Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2026, 15(5), 622-636
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2026.155059

Hans汉斯

考虑SLM约束的井下小尺寸涡轮结构优化

孙　腾，付　帅，王　鹏*

长江大学机械工程学院，湖北　荆州

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月23日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

针对井下小尺寸涡轮叶片结构复杂、传统加工难度较大以及金属增材制造过程中易产生支撑结构等问题，提出一种考虑选择性激光熔化(SLM)几何制造约束的涡轮叶片结构优化方法。以叶片前缘半径、后缘半径、前缘楔角、后缘楔角、入口角、出口角和叶片高度为设计变量，采用五次多项式曲线与圆弧相切方法建立涡轮定、转子叶片参数化模型。基于拉丁超立方抽样获得100组叶片结构样本，通过计算流体力学(CFD)方法获得各样本的输出扭矩和压降，并进一步计算效率。在此基础上，建立叶片结构参数与涡轮性能之间的径向基函数(RBF)代理模型，并采用扭矩、压降和效率加权综合评价函数对叶片结构进行优化。结果表明：扭矩、压降和效率代理模型测试集的决定系数分别为0.8110、0.8619和0.7319；优化方案的扭矩、压降和效率分别为1.12 N·m、24,821 Pa和0.709，与代理模型预测值6.67%、5.90%和1.25%。在本文设定的最小特征尺寸、叶片边缘尺寸和悬垂角约束下，优化方案具有SLM无支撑成形可行性。

关键词

井下涡轮，选择性激光熔化，叶片结构优化，径向基函数代理模型，计算流体力学

Structural Optimization of a Downhole Small-Size Turbine Considering SLM Manufacturing Constraints

Teng Sun, Shuai Fu, Peng Wang*

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: September 30, 2026; accepted: October 23, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

To address the challenges associated with the complex structure of downhole small-scale turbine

*通讯作者。

文章引用: 孙腾, 付帅, 王鹏. 考虑 SLM 约束的井下小尺寸涡轮结构优化[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(5): 622-636.
DOI: 10.12677/met.2026.155059

blades, the difficulty of conventional machining, and the tendency to generate support structures during metal additive manufacturing, this study proposes a turbine blade structural optimization method considering the geometric manufacturability constraints of selective laser melting (SLM). The leading-edge radius, trailing-edge radius, leading-edge wedge angle, trailing-edge wedge angle, inlet angle, outlet angle, and blade height were selected as design variables. A parametric model of the turbine stator and rotor blades was established using a method in which quintic polynomial curves are tangent to circular arcs. Based on Latin hypercube sampling, 100 sets of blade-structure samples were generated. The output torque and pressure drop of each sample were obtained using computational fluid dynamics (CFD), and the corresponding efficiency was further calculated. On this basis, radial basis function (RBF) surrogate models were established to describe the relationship between blade structural parameters and turbine performance. The blade structure was then optimized using a weighted comprehensive evaluation function incorporating torque, pressure drop, and efficiency. The results show that the coefficients of determination of the surrogate models for torque, pressure drop, and efficiency on the test set are 0.8110, 0.8619, and 0.7319, respectively. The torque, pressure drop, and efficiency of the optimized design are 1.12 N·m, 24,821 Pa, and 0.709, respectively, with relative errors of 6.67%, 5.90%, and 1.25% compared with the surrogate-model predictions. Under the constraints of minimum feature size, blade edge size, and overhang angle specified in this study, the optimized design demonstrates the feasibility of support-free SLM fabrication.

Keywords

Downhole Turbine, Selective Laser Melting, Blade Structural Optimization, Radial Basis Function Surrogate Model, Computational Fluid Dynamics

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

随着深井、超深井及复杂地层钻井需求的增加，井下动力钻具的输出性能和工作可靠性受到广泛关注。涡轮钻具具有转速高、耐高温、振动小和寿命长等特点，在高温高压井及硬地层钻井中具有较好的应用前景。围绕涡轮钻具叶片设计，冯进等[1]对涡轮钻具叶片型线设计方法进行了研究，指出连续光顺的叶片型线有利于降低叶道内流动损失。何顺等[2]采用 Bezier 曲线构造涡轮叶片型线，提高了叶片造型的灵活性和光顺性。袁新梅等[3]基于五次多项式叶型和 CFD 方法，分析了前缘半径、后缘半径及进出口结构角等参数对涡轮性能的影响，结果表明叶片结构参数对扭矩和效率具有显著影响。周思柱等[4]结合 Bezier 曲线和粒子群算法对涡轮钻具弯曲叶片进行优化，结果表明合理的叶片弯曲结构能够降低水力损失并提高涡轮效率。谭春飞等[5]采用 BP 神经网络和遗传算法对涡轮安装角进行优化，发现安装角变化会明显改变涡轮输出特性。

其他叶轮机械领域的叶片优化方法也为涡轮叶片设计提供了参考。刘志勇等[6]以叶轮给煤机水平驱动力与拨煤量比值为优化目标，采用改进粒子群算法对叶轮结构及运行参数进行优化，实现了输送能力提高和能耗降低。何瑞轩等[7]针对泵喷推进器转子设计问题，提出了基于 CFD 数据和 Kriging 代理模型的数据驱动优化方法，在有限次数值仿真内获得了较高效率的转子结构。黄松等[8]指出 Bezier 曲线、B 样条、CST 方法和自由变形方法等参数化手段已广泛应用于叶片优化设计。

Cherry 等[9]和 Liverani 等[10]研究表明，316 L 不锈钢 SLM 成形质量与激光功率、扫描速度等工艺参数密切相关。与此同时，金属粉末床熔融零件设计还需考虑成形方向、悬垂结构、支撑需求和后处理

可达性等因素[11]。Thomas [12]指出，悬垂角是判断 SLM 结构是否需要支撑的重要几何参数；Calignano [13]的研究表明，支撑结构虽然可改善悬垂区域成形稳定性，但会增加制造时间和后处理难度。

