framework and engineering implementation path for the lightweight design and performance optimization of small sheet metal support structures.

Keywords

SolidWorks Simulation, A Mobile Phone Holder, Parametric Sensitivity Analysis, Multi-Objective Optimization Design, Lightweight Design, Sheet Metal Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着移动智能终端技术的快速发展，智能手机、平板电脑等电子设备已成为学习办公、娱乐休闲等场景的必备工具，也促进了配套支撑配件产品的多样化与功能需求。手机支架作为基础支撑功能配件的生活消费品具有更新快、需求量大、售卖价格低等特点，消费者使用时一般需求结构稳定、功能方便、便携轻质、美观安全等。市场上的产品设计多以经验为主，存在一些弊端，如板材较厚，产品笨重，不符合产品轻量化发展趋势，或者片面追求轻薄，使用中出现结构不稳定，导致电子产品倾倒受损，或者折叠频率高，产生变形断裂等失效问题，也有厂家追求低成本，采用塑料等脆性材料，引起老化及环保问题等。对于产品设计和制造厂家需要实现手机支架的人机适配性设计、轻量化制造、成本低、功能扩

展等多重要求，其中结构轻量化与力学稳定性是手机支撑件最基本的设计核心和指标。

在结构轻量化等优化方向，国内外学者开展了大量的研究与讨论。Deb K 等提出的 NSGA-II 多目标遗传算法解决了传统多目标进化算法计算复杂度高、解集收敛性差、易丢失最优解的问题，系统建立了多约束、多目标优化问题的经典求解框架[1]，在此基础上阐述了 Pareto 最优解理论、多约束条件处理机制、NSGA-II 算法的迭代逻辑与参数设置规则等具体原理[2]，目前已广泛应用于机械结构优化设计；王勛成所著《有限单元法》构建了线弹性静力学有限元分析的基础理论，是结构力学仿真的核心依据[3]；吴鹏兴、刘夫云等建立了商用车驾驶室白车身隐式参数化模型和模块化集成流程，提出了“敏感性分析、核心变量筛选、NSGA-II 多目标优化”的思路，验证了可行性与优越性[4]；王俊豪针对车身钣金件装配偏差导致的试制问题，提出了一种基于 Box-Behnken 法与 3DCS 的车身钣金件焊装夹具定位布局优化设计方法，结合响应面法构建了优化模型并试产，验证了方法的实用性[5]；李天箭等论述了机床构型和结构件轻量化设计的研究历程和技术发展，对常用现代设计方法进行介绍与评述，重点分析和评述仿生优化设计的手段方法和轻量化效果[6]；格力电器的黄辉等介绍了拓扑优化和形貌优化在家电钣金件上的应用过程，通过优化前后结构固有频率的对比，表明优化后结构的刚度有明显提升[7]；杨超等提出了一种结合多项式响应面模型、基于方差的敏感性分析方法和智能优化算法的高效计算方法，解决了并联机构全局性能指标高计算成本引起的敏感性分析和多目标优化设计的难题，并证明了算法的有效性[8]；陈懿利用 Solidworks 软件的仿真模块对锥形氧化铝仓进行了仿真分析，获得其应力集中结构进而采用弧面加强筋板实现了优化设计，结果表明可显著改善最大应力，为仓体结构设计的合理性提供了依据[9]；国瑞祥对利用 Ansys 软件结合多目标优化算法，开展了液压缸的多目标优化设计研究，优化结果表明不仅能够有效降低液压缸的质量，还能够提高其使用寿命和工作可靠性[10]；邓小雷等基于有限元法和混合田口法对竹根挖掘机支架结构进行多目标优化，有效提高支架性能并实现了轻量化[11]。

与汽车、航空航天等领域的大型钣金结构优化相比，针对消费电子产品的小型钣金支架的研究较少，主要以单一静力学性能校核为主，未开展参数敏感性权重量化分析与多目标协同优化。因此，本文以手机支架为例，利用 SolidWorks Simulation 软件进行结构力学和参数敏感性分析，讨论多目标参数优化过程，实现力学性能、轻量化、功能适配性、加工工艺性等产品设计的多角度融合方案。

2. 手机支架初始结构与有限元静力学分析

2.1. 初始结构与设计需求

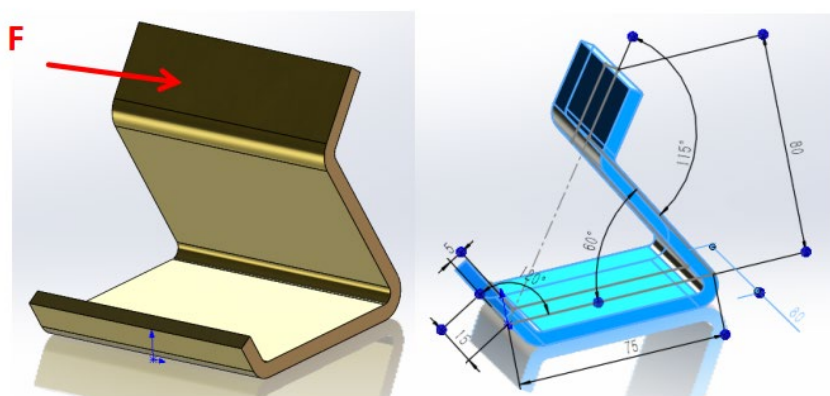


Figure 1. Initial structure and basic parameters of the mobile phone holder
图 1. 手机支架初始结构与基本参数

本文讨论的手机支架为一体式钣金工艺，初始结构如图 1 所示，材料为 6061-T6 铝合金，支架需满足主流智能手机与平板电脑的支撑，适配设备屏幕尺寸为 6~12.9 英寸，设备最大重量为 2 kg，斜面承载载荷为 20 N，设计工况要求包括：

- (1) 结构稳定：采用三角形稳定结构，保证设备使用中不发生倾倒、摇晃，满足多角度使用需求；
- (2) 力学性能：正常承载工况下，结构最大变形量 ≤ 2 mm，安全系数控制在 1.2~2 之间，避免性能冗余；
- (3) 使用功能：满足设备散热、充电需求，可设置限位结构防止设备滑落，适配不同角度的观看舒适度；
- (4) 加工工艺：采用钣金折弯结构，符合铝合金板材的加工工艺要求，结构简单，制造成本低，适合批量生产。

