

超导加速模组水平测试平台真空泵站 结构分析与优化

赵凡 李菡* 尉伟 岳泰 李靖国 孙兴中
(深圳先进光源研究院 深圳 518107)

Structure Analysis and Optimization of Vacuum Pump Station of Horizontal Test Platform of Superconducting Acceleration Cryomodule

ZHAO Fan, LI Han*, WEI Wei, YUE Tai, LI Jingguo, SUN Xingzhong
(Institute of Advanced Light Source Facilities, Shenzhen 518107, China)

Abstract In this paper, the beam vacuum pump station of the horizontal test platform of superconducting acceleration cryomodule is taken as the research object, structural simulation analysis and multi-objective optimization design are conducted to meet its requirements for safety and lightweight. Firstly, based on statics simulation and sub-model technology, the strength and stiffness of the vacuum pump station are analyzed and an optimization scheme is proposed. Subsequently, the test sample space is obtained through the central composite design (CCD) method and parametric simulation, and the response surface analysis is conducted through the Kriging surrogate model. Finally, the multi-objective genetic algorithm (MOGA) is adopted to obtain the Pareto optimal solution, and the preferred scheme is simulated and verified. The results show that the maximum equivalent stress of the optimized vacuum pump station is 76.116 MPa, the maximum deformation is 0.47151 mm, and the mass of the pump station only increased by 0.25% compared with that before optimization. The optimization results meet the design requirements of multi-objective optimization, which proves the feasibility of the said multi-objective optimization method. This research can provide references for the design and optimization of vacuum chambers in the field of accelerators.

Keywords Superconducting accelerator, Finite element analysis, Sub-model technology, Response surface method, Multi-objective optimization

摘要 文章以超导加速模组水平测试平台的束流真空泵站为研究对象,开展结构仿真分析和多目标优化设计,以满足其安全性和轻量化要求。首先,基于静力学仿真和子模型技术,分析真空泵站的强度和刚度并提出优化方案。随后,通过中心复合设计(CCD)方法和参数化仿真获得试验样本空间,建立克里金(Kriging)代理模型并进行响应面分析。最后,采用多目标遗传算法(MOGA)求得帕累托(Pareto)最优解,并对优选方案进行仿真验证。结果表明:优化后的真空泵站其最大等效应力为76.116 MPa,最大变形量为0.47151 mm,而泵站质量相比优化前仅增加了0.25%,优化结果满足多目标优化的设计要求,证明了所述多目标优化方法的可行性。研究内容可为加速器领域真空腔体的设计优化提供参考。

关键词 超导加速器 有限元分析 子模型技术 响应面法 多目标优化

中图分类号: TB754

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202412011

深圳中能高重频 X 射线自由电子激光大科学装置(Shenzhen Superconducting Soft X-ray Free Electron Laser, 简称 S³FEL)是基于超导高频技术的

新一代 X 射线相干光源^[1-2]。相比基于常温加速技术的自由电子激光装置,超导直线加速器技术可以有效提高电子束流的重复频率,实现最高每秒 10⁶

脉冲输出,能大幅提高装置的平均功率^[3]。超导加速模组作为高重频自由电子激光装置的核心设备^[4-5],通常需要在水平测试平台上进行测试并获得真空、低温和加速性能等方面的关键技术参数^[6-7],通过评估其整体性能是否达到设计指标,确保其后续安装到加速器上时能够平稳运行^[8-11]。在水平测试平台进行测试时,超导加速模组的真空系统按照区域及功能可划分为束流真空系统、耦合器真空系统和绝热真空系统^[12-13]。其中,超导加速器的束流真空是指超导腔内部用于传输带电粒子束的高真空封闭区域。高真空环境可以有效降低粒子束流与残余气体的碰撞几率,从而保证束流的稳定性。在水平测试平台中,束流真空的高真空环境通过模组封头束流口处的离子泵来实现。为了将超导腔的束流口同离子泵、真空规、真空阀等真空设备或配件连接起来,需要设计并加工一个真空过渡腔体——真空泵站。此外,为了对束流流强的大小进行测量,真空泵站上还需连接一台束流诊断设备,即“法拉第筒”^[14-15]。

若因真空泵站的结构问题致使束流真空发生泄漏,会引发超导腔的污染和束流稳定性的下降;泄漏严重时需拆卸清洗超导腔,这会导致测试周期延误和测试成本增加。因此在设计真空泵站时,要对其结构安全性进行分析。通过对真空腔体的刚度、强度等方面进行仿真评估^[16-17],进而对其结构的几何尺寸进行优化^[18-19],可以保证真空腔体在实际使用时的安全可靠。在对机械结构进行优化设计时,如果仅凭借经验对几何参数进行修改,由于缺乏科学理论的支撑,因此很难直接得到性价比高的设计方案;而多目标优化方法,通过采用先进的优化算法和计算机仿真技术,可快速找到最优设计方案,既能缩短设计迭代周期,又能保证优化过程的科学性。因此,多目标优化方法及其工程应用已成为目前机械设计领域的研究热点之一^[20-27]。在开展多目标优化时,设计变量一般结合具体的工程实际,灵活选取诸如长度、宽度、厚度等几何参数;随后根据定义的设计变量构建数学模型,并通过数值优化算法进行求解;最后确定一组最优设计变量组合,并通过仿真对其可行性进行验证。本文针对超导加速模组水平测试平台真空泵站的三维结构开展仿真分析和多目标优化工作,使其结构在优化后满足安全性和轻量化要求。此外,本文所提出的多目

标优化方法也可为加速器领域真空腔体的设计与优化提供参考。

1 初步设计方案的仿真分析

1.1 仿真分析步骤与相关参数

利用仿真软件对真空泵站进行静态结构分析的基本步骤为:

(1) 简化三维模型:基于水平测试平台内部空间大小及各部件安装相对位置,真空泵站的初步设计方案如图 1 所示。在仿真前,需对真空泵站三维模型进行适当简化,忽略对静态结构分析影响较小的部分(如各法兰上的刀口、法兰孔处的倒角等),以便提高运算速率;而泵站左侧悬挂法拉第筒的长真空管的根部处,在简化时需保留过渡圆角,以解决结构仿真中三维模型几何突变处经常会遇到的应力奇异问题^[28-30]。

