基于超导高重频加速器的大连先进光源束流测试平台真空系统

赵峰 魏建平 常仁超 朱潇潇 赵禹 张浩 李磊 林涵文 尉伟*
(深圳先进光源研究院 深圳 518000)

Vacuum System Design and Key Technologies for the DALS Beam Test Platform Based on a Superconducting High-repetition-rate Accelerator

ZHAO Feng, WEI Jianping, CHANG Renchao, ZHU Xiaoxiao, ZHAO Yu, ZHANG Hao, LI Lei, LIN Hanwen, WEI Wei*
(*Institute of Advanced Light Source Facilities*, *Shenzhen*, *Shenzhen* 518000, *China*)

Abstract The Dalian Advanced Light Source (DALS) is a planned extreme ultraviolet (EUV) free-electron laser (FEL) facility based on a superconducting continuous-wave linear accelerator architecture. Its core objective involves generating high-brightness FEL radiation with 1 MHz repetition frequency and wavelength coverage of 6.5-180 nm using a 1 GeV electron beam. As a critical pre-research project for DALS construction, the DALS beam test platform aims to overcome key technological bottlenecks in high-quality beam generation. This work focuses on the vacuum system design and critical technologies for the room-temperature beamline section of the test platform employing superconducting high-repetition-rate accelerators. Based on beam physics requirements, systematic design and optimization were implemented through theoretical analytical calculations and Moflow+ numerical simulations. A comprehensive solution from theoretical design to engineering implementation was achieved through software simulations (SynRad+ and Workbench) and practical verification, with particular emphasis on three key technologies for superconducting accelerator beamline vacuum system adaptation: optimized design of electromagnetic field-constrained CF flange radiofrequency shielding structures, structural design and steady-state thermal analysis of non-standard vacuum chambers, and precision control with modular installation techniques for ultra-clean vacuum systems. Current vacuum test results for the room-temperature beamline section demonstrate: injection segment vacuum better than 5×10^{-8} Pa, beam distribution and diagnostic section vacuum better than 5×10^{-6} Pa, and differential pumping cavity vacuum downstream of superconducting modules better than 2×10^{-8} Pa with residual gas composition (mass numbers >44) below 1% of total residual gas and low hydrogen molecule content - all meeting superconducting accelerator operational requirements. The design specifications and technical framework developed in this project provide crucial technical support for subsequent full-system vacuum engineering implementation of superconducting accelerators.

Keywords Extreme ultraviolet free-electron laser (FEL) facility，Beam test platform，Vacuum system design，impedance，Steady-state thermal analysis，Ultra-clean vacuum

摘要 大连先进光源(DALS)是规划中基于超导连续波直线加速器架构的极紫外自由电子激光综合装置,其核心目标是通过 1 GeV 电子束流产生重复频率 1 MHz、波长覆盖 6.5−180 nm 的高亮度自由电子激光装置。作为 DALS 建设的关键预研

收稿日期: 2025−05−19
基金项目: 深圳市科技计划项目（JCYJ20220530140807017）
* **联系人:** E-mail: weiwei@mail.iasf.ac.cn

项目，DALS 束流测试平台旨在突破高品质束流生成的核心技术瓶颈。工作面向使用超导高重频加速器的束流测试平台常温段真空系统的真空系统设计及关键技术，基于束流物理参数需求，通过理论解析计算与 Moflow+数值模拟进行了真空系统的设计及优化。通过软件仿真（SynRad+和 Workbench）与实际验证实现了从理论设计到工程实现的系统化解决，重点解决了超导加速器束流线真空系统适配的三项关键技术：基于电磁场约束的 CF 法兰射频屏蔽结构优化设计、异形真空室的结构设计与稳态热分析、以及超净真空系统的精密调控与模块化安装工艺。目前束流测试平台常温束流真空段的真空调试结果为，注入段真空度优于 5×10^{-8} Pa，束流分配及诊断线段真空度优于 5×10^{-6} Pa，超导模组下游差分腔体真空度优于 2×10^{-8} Pa 且残余气体中质量数大于 44 的气体占全部残余气体比例小于 1%、及具有较低的氢分子组分，符合超导加速器运行要求。项目中形成的设计及技术规范和体系为后续超导加速器全系统真空工程实施提供了重要技术支持。

关键词 极紫外自由电子激光装置 束流测试平台 真空系统设计 阻抗 稳态热分析 超净真空

中图分类号： TL35; TB75 **文献标识码：** A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202505004

全球自由电子激光（FEL）装置（如欧洲 XFEL、美国 LCLS、上海 SXFEL 等）的快速发展，推动了基础科学到工业应用的革命性突[1-3]。自 2016 年首次出光以来，大连相干光源（DCLS）已成为中国第一个高增益 FEL 用户设施，它提供波长范围为 50−150 nm 的 FEL 脉冲，重复频率可以达到达 50 Hz，已取得显著成果[4-5]。为满足更高重复频率（1 MHz）及更宽波长覆盖（6.5−180 nm）的科学需求，大连先进光源（DALS）提出建设基于超导连续波直线加速器的新型 FEL 装置，而为保证 DALS 装置建设及运行的正常开展需要先建设一个 1 MHz 高重频超导连续波注入器测试平台，该平台可以同时兼容 DC 电子枪与 VHF 电子枪测试需求，并且可以验证超导加速模组的电子加速性能。

自由电子激光装置的电子束团在束流传输过程中单次通过真空室，研究表明残余气体分子与高能电子的碰撞几率随真空度提升呈指数衰减关系[6-7]，因此对系统真空度提出要求以保证束流寿命和束流品质；超导直线加速器相比于传统加速器对束流品质要求更为严格。真空室结构材料导电特性、内壁的非光滑是束流尾场（Wakefield）效应及束流耦合阻抗（Beam coupling impedance）的主要来源[8]，也是阻抗驱动束流集体不稳定性的根源。因此束流通过区域的真空通道必须采用阻抗屏蔽设计，通过优化设计真空室机械结构及连接件——如连接法兰、波纹管、过渡段等——以减小真空阻抗；超导加速器的超导腔是加速器中的重要组件，将电子加速到极高的能量，超导腔对洁净度要求极高[9-10]，其表面缺陷或者附着的颗粒物会造成超导腔失超甚至损坏，因此为保证模组运行的寿命和稳定性，模组部分及前后 20 m 内要求超净真空环境（PF, Particle free Ultra-high Vacuum）。