现有井下涡轮叶片优化研究主要关注叶片型线和水力性能，对小尺寸叶片的 SLM 无支撑成形要求考虑相对不足。基于此，本文以井下小尺寸涡轮定、转子叶片为研究对象，选取前缘半径、后缘半径、前缘楔角、后缘楔角、入口角、出口角和叶片高度为设计变量，建立参数化叶片模型。采用拉丁超立方抽样和 CFD 数值模拟获取样本数据，构建 RBF 代理模型，并以扭矩、压降和效率为评价指标建立加权综合评价函数。在此基础上，引入增材制造工艺约束并采用 fmincon 算法对叶片结构进行优化，最后通过 CFD 对优化结果进行复核。

2. 涡轮叶片建模与 CFD 仿真

2.1. 涡轮叶片几何参数定义

涡轮叶片是井下涡轮钻具实现能量转换的关键部件，一般由多副定转子构成，其几何形状直接决定叶道内流体流动状态和转子受力特性。叶片几何参数主要包括前缘半径、后缘半径、前缘楔角、后缘楔角、入口角、出口角、叶片高度、叶片弦长、叶栅节距和安装角等。图 1 为涡轮定子叶片几何参数示意图。

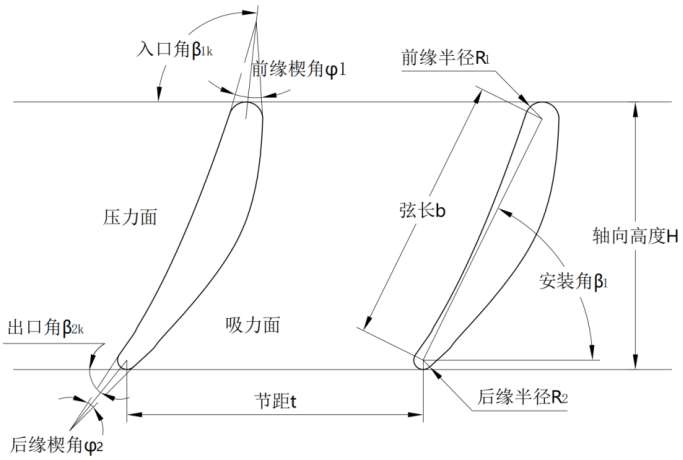

Figure 1. Geometric parameters of the stator blade
图 1. 定子叶型几何参数示意图

2.2. 设计变量选取与 SLM 制造约束

涡轮叶片结构参数较多，不同参数对流动性能和制造可行性的影响程度不同。叶片进出口角、前后缘半径和叶片高度应保证流道具有合理的流通面积和流动转角，避免因叶片偏转过大或局部曲率突变导致流体分离、回流。

SLM 成形薄壁结构时壁厚不应过小，否则易产生尺寸偏差、边缘烧蚀或成形不稳定；当结构悬垂角低于临界角时，悬垂区域易出现塌陷和挂渣，需要增加支撑结构。对于内部叶道狭窄的涡轮叶片，支撑结构难以去除，因此本文在设计变量取值范围内引入无支撑成形约束。

设计变量向量定义为：

$$X = \left[R_1, R_2, \varphi_1, \varphi_2, \beta_{1k}, \beta_{2k}, H\right]$$

其中，R_1 为前缘半径，R_2 为后缘半径，φ_1 为前缘楔角，φ_2 为后缘楔角，β_{1k} 为入口角，β_{2k} 为出口角，H 为叶片高度。

设计变量约束可统一表示为：

$$x_i^L \le x_i \le x_i^U, \quad i=1,2,\cdots,n$$

式中，x_i 为第 i 个设计变量，x_i^L 和 x_i^U 分别为变量下限和上限，n 为设计变量个数

2.3. 叶片参数化建模方法

由于每组涡轮结构方案均需进行三维 CFD 计算，若直接采用 CFD 进行大量优化搜索，计算成本较高。因此，本文采用代理模型建立设计变量与涡轮性能之间的非线性映射关系。常用代理模型包括 Kriging 模型、径向基函数模型、支持向量回归模型和神经网络模型等。不同模型的适用场景和对样本规模的要求存在差异。

不同代理模型适用性比较如表 1 所示：

Table 1. Applicability comparison of surrogate models
表 1. 代理模型适用性比较

模型	优点	不足	本文适用性
Kriging	全局预测能力较强，可提供不确定性估计	超参数优化较复杂，训练成本较高	可作为对比模型
SVR	适合小样本非线性回归，泛化能力较好	核函数和惩罚因子选择敏感	可用于对比验证
BP 神经网络	非线性表达能力强	对样本数量要求较高，易过拟合	本文样本量偏少，稳定性不足
RBF	结构简单，训练快，小样本拟合能力较好	对基函数宽度参数敏感	适合作为本文主模型

本文设计变量为 7 个，CFD 样本数量为 100 组，属于中小样本、多变量、非线性优化问题。综合考虑样本规模、训练效率、模型稳定性和后续优化调用便利性，本文选择 RBF 作为主要代理模型。

叶片型线的压力面和吸力面分别采用五次多项式进行构造，前缘和后缘分别采用圆弧与五次多项式型线相切组成。分别设压力面 y_p 和吸力面 y_s 的型线方程如下：

$$\begin{cases} y_p = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 \\ y_s = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 + b_5 x^5 \end{cases} \tag{1}$$

其中，a_0~a_5 和 b_0~b_5 分别为压力面和吸力面五次多项式的待定系数。根据前缘半径、后缘半径、前缘楔角、后缘楔角、入口角和出口角等叶片几何参数，首先确定压力面和吸力面的起点、终点坐标及端点切线方向。设压力面和吸力面的起点、终点坐标分别为(x_{p1}, y_{p1})、(x_{p2}, y_{p2})和(x_{s1}, y_{s1})、(x_{s2}, y_{s2})，相应端点的一阶导数由叶片入口角、出口角及前后缘楔角共同确定。