2.2. 有限元模型建立与边界条件设定

手机支架采用钣金工艺，初始结构有限元模型不需要做简化，为保证仿真精度，先进行网格收敛性验证，初设置 3 组不同的网格尺寸，分别为 3 mm、2.5 mm、2 mm，对比不同网格尺寸下的最大等效应力与最大变形量，验证结果如表 1 所示。

Table 1. Results of grid convergence verification

表 1. 网格收敛性验证结果

网格尺寸/mm	单元数量	最大等效应力/MPa	最大变形/mm	结果相对误差/%
3	32,572	2.894	0.03010	0.10
2.5	55,253	2.874	0.03011	0.07
2	82,820	2.860	0.03013	0

由表 1 可知，当网格尺寸减小至 2 mm 时，仿真结果的相对误差已小于 0.1%，说明网格已收敛。因此，本文后续所有仿真分析均采用 2 mm 的网格尺寸，兼顾仿真精度与计算效率。

边界条件按照支架的实际使用工况设置，即对支架底部底面施加全固定约束，限制 6 个自由度，模拟支架放置在桌面的固定工况，在支架的承载斜面上施加 20 N 的法向集中载荷，模拟手机或平板对支架的压力作用。

2.3. 初始结构静力学与稳定性仿真结果分析

基于上述有限元模型，针对应力最大位置进行局部网格加密，单元尺寸定义为 0.5 mm，得到初始结构的静力学分析结果(图 2，图 3)即等效应力、变形位移、安全系数与质量属性等结果列表如表 2 所示。

Table 2. Core simulation results of the initial structure

表 2. 初始结构核心仿真结果

性能指标	数值
最大 von Mises 等效应力	3.156 MPa
最大变形量	0.03015 mm
最小安全系数	8.7
结构质量	0.189 kg
结构体积	69845.177 mm ³
材料屈服强度	275.7 MPa

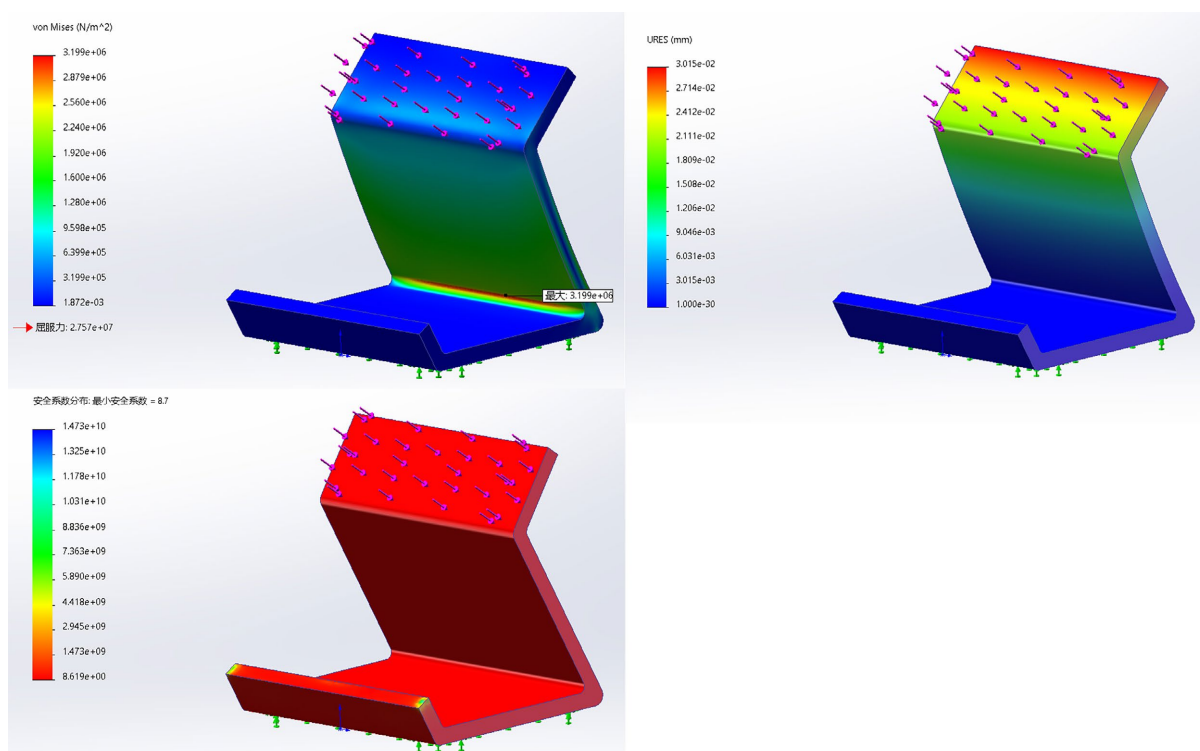


Figure 2. Contour plot of initial simulation results

图 2. 初始仿真结果云图

手机支架的结构设计与优化的质量属性
配置: 默认
坐标系: -- 默认 --

密度 = 0.000 千克 / 立方毫米
质量 = 0.189 千克
体积 = 69845.177 立方毫米
表面积 = 29966.797 平方毫米

Figure 3. Mass parameters of the initial structure

图 3. 初始结构质量参数

由仿真结果可知:

- (1) 初始结构的最大等效应力仅为 3.156 MPa, 远低于材料的屈服强度 27.57 MPa, 材料强度利用率低;
- (2) 结构最小安全系数达 8.7, 远超设计要求的 1.2~2 的区间, 结构安全裕量过大, 存在极大的轻量化优化空间;
- (3) 结构最大变形量仅为 0.03015 mm, 远小于 2 mm 的变形约束要求, 结构刚度过剩;
- (4) 初始结构质量为 0.189 kg, 材料用量大, 不符合消费电子产品轻量化的设计需求。

因此, 初始结构的力学性能存在严重冗余, 通过优化结构及参数在满足设计约束的前提下, 来实现大幅轻量化减重, 本文将围绕该目标开展相关参数的敏感性分析与多目标优化设计。