大连先进光源（DALS）预研项目-束流测试平台，装置总长约为 60 m，由电子枪、聚束器、3.9 GHz 加速模、1.3 GHz 加速模组、束流传输段、偏转腔、废束桶等组成，具体的物理布局见图 1。束流测试平台采用分段式真空系统设计，沿 60 m 束线布局形成梯度真空结构。系统由电子枪注入段（压强小于 5×10^{-8} Pa）、超导加速模组（压强小于 5×10^{-8} Pa）及束流分配及诊断段（压强小于 5×10^{-6} Pa）构成。在工程实现层面，重点攻克了超导加速器束流线适配的三项核心技术：（1）加速器中真空室连接处通常采用 CF 类型的刀口密封法兰，传统法兰和铜圈的连接过渡段会形成局部不平滑过渡段，因此成为真空阻抗的主要来源之一，项目中设计了一种 RF 屏蔽型法兰−密封圈连接结构，通过实现法兰−密封圈-法兰预紧密封后的平滑过渡，有效抑制了标准法兰−铜圈结构产生的谐振效应；（2）电子束在磁铁中的运动轨迹发生偏转时会产生辐射光，辐射光沉积在真空室表面会引起温升造成放气量增加，本文应用 SynRad+和 workbench热力学模块建立非均匀功率密度分布模型，对平台上所有真空室进行了温升仿真计算，结果显示最大温升不超过 0.007℃ 满足设计要求。（3）低温模组内的真空度在工作时（液氦低温状态下）可达到 1.3×10^{-8} Pa，考虑到超导铌腔表面的工作稳定性，要求进入低温模组内超导腔部分的气体负载尽可能小，以阻止残余气体在超导腔低温表面的积聚，重要的是减少残余气体中对铌超导特性有重大影响的氢的含量，同时与低温模组束流管道直接连接的真空室和腔体，还必须满足保证超导腔工作的超洁净要求−即“Particle free”，项目中对超导加速器室温真空系统提出了一套综合性的微粒控制方案，从≥0.3 μm 量级颗粒物的产生、迁移及污染控制方面进行了多维度系统解决。本项目开

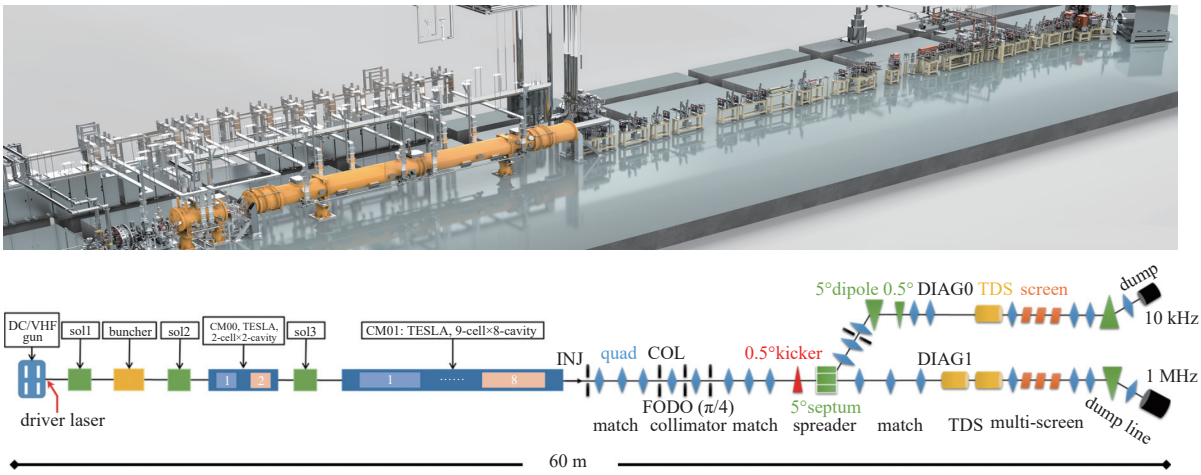

图1　束流测试平台物理布局

Fig. 1　The physical layout of the beam test platform

展的相关工作对大连先进光源(DALS)、深圳高重频自由电子激光(S3FEL)及其他基于超导加速器的自由电子激光装置的建设具有重要参考价值。

1　真空系统设计

1.1　真空系统设计要求

DALS 预研项目常温段真空按空间划分为注入段真空(Buncher、模组间)、刮束段(差分段、差分段-kicker)及束流诊断线段真空，各段需获取并维持束流真空室内的超高真空环境(靠近电子枪和低温模组出入口的束流轨道部分静态真空优于 5×10^{-8} Pa，其余束流轨道部分真空度优于 5×10^{-6} Pa)，以满足束流寿命及其它束流不良抑制的要求。本文工作内容是室温段束流真空系统设计，室温束流真空段通过隔断阀门与电子枪和低温超导模组的真空段进行隔断，其分区段真空设计指标如表 1 所示。

表 1　不同区间的真空指标

Tab. 1　Vacuum specifications for different functional zones

序号	区间	静态真空度/Pa	漏率/ mbar·l/s	超净
1	注入段	$<5\times10^{-8}$	小于 1×10^{-10}	是
2	差分段	$<5\times10^{-8}$	小于 1×10^{-10}	是
3	差分段-kicker	$<5\times10^{-6}$	小于 1×10^{-10}	是
4	诊断线段	$<5\times10^{-6}$	小于 1×10^{-10}	否

1.2　理论计算

在真空系统设计之初需要对真空获得系统的泵分布，压强曲线等进行计算，从而得到满足要求的系统设计。当真空系统对恒定体积容器抽气时，真空系统对容器的有效抽速若以 S_e 表示，容器中的压强以 p 表示，则单位时间内系统所排出的气体流量即是 $S_e p$。容器中的压强变化率为 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$，容器内的气体减少量即是 $V\cdot\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$。根据真空系统抽气方程：

$$V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=-S_e p+Q_f+Q_s+Q_g+Q_l \qquad (1)$$

式中，V 是被抽容器的容积，由于随着抽气时间 t 的增长，容器内的压强 p 降低，所以容器内的压强变化率 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$ 为负值。则 $V\cdot\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$ 为负值，表示容器内气体的减少量。放气流量 Q_f、渗透气流量 Q_s、真空室内的气流量 Q_g 和漏气流量 Q_l 都是使容器内气体量增多的气流量。由极限真空定义，当 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t=0$，真空系统达到其极限真空。