为保证叶片型线满足端点位置和切线方向要求，并提高型线的光顺性，对压力面和吸力面分别施加以下边界条件：

$$\begin{cases} y_p(x_{p1}) = y_{p1}, \\ y_p(x_{p2}) = y_{p2}, \\ y_p'(x_{p1}) = y_{p1}', \\ y_p'(x_{p2}) = y_{p2}', \\ y_p''(x_{p1}) = 0, \\ y_p''(x_{p2}) = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} y_s(x_{s1}) = y_{s1}, \\ y_s(x_{s2}) = y_{s2}, \\ y_s'(x_{s1}) = y_{s1}', \\ y_s'(x_{s2}) = y_{s2}', \\ y_s''(x_{s1}) = 0, \\ y_s''(x_{s2}) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{p1} & x_{p1}^2 & x_{p1}^3 & x_{p1}^4 & x_{p1}^5 \\ 1 & x_{pn} & x_{pn}^2 & x_{pn}^3 & x_{pn}^4 & x_{pn}^5 \\ 0 & 1 & 2x_{p1} & 3x_{p1}^2 & 4x_{p1}^3 & 5x_{p1}^4 \\ 0 & 1 & 2x_{pn} & 3x_{pn}^2 & 4x_{pn}^3 & 5x_{pn}^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6x_{p1} & 12x_{p1}^2 & 20x_{p1}^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6x_{pn} & 12x_{pn}^2 & 20x_{pn}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{p1} \\ y_{pn} \\ y'_{p1} \\ y'_{pn} \\ y''_{p1} \\ y''_{pn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{s1} & x_{s1}^2 & x_{s1}^3 & x_{s1}^4 & x_{s1}^5 \\ 1 & x_{sn} & x_{sn}^2 & x_{sn}^3 & x_{sn}^4 & x_{sn}^5 \\ 0 & 1 & 2x_{s1} & 3x_{s1}^2 & 4x_{s1}^3 & 5x_{s1}^4 \\ 0 & 1 & 2x_{sn} & 3x_{sn}^2 & 4x_{sn}^3 & 5x_{sn}^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6x_{s1} & 12x_{s1}^2 & 20x_{s1}^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6x_{sn} & 12x_{sn}^2 & 20x_{sn}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{s1} \\ y_{sn} \\ y'_{s1} \\ y''_{sn} \\ y'_{s1} \\ y''_{sn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

通过上述线性方程组即可求得叶片压力面和吸力面的未知向量 a 及向量 b。从而可以得到叶片的吸力面和压力面表达式 y_s 和 y_p。再与前缘圆弧与后缘圆弧拟合即可得到叶片截面形状。

2.4. CFD 仿真方法

计算域单独命名 inlet (流体入口)、outlet (流体出口)、Stator (定子叶片)、Rotor (转子叶片)和 walls (流域壁面边界)。其中流域中存在三个交界混合面，这里需要分别对三个交界混合面进行设置，入口段和定子段的交界面、定子段和转子段的交界面和出口段和转子段的交界面分别设置命名为 interface1，interface2 和 interface3，Stator 和 Rotor 分别表示定子和转子叶片边界面的命名。

根据原始参数建立涡轮定、转子流道模型。对涡轮流道进行网格划分时，进口段和出口段采用结构化网格，定子和转子叶片区域采用非结构化网格，并对叶片前缘、后缘、叶道喉部和近壁面区域进行局部加密。为减小入口和出口边界对实际流动的影响，将定子入口和转子出口端分别向外延伸一定距离。

网格划分后，导入计算域模型进入 FLUENT，检查网格质量，是否出现左手网格或奇异网格，核查是否出现报错，选择基于压力法的求解器 Pressure-Based Solver，分析类型选择设置为 Steady State (稳态)，考虑重力作用，勾选重力加速度方向 y+；湍流模型选用 Realizable k-ε 模型，选择流体类型为 Water-liquid，Rotor 流域设置为 Frame Motion，分别设置转速不同转速；设置入口边界 inlet 为速度入口，设置对应流速，垂直入口方向进入；设置出口边界 outlet 为压力出口；在流域名称为 Rotor 部分，壁面设置为 MOVing Wall，相对于相邻单元区域，旋转速度设置为 0，方向选择 Z 轴；其余壁面设置为无滑移壁面；选择混合初始化，初始迭代次数 30 次，检查是否混合完全；压力速度耦合算法选择 Coupled，对于旋转机械类流体计算，Coupled 算法收敛性更好，计算精度较高，计算速度快；运行计算，直到残差收敛运算结束，后处理查看结果，并根据结果进行理论分析。

3. 涡轮叶片代理模型优化方法

3.1. 超拉丁抽样方法

由于设计变量数量较多，若采用全因子实验设计将产生大量样本，计算成本较高。拉丁超立方抽样方法能够在设计空间内较均匀地选取样本点，适用于多变量参数优化问题。设设计变量向量为：

$$x = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$$

其中，n 为设计变量个数。每个样本点对应一组叶片结构参数，并通过参数化建模自动生成几何模型。随

后对各样本进行 CFD 计算，获得对应的输出扭矩、压降、功率和效率等性能指标，形成代理模型训练数据集。

3.2. 基于 RBF 的代理模型

由于每组涡轮结构方案均需进行三维 CFD 计算，若直接采用 CFD 进行大量优化搜索，计算成本较高。为提高代理模型的优化效率与稳定性，本文采用基于 RBF 的集成代理模型建立设计变量与涡轮性能之间的非线性映射关系。

对于任一性能指标 y，RBF 代理模型可表示为：

$$\hat{y}(x)=\sum_{j=1}^{N}\omega_j\varphi\left(\left\|x-x_j\right\|\right)+p(x) \tag{5}$$

式中，$\hat{y}(x)$ 为代理模型预测值；N 为训练样本数；ω_j 为第 j 个径向基函数的权重；为第 j 个训练样本；φ 为径向基函数；$p(x)$ 为趋势项。本文采用高斯径向基函数：

$$\varphi(r)=\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6}$$

式中，r 为样本点之间的欧氏距离，σ 为径向基函数宽度参数。模型参数通过训练集进行拟合，并采用测试集评价模型的泛化能力。

3.3. 综合评价函数构建

在涡轮转速固定时，功率与扭矩具有相同的变化趋势。为避免重复强调扭矩指标，本文在综合评价函数中主要选取扭矩、压降和效率作为评价指标。

本文选取扭矩 T、压降 Δp 和效率 η 作为优化评价指标。由于不同性能指标的量纲和数量级不同，不能直接进行加权求和。因此，在构造综合评价函数前，首先对各性能指标进行无量纲归一化处理。对于扭矩和效率这类效益型指标，其数值越大越优，采用正向归一化方法：

$$T^*(x)=\frac{T(x)-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}} \tag{7}$$