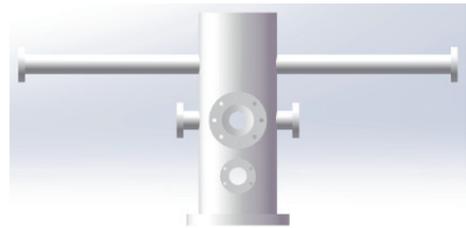


图1 真空泵站初步设计方案

Fig. 1 Preliminary design scheme of vacuum pump station

(2) 添加材料属性:所用材料为 304 不锈钢,其材料属性如下:密度为 7930 kg/m^3 ,拉伸屈服强度为 205 MPa ,弹性模量为 194 GPa ,泊松比为 0.3,许用应力 137 MPa ^[31-33]。

(3) 划分网格:采用分块网格划分的策略,在关键区域(例如泵站左侧悬挂法拉第筒的长真空管的根部处)进行局部加密。为检验网格尺寸设置是否合理,将网格加密部分的单元尺寸依次设置为 4 mm , 2 mm , 1 mm , 0.5 mm , 0.25 mm 并划分网格,通过观察仿真结果的变化趋势检验网格敏感性。

(4) 添加约束和载荷:由于真空泵站的底部安装在离子泵泵口之上,泵站右侧长管与真空插板阀相连,因此对泵站底部的法兰和右侧长管的法兰设置固定约束。由于法拉第筒及其附件的质量为 9 kg ,重力加速度取 $g=9.8 \text{ m/s}^2$,因此对左侧长管的法兰处施加垂直向下的作用力 88.2 N 。此外,考虑真空泵站内外压差的作用,对真空泵站外表面施加 0.1 MPa 的大气压强。

(5) 求解并输出结果: 设置好上述约束及载荷后, 对真空泵站的变形量及等效应力进行仿真运算并输出结果。

1.2 网格敏感性分析

各单元尺寸下网格划分质量与仿真结果如表1所示。从表1可以看出, 随着网格不断细化, 相邻两次网格步的最大变形量的变化幅度均小于5%, 而最大应力值的变化幅度则存在明显的差异。当单元尺寸细化到0.25 mm时, 其相邻网格步之间最大变形量的变化幅度约为0.0011%, 而最大应力值的变化幅度约为2.03%, 由于两者均小于5%的变化阈值, 此时可认为仿真结果不再随网格尺寸的减小而发生显著变化, 故取单元尺寸0.25 mm的仿真结果进行分析。

表1 真空泵站初步设计方案在不同单元尺寸下的仿真结果
Tab. 1 Simulation results of the preliminary design scheme of the vacuum pump station under different cell sizes

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
单元尺寸/mm	4	2	1	0.5	0.25
节点数	1637624	1692993	1924772	3264196	11755203
单元数	1112864	1138110	1271233	2158660	8175127
平均单元质量	0.78186	0.78414	0.78860	0.80897	0.83513
计算时间/min	13	13.5	15.5	29	136
最大应力值/MPa	93.757	104.73	111.43	117.79	120.18
最大变形量/mm	0.85738	0.87733	0.88498	0.88563	0.88562

1.3 仿真结果分析

在复杂应力状态下, 第四强度理论对塑性材料(如钢、铝等金属)的屈服失效预测精度更高, 且在薄壁结构等工况下同实验结果的吻合度更好, 因此本文采用第四强度理论(Von Mises理论)进行强度分析。真空泵站初步设计方案的等效应力云图如图2所示, 等效应力最大值 σ_{\max} 位于悬挂法拉第筒的长真空管的根部位置, 其大小为120.18 MPa; 而除该长管的根部区域外, 真空泵站其余部分的应力值则均小于40 MPa。虽然最大应力值小于材料的许用应力137 MPa, 但长管根部仍存在很明显的应力集中问题, 需要进一步改善。

真空泵站初步设计方案的变形云图如图3所示, 最大变形量 δ_{\max} 位于悬挂法拉第筒的长真空管的法兰处。为满足悬臂圆管处刚度安全性的需要, 本文要求悬臂圆管的最大变形量 δ_{\max} 须不超过 $L/500=$

0.706 mm(其中 L 为悬臂圆管的长度)。仿真结果显示, 悬臂圆管处的最大变形量为0.88562 mm, 超出了本文对悬臂圆管变形量的限制要求。综上所述, 无论是最大变形量超限还是应力集中问题, 都需要对真空泵站结构进行改进和优化。

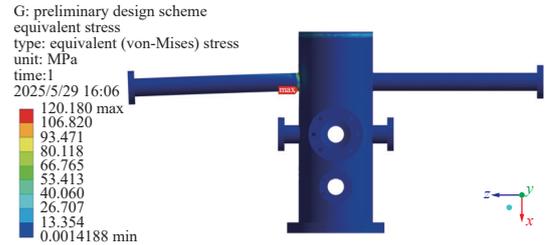


图2 真空泵站初步设计方案的等效应力云图

Fig. 2 Equivalent stress cloud map for the preliminary design scheme of vacuum pump station

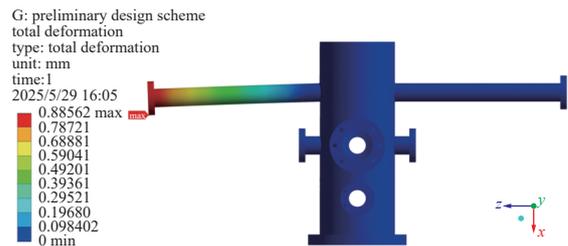


图3 真空泵站初步设计方案的变形云图

Fig. 3 Deformation cloud map for the preliminary design scheme of vacuum pump station

1.4 子模型技术

如果对结构全局求解等效应力, 计算量会随着网格的加密呈指数级增长, 计算时间也会大幅提高(如表1所示); 而采用子模型技术(Sub-model technology)针对关键区域的应力进行局部高精度仿真, 则可避免全局模型计算量过大的问题。子模型的构建依据圣维南原理^[34-36], 该原理指出: 当实际分布载荷被等效载荷替代时, 应力的改变主要集中在载荷施加的区域。由此可知, 若子模型的切割边界远离应力集中区域, 则能够通过计算子模型得到较精确的结果。在子模型技术中, 全局模型与子模型通过切割边界位移传递实现解耦: 先基于较粗的网格求解全局模型, 然后从全局模型的结果中提取子模型区域的边界条件, 再对子模型构建更精细的高质量网格进行二次分析, 重新计算子模型区域的应力, 可使局部的仿真结果不受全局模型简化的影响。

本文选用表1中单元尺寸为1 mm这一中等网

格尺寸的仿真结果作为子模型的边界条件, 随后对单元尺寸为 0.5 mm 和 0.25 mm 的长真空管的根部子模型进行精细化仿真, 其网格划分质量与仿真结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 所求应力结果与表 1 中的结果相差不大, 但运算时长明显下降。图 4 展示了子模型的几何边界及应力云图, 该区域的应力仿真结果与图 2 相比基本保持一致。由此可见, 合理应用子模型技术, 可实现计算精度与计算效率的完美平衡。因此, 在本文后续的优化设计中, 将采用全局模型先计算变形量, 而后使用子模型技术求解局部应力, 以便快速实现对不同优化方案的精确仿真。