对于基本的真空系统，真空室内的气体负荷通过流导为 C 的管道被真空机组或真空泵抽走。可用 p_j 和 S_e 分别表示真空容器出口的压强和真空机组对该口的有效抽速，p_p 和 S_p 分别表示真空泵或机组入口的压强和抽速。当管道中气体为稳定流动时，单位时间内流过管道任意截面的气流量都是相等的，则有表达式：

$$Q=p_j S_e=p_p S_p=p_i S_i=C(p_j-p_p) \qquad (2)$$

式中，p 为待求真空管内压强；Q 是系统总的放气量；C 为对抽气管道的流导。上式为真空系统的气体连续性方程，束流管路内的压强理论计算过程遵循此方程。

实际真空系统泵站位置放气、流导示意图如图 2 所示。离子泵与 NEG 泵的对系统的有效抽速(Se-sip 和 Se-neg)受泵站结构限制，根据上述真空系统的气体连续性方程，有效抽速计算公式为：

$$\frac{1}{S_e}=\frac{1}{S_p}+\frac{1}{C_1} \tag{3}$$

式中，C_1 为泵站流导，根据真空设计指标要求，此时腔体内属分子流流态，分子流下短圆管道（L<20 d）（20℃ 空气）流导的计算公式为：

$$C_1=\alpha*116*A \tag{4}$$

式中，A 为圆孔面积（m2），a 为克劳辛系数。则泵站外腔的真空度 p_1 为：

$$p_1=p_{j0}+\frac{Q_1+Q_2+Q_3}{S_{e-sip}+S_{e-neg}} \tag{5}$$

式中，p_{j0} 为真空泵的极限压力；Q_1 为泵站本底材料放气量（对于超高真空而言，真空腔体内壁材料放气是决定真空度的重要因素，因此理论计算考虑了此因素）；Q_2 为泵站下游设备通过管路传导的总的气流量；Q_3 为泵站上游设备通过管路传导的总的气流量。其中放气量 Q_1 是决定极限真空度的重要因素，其计算公式如下：

$$Q_1=\sum q_iA_i \tag{6}$$

式中，q_i 为真空系统中第 i 种材料单位表面积的放气速率；A_i 为第 i 种材料暴露在真空系统中的几何表面积。

由于屏蔽结构流导有限，管道内与泵站外腔有一定压差，根据屏蔽结构流导计算管道内压强 p_2，其计算公式为：

$$p_2-p_1=\frac{Q_2+Q_3}{C_2} \tag{7}$$

式中：屏蔽结构流导 C_2 为分子流下矩形薄壁窄缝（20℃ 空气）流导（单位：L/s），计算公式为：

$$C_2=n*11.6*K_j*a*b \tag{8}$$

式中：K_j 为矩形窄缝的形状系数，a、b 分别为矩形的两个边长（cm）；n 为单个屏蔽结构的矩形薄壁窄缝个数。由此即可求出管路内压强，根据计算结果对应进行真空布局优化。并且根据理论计算结果进行了束流常温段真空布局设计，其中注入段和模组后端差分段的真空布局如图 3 所示。

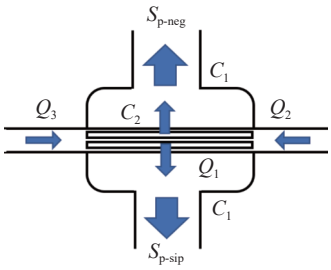

图2 泵站附近真空系统放气、流导示意图

Fig. 2 The degassing and flow conductance diagram of vacuum system near pumping station

1.3 真空系统压强分布仿真

针对复杂几何结构在超高真空环境下的稳态压强计算问题，传统理论分析方法面临显著制约。为此，本研究采用基于蒙特卡罗方法的分子流仿真软件 Molflow+[11]，通过构建三维 数值模型对初始真空系统布局开展高精度数值模拟。基于仿真结果揭示的流场特征与压强梯度分布规律，对原设计方案进行反馈式迭代，最终完成了真空系统压强分布的优化改进。

将束流测试平台分为 6 段分别进行压强分布仿真：电子枪出口（VHF/DC）-小模组入口（CM00）、小模组出口（CM00）-大模组入口（CM01）、大模组出口差分段（CM01-DP）、差分段（DP）-kicker、kicker-主线偏转腔（TD）以及主线偏转腔（TD）-主线末端废束筒（DMP）。仿真设置材料放气率[12]：不锈钢放气率 q_1=8.8E-12 mbar l/cm^2/s，铜放气率 q_2=4.0E-12 mbar l/cm^2/s，各段最终压强分布仿真结果如图 4 所示，从中可以看出电子枪及模组两端真空度优于 5×10^{-8} Pa，