式中，$T^*(x)$ 和 $\eta^*(x)$ 分别为归一化后的扭矩和效率评价值；$T(x)$ 和 $\eta(x)$ 分别为设计方案 x 对应的预测扭矩和预测效率；$T_{\min}$、$T_{\max}$、$\eta_{\min}$、$\eta_{\max}$ 分别为候选方案集合中对应指标的最小值和最大值。

对于压降 Δp 而言，其数值越小越优，因此采用反向归一化方法：

$$\Delta p^*(x)=\frac{\Delta p_{\max}-\Delta p(x)}{\Delta p_{\max}-\Delta p_{\min}} \tag{8}$$

式中，$\Delta p^*(x)$ 为归一化后的压降评价值，数值越大表示压降越小、方案越优；$\Delta p(x)$ 为设计方案 x 对应的预测压降；$\Delta p_{\min}$ 和 $\Delta p_{\max}$ 分别为候选方案集合中的最小压降和最大压降。因此，可构造归一化评价向量：

$$F(x)=\begin{bmatrix}T^*(x)\\ \Delta p^*(x)\\ \eta^*(x)\end{bmatrix} \tag{9}$$

设权重向量为：

$$W=\begin{bmatrix}w_T & w_{\Delta p} & w_\eta\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中，w_T、$w_{\Delta p}$和w_η分别为扭矩、压降和效率的权重系数，且满足：

$$w_T + w_{\Delta p} + w_\eta = 1 \tag{11}$$

则综合评价函数可表示为：

$$S(x) = w_T T^*(x) + w_{\Delta p}\Delta p^*(x) + w_\eta \eta^*(x) \tag{12}$$

3.4. 目标函数的构建

在完成代理模型训练和综合评价函数构建后，涡轮叶片结构优化问题可转化为有界约束条件下的连续变量优化问题。本文以归一化后的叶片结构参数作为优化变量，其设计变量向量表示为：

$$x' = \left[R_1', R_2', \varphi_1', \varphi_2', \beta_{1k}', \beta_{2k}', H'\right] \tag{13}$$

式中，R_1'、R_2'、φ_1'、φ_2'、β_{1k}'、β_{2k}'和H'分别为前缘半径、后缘半径、前缘楔角、后缘楔角、入口角、出口角和叶片高度的归一化变量。各归一化变量均在[0, 1]范围内，即：

$$0 \le x_i' \le 1, i = 1, 2, \cdots, 7 \tag{14}$$

根据前文建立的综合评价函数，本文以综合评价值$S(x')$最大为优化目标。由于 MATLAB 中的 fmincon 函数用于求解最小化问题，因此将目标函数定义为：

$$\min_{x'} f(x') = -S(x') \tag{15}$$

4. 案例分析

4.1. 涡轮叶片参数化建模与 CFD 仿真

本文以井下小尺寸涡轮定、转子叶片为研究对象，对其进行参数化建模和结构优化。涡轮无冲击转速约为 1200 r/min，额定流量为 8 L/s，单副涡轮扭矩约为 1 N·m，流道内径和外径分别为 45 mm 和 65 mm。叶片主要结构参数如表 2 所示；定转子三维模型如图 2 所示：

Table 2. Main blade structural parameters
表 2. 叶片主要结构参数

名称	数值
叶片高度 H (mm)	10
叶栅节距 t (mm)	6.975
叶片安装角 β_m (˚)	71.17
轴向速度系数 Cz	1.49
环流系数 Cu	1.32
冲击度系数 m_a	0.5
前缘半径 R_1 (mm)	0.8
后缘半径 R_2 (mm)	0.6
叶片弦长 b (mm)	9.3
前缘楔角 φ_1 (˚)	20
后缘楔角 φ_2 (˚)	10

续表

定转子进口角 α_{2k}/β_{1k} (˚)	96.13
定转子出口角 α_{1k}/β_{2k} (˚)	52.1

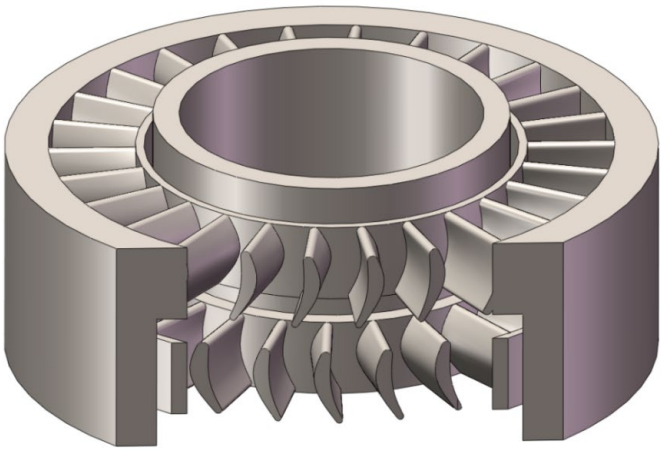

Figure 2. Stator and rotor 3D model
图 2. 定转子三维模型

4.2. 涡轮 CFD 仿真计算与样本获取

4.2.1. 涡轮 CFD 仿真计算

为保证计算结果可靠性，需要进行网格无关性验证。通过比较不同网格数量下的扭矩、压降和效率变化，确定所采用的网格数量。从图 3 网格无关性验证中可以得出当网格数量为 4.5×10^6 时，扭矩、压降、效率和功率趋于稳定，考虑到计算成本和结果的准确性选择网格数为 4.5×10^6 用于后续的仿真计算。