表 2 子模型技术在两种单元尺寸下的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of sub-model technology under two cell sizes

	No.1	No.2
单元尺寸/mm	0.5	0.25
节点数	1248902	9080791
单元数	837719	6411980
平均单元质量	0.84894	0.85413
计算时间/min	0.7	12
最大应力值/MPa	117.26	120.28

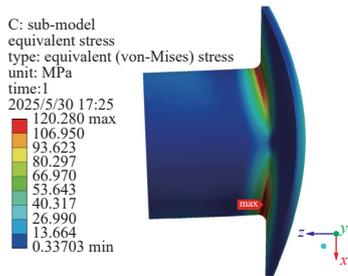


图 4 采用子模型技术求解局部应力分布

Fig. 4 The local stress distribution solving by the sub-model technology

2 改进模型的仿真分析

为了解决悬挂法拉第筒一侧长真空管的变形量超限与应力集中问题, 决定在此长管根部位置处焊接补强板(如图 5 所示), 以便对此处进行局部补强。在设计方案改进时, 需要综合考虑结构安全性与轻量化要求: 一方面要降低悬臂圆管的最大应力和变形量, 另一方面需控制泵站整体质量的增长幅度。补强板的高度 P_1 、长度 P_2 、半厚度 P_3 分别设计为 15 mm, 15 mm 和 1 mm, 上下两块补强板大小相

等且呈对称分布。对上述改进方案开展仿真分析, 采用全局模型计算变形量, 利用子模型技术求解局部应力, 其变形云图和等效应力云图分别如图 6 和图 7 所示。

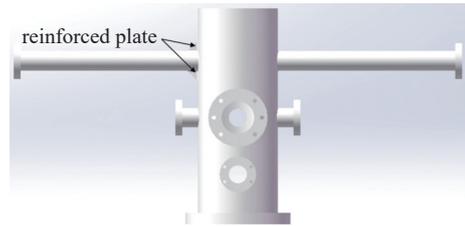


图 5 焊接补强板的真空泵站

Fig. 5 The vacuum pump station with welding reinforced plate

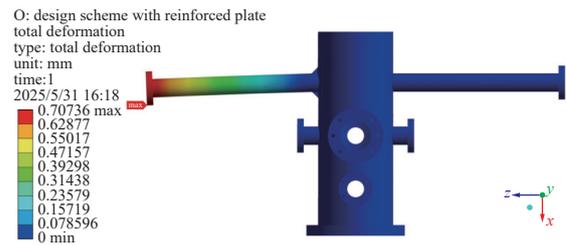


图 6 带补强板的真空泵站变形云图

Fig. 6 Deformation cloud map of vacuum pump station with reinforced plate

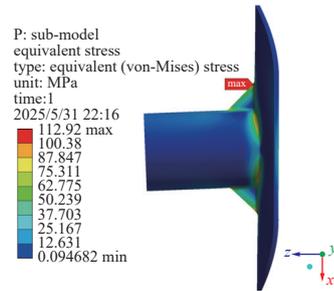


图 7 补强板处的等效应力云图

Fig. 7 Equivalent stress cloud map of the reinforced plate

查看仿真结果发现, 由于补强板尺寸取值偏小, 泵站总体质量只增加了大约 0.03%, 因此可认为其质量基本保持不变。虽然实现了结构轻量化的目标, 但存在以下关键问题: 首先, 悬臂圆管法兰口处的最大变形量为 0.70736 mm, 超出了 0.706 mm 的设计限值; 其次, 悬臂圆管根部的最大等效应力为 112.92 MPa, 仅略低于材料 137 MPa 的许用应力, 安全裕度不足, 因此该改进方案在给定载荷工况下仍无法拥有足够的安全性, 需要进一步调整补强板的设计参数。然而, 针对最大变形量、最大等效应力和泵站质量这三个优化目标, 若采用传统的人工调

试方法获取最佳设计参数,一方面效率低下且带有较强的主观性,另一方面难以同时兼顾各项优化指标,因此无法在短时间内找到既能有效提升结构刚度和强度,又能合理控制泵站质量的最佳方案。相比之下,多目标优化设计方法通过系统化的参数寻优,可以科学高效地确定最优参数组合,实现安全性与轻量化之间的平衡。

3 多目标优化设计

多目标优化设计的总体思路为:以补强板的几何参数为设计变量,以泵站质量、最大变形量和最大应力值为优化目标,采用中心复合设计和参数化仿真获得试验样本空间,建立 Kriging 模型并进行响应面分析,利用 MOGA 算法求得 Pareto 最优解,最后对优选方案进行仿真验证。

3.1 构建数学模型

根据改进方案的结构特点,以补强板的高度 P_1 、长度 P_2 、半厚度 P_3 作为设计变量 x ,分别设定其参数变化范围(为减少计算量,上下两块补强板对称分布,对称处的结构参数设置为相同尺寸);选取真空泵站的最大变形量 δ_{\max} 、最大应力值 σ_{\max} 和质量 M 作为优化目标;以最大变形量 δ_{\max} 不超过 0.706 mm,最大应力值 σ_{\max} 不超过 80 MPa 作为优化目标约束条件;在保证真空泵站的强度、刚度满足要求的前提下实现轻量化设计。建立真空泵站多目标优化数学模型如下:

$$\begin{cases} \text{find : } x = [P_1, P_2, P_3]^T \\ F(x) = \min[M] \\ \delta_{\max} \leq 0.706 \text{ mm} \\ \sigma_{\max} \leq 80 \text{ MPa} \\ 20 \text{ mm} \leq P_1 \leq 40 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \leq P_2 \leq 40 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq P_3 \leq 4 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

3.2 CCD 试验设计

中心复合设计(Central Composite Design, CCD)是最常见的响应面试验设计方法之一,该方法可有效预估因素的主效应、交互作用以及二次效应。在仿真软件中设置补强板各设计变量的取值范围,选用可旋转型中心复合设计方式以保证不同方向上预测精度的一致性,软件会在各设计变量所限定的取值范围内自动生成 15 个试验样本点。对这些样本点进行参数化建模和仿真迭代求解,利用整体模型求解真空泵站的变形量和质量,利用子模型技术

求解补强板处的等效力,15 个样本点及其仿真结果如表 3 所示。

表 3 中心复合设计样本点及其仿真结果

Tab. 3 The sample points of central composite design and relevant simulation results