3. 结构参数敏感性分析与优化变量筛选

3.1. 敏感性理论

参数敏感性分析是量化设计变量对目标函数影响程度的核心方法，也是筛选优化变量、提升优化效率的关键步骤。本文采用单因素试验法开展敏感性分析，即固定其他设计变量，仅改变单一变量的取值，通过仿真得到目标函数的变化规律，并采用敏感度指标量化和评价参数对性能指标的影响程度，敏感度计算公式为：

$$S = \left| \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X} \right| \tag{3-1}$$

式中， S 为设计变量对目标函数的敏感度， $\Delta X/X$ 为设计变量的相对变化率， $\Delta Y/Y$ 为目标函数的相对变化率。 S 值越大，说明该设计变量对目标函数的影响程度越高，权重越大。

3.2. 敏感性分析方案设计

结合手机支架的结构特征与初始仿真结果，先选取 3 个对结构性能可能存在显著影响的设计变量，分别为：支撑角 α 、背板倾角 β 、板材壁厚 t ，如图 4 所示。各参数的初始值与设计取值范围如表 3 所示。

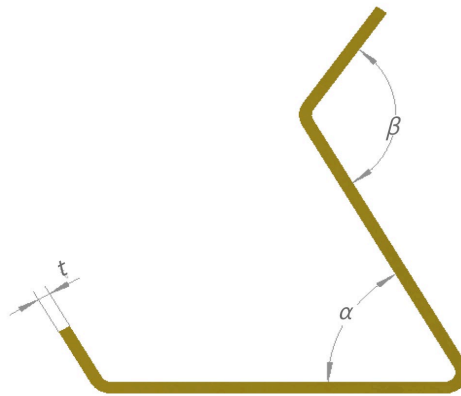


Figure 4. Structural optimization parameters of the mobile phone holder
图 4. 手机支架结构优化参数

Table 3. Design parameters and value ranges
表 3. 设计参数与取值范围

设计参数	参数符号	初始值	取值范围
支撑角	α	60°	30°~75°
背板倾角	β	115°	90°~155°
板材壁厚	t	5mm	1 mm~5 mm

选取 3 个核心评价指标开展敏感性分析，即目标函数分别为：结构质量 m (轻量化目标)、最大变形量 δ (刚度指标)、最小安全系数 n (强度与稳定性指标)。

实验采用单因素试验法，仅改变 1 个参数变量的取值，在设计范围内均匀设置 4~8 个水平，每个水平开展 1 次有限元仿真，得到该参数变化对评价指标的影响规律，最终计算各参数的敏感度与权重占比。

3.3. 单参数影响规律与权重量化分析

支撑角 α 的敏感性分析

支撑角 α 是一体式支架结构的核心角度参数，直接影响结构的稳定性，其变化对评价指标的影响结果如表 4 所示。

Table 4. Results of the influence of support angle α on structural performance

表 4. 支撑角 α 对结构性能的影响结果

支撑角 α	30°	45°	60°	75°
最小安全系数 n	7.344	8.026	8.727	7.814
最大变形量 δ/mm	0.04573	0.03628	0.03015	0.03820
结构质量 m/kg	0.189	0.189	0.189	0.189

由结果可知：支撑角 α 的变化对结构质量无影响，对应力的影响较小，对结构变形量与稳定性的影响较为显著；当 $\alpha = 60^\circ$ 时，结构变形量最小，安全系数最高，稳定性最佳，与等边三角形稳定性最优的理论规律一致。经计算，支撑角 α 对安全系数的敏感度为 0.312，对变形量的敏感度为 1.033，综合敏感度为 0.448，权重占比较低。

背板倾角 β 的敏感性分析

背板倾角 β 直接决定设备的放置角度，同时影响结构的受力状态，其变化对评价指标的影响结果如表 5 所示。

Table 5. Results of the influence of backplane inclination angle β on structural performance

表 5. 背板倾角 β 对结构性能的影响结果

背板倾角 β	90°	105°	115°	125°	135°	145°	155°
最小安全系数 n	7.082	9.583	8.762	7.021	7.021	4.684	3.273
最大变形量 δ/mm	0.08285	0.03288	0.03015	0.03854	0.03854	0.09225	0.2210
结构质量 m/kg	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189

由结果可知：背板倾角 β 的变化对结构质量无影响，但对应力、变形量与安全系数均有显著影响；当 $\beta > 135^\circ$ 时，结构安全系数快速下降，变形量急剧增大，其变化趋势表明已不符合使用要求；当 β 处于 $105^\circ \sim 125^\circ$ 区间时，结构稳定性好，变形量小，性能最优。经计算，背板倾角 β 对安全系数的敏感度为 1.793，对变形量的敏感度为 18.197，综合敏感度为 6.663，权重占比仅次于板材壁厚。

板材壁厚 t 的敏感性分析

板材壁厚 t 是影响结构质量、刚度与强度的关键参数，该手机支架采用钣金工艺，参数需符合钣金材料厚度尺寸，其变化对评价指标的影响结果如表 6 所示。

Table 6. Results of the influence of plate thickness t on structural performance

表 6. 板材壁厚 t 对结构性能的影响结果

板材壁厚 t/mm	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5
最小安全系数 n	-	0.961	1.614	2.460	3.389	4.510	5.751	8.666
最大变形量 δ/mm	-	1.229	0.5049	0.2544	0.1453	0.09051	0.0600	0.03015
结构质量 m/kg	-	0.058	0.077	0.096	0.115	0.134	0.152	0.189

注： $t > 2 \text{ mm}$ 时，结构安全系数小于 1，发生失稳失效，无有效结果。

由结果可知：板材壁厚 t 对结构质量、变形量与安全系数均有极为显著的影响，壁厚与结构质量呈线性正相关，与变形量呈负相关，与安全系数呈正相关； $t > 3.5 \text{ mm}$ 时，结构安全系数远超过 2，出现性能冗余。因此，板材壁厚的合理优化区间为 2~3 mm。经计算，板材壁厚 t 对安全系数的敏感度为 1.358，对变形量的敏感度为 26.243，对质量的敏感度为 0.988，综合敏感度 9.529，是所有参数中权重最高的核心变量。