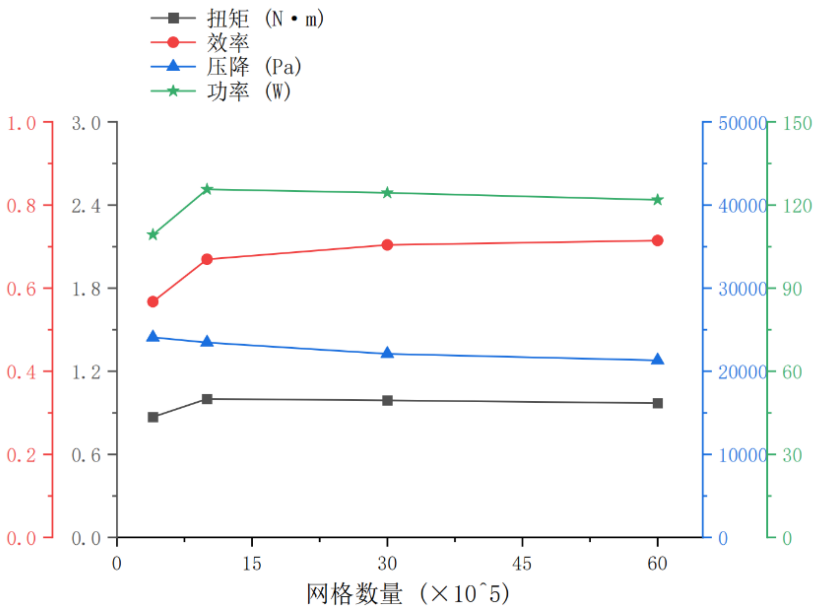

Figure 3. Grid independence verification
图 3. 网格无关性验证

划分网格后的定转子流道三维模型如图 4 所示：

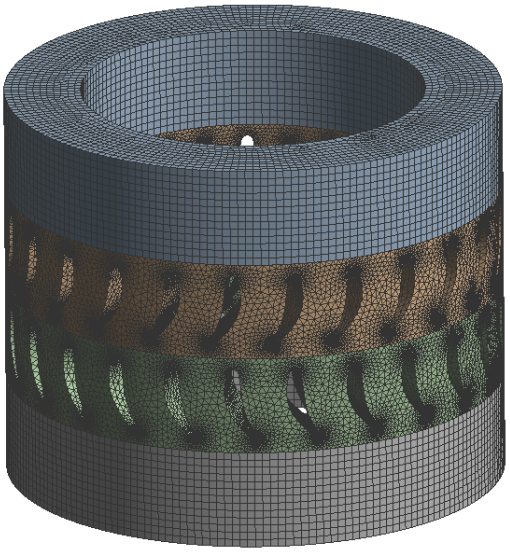

Figure 4. 3D model of the stator and rotor flow channels
图 4. 定转子流道三维模型

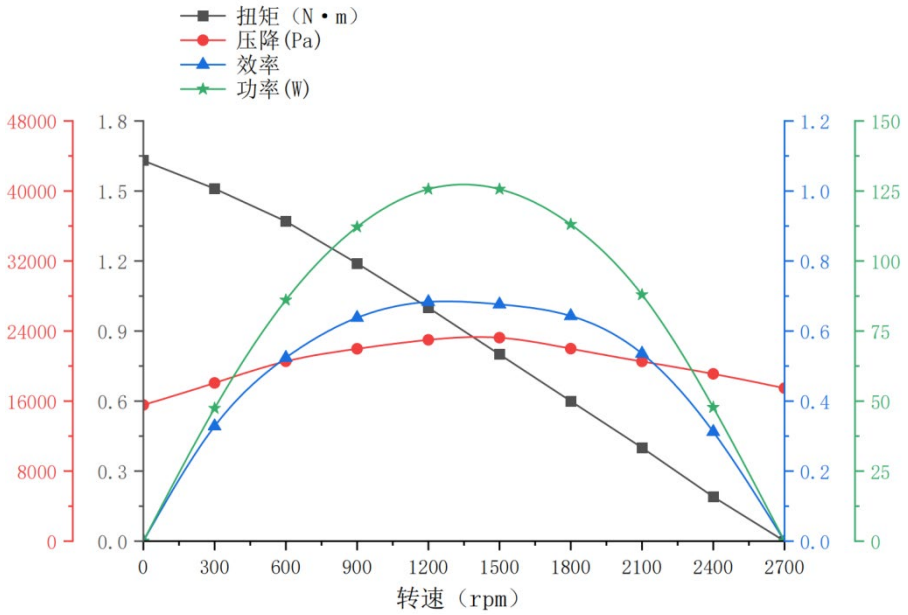

Figure 5. Turbine output characteristics
图 5. 涡轮输出特性

涡轮输出特性如图 5 所示，当涡轮转速为 1200 r/min 左右时，水力效率最高。为了研究叶片结构参数对扭矩、压降和效率的影响，选择转速为 1200 r/min 进行叶片结构参数的优化。

4.2.2. 样本获取

为兼顾优化效率和工程可行性，本文以涡轮叶片结构参数为设计变量，选取前缘半径 R_1、后缘半径 R_2、前缘楔角 φ_1、后缘楔角 φ_2、入口角 β_{1k}、出口角 β_{2k} 和叶片高度 H 共 7 个参数作为代理模型输入变

量。设计变量向量定义为：

$$X=\left[R_1,R_2,\varphi_1,\varphi_2,\beta_{1k},\beta_{2k},H\right]$$

各设计变量取值范围是在原始叶型参数基础上，结合 SLM 成形最小特征尺寸、悬垂角和内部流道可成形性确定的。SLM 成形薄壁结构时壁厚不应低于 0.20 mm，当壁厚小于 0.20 mm 时，成形结构件尺寸偏差大于 25% [14]。因此，本文将前缘半径 R_1 取为 0.6~1.0 mm，后缘半径 R_2 取为 0.3~0.6 mm，使前、后缘圆角均高于薄壁成形下限，避免叶片边缘过薄或局部堵塞。前缘楔角 φ_1 和后缘楔角 φ_2 分别围绕原始叶型参数 20˚和 10˚进行变化，取 $\varphi_1=10^\circ\sim30^\circ$、$\varphi_2=7^\circ\sim15^\circ$，以保证叶片前、后缘具有一定厚度并避免形成过尖特征。

对于悬垂结构，增材制造的悬垂角度一般以 40~50˚作为临界悬垂角[15]；当悬垂结构倾斜角低于 45˚时，悬垂部分易出现塌陷和挂渣。因此，入口角 β_{1k} 和出口角 β_{2k} 在原始结构角 96.13˚和 52.1˚附近取值，分别设为 90~110˚和 48~56˚，其中出口角下限高于 45˚，有利于满足自支撑成形要求。