编号	P_1 /mm	P_2 /mm	P_3 /mm	σ_{\max} /MPa	δ_{\max} /mm	M /kg
1	30.000	30.000	3.0000	79.982	0.46157	10.048
2	20.000	30.000	3.0000	104.328	0.53531	10.035
3	40.000	30.000	3.0000	74.534	0.41613	10.062
4	30.000	20.000	3.0000	86.759	0.51349	10.035
5	30.000	40.000	3.0000	85.108	0.42981	10.062
6	30.000	30.000	2.0000	81.227	0.48295	10.036
7	30.000	30.000	4.0000	77.705	0.44330	10.061
8	24.054	24.054	2.4054	89.950	0.53736	10.029
9	35.946	24.054	2.4054	85.965	0.47551	10.040
10	24.054	35.946	2.4054	97.923	0.49533	10.040
11	35.946	35.946	2.4054	73.361	0.42044	10.055
12	24.054	24.054	3.5946	87.143	0.51217	10.039
13	35.946	24.054	3.5946	80.505	0.45077	10.054
14	24.054	35.946	3.5946	94.738	0.47183	10.054
15	35.946	35.946	3.5946	70.501	0.39946	10.077

3.3 Kriging 响应面分析

响应面法(RSM)是一种基于统计学的优化方法,其利用有限的试验数据,通过构建数学代理模型近似表达复杂系统的输入与输出关系,从而预测系统的性能。Kriging 代理模型是一种基于随机过程理论的多维插值求解方法,能够同时兼顾全局和局部的共同影响因素,该方法可以显著提升拟合精度,尤其是处理高度非线性优化问题时表现出色。因此, Kriging 模型被广泛应用于结构优化设计、材料性能预测等领域。由于 Kriging 模型是一种近似模型,因此必须对其拟合优度进行评价。Kriging 模型的拟合度通常用决定系数 R^2 来判断:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中, y_i 是样本点的真实值; \hat{y}_i 是响应面模型对样本点的预测值; \bar{y} 是样本点真实值的平均值。 R^2 越接近于 1,说明所构建的响应面函数与设计变量之间的规律拟合得越精确。如果响应面模型达不到预设精度的要求,需要增加试验次数或更换响应面模

型来提升响应面拟合的准确性。

求解得到 Kriging 响应面模型的拟合优度如表 4 所示。从表中可知, 3 个优化目标的响应面拟合度均为 1, 表明 King 模型的拟合准确度已达到最优。

表 4 Kriging 模型的拟合优度

Tab. 4 Goodness of fit results for Kriging model

优化目标	最大等效应力	最大变形量	几何质量
决定系数 R^2	1	1	1

Kriging 模型的归一化拟合曲线如图 8 所示。在归一化拟合曲线中, 真实值与预测值越接近, 即两者越接近 45° 对角线, 响应面模型的拟合效果越准确。从图中可以看出, 泵站质量、最大变形量和最大等效应力所对应的点均分布在 45° 对角线上, 表明样本点的真实值与响应面的预测值之间的拟合精度良好, 预测准确度高, 因此通过 Kriging 模型得到的响应面符合优化设计需求。

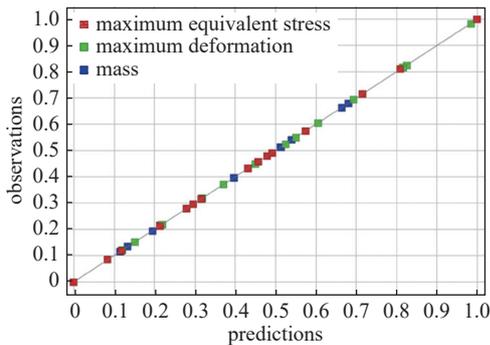


图 8 响应面的归一化拟合曲线

Fig. 8 Normalized fitted curve of response surface model

敏感性分析是一种用于评估响应面模型中优化目标对设计变量的敏感程度的方法。在结构优化中, 敏感性可有效反映样本拟合后响应面模型的设计变量对于优化目标的影响程度, 该值的正负代表设计变量与优化目标的正负相关性。通过敏感性分析, 可有效识别出对优化目标影响程度较大的设计变量, 为结构优化提供参考。图 9 展示了补强板 3 个设计变量对于真空泵站 3 个优化目标的敏感性。从图中可看出, 补强板高度 P_1 对最大等效应力的影响十分明显, 且呈负相关; 补强板高度 P_1 和长度 P_2 对最大变形量的影响较大, 并且这两个变量均与最大变形量呈负相关; 补强板的高度 P_1 、长度 P_2 、半厚度 P_3 对质量的影响相对均衡, 且均为正相关。

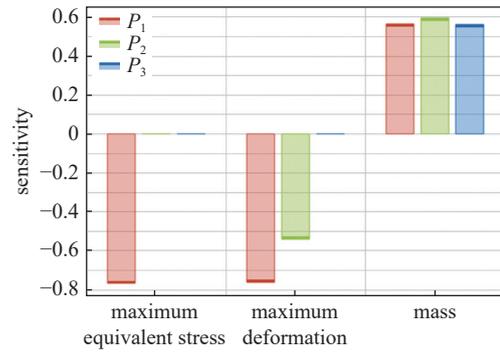


图 9 敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis

基于 Kriging 模型, 绘制设计变量对优化目标的 3D 响应面如图 10、11、12 所示; 从图 10 可看出, 补强板的高度 P_1 、长度 P_2 、半厚度 P_3 这 3 个设计变量与最大等效应力呈非线性关系, 且最大应力值的变化比较剧烈。从图 11 可发现, 最大变形量与设计变量之间呈现近似线性关系, 并且随着设计变量的增大, 最大变形量不断降低。从图 12 可知, 真空泵站的质量随着 3 个设计变量的增加呈线性增长趋势。由于随着设计变量的增加, 最大变形量与几何质量呈相反变化趋势, 因此不存在一组设计变量能使真空泵站的 3 个优化目标同时达到最小, 故寻找最优设计变量组合实际上是寻找真空泵站多个优化目标之间的最佳平衡点。

3.4 MOGA 算法寻优

多目标优化问题的求解方法可分为归一化方法和非归一化方法两类。以加权法为代表的归一化方法, 通过将多目标函数转化为单目标函数进行求解; 然而, 加权法在目标权重的分配时, 往往受到优化决策者主观判断的影响。相比之下, 多目标遗传算法 (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) 作为非归一化方法中的典型代表, 通过非支配排序 (Non-Dominated Sorting) 算法和多样性保持策略, 生成分布均匀的 Pareto 前沿。Pareto 前沿是全部 Pareto 最优解的集合, 在多目标优化问题中, 由于目标之间相互冲突, 无法通过调整设计变量使所有目标同时达到最优, 因此 Pareto 前沿上的最优解实际代表的是不同目标间的最佳平衡点。