散热孔直径 d 的敏感性分析

根据产品使用需求，在初始结构上增设散热孔与充电插槽，考虑简单结构，易于钣金设计与加工，其结构如图 5 所示。

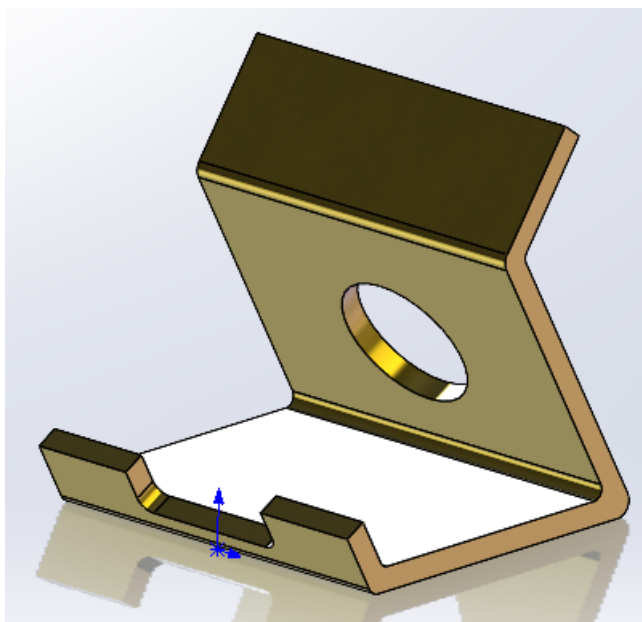


Figure 5. Improved product structure
图 5. 改进后的产品结构

散热孔的设置可同时实现结构减重与设备散热的双重功能，其直径 d 对结构性能的影响结果如表 7 所示。

Table 7. Results of the influence of heat dissipation hole diameter d on structural performance
表 7. 散热孔直径 d 对结构性能的影响结果

散热孔直径 d/mm	40	45	50	55	60	70
最小安全系数 n	6.208	5.618	4.955	4.237	3.480	1.809
最大变形量 δ/mm	0.05053	0.05738	0.06616	0.07787	0.09437	0.1648
结构质量 m/kg	0.167	0.162	0.157	0.152	0.146	0.131

由结果可知：散热孔直径 d 与结构质量呈负相关，孔径越大，减重效果越好，但结构安全系数随之下降，变形量随之增大；当 $d > 60 \text{ mm}$ 时，结构安全系数降至 1.809，接近设计下限，变形量显著增大；当 d 处于 40~60 mm 区间时，可兼顾减重效果与结构力学性能。经计算，散热孔直径 d 对安全系数的敏感度为 0.945，对变形量的敏感度为 3.015，对质量的敏感度为 0.287，综合敏感度为 1.416，权重占比处于中等水平。

3.4. 优化变量与设计区间确定

基于上述敏感性分析结果, 计算各参数对综合性能的权重占比, 按权重从高到低排序依次为: 板材壁厚 $t >$ 背板倾角 $\beta >$ 散热孔直径 $d >$ 支撑角 α , 其他结构参数暂不考虑优化。最终筛选出 4 个核心优化变量, 并确定其合理设计区间, 如表 8 所示, 为后续多目标优化提供边界条件。

Table 8. Core optimization variables and design intervals

表 8. 核心优化变量与设计区间

优化变量	符号	设计下限	设计上限
板材壁厚	t	2 mm	3 mm
背板倾角	β	105°	125°
散热孔直径	d	40 mm	60 mm
支撑角	α	45°	75°

4. 手机支架多目标优化设计与求解

4.1. 多目标优化理论与数学模型

多目标优化问题的本质是求解多个相互冲突的目标函数在约束条件下的最优解, 其标准数学模型为:

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t.} \quad g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ \quad \quad h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p \\ \quad \quad x_L < x < x_U \end{cases} \quad (4-1)$$

式中, x 为设计变量向量, $f_n(x)$ 为目标函数, $g_i(x)$ 为不等式约束条件, $h_j(x)$ 为等式约束条件, x_L 、 x_U 分别为设计变量的下限与上限。

基于敏感性分析结果, 结合设计要求, 建立手机支架的多目标优化数学模型, 包括优化目标、设计变量与约束条件三部分。

优化目标:

本文的核心优化目标是实现结构轻量化, 即最小化结构质量 $m(x)$; 同时, 为保证结构的使用性能, 协同优化目标为最小化结构的最大变形量 $\delta(x)$, 由上述多目标优化理论公式可推导其表达式为:

$$\min F(x) = [m(x), \delta(x)]^T \quad (4-2)$$

式中, $x = [t, \beta, d, \alpha]^T$ 为设计变量向量。

约束条件:

由设计要求和敏感度结论, 结合多目标优化问题的不等式约束条件, 设置了手机支架的三类约束条件, 分别为强度稳定性约束、刚度约束与几何边界约束, 表达式为:

$$\begin{cases} g_1(x) = 1.2 - n(x) \leq 0 \\ g_2(x) = n(x) - 2 \leq 0 \\ g_3(x) = \delta(x) - 2 \leq 0 \\ 2\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm} \\ 105^\circ \leq \beta \leq 125^\circ \\ 40\text{mm} \leq d \leq 60\text{mm} \\ 45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ \end{cases} \quad (4-3)$$

式中, $n(x)$ 为结构的最小安全系数, $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 为安全系数约束, 要求安全系数处于 1.2~2 之间; $g_3(x)$ 为刚度约束, 要求最大变形量不超过 2 mm; 最后 4 项为设计变量的几何边界约束。

4.2. 优化求解

试验设计以上 4 个设计变量, 每个变量设置 3 个水平, 共 9 组试验点, 每组试验点开展 1 次有限元仿真, 得到对应的响应值(质量、变形量、安全系数), 优化变量水平表和 16 组试验点分别如表 9 和表 10 所示。

Table 9. Optimization variable level table

表 9. 优化变量水平表

水平	板材壁厚 t/mm (2~3.5 mm)	背板倾角 $\beta/^\circ$ (105~125°)	散热孔直径 d/mm (40~60 mm)	支撑角 $\alpha/^\circ$ (45~75°)
1	2.0	105	40	45
2	2.5	115	50	60
3	3	125	60	75