叶片高度 H 以原始值 10 mm 为中心，结合 SLM 管路通道适宜成形尺度，取 8~12 mm，以保证叶道具有足够流通面积和粉末清理空间。各变量取值范围如表 3 所示。

Table 3. Range of values for each variable
表 3. 各变量取值范围

变量	含义	下限	上限	单位
R_1	前缘半径	0.6	1.0	mm
R_2	后缘半径	0.3	0.6	mm
φ_1	前缘楔角	10	30	°
φ_2	后缘楔角	7	15	°
β_{1k}	入口角	90	110	°
β_{2k}	出口角	48	56	°
H	叶片高度	8	12	mm

根据设计变量取值范围，本文采用拉丁超立方抽样方法生成 100 组叶片结构样本。每组样本对应一个定、转子叶片结构方案，并通过参数化建模自动生成几何模型。随后对各样本进行 CFD 计算，获得对应的输出扭矩和压降，并进一步计算功率和效率。本文生成 N = 100 组样本，部分样本及 CFD 结果如表 4 所示。

Table 4. Representative samples and CFD results
表 4. 部分样本及 CFD 结果

单位	mm	mm	°	°	°	°	mm	N·m	Pa
变量 / 编号	R_1	R_2	φ_1	φ_2	β_{1k}	β_{2k}	H	T	Δp
1	0.8	0.41	23.86	10.14	100.89	48.22	10.14	1.09	24,075
2	0.99	0.51	19.18	10.56	99.7	49.57	10.98	1.1	24,570
3	0.62	0.58	22.65	12.26	96.43	49.73	11.42	1.02	22,460
4	0.86	0.52	17.75	9.22	91.85	53.91	11.53	0.7	16,441
5	0.73	0.45	22.02	10.35	102.97	49.3	10.01	1	22,753
6	0.68	0.57	29.78	12.08	90.52	50.81	10.29	0.99	22,221

续表

7	0.69	0.43	15.02	8.55	91.52	55.36	10.89	0.5	12,890
8	0.69	0.37	12.56	11.09	103.15	51.2	9.02	0.96	21,392
9	0.78	0.34	15.55	7.05	100.53	53.55	10.94	0.72	16,397
10	0.77	0.51	10.19	12.14	96.12	52.88	10.51	0.88	20,049
			……						
91	0.66	0.39	29.85	13.08	98.27	48.91	11.05	0.69	16,871
92	0.92	0.38	20.94	11.84	106.24	49.12	9.29	0.64	15,647
93	0.93	0.52	21.83	9.54	97.24	51.95	8.45	0.79	18,945
94	0.87	0.31	18.99	7.83	101.2	55.82	10.87	0.72	16,991
95	0.8	0.54	29.39	13.39	94.54	52.39	8.95	0.91	20,617
96	0.78	0.34	16.29	9.67	106.08	55.49	9.21	0.73	17,068
97	0.78	0.55	13.49	14.07	98.03	48.03	8.56	0.72	17,883
98	0.71	0.35	10.74	10.88	94.14	53.17	9.12	1.15	26,226
99	0.68	0.57	11.45	14.53	100.62	53.78	11.31	0.95	22,082
100	1	0.33	23.45	10.48	107.87	52.21	11.02	0.89	19,654

4.3. 代理模型预测结果与精度评价

将 CFD 样本数据采用 SPXY 按照 85 组训练集和 15 组测试集划分。训练集用于确定代理模型参数，测试集用于评价模型预测能力。所有过程在 Matlab 环境下完成。测试集预测效果如图 6 所示：

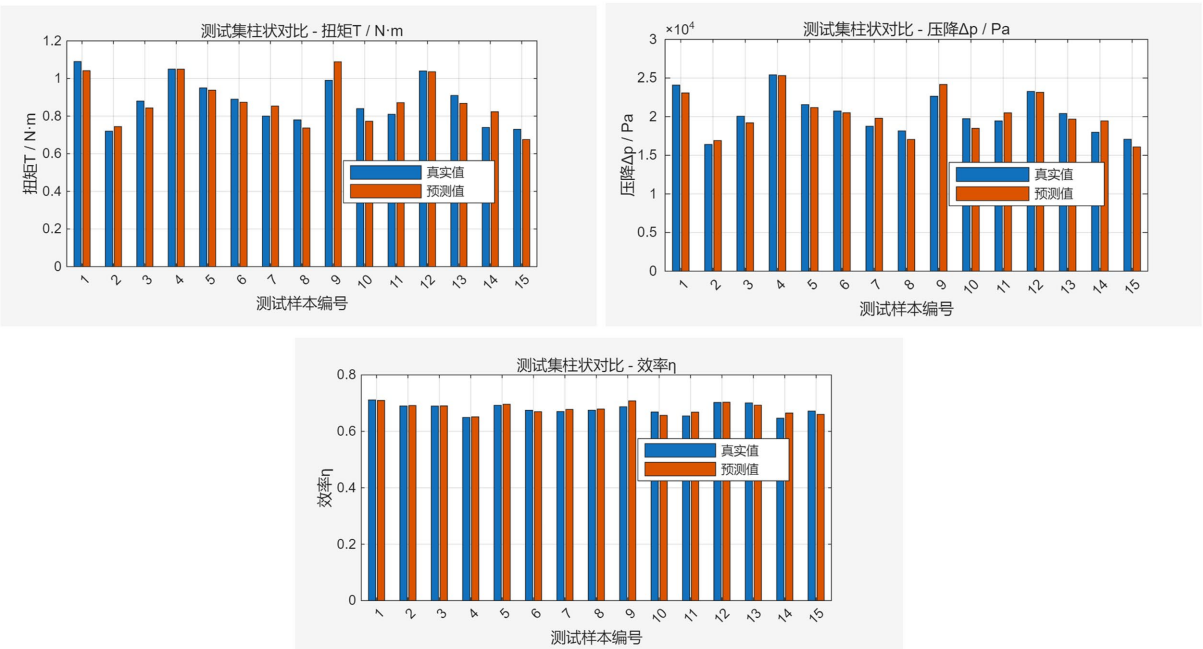

Figure 6. Test set prediction performance
图 6. 测试集预测效果

为验证代理模型的预测精度，本文采用训练集和测试集分别评价模型的拟合能力和泛化能力。评价指标中 R^2 越接近 1，说明模型预测效果越好；RMSE 和 MAPE 越小，说明预测误差越低。