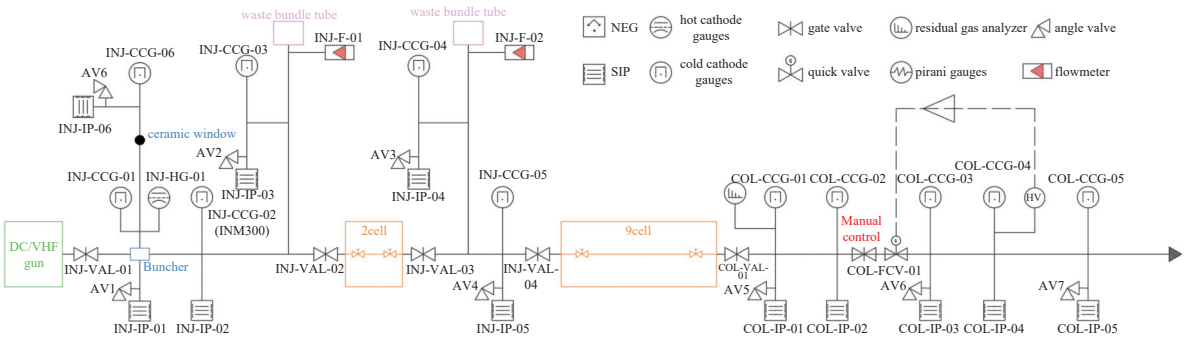

图3 束流测试平台物理布局

Fig. 3 The physical layout of the beam test platform

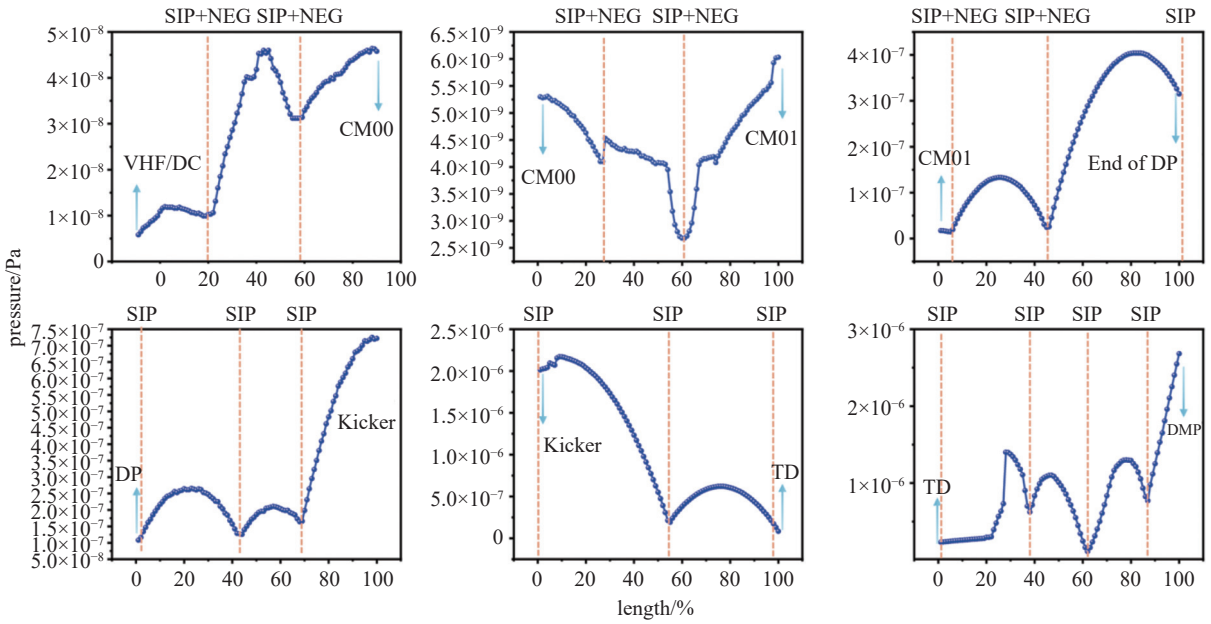

图4　束流测试平台各段压强分布仿真结果

Fig. 4　Pressure distribution simulation of the beam test platform

后端束流分配及诊断段的真空度优于 5×10^{-6} Pa, 真空布局满足设计束流物理要求。

2　关键技术问题

束流测试平台真空系统中大部分采用的技术, 基于标准的粒子加速器超高真空技术, 但由于其采用了高重频(1 MHz)的超导加速技术[13-14], 带来了一些不同于传统加速器真空设计的关键问题。首先加速器中的高能带电粒子束会与其通过的真空室发生电磁相互作用产生尾场, 尾场产生时会作用于电子束, 引起束流不稳定性上升, 因此要求束流通过的真空室截面均满足低阻抗要求; 其次异形真空室的设计, 要求实现束流的有效包络的同时还要满足磁铁磁极间隙的要求, 同时当束流偏转产生的辐射光照射在真空室内壁时引起的温升也需要重点关注; 模组在工作时超导高频腔内的颗粒物将提高腔内场致发射、降低腔性能, 甚至对超导腔造成永久损害, 因此模组前后 20 m 范围内束流线上的真空设备均有超净要求。

2.1　RF 屏蔽法兰

全金属结构的粒子加速器中真空室连接处通常采用金属密封的 CF 类型刀口密封法兰, 由于其数量多, 在法兰密封结构处真空室截面的不连续成为真空阻抗的主要来源之一。项目中设计了一种 RF 屏蔽型法兰−密封圈连接结构, 通过实现法兰−密封圈-法兰预紧密封后的平滑过渡, 有效减少阻抗。

应用 ANSYS 软件对不同型号的屏蔽铜圈进行了塑性形变仿真, 以 DN63 的无氧铜密封圈和 CF63 的不锈钢法兰为例, 在螺栓上施加 13 N m 的预紧力力矩, 仿真计算铜圈在压紧后向铜圈中心方向的形变(图 5), 然后根据仿真结果制定了如表 2 所示的不同型号屏蔽铜圈的关键结构尺寸及加工公差。

根据表 2 给出的尺寸参数加工出对应屏蔽铜圈, 然后进行屏蔽法兰−铜圈过渡段径向台阶高度的测试, 首先用定力矩扳手选择 10 N·m 至 16 N·m 的预紧力矩将法兰−密封圈预紧, 并把压紧后的装置用工装固定在测试平台上(如图 6 所示), 采用三坐标测量仪沿法兰内壁测量密封圈受力后的内径, 生成参考圆数据, 半径差值即为法兰铜圈过渡段径向变形量。

对不同预紧力矩下的法兰和铜圈内径数据进行统计并绘制成如图 7 所示的雷达图, 图中红线框范围为法兰内径区域, 其它颜色的线为铜圈在不同预紧力矩下八个测量点的形变量连线。从图中可以看出, 随着预紧力矩的增加屏蔽铜圈内径不断向法兰内径贴合, 当预紧力矩为 14 N·m 时铜圈内径和法兰内径几乎重合, 当预紧力矩为 15 N·m 时铜圈内径内凸于法兰内径, 因此考虑到实际工程上的可靠性要求, 实际安装时预紧力矩在 11 N·m−13 N·m