Table 10. Data table of orthogonal test with 9 groups of levels for optimization variables

表 10. 优化变量 9 组水平正交试验数据表

试验号	壁厚 t/mm	倾角 $\beta/^\circ$	支撑角 $\alpha/^\circ$	孔径 d/mm	质量 m/kg	变形量 δ/mm	安全系数 n
1	2.0	105	45	40	0.063	1.862	1.205
2	2.0	115	60	50	0.059	1.638	1.272
3	2.0	125	75	60	0.056	1.915	1.218
4	2.5	105	60	60	0.079	0.928	1.468
5	2.5	115	75	40	0.081	0.852	1.598
6	2.5	125	45	50	0.077	1.103	1.492
7	3.0	105	75	50	0.094	0.488	1.728
8	3.0	115	45	40	0.092	0.535	1.708
9	3.0	125	60	60	0.096	0.622	1.736

试验结果表明:

- (1) 板材壁厚 t 与质量呈正相关、与变形量呈负相关、与安全系数呈正相关(权重最高);
- (2) 背板倾角 β 在 115° 时变形量相对稳定较小、安全系数相对最高, 偏离后性能显著下降;
- (3) 支撑角 α 在 60° 为性能最优, 与三角形稳定性理论一致;
- (4) 散热孔直径 d 与质量呈弱负相关, 孔径增大变形量微增、安全系数微降;

试验结果与上文结论基本一致。

4.3. 试验结果分析

由正交试验结果表明所有试验点的安全系数、变形量都符合约束条件, 无无效数据; 其次, 表中第 5 组数据($t = 2.5 \text{ mm}$ 、 $\beta = 115^\circ$ 、 $\alpha = 75^\circ$ 、 $d = 40 \text{ mm}$) 为最优试验点: 变形量最小(0.852 mm)、安全系数最高(1.598)

4.4. Solid-Woks Simulation 软件仿真实验

根据参数敏感度分析与多目标优化设置, 导入 Solid-woks Simulation 软件中进行仿真实验(如图 6)。



Figure 6. Setting optimization parameters in SolidWorks Simulation

图 6. 在 Solid-works Simulation 中设置优化参数

实验结果给出 27 组数据组合，筛选优化结果第 25 组为最佳，参数与结构见图 7。

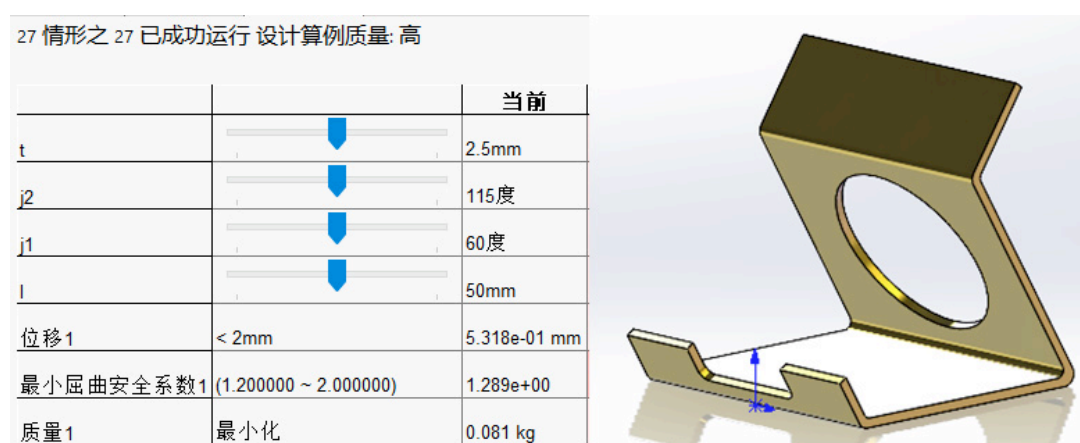


Figure 7. Optimization parameter combinations and the structure in SolidWorks software

图 7. 软件仿真优化参数组合及其结构

4.5. 确定最优参数与性能验证

基于敏感度理论和多目标优化的正交水平试验，结合软件仿真的结果，综合结构优势与产品的加工工艺等要求，最终确定最优参数组合(表 11)，并重构手机支架模型，进行初步验证，结果如图 8 所示。

Table 11. Optimization parameter combinations and performance indicators

表 11. 优化参数组合及性能指标

壁厚 t/mm	倾角 $\beta/^\circ$	支撑角 $\alpha/^\circ$	孔径 d/mm	质量 m/kg	变形量 δ/mm	安全系数 n
2.5	115	60	45	0.083	0.4623	1.460

观察应力云图发现，此时最大应力位置由支撑角折弯处转移到了散热孔边缘，根据力学知识可知，当受力结构在结构形状或尺寸发生突变时容易产生应力集中现象。结合本案例，在初始结构形态时，最大等效力发生在结构形状突变位置即支撑角折弯处，此时最大应力在材料许可的屈服强度内。当进一步优化对支架开设散热孔时，由于结构形状和尺寸同时发生变化，孔边缘更易形成应力集中。对此进行面域分割和加密网格，验证结果见图 9，可知优化结果仍收敛，在材料的许可强度内，符合工况要求，图 10 为此时支架结构的质量属性。

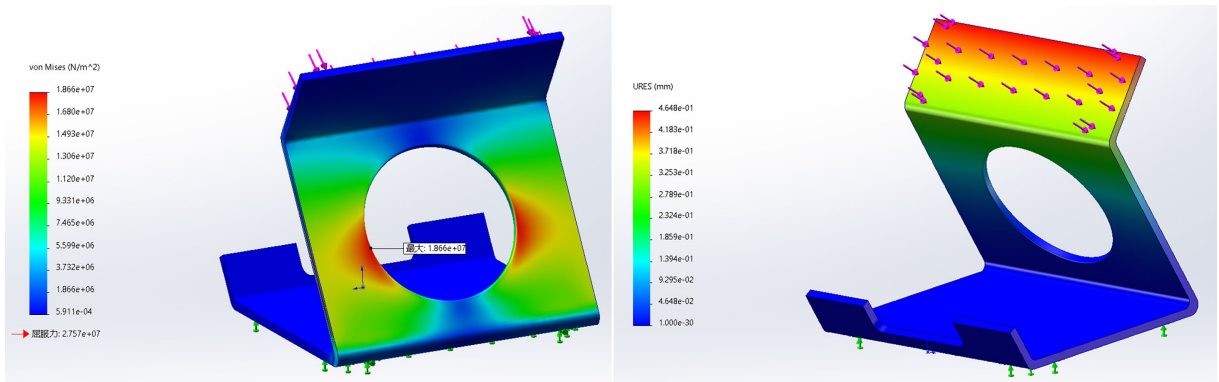


Figure 8. Initial simulation results of the optimal parameter group
图 8. 最优参数组初始仿真结果