Table 5. Prediction accuracy of the proxy model on the test set
表 5. 代理模型测试集预测精度

性能指标	R^2	RMSE	MAPE/%
扭矩 T/N·m	0.8110	0.0511	5.107
压降 Δp/Pa	0.8619	937.05	4.189
效率 η	0.7319	0.0098	1.112

代理模型测试集预测精度如表 5 所示：测试集扭矩和压降的 R^2 分别为 0.8110 和 0.8619，说明模型能够较好地反映结构参数与涡轮性能之间的非线性关系。对应 MAPE 分别为 5.107%和 4.189%，预测误差较小。效率的测试集 R^2 为 0.7319，MAPE 仅为 1.112%，RMSE 为 0.0098，说明效率预测的相对误差和绝对误差均较小。由于效率数值变化范围较窄，R^2 对局部误差较敏感，因此其决定系数略低，但整体预测精度仍可满足优化需求。

在代理模型预测精度满足优化需求的基础上，本文进一步基于已建立的综合评价函数对涡轮叶片结构参数进行优化。优化过程在 MATLAB 环境下完成，调用 fmincon 函数进行有界约束非线性寻优。

综合评价函数中扭矩权重为 0.50，效率权重为 0.30，压降权重为 0.20。该权重设置主要依据井下小尺寸涡轮的实际工况需求确定。输出扭矩直接影响井下工具的驱动能力，是涡轮性能评价的主要指标，因此赋予最高权重；效率反映流体能量转换水平，关系到涡轮能量利用能力，因此赋予次高权重；压降反映流体通过涡轮时的水力损失应尽量降低，但在满足井下循环系统允许压降范围内可作为约束性指标进行综合权衡，因此赋予相对较低权重。

为探究权重对优化结果的影响，本文设置了不同权重组合进行敏感性分析，结果表明权重变化会影响扭矩、效率和压降之间的平衡关系，但主要优化变量变化趋势一致，说明本文权重设置下的优化结果具有一定稳定性。

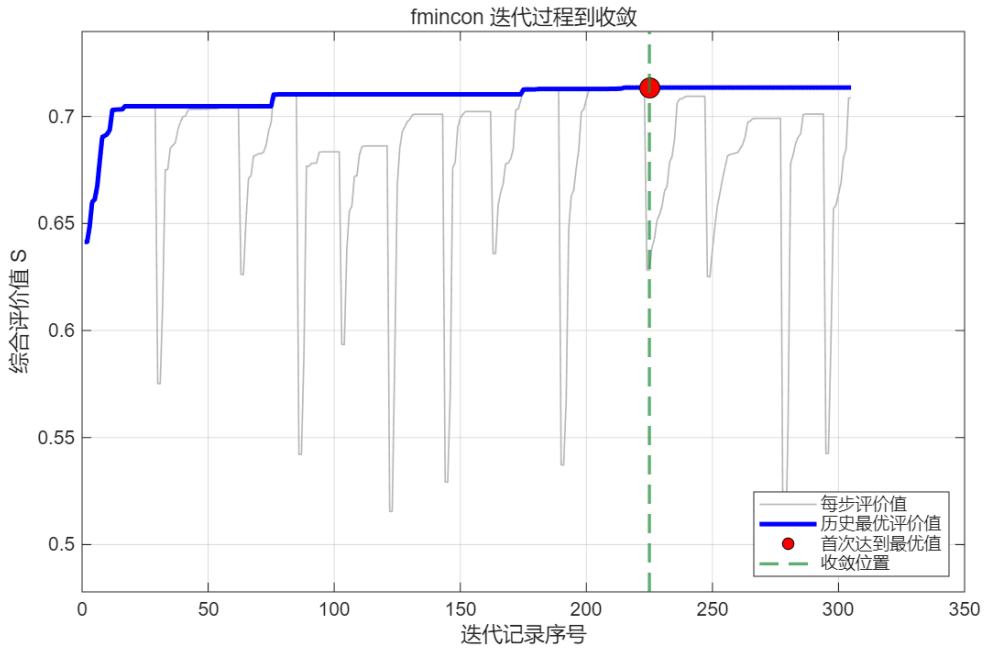

Figure 7. Iterative process
图 7. 迭代曲线

图 7 所示为优化过程的收敛曲线，其中灰色曲线表示各迭代步的评价值变化，蓝色曲线表示历史最优评价值，红色标记点表示首次获得最优解的位置，绿色虚线表示算法收敛位置。结果表明，综合评价值在迭代初期快速提升，随后变化幅度逐渐减小，并在约第 225 步后稳定不变，表明优化过程已收敛。最终获得的综合评价值为 0.7135，验证了该优化方案的有效性。

涡轮在转速为 1200 r/min 时，原始方案代理模型预测性能为：扭矩 0.91 N·m，压降 20,682 Pa，效率 0.691；其仿真结果为：扭矩 1.00 N·m，压降 22997 Pa，效率 0.683；由此可见代理模型预测结果较为可靠。最优叶片结构参数及预测性能如表 6 所示：

Table 6. Optimal blade structural parameters and predicted performance
表 6. 最优叶片结构参数及预测性能

变量	含义	数值	单位
R_1	前缘半径	0.94	mm
R_2	后缘半径	0.47	mm
φ_1	前缘楔角	20.58	°
φ_2	后缘楔角	14.62	°
β_{1k}	入口角	97.9	°
β_{2k}	出口角	49.4	°
H	叶片高度	10.69	mm
S	综合评价值	0.713	-
T	扭矩	1.20	N·m
Δp	压降	26378	Pa
η	效率	0.718	-