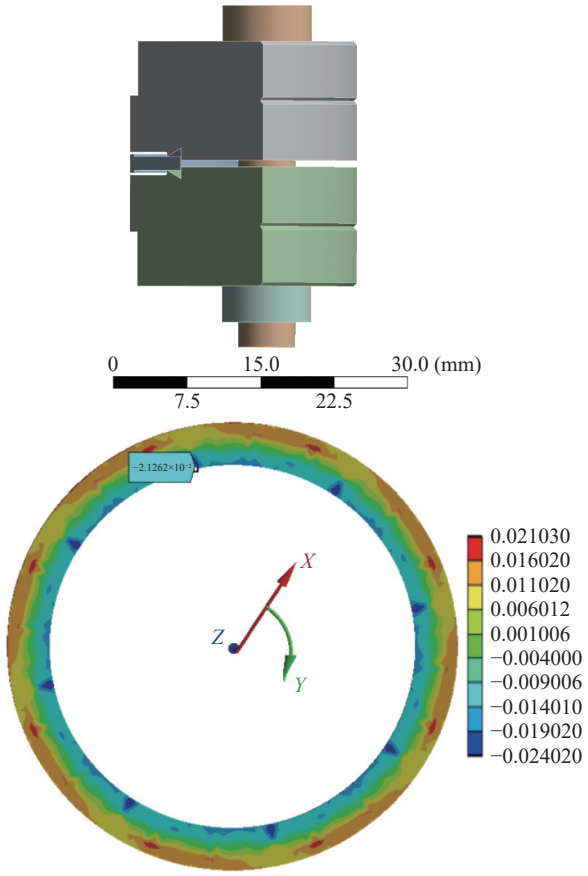

图5 屏蔽法兰−铜圈仿真模型

Fig. 5 Shield flange-copper ring simulation model

表 2 不同型号屏蔽铜圈内外径加工尺寸

Tab. 2 Different types of shielded copper inner diameter and outer diameter processing size

Types	*DN*35	*DN*50	*DN*63	*DN*100
internal /mm	$35_{0.02}^{0.04}$	$50_{0.04}^{0.06}$	$63_{0.06}^{0.08}$	$100_{0.08}^{0.16}$
external/mm	$48.3_{-0.011}^{0}$	$61.6_{-0.013}^{0}$	$82.5_{-0.015}^{0}$	$120.6_{-0.018}^{0}$
thickness/mm	2	2	2	2

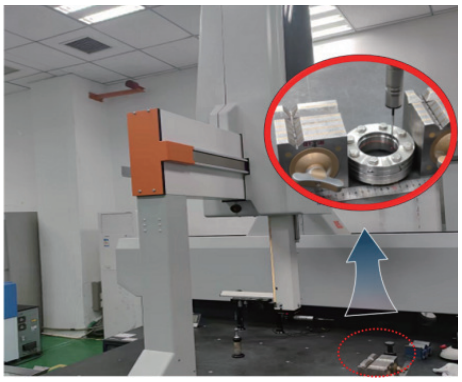

图6 三坐标测量仪测量法兰密封圈内径

Fig. 6 The measurement of inner diameter of copper gasket with trilinear coordinates measuring instrument

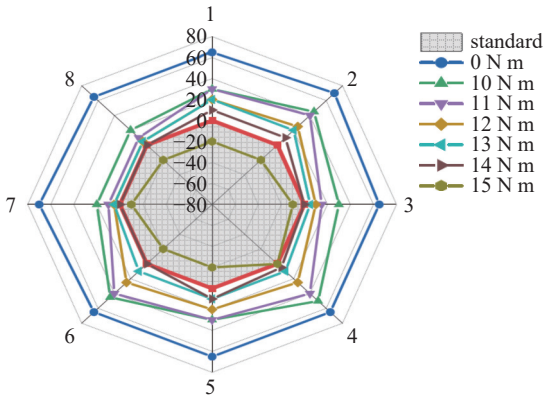

图7 屏蔽铜圈形变测试验证

Fig. 7 Shielded copper ring test verification

之间。进一步进行多个样本的预紧测试试验，测试结果如表 3 所示，随着预紧力矩从 10 N·m 增加到 16 N·m，铜圈过渡段径向台阶整体呈减小趋势，其中当预紧力矩增加到 15 N·m 时铜圈内径会小于法兰内径，即凸出入真空管路内。通过系列的测试，测定当预紧力矩为 13 N·m 时，该预紧力矩下对应的法兰−密封圈内径差 Δ*D* 约为 30 μm，从而明确对项目中采用的设计，预紧力矩为 10−13 N m 为最佳预紧力矩范围。此外根据标准 CF 密封结构的特性可知，实际安装时的预紧力矩选择 10−13 N·m 最为可靠，并且对应的屏蔽铜圈的内径加工公差为 [+0.06 mm, +0.08 mm]，即 DN63 的屏蔽铜圈内径加工尺寸 $dd=63_{0.06}^{0.08}$ mm，能在满足超高真空密封的前提下有效减小轴向台阶。ANSYS 变形计算结果，也验证了表 2 给定的不同型号密封圈的关键尺寸。

表 3 屏蔽法兰−密封圈连接过渡段径向台阶高度

Tab. 3 Radial step height of transition section in shielded flange-gasket connection

moment /N·m		10	11	12	13	14	15	16
Δ*D*/um	sample 1	−58	−40	−30	−15	−5	10	20
	sample 2	−50	−43	−38	−25	−10	5	0
	sample 3	−55	−37	−29	−10	−0	5	10
	sample 4	−56	−40	−30	−15	−5	10	20
	sample 5	−58	−39	30	−10	−0	9	15

屏蔽法兰−密封圈的结构设计目的是通过减小法兰和铜圈的连接过渡段的台阶来减小电子束通过环境的阻抗效应，最终降低阻抗对电子束稳定性的影响，因此完成设计后需要验证屏蔽法兰−密封圈结构是否能够满足屏蔽阻抗效果。采用 3D 电磁仿真软件 CST[15] 分别对光滑真空管段、标准法兰−

密封圈过渡段和屏蔽法兰–密封圈过渡段的阻抗进行了仿真对比, 仿真结果如图 8 所示, 图中可以看出屏蔽法兰–铜圈可以有效的屏蔽掉了标准法兰–铜圈结构在低频段和高频段产生的谐振峰。

