

低能强流高电荷态离子加速器 RFQ 真空系统设计

张鹏¹ 游志明² 贾欢¹ 文俊¹ 赵玉刚¹ 牛小飞^{1*}

(1. 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000; 2. 先进能源科学与技术广东省实验室 惠州 516000)

Design of RFQ Vacuum System for Low Energy Intense-Highly-Charged Ion Accelerator Facility

ZHANG Peng¹, YOU Zhiming², JIA Huan¹, WEN Jun¹, ZHAO Yugang¹, NIU Xiaofei^{1*}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516000, China)

Abstract The 81.25 MHz radio frequency quadrupole (RFQ) accelerator is the key equipment of low energy intense-highly-charged ion accelerator facility (LEAF). In order to ensure the RFQ can achieve a stable operation and high-quality beam supply, the RFQ cavity vacuum is required to reach an ultra-high vacuum of about 10^{-6} Pa. In this paper, the design of the vacuum system of LEAF RFQ is completed by the two-stage molecular pump scheme, and the process of vacuum system design and equipment selection are introduced in detail. In addition, VAKTRAK and MOLFLOW+ were used to simulate the vacuum distribution under the design scheme. At present, LEAF RFQ operates stably and efficiently, and the measured vacuum is about 1.4×10^{-6} Pa, which meets the requirements of beam supply and experiments. This work verifies the reliability of VAKTRAK and MOLFLOW+ results and accumulates experience for vacuum system design of high intensity heavy-ion accelerator facility (HIAF).

Keywords LEAF, RFQ, Vacuum system, VAKTRAK, MOLFLOW+

摘要 81.25 MHz 射频四极加速器 (RFQ) 是低能量强流高电荷态离子加速器装置 (LEAF) 的关键设备, 为保障 RFQ 加速器的稳定运行和高质量出束, 要求 RFQ 腔体达到 10^{-6} Pa 的超高真空环境。本文采用二级分子泵方案完成了 LEAF RFQ 的真空系统设计, 详细介绍了真空系统设计及设备选型流程, 并使用 VAKTRAK 和 MOLFLOW+ 软件分别对设计方案进行了模拟计算。目前, LEAF RFQ 平稳高效运行, 实际测量真空度在 1.4×10^{-6} Pa 左右, 满足供束和实验的要求。本工作验证了 VAKTRAK 和 MOLFLOW+ 计算结果的可靠性, 为强流重离子加速器装置 (HIAF) 真空系统设计积累了经验。

关键词 LEAF RFQ 真空系统 VAKTRAK MOLFLOW+

中图分类号: TB75 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202205012

低能量强流高电荷态离子加速器装置 (Low Energy intense-highly-charged ion Accelerator Facility, LEAF) 由中国科学院近代物理研究所提出并建设, 用于材料辐照性能、高电荷原子物理、低能核天体物理等方面的研究, 同时作为强流重离子加速器装置 (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF) 的前期预研装置^[1-3]。LEAF 主要由 45 GHz 电子回旋共振 (Electron Cyclotron Resonance, ECR) 离子源、300 kV 高压平台、低能束流传输线、81.25

MHz 射频四极 (Radio Frequency Quadrupole, RFQ) 加速器、中能束流传输线及多个实验终端组成^[4-6]。

RFQ 是 LEAF 的关键设备, 负责实现对离子的加速、聚焦和聚束。LEAF RFQ^[7] 由六段腔组成, 总长 6 m, 采用八角空腔结构, 四翼型极头将腔内空间近似分为四个象限, 三维结构图如图 1 所示。加速离子荷质比从 1/7 到 1, 包含从质子到铀离子的全部离子束, RFQ 运行频率为 81.25 MHz, 可将上述各类离子从 14 keV/u 加速至 0.5 MeV/u。作为连续波运

行的高功率射频腔,高的真空度可以降低微打火放电现象,是 RFQ 加速器稳定运行的关键^[8-9]。为保障 LEAF RFQ 连续稳定运行,设计真空度定为 10^{-6} Pa。由于四翼型极头的存在,导致腔体内流导较小,给目标超高真空及真空均匀性的实现增添了困难。对于此类型 RFQ 的真空系统,已有的经验是采用真空管道将腔体四个象限连通,以实现泵组对四个象限空间同时抽气,如美国 APT/LEDA