本文将泵站质量、最大变形量、最大等效应力作为优化目标, 利用多目标遗传算法 (MOGA) 进行优化求解。此算法的详细参数设置如表 5 所示, 经过 9 次迭代 7136 次评估后基本达到收敛, MOGA

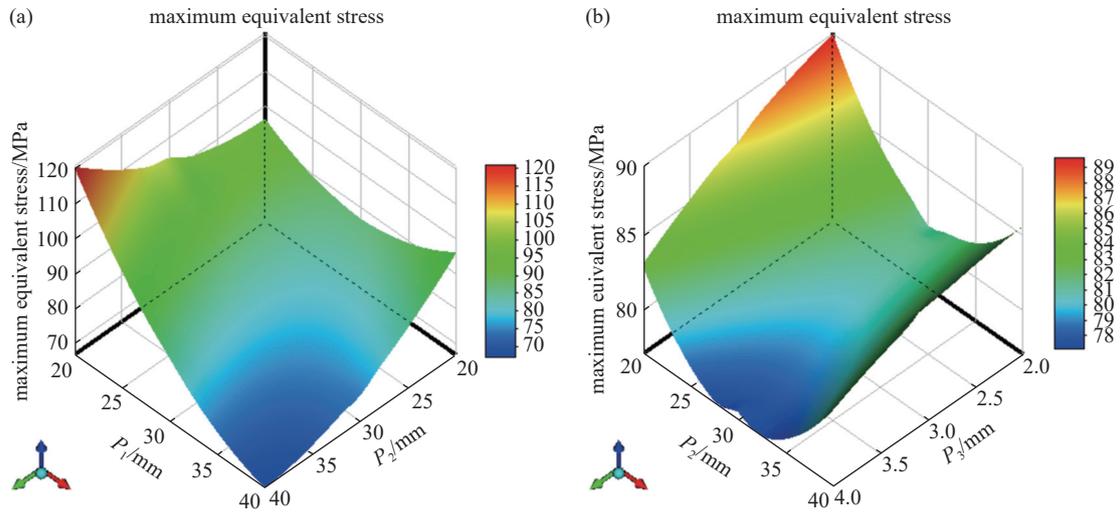


图10 最大等效应力响应面(a)最大应力与 P_1 和 P_2 ; (b)最大应力与 P_2 和 P_3

Fig. 10 Maximum equivalent stress response surface (a) maximum equivalent stress with P_1 and P_2 ; (b) maximum equivalent stress with P_2 and P_3

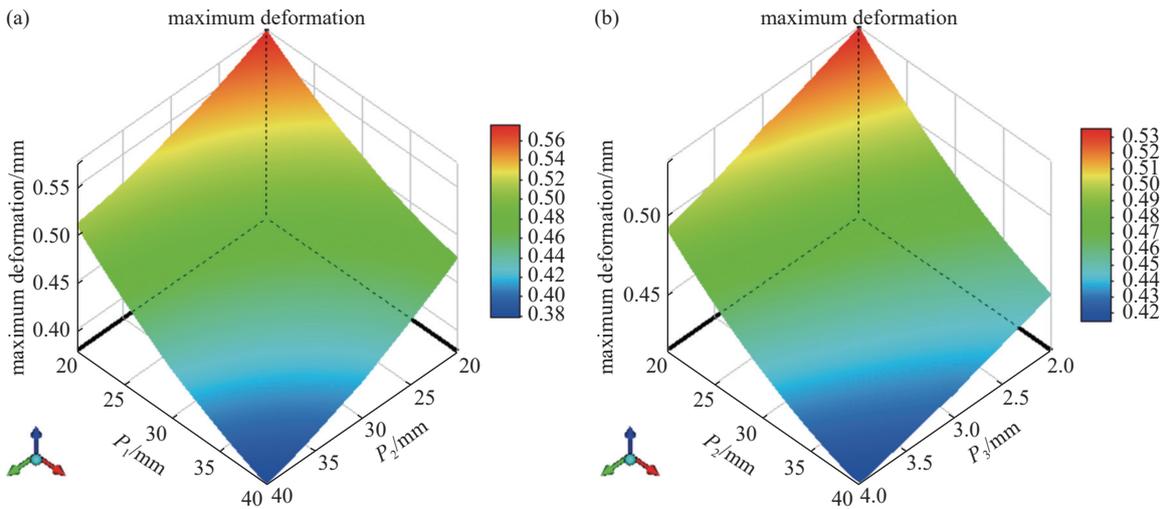


图11 最大变形量响应面(a)最大变形量与 P_1 和 P_2 ; (b)最大变形量与 P_2 和 P_3

Fig. 11 Maximum deformation response surface (a) maximum deformation with P_1 and P_2 ; (b) maximum deformation with P_2 and P_3

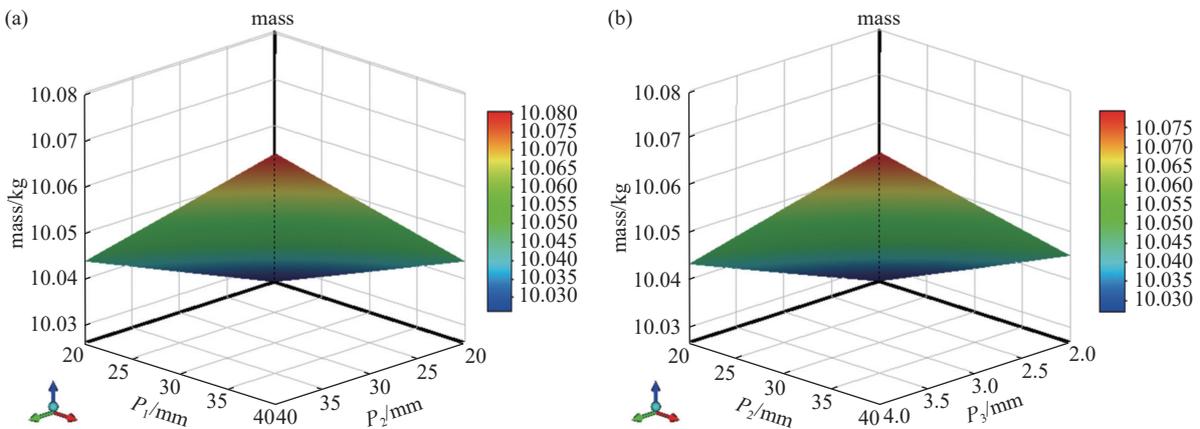


图12 质量响应面(a)质量与 P_1 和 P_2 ; (b)质量与 P_2 和 P_3

Fig. 12 Mass response surface (a) mass with P_1 and P_2 ; (b) mass with P_2 and P_3