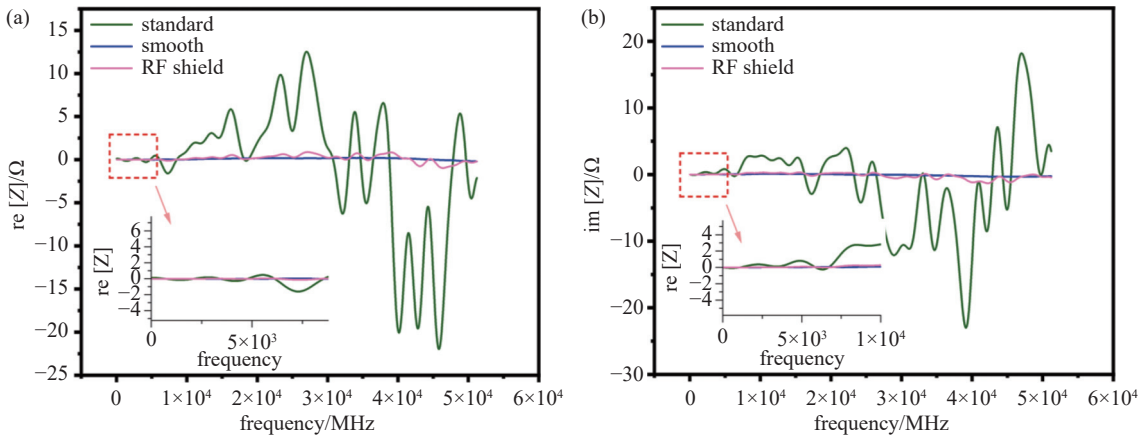

图8　阻抗仿真对比。(a)阻抗实部仿真结果, (b)阻抗虚部仿真结果

Fig. 8　Impedance simulation comparison. (a) Simulation results of the real part of the impedance, (b) simulation results of the imaginary part of the impedance

根据实际安装效果, 该类型屏蔽铜圈实现了良好的连接段平滑过去, 但是压紧后铜圈外径与法兰定位槽会出现“顶死”现象, 不便于铜圈拆卸。因此后续准备对铜圈结构进行进一步优化, 更改原有依赖铜圈外径定位的方式。

2.2　真空室设计

DALS 预研项目中, 磁铁类型分为偏转磁铁、切割磁铁、四级磁铁、校正磁铁、kicker 磁铁和永磁铁, 其中偏转磁铁、切割磁铁中束流轨迹会发生偏转, 为满足束流运动轨迹要求需要对应设计异形真空室, 磁铁参数如表 4 所示。

表 4　磁铁物理参数

Tab. 4　Physical parameters of magnet

No	Gap/mm	Angle/°	Radius/mm	Beam Path/mm
1	55	90	600	50
2	40	90	600	35
3	13	5.1	4493.787	7
4	40	5.1	4493.787	35
5	40	0.513	111687.679	35
6	55	30	763.944	50
7	55	−30	763.944	50

根据表 4 给定的磁铁参数对应进行真空室的结构设计, 以满足与磁铁及电子束的物理参数相匹配: 真空室的关键结构尺寸如表 5 所示, z 方向为沿束流方向, y 方向为偏转后的束流方向。其中注入段两个偏转铁内的真空室为增加导电性, 内壁镀铜膜, 镀膜厚度为 20 um±15%。

表 5　真空室关键参数

Tab. 5　Core parameters of vacuum chamber

No	Internal/ mm	Thickness/ mm	Material	Angle/(°)
1	Φ50(z)/80x84(y)	1.5	316 L	90
2	Φ35(z)/ 50x33(y)	1.5	316 L	90
3	Φ7-Φ35(z)	2.5	CuCrZr	5.1
4	Φ35(z)	1.5	316 L	5.1
5	Φ35(z)	1.5	316 L	0.513
6	Φ50-50x26-Φ50 (z) Φ50-50x26-Φ150 (y)	2	316 L	30
7	Φ50-50x26-Φ50 (z) Φ50-50x26-Φ150 (y)	2	316 L	−30

当电子束在真空室内发生偏转时会有部分功率损失在真空室内壁, 导致局部温升造成放气量增加从而影响真空, 因此要考虑真空室局部温升的影响。首先采用 SynRad+ 软件进行仿真计算, 得到电子束的损失功率密度分布, 然后采用 Workbench 将功率密度数据映射在真空室受光表面, 进行温升仿真计算, 仿真结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 设置环境温度为 22℃ 的前提下, 注入段两个 90°偏转真空室局部温升最高为 0.007℃, 后端偏转铁内的真空室几乎没有温升变化, 因此真空室不需要设置额外的水冷结构。

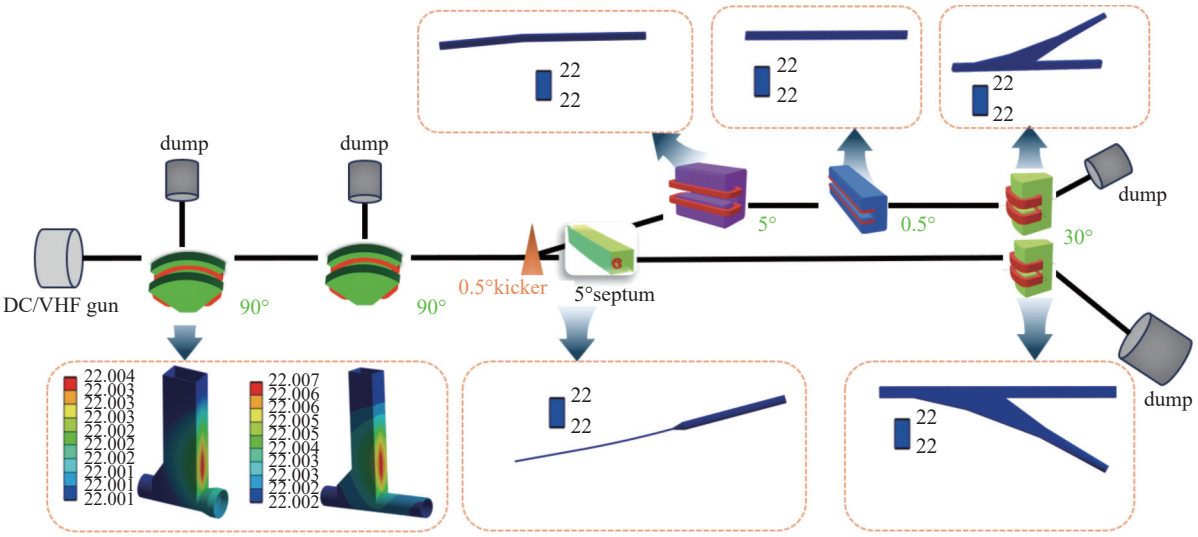

图9 真空室温升仿真

Fig. 9 Temperature rise simulation in vacuum chamber

2.3 真空设备超净安装及调试

在粒子加速器工程应用中，微米级颗粒污染控制是保障超导腔性能的核心技术挑战。针对≥0.3 μm 颗粒物引发的热崩溃和场发射风险，本研究提出了涵盖颗粒生成抑制及迁移阻断的全流程控制方案，具体流程如图 10 所示。