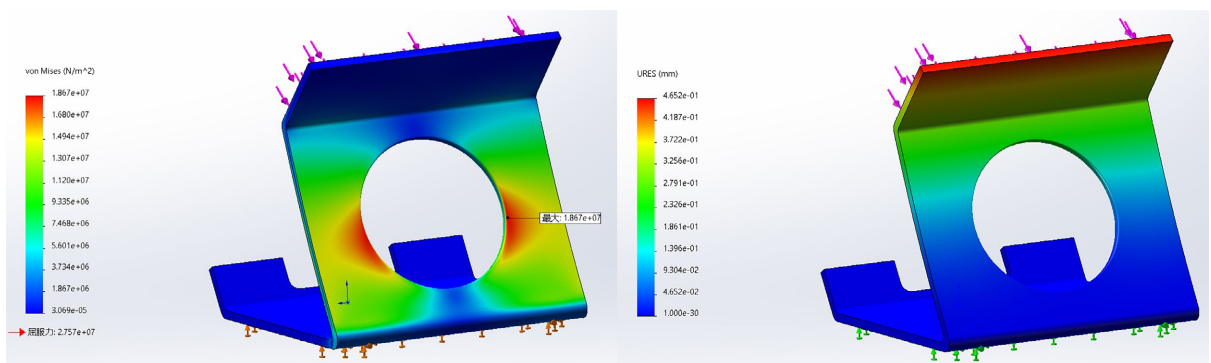


Figure 9. Refined grid simulation results of the optimal parameter group
图 9. 最优参数组加密网格仿真结果

手机支架的结构设计与优化分析的质量属性
配置: 槽口
坐标系: -- 默认 --
密度 = 0.000 千克 / 立方毫米
质量 = 0.083 千克
体积 = 30755.644 立方毫米
表面积 = 25903.381 平方毫米

Figure 10. Mass properties of the optimized mobile phone holder
图 10. 优化后支架的质量属性

4.6. 优化后结构的性能验证与对比分析

由仿真结果可知:

- (1) 优化后结构的最大等效应力为 18.85 MPa, 低于 6061 铝合金的屈服强度 27.57 MPa, 材料强度利用率得到大幅提升, 未发生塑性屈服;
- (2) 结构最大变形量为 0.4630 mm, 远小于 2 mm 的设计约束, 满足结构刚度要求;
- (3) 结构最小安全系数为 1.463, 处于 1.2~2 的设计区间内, 既保证了结构的稳定性与安全性, 又避免了性能冗余;

(4) 优化后结构质量为 0.083 kg，减重 0.106 kg (减重率 43.9%)，实现了显著的轻量化减重效果。

优化过程前后结构性能综合对比

引入最大敏感度参数壁厚 t 对性能结果的影响度作为优化过程的参照，对不同阶段的核心性能进行对比，结果如表 12 和图 11 所示。

Table 12. Comprehensive comparison of structural performance at each optimization stage
表 12. 优化各阶段结构性能综合对比

性能指标	结构形状			变化梯度	
	1: 初始结构	2: 最大敏感度	3: 优化参数	1~2 阶段	2~3 阶段
壁厚	5 mm	2.5 mm	2.5 mm	-50%	0
结构质量	0.189 kg	0.096 kg	0.083 kg	-49.21%	-13.54%
等效应力	3.156 MPa	11.161 MPa	18.85 MPa	253.64%	68.89%
变形量	0.03012 mm	0.2544 mm	0.4609 mm	744.62%	81.17%
安全系数	8.7	2.460	1.463	-71.72%	-40.53%

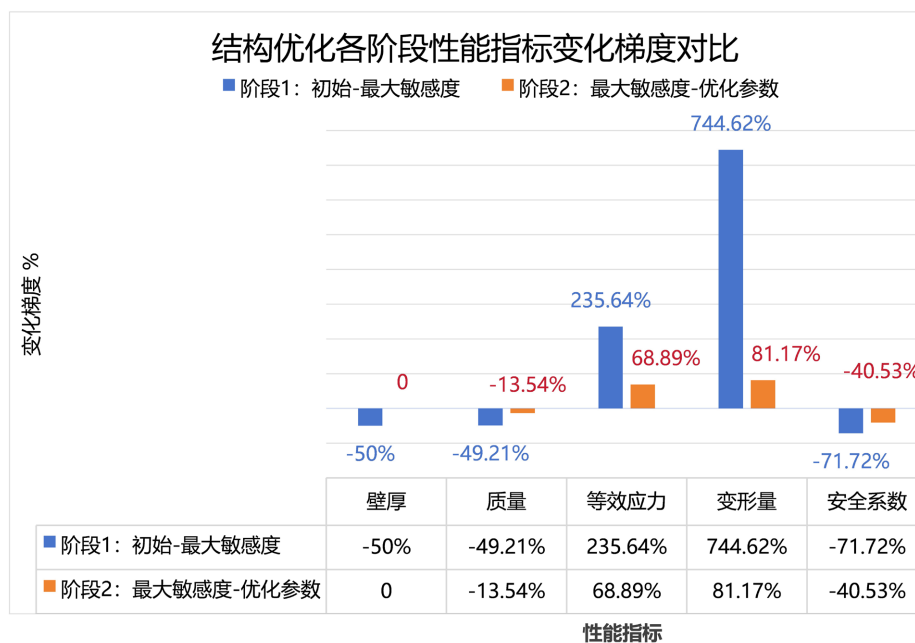


Figure 11. Comparison of performance index change gradients at each stage of structural optimization
图 11. 结构优化各阶段性能指标变化梯度对比