(Accelerator Production of Tritium/Low Energy Demonstration Accelerator) 装置、FRIB(The Facility for Rare Isotope Beams) 装置以及中国 CSNS (China Spallation Neutron Source) 装置的 RFQ 真空系统^[10-12]。本文中为满足紧凑布局要求,并考虑尽量缩短抽气管道,摒弃了上述环绕式抽气管道布局,选择在腔室③、④象限处配备二级分子泵组,实现了相对均匀的超高真空环境,满足 LEAF RFQ 运行要求。

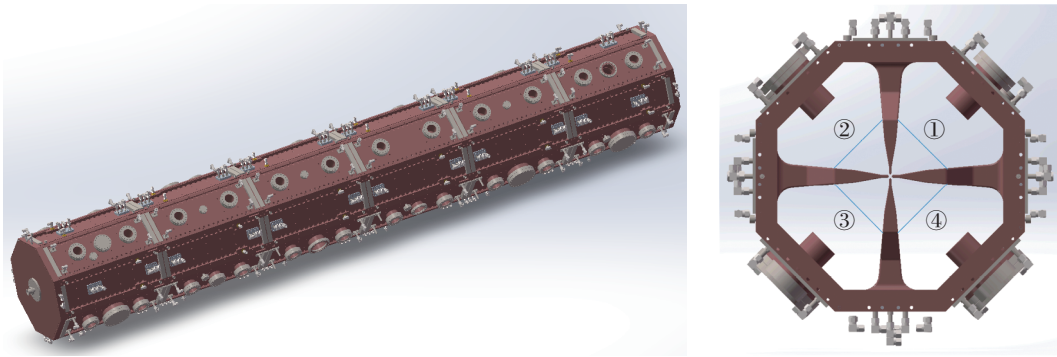


图1 LEAF RFQ 三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure diagram of LEAF RFQ

1 真空系统设计

1.1 系统气载计算

LEAF RFQ 系统气载 Q 可归纳为三部分^[13]

(1) 系统真空材料表面出气量 Q_1 , 为材料出气率与系统表面积的乘积。LEAF RFQ 采用无氧铜真空材料, 出气率按照 $7.98 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 计算, 系统表面积约 304426 cm^2 , 则 Q_1 约为 $2.43 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

(2) 系统漏气及渗透量 Q_2 , 在超高真空系统中通常为总气载的 5%-10%, 这里保守取为 $Q_2 = 10\% Q_1$ 。

(3) 放入系统的其它元器件出气量 Q_3 , 这里主要是真空规管出气, 取 $Q_3 = 10\% Q_1$ 。

综合三部分气源, LEAF RFQ 系统总出气量 Q 约为 $2.97 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2 真空泵抽速计算

依据 10^{-6} Pa 的设计真空度, 真空室所需有效总抽速 S_t 由式 (1) 确定, 约 2970 L/s。

$$S_t = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

式中, S_t 是所需有效总抽速, Q 是系统总出气量, P 是设计真空度。按照配备 8 台分子泵设计, 则单台

分子泵对真空室的有效抽速 S 需达到 371.25 L/s。考虑泵口与真空室之间连接管对分子泵抽速的衰减作用, 单台分子泵所需抽速 S_p 由式 (2) 确定

$$S_p = \frac{U \cdot S}{U - S} \quad (2)$$

式中, S_p 是单台分子泵抽速, S 是单台分子泵对真空室的有效抽速, U 是分子泵口与真空室之间连接管的流导。连接管内径 $d=150 \text{ mm}$, 管长 $l=180 \text{ mm}$, 流导 U 按分子流短管计算, 如式 (3)^[13]

$$U = \alpha \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \cdot A_0 \quad (3)$$

式中, α 为克劳辛系数, 由连接管的相对长度 (l/d) 确定^[13], 取为 0.4711; R 为摩尔气体常数; T 为气体温度; M 为气体摩尔质量; A_0 为连接管的入口面积。对于室温空气, 流导 U 为 965.7 L/s。根据式 (2) 可得 $S_p=603.11 \text{ L/s}$, 实际选用设计真空度下标定抽速为 600 L/s 的分子泵。

1.3 真空系统布局

LEAF RFQ 真空系统整体布局如图 2 所示, 选择采用二级分子泵方案。一级分子泵与 RFQ 腔体连接, 首尾两段腔体分别配备 2 台 600 L/s 分子泵,

布置于腔体第③、④象限处;中间四段各配备 1 台 600 L/s 分子泵,布置于腔体第④象限处。选用由 1 台分子泵和 2 台机械泵组成的分子泵机组作为前级,与一级分子泵串联。采用分子泵串联的方法可增