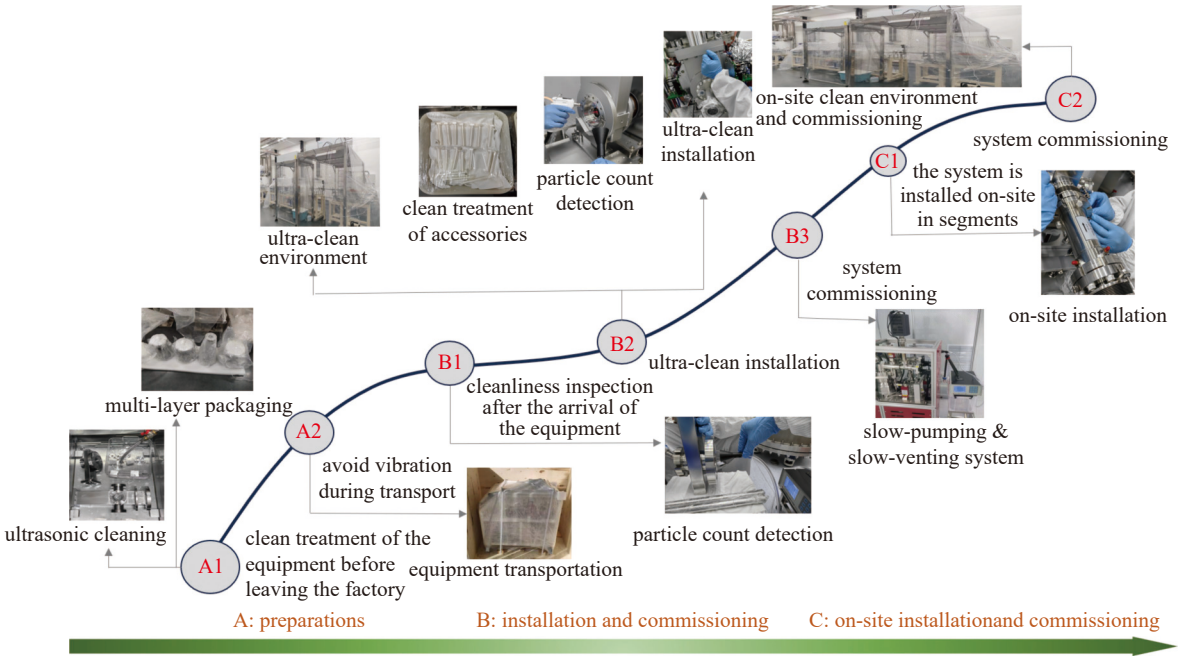

图10 超净安装流程

Fig. 10 Ultra-clean installation process

污染源控制。所有真空组件(法兰、规管、离子泵等)均要求厂家实施无油预处理工艺，并采用微粒检测仪进行 0.3 μm 级颗粒物检测，出厂检测标准为：应用 0.3 MPa 洁净的离化氮气吹扫真空腔室内壁，并采用颗粒计数器对吹起的微粒进行收集检测计数，检测周期为 10 s，要求一个周期内≥0.3um 大小的颗粒数为 0 个。

颗粒迁移控制。实验数据表明当气流速率超过 0.25±0.050.3 atm·l/min 时，湍流边界层会产生显著的颗粒输运效应。为此，系统设计采用层流控制技术，在分子泵组抽气、系统破空、充气校准等关键工序中，将气体流速严格控制在 0.25±0.050.3

atm·l/min 范围内, 有效抑制了 0.3 μm 颗粒的迁移动力学过程。

在超净真空系统的部件预处理、装配、调试及运行全过程中, 严格遵循双重防污染原则: 既杜绝外部颗粒侵入真空系统, 又避免内部既有颗粒迁移至关键区域。

为验证实际采用的超净安装工艺规程可靠性, 特别设计洁净度验证实验(图 11), 设备整体安装前需要在十级洁净间内对待安装管路进行洁净预处理如图 11(a)所示, 同时安装所需的配件如螺栓、螺母和垫片等同样需要进行洁净处理如图 11(b)所示, 确保安装前基底洁净度达到≥0.3 μm 颗粒零检出的标准。最后经规范组装工艺完成系统集成后, 复测腔体内部洁净度, 仍保持≥0.3 μm 颗粒零检出的理想状态如图 11(c)所示。该验证结果充分证明, 所采用的安装工艺能有效控制微粒污染, 在真空腔室组装过程中未引入大尺寸颗粒污染物。

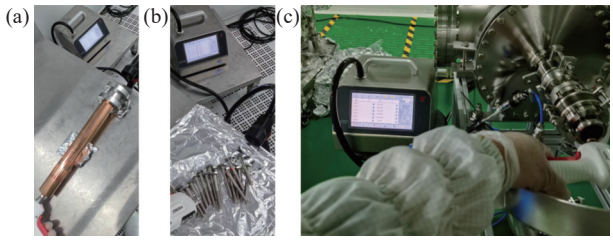

图11　超净安装流程验证。(a)待安装设备洁净测试, (b)安装而配件洁净测试, (c)整体组装后洁净测试

Fig. 11　Verification of the ultra-clean installation process. (a) Cleanliness verification of equipment prior to installation, (b) cleanliness verification of installation accessories, (c) post-assembly cleanliness verification of integrated system

目前洁净度检测仅局限于真空环境建立前的颗粒污染检测, 在系统完成整体安装与极限真空调试后, 真空腔体内部的颗粒污染水平难以有效监测。因此, 还需开发适用于真空内部环境的颗粒度实时监测技术, 以保障电子枪与超导模组等关键设备在运行过程中的洁净环境。

3　调试结果

目前 DALS 束流测试平台常温段已完成了极限真空调试, 将各点位真空度设计要求, 软件仿真结果及真空调试结果进行对比, 对比结果如图 12 所示: 对比 DALS 真空分布设计要求, 仿真结果显示在现有真空设备布局情况下, 各点位真空度均满足设计要求; DALS 真空调试结果表明注入段 4 个测量点位, 真空度均优于 5.0×10^{-8} Pa, CM01 模组出口差分段, 当远端真空为 1×10^{-7} Pa 量级时, 末端差分泵站真空度为 1.9×10^{-8} Pa 可以实现由远端室温低真空到低温高真空的有效过渡; 束流诊断线真空最终调试结果均优于 1×10^{-6} Pa, 设计要求 5×10^{-6} Pa, 满足电子束通过条件。因此根据以上分析结果说明本文的真空布局满足设计要求。