优化算法收敛曲线如图 13 所示。从最优 Pareto 解集中选出的 3 组候选点如表 6 所示。通过观察表 6 中的数据, 3 个候选点的参数值比较接近, 结合工程实际对于参数尺寸进行圆整, 最优设计参数组合 P_1 、 P_2 和 P_3 最终选定为 33 mm, 29 mm 和 2 mm。

表 5 MOGA 算法参数设置

Tab. 5 Multi-objective genetic algorithm parameters setting

参数	数值
预计评估数	14400
初始样本数量	3000
迭代样本数	600
最大允许帕累托百分比/%	70
收敛稳定百分比/%	2
最大迭代次数	20
候选点数	3

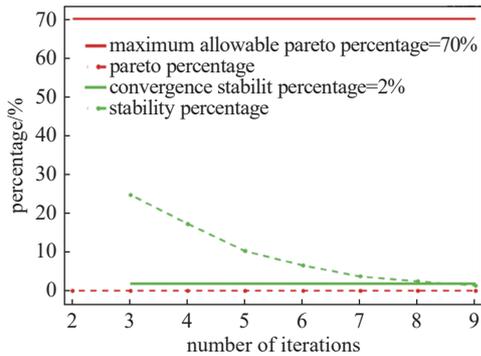


图 13 MOGA 优化算法收敛曲线图

Fig. 13 Convergence diagram of multi-objective genetic algorithm

表 6 优化结果候选组合

Tab. 6 Candidate combination of optimization results

	P_1 /mm	P_2 /mm	P_3 /mm	σ_{max} /MPa	δ_{max} /mm	M /kg
候选点 1	32.221	28.909	2.0034	80.000	0.47526	10.037
候选点 2	32.411	28.759	2.0049	79.994	0.47494	10.037
候选点 3	32.799	28.503	2.0023	79.978	0.47424	10.037

3.5 优化方案仿真验证

为了验证圆整后所确定的最优设计方案的可行性, 还需根据圆整后的优化方案建立相应的三维模型并开展静力学仿真校核。优化后的真空泵站其变形云图及补强板区域的应力云图分别如图 14、15 所示, 优化前后的设计参数和仿真结果列于表 7。结合仿真结果对比分析, 优化后真空泵站的结构性

能得到了显著改善: 最大等效应力降低至 76.116 MPa, 最大变形量减小至 0.47151 mm, 较优化前分别降低了 32.59% 和 33.34%, 有效提升了结构的安全性; 同时, 泵站质量仅增加了 0.25%, 满足了轻量化的设计要求。优化结果也表明, 综合了参数化建模、试验设计、响应面分析和 MOGA 算法的多目标优化方法, 可以通过科学计算快速获取最优参数组合, 实现安全性与轻量化之间的平衡, 有效提升了真空腔体的综合性能, 这也为加速器领域类似腔体的设计与优化工作提供可靠的理论依据。

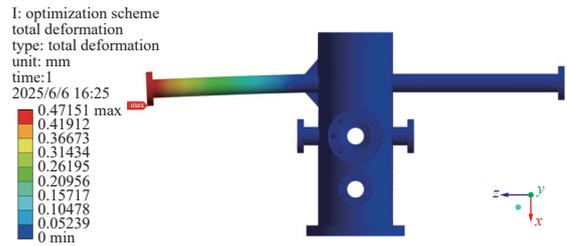


图 14 优化方案的变形云图

Fig. 14 Deformation cloud map of optimization scheme

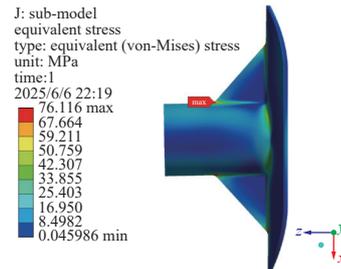


图 15 优化方案中补强板处的等效应力云图

Fig. 15 Equivalent stress cloud map of the reinforced plate in optimization scheme

表 7 优化前后仿真结果对比

Tab. 7 Comparison of simulation results before and after optimization

变量	优化前	优化后
P_1 /mm	15	33
P_2 /mm	15	29
P_3 /mm	1	2
σ_{max} /MPa	112.92	76.116
δ_{max} /mm	0.70736	0.47151
M /kg	10.013	10.038