由对比结果可知：

(1) 轻量化效果显著：优化后结构质量降低了 56.1%，减重幅度达 0.106 kg，材料用量大幅减少，完全实现了轻量化的核心优化目标；

(2) 材料利用率大幅提升：优化后结构的最大等效应力从 3.156 MPa 提升至 18.85 MPa，材料强度得

到充分利用，解决了初始结构性能冗余的问题；

(3) 性能仍满足设计要求：尽管优化后结构的变形量有所增大、安全系数有所降低，但所有性能指标均处于设计约束范围内，既保证了结构的安全性及使用性能，又实现了轻量化的最优平衡；

(4) 优化方案合理可行：优化后的结构仍保持三角形稳定结构，未改变核心受力特征，验证了本文优化设计思路与敏感度分析、多目标优化方法协同的有效性与合理性。

4.7. 疲劳与偏载工况校核

(1) 由上述表 12 和图 11 可知，支架在最大敏感度壁厚 t 影响下，各性能指标发生了显著的波动变化。在壁厚相同的情况下，通过开散热孔对支架的减重效果较小，但在变形量和等效应力指标上有较大影响。因此，根据支架的使用情况进一步对其开展疲劳校核，以评估可能存在的失效风险。

疲劳事件定义：假设支架每天使用时间为 6 小时，年均工作 365 天，设计寿命为 20 年，单次使用时长 30 分钟，计算得到对应总循环次数约为 8.76×10^4 次。经过仿真可以得到支架的生命周期与疲劳安全系数均满足工程应用要求，其仿真结果如图 12 所示。

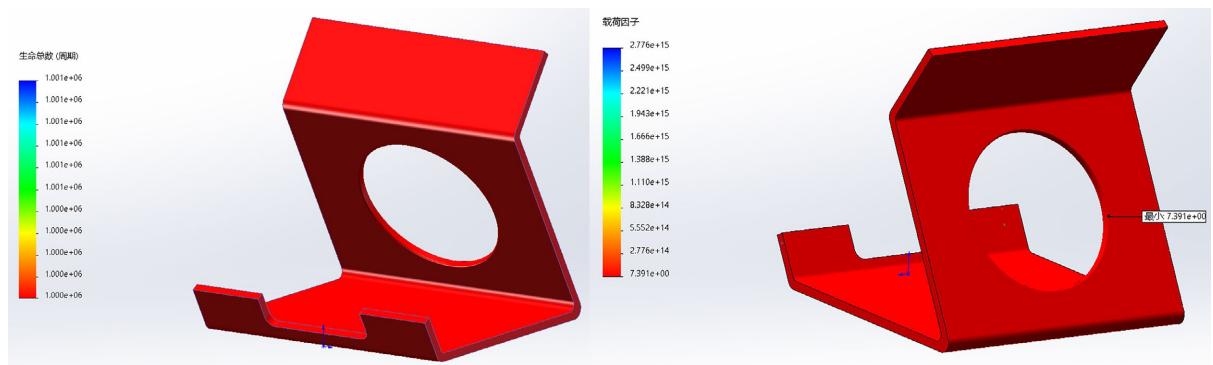


Figure 12. Life cycle and fatigue load factor of the mobile phone holder
图 12. 支架的生命周期与疲劳载荷因子

(2) 为验证优化后结构的稳定性，对其开展偏载工况校核：

以 70 mm 宽度的手机尺寸为例，将 20 N 载荷施加在承载斜面距边缘 30 mm 附近，模拟设备偏载放置的工况，仿真结果如图 13 显示，结构最大变形量为 0.5346 mm，图中以放大 5 倍效果叠加展示，最小安全系数为 1.305，仍满足设计约束要求，说明结构具有良好的抗偏载能力与工况鲁棒性。

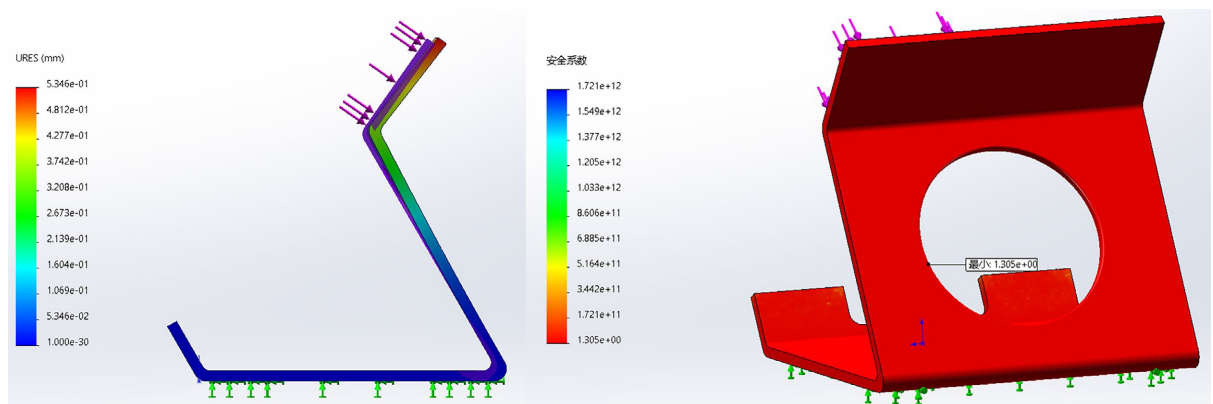


Figure 13. Performance analysis of the structure under eccentric load condition
图 13. 偏载工况下结构的性能分析

5. 优化结构钣金加工工艺性分析

本文设计的手机支架采用一体式钣金折弯结构，需符合铝合金板材的冲压折弯加工工艺要求，同时满足消费电子产品低成本、大批量生产的需求，核心工艺性分析内容如下：

(1) 材料与下料优化：选用厚度 2.5 mm 的 6061-T6 铝合金板材，符合市场主流板材规格，无需定制材料；优化后的结构展开尺寸约 175 mm × 80 mm，可在标准板材上进行套料下料，有效降低了原材料成本；