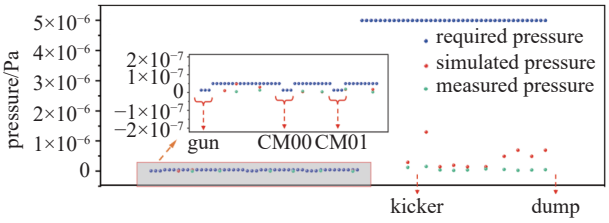

图12　DALS 的压强分布对比

Fig. 12　Pressure distribution comparison in DALS

在 DALS 束流测试平台常温段极限真空调试完成后, 对真空压强分布的设计要求、软件仿真结果及真空调试实测数据进行系统性对比分析。如图 12 所示, 基于现有真空设备布局的软件仿真结果表明, 各关键点位真空度均达到设计指标要求。

具体来看, 在注入段, 4 个真空测量点位的实测真空度均优于 5×10^{-8} Pa; 在 CM01 模组出口差分段, 当远端室温区域真空度处于 1×10^{-7} Pa 量级时, 末端差分泵站实现了 1.9×10^{-8} Pa 的真空度, 有效完成了从远端束流输运线真空环境到低温侧高真空环境的过渡。此外, 束流诊断线的最终真空调试结果显示, 其真空度优于 1×10^{-6} Pa, 满足 5×10^{-6} Pa 的设计要求, 提供了电子束稳定传输必须的真空条件。

图 13 为模组下游差分段二级差分泵站腔室的残余气体质谱分析结果。分析结果显示质谱仪位置附近真空度为 1.4×10^{-8} Pa, 分子量>44 amu 的重质分子比例<0.1%, 并且由于差分泵站安装了 NEG 泵(SAES, Z1000)有效降低了系统中残余氢分子数量。

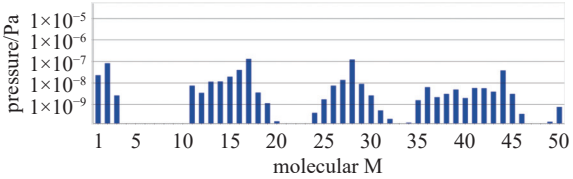

图13　残余气体分析结果

Fig. 13　Residual gas analysis results

4 结论

在工程项目中，系统性地实现了大连先进光源(DALS)束流测试平台常温段真空系统的设计与实现这一重要工作，通过理论计算、数值仿真与工程验证相结合的方法，成功构建了满足高重频超导加速器需求的超高真空技术体系。结果表明：基于电磁-结构耦合设计的 RF 屏蔽法兰-密封圈结构，通过三坐标测量验证了预紧力矩 13 N·m 下铜圈和法兰过渡段实现了良好的平滑过渡，CST 仿真显示该设计有效消除了法兰连接处的谐振峰，将纵向耦合阻抗实现了有效的屏蔽，显著提升了束流稳定性；基于 SynRad+与 ANSYS Workbench 联合仿真技术，实现了真空室同步辐射热负载的精确建模，评估真空室热负载，优化真空室结构设计；建立的超净真空控制方案通过微粒源抑制与迁移动力学控制，使模组前后 20 m 区域的颗粒洁净度满足运行要求(应用 0.3 MPa 洁净的离化氮气吹扫真空腔室内壁，并采用颗粒计数器对吹起的微粒进行收集检测计数，检测周期为 10 s，要求一个周期内≥0.3 um 大小的颗粒数为 0 个)；残余气体分析仪检测结果，分子量>44 amu 的重质分子比例<0.1%。良好的室温真空环境为模组内部低温超导腔真空获取及正常工作提供了重要基础，后续将持续监测低温和常温段真空的不同工作模式下的变化及状态。本工作涉及和发展的技术、规范等为大连先进光源 DALS、深圳高重频自由电子激光装置 S3FEL 及未来新型超导加速器真空工程设计开展了技术验证，提供了重要支撑。

参 考 文 献

[1] Geloni G, Saldin E, Samoylova L, et al. Coherence properties of the European XFEL[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(3): 035021

[2] 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): 023908

[3] Liu Z P, Deng B J, Zhang Q M, et al. Design, construction, and offline calibration of ARPolar prototype for SXFEL facility[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2022, 6(2): 214−226

[4] Chung T Y, Fu H L, Lee H C. DCLS: a fair and efficient scheduling with bandwidth guarantee in WiMAX mesh networks[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2010, 26(4): 1429−1442

[5] Zhu J F, Ding H L, Li H K, et al. The microwave amplitude and phase setting based on event timing for the DCLS[J]. arXiv preprint arXiv: 2311.08414, 2023

[6] Richter M, Gottwald A, Kroth U, et al. Measurement of gigawatt radiation pulses from a vacuum and extreme ultraviolet free-electron laser[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(14): 2970−2972

[7] Benvenuti C. Extreme high vacuum technology for particle accelerators[C]//PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 01CH37268), Chicago: IEEE, 2001, 1: 602−606

[8] Chae Y C, Harkay K, Sun X. Horizontal coupling impedance of the APS storage ring[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland: IEEE, 2003, 5: 3011−3013

[9] Higuchi T, Horikoshi A, Komori T. Development of an actuator for super clean rooms and ultra high vacuum[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Bearings, Tokyo: Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1990: 115−122

[10] Kikuzawa N, Minehara E, Sawamura M, et al. Recent progress of the superconducting accelerator modules for the JAERI FEL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1993, 331(1-3): 276−281

[11] Kersevan R, Ady M. Recent developments of Monte-Carlo codes molflow+ and synrad+[C]//10th International Particle Accelerator Conference, Melbourne: JACoW Publishing, 2019: 1327−1330

[12] Malyshev O B. Vacuum in particle accelerators: modelling, design and operation of beam vacuum systems[M]. Newark: John Wiley & Sons, 2020

[13] Proch D. Superconducting cavities for accelerators[J]. Reports on Progress in Physics, 1998, 61(5): 431−482

[14] Wilson M N. Superconducting magnets for accelerators: a review[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 727−732

[15] Safi D, Birtel P, Meyne S, et al. A traveling-wave tube simulation approach with CST particle studio[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6): 2257−2263