4 结论

本文基于静力学仿真和子模型技术, 对真空泵站设计方案进行仿真分析并提出优化方案。为获

得补强板各设计参数的最优组合,通过中心复合设计方法和参数化仿真获得试验样本空间,建立 Kriging 模型并进行响应面分析,采用 MOGA 算法求得 Pareto 最优解,最后对优选方案进行仿真验证。结果表明:优化后的真空泵站其最大等效应力为 76.116 MPa,最大变形量为 0.47151 mm,而泵站质量相比优化前仅增加了 0.25%。最终的优化方案既有效提升了结构的安全性,又满足了轻量化的设计要求,实现了安全性与轻量化之间的平衡。本文研究内容也证明了多目标优化设计方法的科学性和可行性,该方法可为真空腔体的设计优化提供理论依据和技术参考,在加速器领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liu Z, Wan W S, Wang D. Development of large-scale user facilities for photon science in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2024, 46(3): 161–172 (刘志, 万唯实, 王东. 中国光子大科学装置的发展 [J]. *自然杂志*, 2024, 46(3): 161–172 (in Chinese))
- [2] Dong R C, Feng J Z, Wang X C, et al. Atomic, molecular and cluster applications of short-wavelength free-electron lasers[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2024, 46(3): 203–220 (董瑞超, 冯金泽, 王新成, 等. 短波自由电子激光在原子分子和团簇中的应用 [J]. *自然杂志*, 2024, 46(3): 203–220 (in Chinese))
- [3] Zhang H, Huang L M, Zhao F, et al. Design and thermal structure analysis of a dump beam window for high repetition frequency[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(3): 88–93 (张浩, 黄礼明, 赵峰, 等. 一种高重复频率废束桶束窗的设计及热结构分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(3): 88–93 (in Chinese))
- [4] Zhen T T, Deng R B, Gao F, et al. Finite element analysis and measurement of vibration responses of cryomodule 1.3 GHz superconducting accelerator[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, 45(1): 24–30 (甄亭亭, 邓荣兵, 高飞, 等. 1.3 GHz 超导加速模组振动响应有限元分析及测试 [J]. *核技术*, 2022, 45(1): 24–30 (in Chinese))
- [5] Liu K X, Hao J K, Quan S W, et al. SRF accelerating technology applied in light sources[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(10): 134–142 (刘克新, 郝建奎, 全胜文, 等. 应用于光源的射频超导加速技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(10): 134–142 (in Chinese))
- [6] Mi Z H, Sha P, Sun Y, et al. Operation of domestic 500 MHz superconducting cavity for BEPC II [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(8): 143–147 (米正辉, 沙鹏, 孙毅, 等. BEPC II 国产 500 MHz 超导腔运行综述 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(8): 143–147 (in Chinese))
- [7] Pu X Y, Hou H T, Ma Z Y, et al. Horizontal test of 500 MHz superconducting cavity for SSRF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31(11): 121–126 (蒲小云, 侯洪涛, 马震宇, 等. 上海光源 500MHz 超导腔水平测试 [J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(11): 121–126 (in Chinese))
- [8] Li H, Jobs M, Kern R S, et al. Characterization of a $\beta=0.5$ double spoke cavity with a fixed power coupler[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 927: 63–69
- [9] Li H, Dai J P, Sha P, et al. Development of a 325 MHz $\beta=0.12$ superconducting single spoke cavity for China-ADS[J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38(7): 077008
- [10] Gonnella D, Eichhorn R, Furuta F, et al. Nitrogen-doped 9-cell cavity performance in a test cryomodule for LCLS-II [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(2): 935–937
- [11] Harms E, Hocker A. Performance of 3.9 GHz SRF cavities at Fermilab's ILCTA_MDB horizontal test stand[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, 19(3): 1412–1415
- [12] Liu B Q, Peng X H, Zhai J Y, et al. Development and testing of vacuum system for 1.3 GHz 9-Cell superconducting accelerator module[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(5): 538–541 (刘佰奇, 彭晓华, 翟纪元, 等. 1.3 GHz 9-cell 超导腔加速组元的真空系统 [J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(5): 538–541 (in Chinese))
- [13] Yue T, He C F, Wang X L, et al. Simulation analysis of ultimate vacuum scheme for coupler warm windows[J]. *Vacuum (China)*, 2024, 61(4): 52–57 (岳泰, 何超峰, 王希龙, 等. 耦合器热窗的极限真空方案模拟分析 [J]. *真空*, 2024, 61(4): 52–57 (in Chinese))
- [14] Li P X, Yang T, Yang R J, et al. Design and thermal analysis of a high-power Faraday cup for CSNS-II [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(4): 85–89 (李鹏馨, 杨涛, 杨仁俊, 等. CSNS-II 高功率法拉第筒设计与热分析 [J]. *机电工程技术*, 2023, 52(4): 85–89 (in Chinese))
- [15] Zhu X X, Tan W B, Su Z F, et al. Using Faraday cup for measurement of intense pulsed electric beams[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(3): 536–540 (朱晓欣, 谭维兵, 苏兆峰, 等. 利用法拉第筒测试环形强流电子束束流 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(3): 536–540 (in Chinese))
- [16] Xu K P, Hui H, Gong J G. Nonlinear numerical simulation of the strain-strengthening vacuum insulated vessel[J].

- [Chemical Engineering \(China\)](#), 2016, 44(9): 70–74 (徐鹏鹏, 惠虎, 宫建国. 应变强化型真空绝热容器的非线性数值模拟 [J]. [化学工程](#), 2016, 44(9): 70–74 (in Chinese))
- [17] He S D, Wang H X, Liu B R, et al. Structural stability analysis and test evaluation for large vacuum vessel[J]. [Chinese Journal of Vacuum Science and Technology](#), 2023, 43(5): 410–417 (何绍栋, 王华新, 刘宝瑞, 等. 某大型真空容器结构稳定性分析与试验评价 [J]. [真空科学与技术学报](#), 2023, 43(5): 410–417 (in Chinese))
- [18] Wang L, Ren X F. Structural strength analysis for an alien vacuum shell[J]. [Machinery Design and Manufacture](#), 2011(8): 191–193 (王亮, 任晓芳. 异形真空室壳体的结构强度分析 [J]. [机械设计与制造](#), 2011(8): 191–193 (in Chinese))
- [19] Cui Z W, Xie Y L, Gu Y M, et al. Structural design and optimization of vacuum vessel for negative ion source test facility[J]. [Chinese Journal of Vacuum Science and Technology](#), 2023, 43(3): 231–237 (崔志伟, 谢远来, 顾玉明, 等. 负离子源测试平台真空室结构设计及优化 [J]. [真空科学与技术学报](#), 2023, 43(3): 231–237 (in Chinese))
- [20] Wan G H, Wang Q L, Wu M P, et al. Dynamic analysis and response surface optimization of pipe winch barrel[J]. [Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering](#), 2023, 42(10): 1592–1601 (万光海, 王全龙, 武美萍, 等. 管绞车筒体动力学分析及响应面优化研究 [J]. [机械科学与技术](#), 2023, 42(10): 1592–1601 (in Chinese))
- [21] Wei T, Li M, Huang H, et al. Bus rear high floor skeleton design based on response surface optimization[J]. [Machine Design and Research](#), 2022, 38(1): 161–167 (韦韬, 李明, 黄洪, 等. 基于响应面优化的客车后地板骨架设计 [J]. [机械设计与研究](#), 2022, 38(1): 161–167 (in Chinese))
- [22] Huang K, Wen Y P, Zhou X Z. Multi-objective optimization of high-speed gear shaft using response surface method[J]. [Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering](#), 2023, 42(7): 1129–1139 (黄柯, 文永蓬, 周贤周. 利用响应面法的高速齿轮轴多目标优化方法 [J]. [机械科学与技术](#), 2023, 42(7): 1129–1139 (in Chinese))
- [23] Ling J X, Li H Y, Wang Q T, et al. Structural optimization and lightweighting of tyre forming machine rolling support[J]. [Modern Manufacturing Engineering](#), 2023(10): 126–134 (凌静秀, 李浩宇, 王乾廷, 等. 基于 Kriging 模型和 MOGA 的轮胎成型机辊压支架的轻量化研究 [J]. [现代制造工程](#), 2023(10): 126–134 (in Chinese))
- [24] Chen G X, Cao Y, Wu J X, et al. Welding platform gantry structure lightweight design[J]. [Machinery Design and Manufacture](#), 2024(4): 194–199 (陈国雄, 曹阳, 吴家雄, 等. 焊接平台龙门架结构轻量化设计 [J]. [机械设计与制造](#), 2024(4): 194–199 (in Chinese))
- [25] Li Y T, Lian H Q. Bionic multi-objective optimization design of BFPC column structure[J]. [Modern Manufacturing Engineering](#), 2024(12): 87–93+107 (李有堂, 连虎强. BFPC 立柱结构仿生多目标优化设计 [J]. [现代制造工程](#), 2024(12): 87–93+107 (in Chinese))
- [26] Liu L F, Feng X Y, Li P G, et al. Multi-objective optimization of tire dynamic balancing machine spindle based on response surface method[J]. [Manufacturing Technology and Machine Tool](#), 2025(2): 171–176+193 (刘立富, 冯显英, 李沛刚, 等. 基于响应面法的轮胎动平衡机主轴多目标优化 [J]. [制造技术与机床](#), 2025(2): 171–176+193 (in Chinese))
- [27] Li C, Xu K, Pang N, et al. Parameter optimization of marine steel pile removal equipment's surrounding structure[J]. [Journal of Machine Design](#), 2025, 42(3): 150–156 (李超, 徐凯, 庞楠, 等. 海洋钢桩清除机具环抱结构参数优化 [J]. [机械设计](#), 2025, 42(3): 150–156 (in Chinese))
- [28] Luo J A, Zhou X Y. Study on stress singularity in finite element analysis[J]. [Journal of Langfang Normal University \(Natural Science Edition\)](#), 2021, 21(4): 42–45+50 (罗吉安, 周星越. 有限单元法分析中应力奇异问题的研究 [J]. [廊坊师范学院学报 \(自然科学版\)](#), 2021, 21(4): 42–45+50 (in Chinese))
- [29] Liu S Y, Huang C Y. Research on stress singularity problems of finite element analysis based on SolidWorks simulation[J]. [Modern Manufacturing Technology and Equipment](#), 2020(6): 69–72 (刘三勇, 黄才英. SolidWorks Simulation 有限元分析中应力奇异问题的研究 [J]. [现代制造技术与装备](#), 2020(6): 69–72 (in Chinese))
- [30] Wang X, Qi Q S. Research on stress singularity of finite element analysis[J]. [Mechanical Engineering and Automation](#), 2014(3): 61–63 (王鑫, 戚其松. 有限元分析中应力奇异问题的处理 [J]. [机械工程与自动化](#), 2014(3): 61–63 (in Chinese))
- [31] State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 20801.2-2020 Pressure piping code-Industrial piping-Part 2: Materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020 (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 20801.2-2020 压力管道规范 工业管道 第 2 部分: 材料 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020 (in Chinese))
- [32] Zhou L D, Jiang N. Allowable stress and strain of strain hardening of cryogenic vessels of S30408 austenitic stainless steels[J]. [Pressure Vessel Technology](#), 2011, 28(2): 5–10 (周连东, 江楠. 国产 S30408 奥氏体不锈钢应变强