(2) 折弯工艺可行性：结构仅包含 3 处折弯特征，折弯角度分别为 60°、60°、115°，均为常规折弯角度，无需定制复杂模具；6061 铝合金板材的最小折弯半径为 $0.5t$ (t 为板材厚度)，本文设计的折弯半径为 2 mm，大于最小折弯半径 1.25 mm，避免折弯过程中出现开裂、回弹过大等问题，折弯工艺性良好，结构如图 14 所示；

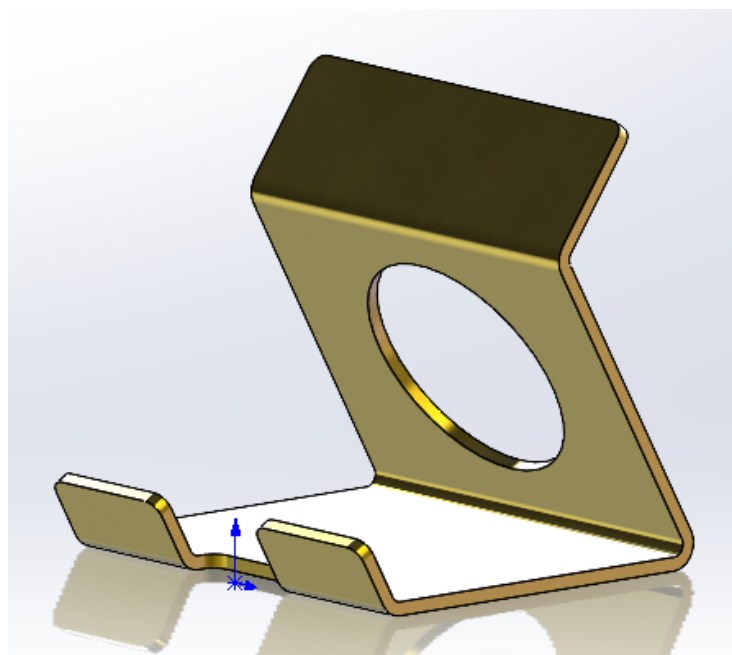


Figure 14. Sheet metal structure of the mobile phone holder

图 14. 手机支架钣金结构

(3) 结构简化设计：优化后的结构无复杂的异形特征、深腔特征与薄壁特征，所有孔位均可通过冲压一次成形，加工工序少，生产效率高，单套模具可实现大批量生产，符合消费电子产品更新快、成本要求低的特点；

(4) 表面处理适配性：结构表面为平面与圆弧过渡，无尖角与死角，可适配阳极氧化、喷砂、喷涂等常用表面处理工艺，满足产品的外观与防护需求。

可知优化后的结构完全符合钣金加工工艺要求，结构简单，制造成本低，适合大批量的量产，具备良好的工程落地性。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

本文以 6061 铝合金钣金手机支架为研究对象，基于 SolidWorks Simulation 软件进行结构性能指标的

仿真分析、参数敏感性讨论与多目标优化设计，实现了结构轻量化与力学性能的协同优化，得到以下主要结论：

(1) 建立了手机支架的参数化三维模型与线弹性静力学有限元模型，通过初始工况仿真发现，初始结构的最小安全系数达 8.7，最大变形量仅为 0.03012 mm，存在严重的力学性能冗余，具备极大的轻量化优化空间。

(2) 采用单因素试验法开展了参数敏感性分析，对影响支架性能的 4 个结构参数权重进行量化计算，权重从高到低排序为：板材壁厚 > 背板倾角 > 散热孔直径 > 支撑角，并确定了其合理设计区间，为多目标优化提供了依据。

(3) 构建了以结构质量最小为核心目标，以安全系数 1.2~2、最大变形量 ≤ 2 mm 为约束的多目标优化数学模型，结合参数正交水平试验求解与软件仿真测试，综合评价得到了最优参数组合。优化后支架质量从 0.189 kg 降至 0.083 kg，减重率达 56.1%，最大变形量 0.4609 mm，最小安全系数 1.463，所有性能指标均满足设计约束要求。

(4) 增加了散热、充电等功能设计，对优化后结构的偏载工况进行了验证分析，并进一步开展了钣金加工工艺性分析，验证了方案的人机适配性与批量生产可行性，可为小型钣金支撑结构的轻量化设计与工程实现提供标准化的参考路径。

6.2. 未来展望

本文针对手机支架的静力学性能与轻量化开展了多目标优化设计，后续可从以下几个方面开展进一步研究：

(1) 拓扑优化与参数优化结合：在现有参数优化的基础上，开展结构拓扑优化设计，基于变密度法优化材料的空间分布，进一步提升材料利用率，实现结构的创新设计与极致轻量化。

(2) 在功能设计上，可以丰富用户需求，增加防滑、多角度及其他附加功能需求的集成，实现可选择性、模块化、多场景工作等。

参考文献

- [1] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., et al. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [2] Deb, K. (2001) *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley.
- [3] 王勳成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [4] 吴鹏兴, 刘夫云, 宋超, 等. 基于 NSGA-II 的隐式参数化白车身轻量化设计[J]. *机械设计*, 2022, 39(2): 95-100.
- [5] 王俊豪. 基于响应面与 3DCS 的车身钣金件定位布局优化设计[J]. *汽车制造业*, 2025(5): 76-81.
- [6] 李天箭, 丁晓红, 李郝林. 机床结构轻量化设计研究进展[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(21): 186-198.
- [7] 黄辉, 张龙, 王继承, 宋培刚. 优化设计在钣金件设计上的应用[J]. *家电科技*, 2010(7): 78-80.
- [8] 杨超, 叶伟, 陈巧红. 并联机构敏感性分析和多目标优化设计方法[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(19): 229-241.
- [9] 陈懿. 基于 SolidWorks Simulation 的锥形氧化铝仓设计与研究[J]. *有色金属设计*, 2025(6): 39-42.
- [10] 郭瑞祥. 基于 Ansys 液压缸的多目标优化设计[J]. *建模与仿真*, 2025, 14(3): 110-123.
- [11] 邓小雷, 王振飞, 吕笑文, 贺忠. 混合田口法和有限元法的竹根挖掘机支架结构优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2021(2): 237-240.