涡轮在转速为 1200 r/min 时，原始方案代理模型预测性能为：扭矩 0.91 N·m，压降 20,682 Pa，效率 0.691；其仿真结果为：扭矩 1.00 N·m，压降 22,997 Pa，效率 0.683；由此可见代理模型预测结果较为可靠。优化前后预测涡轮性能对比如表 6 所示。

Table 7. Comparison of predictive performance between the original and optimized schemes
表 7. 原始方案与优化方案预测性能对比

预测性能指标	原始方案	优化方案	变化幅度
扭矩 T/N·m	0.91	1.20	+31.87%
压降 Δp/Pa	20,682	26,378	+27.54%
效率 η	0.691	0.718	+3.91%

由表 7 原始方案与优化方案预测性能对比可知，优化方案的扭矩由 0.91 N·m 提高至 1.20 N·m，提高约 31.87%；效率由 0.691 提高至 0.718，提高约 3.91%。但预测压降由 20,682 Pa 增加至 26,378 Pa，提高 27.54%。因此，该优化方案主要实现了输出能力提升，同时以一定的压降增加为代价。该结果体现了扭矩、效率和压降之间的综合权衡。

4.4. 优化结果验证

为验证代理模型优化结果的可靠性，根据表 6 中的最优设计变量重新建立定、转子三维模型，并采用与样本计算一致的计算域、网格策略、边界条件和求解设置进行 CFD 复核。复核工况为入口流量 8 L/s、

转子转速 1200 r/min 优化方案验证结果如表 8 所示：

Table 8. Review results of optimization scenarios
表 8. 优化方案验证结果

性能指标	代理模型预测值	CFD 复核值	相对误差/%
扭矩 T/N·m	1.20	1.12	6.67
压降 Δp/Pa	26,378	24,821	5.90
效率 η	0.718	0.709	1.25

CFD 复核结果表明，代理模型对优化方案的扭矩、压降和效率均具有一定预测能力。其中，扭矩和压降的相对误差分别为 6.67%和 5.90%，效率相对误差为 1.25%。优化方案的 CFD 复核扭矩较原始方案的 CFD 扭矩提高 12%，效率提高约 3.8%。

5. 结论

本文针对 SLM 制造条件下井下小尺寸涡轮叶片的结构优化问题，选取前缘半径、后缘半径、前后缘楔角、进出口角等共 7 个参数作为设计变量，建立了基于 LHS-CFD-RBF 的代理模型优化方法，并对优化结果进行了 CFD 复核，主要结论如下：

(1) 采用五次多项式曲线和圆弧连接方法，建立了井下小尺寸涡轮定、转子叶片参数化模型，实现了主要叶片结构参数的灵活调节。

(2) 采用拉丁超立方抽样获得 100 组样本，并通过 CFD 计算建立了叶片结构参数与涡轮扭矩、压降及效率之间的 RBF 代理模型。测试结果表明，扭矩、压降和效率预测模型的 R^2 分别为 0.8110、0.8619 和 0.7319，能够满足优化需求。

(3) 基于综合评价函数和 fmincon 算法对叶片结构进行优化。与原始方案相比，优化方案的扭矩由 0.91 N·m 提高至 1.20 N·m，效率由 0.691 提高至 0.718，但压降由 20,682 Pa 增加至 26,378 Pa，表明优化结果实现了输出性能与能量损失之间的综合权衡。

(4) CFD 复核结果表明，优化方案的扭矩、压降和效率分别为 1.12 N·m、24,821 Pa 和 0.709，与代理模型预测值的相对误差分别为 6.67%、5.90%和 1.25%，验证了优化方法的有效性。优化方案满足本文设定的 SLM 几何制造约束，具有一定的增材制造可行性。

参考文献

[1] 冯进, 符达良. 涡轮钻具涡轮叶片造型设计新方法[J]. 石油机械, 2000(11): 9-12, 3.

[2] 何顺, 冯进, 陈斌, 等. 基于 Bezier 曲线的涡轮叶片造型方法[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(21): 45-50, 4.

[3] 袁新梅, 金欢欢, 段清龙, 等. φ175mm 涡轮钻具叶片型线结构参数优化研究[J]. 石油机械, 2024, 52(8): 24-32.

[4] 周思柱, 王峰, 刘书杰, 等. 基于粒子群算法的涡轮钻具叶片优化[J]. 石油钻采工艺, 2025, 47(2): 179-185.

[5] 谭春飞, 于瑞丰, 郝明钊, 等. 基于 BP 神经网络与遗传算法的涡轮安装角优化[J]. 石油机械, 2018, 46(2): 1-4.

[6] 刘志勇, 闫军, 杨硕. 叶轮给煤机叶片的优化设计及仿真分析[J]. 机械设计, 2024, 41(6): 123-129.

[7] 何瑞轩, 王新晶, 丁永乐, 等. 数据驱动的泵喷推进器转子优化设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 30-37.

[8] 黄松, 王鹏, 汪洋冰. 压气机叶片几何气动性能优化设计方法综述[J]. 推进技术, 2024, 45(4): 6-24.

[9] Cherry, J.A., Davies, H.M., Mehmood, S., Lavery, N.P., Brown, S.G.R. and Sienz, J. (2014) Investigation into the Effect of Process Parameters on Microstructural and Physical Properties of 316L Stainless Steel Parts by Selective Laser Melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **76**, 869-879.

https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2

[10] Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L. and Fortunato, A. (2017) Effect of Selective Laser Melting (SLM) Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, **249**, 255-263. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042

[11] ISO/ASTM (2019) ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive Manufacturing-Design-Part 1: Laser-Based Powder Bed Fusion of Metals. International Organization for Standardization.

[12] Thomas, D. (2009) The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Ph.D. Thesis, University of Wales.

[13] Calignano, F. (2014) Design Optimization of Supports for Overhanging Structures in Aluminum and Titanium Alloys by Selective Laser Melting. *Materials & Design*, **64**, 203-213. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043

[14] 关杰仁, 单悦晴, 刘蕴华, 等. 选区激光熔化成形铝合金薄壁和悬垂结构研究[J]. 材料开发与应用, 2025, 40(5): 10-17.

[15] 魏伟, 吴海鑫, 吴晓萱, 等. 增材制造自支撑设计综述[J]. 中国激光, 2024, 51(10): 122-145.