- 化低温容器许用应力及应变确定 [J]. 压力容器, 2011, 28(2): 5-10 (in Chinese))
- [33] Zheng B, Wang N N. Application of guiding cantilever method in design of piping flexibility and supports[J]. *Process Equipment and Piping*, 2021, 58(4): 75-79 (郑彬, 汪妮妮. 导向悬臂法在管道柔性和支架设计中的应用 [J]. *化工设备与管道*, 2021, 58(4): 75-79 (in Chinese))
- [34] Song S Y, Yin F. Sain Vaint principle of meshing in finite element method and its application[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2012(8): 63-65 (宋少云, 尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用 [J]. *机械设计与制造*, 2012(8): 63-65 (in Chinese))
- [35] Gao Y H, Dong J H, Gao B J. Application of sub-model technique in stress analysis and structure optimization of the supporting region of large spherical tank[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(5): 735-739 (高艳红, 董俊华, 高炳军. 子模型技术在大型球罐支撑区应力分析及结构优化中的应用 [J]. *机械强度*, 2010, 32(5): 735-739 (in Chinese))
- [36] Gao B J, Gao Y H, Li J H. Application of sub-model technique in stress analysis of spherical tank[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2009, 26(5): 27-31 (高炳军, 高艳红, 李金红. 子模型法在球罐应力分析中的应用 [J]. *压力容器*, 2009, 26(5): 27-31 (in Chinese))

文章简介

本文以超导加速模组水平测试平台的束流真空泵站为研究对象,开展结构仿真分析和多目标优化设计,以满足其安全性和轻量化要求。首先,基于静力学仿真和子模型技术,分析真空泵站的强度和刚度并提出优化方案。随后,通过中心复合设计(CCD)方法和参数化仿真获得试验样本空间,建立克里金(Kriging)代理模型并进行响应面分析。最后,采用多目标遗传算法(MOGA)求得帕累托(Pareto)最优解,并对优选方案进行仿真验证。结果表明:优化后的真空泵站其最大等效应力为 76.116 MPa,最大变形量为 0.47151 mm,而泵站质量相比优化前仅增加了 0.25%,优化结果满足多目标优化的设计要求,证明了所述多目标优化方法的可行性。本文研究内容可为加速器领域真空腔体的设计优化提供参考。

通讯作者简介



李蕊,女,博士,深圳先进光源研究院研究员,担任深圳中能高重复频率 X 射线自由电子激光项目超导加速器关键部件研发及测试平台负责人。其从事超导加速器射频性能与低温测试技术研究,曾长期就职于欧洲著名的超导加速器实验室。具有丰富的大型项目的主持和管理经验,撰写了大量工程技术报告,发表论文 28 篇,加速器国际会议口头报告 10 次,担任国际超导加速器合作联盟(TTC)技术委员会委员、国际合作委员会委员,担任 2018、2023、2024 年国际超导加速器合作联盟年会(TTC)分会场主席。

第一作者简介



赵凡,男,博士,工程师,主要研究方向为真空科学与技术,负责超导加速模组水平测试平台真空系统的设计、集成、调试、运行与维护等工作。累计在 *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*、*Energy*、*Applied Surface Science*、*Powder Technology*、《真空科学与技术学报》等国内外重要学术期刊上发表论文 16 篇,其中以第一作者身份发表 SCI 论文 5 篇;获得授权专利 5 项,作为主要起草人获批地方标准 1 项。

团队简介

研究团队依托于深圳先进光源研究院,一直致力于深圳自由电子激光装置的建设,促进国际学术交流,推动深圳自由电子激光平台的国际化。岗组团队专业方向包括超导射频、磁学、机械、控制、真空、仪器仪表等,负责超导腔关键技术及测试平台设计建造,超导腔模组测试系统研发及低温测试。