大系统对氢气的压缩比^[14],有效提高极限真空^[15]。真空测量系统选择在 RFQ 腔体安装电阻真空计和冷阴极电离真空计各 1 套,在前级管道安装电阻真空计 1 套。

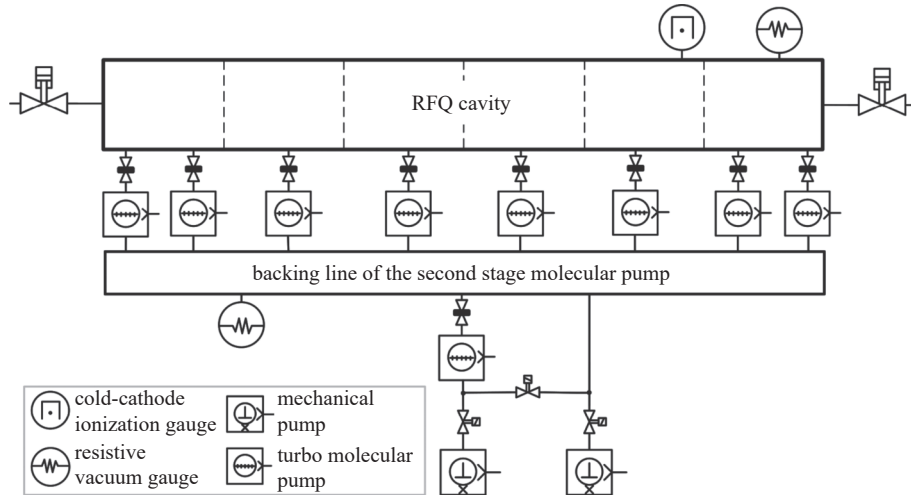


图2 LEAF RFQ 真空系统布局

Fig. 2 Layout of LEAF RFQ vacuum system

2 真空分布模拟结果与测试结果

2.1 VAKTRAK 软件计算

VAKTRAK^[16-17]是斯坦福大学直线加速器中心 Volker Ziemann 开发,用于求解气体分子流状态下压强分布的软件。该软件使用传输矩阵模型表述气体分子传输过程,通过求解压强微分方程获得系统压强分布。VAKTRAK 具有对计算机硬件要求低、可即时获得真空压强分布的特点,是设计加速器真空系统的基础软件之一。对几何结构简单的真空系统,使用 VAKTRAK 的模拟计算简洁而有效。

针对 LEAF RFQ 真空系统,根据分子泵口位置将系统划分成长度分别为 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 0.5 m 的七段,分别给出每段的长度、流导、抽速及出气量等参数,如表 1 所示。此处流导为 RFQ 腔室的流导,考虑四翼型极头结构,计算流导时将 RFQ 腔室等效视为并联的四个等边三角形管道,0.5 m 腔体段流导为 9788 L/s, 1 m 腔体段流导为 4894 L/s。

依据表 1 所示的输入参数, VAKTRAK 计算 LEAF RFQ 真空压强分布结果如图 3 所示。整段 RFQ 系统稳态真空度在 $9.20 \times 10^{-7} \sim 1.02 \times 10^{-6}$ Pa 范围内波动,均值 9.70×10^{-7} Pa。

表 1 VAKTRAK 软件计算 LEAF RFQ 真空压强分布的输入参数

Tab. 1 VAKTRAK input parameters for calculating LEAF RFQ vacuum pressure distribution

编号	元件代码	长度 /m	流导 /(L/s)	有效抽速 /(L/s)	出气量 /(Pa L/s)	备注
1	5	0.5	9788	0	2.39×10^{-4}	“RFQ 腔体 1”
2	2	0	0	742.86	0	“分子泵 1+2”
3	5	1	4894	0	4.78×10^{-4}	“RFQ 腔体 2”
4	2	0	0	371.43	0	“分子泵 3”
5	5	1	4894	0	4.78×10^{-4}	“RFQ 腔体 3”
6	2	0	0	371.43	0	“分子泵 4”
7	5	1	4894	0	4.78×10^{-4}	“RFQ 腔体 4”
8	2	0	0	371.43	0	“分子泵 5”
9	5	1	4894	0	4.78×10^{-4}	“RFQ 腔体 5”
10	2	0	0	371.43	0	“分子泵 6”
11	5	1	4894	0	4.78×10^{-4}	“RFQ 腔体 6”
12	2	0	0	742.86	0	“分子泵 7+8”
13	5	0.5	9788	0	2.39×10^{-4}	“RFQ 腔体 7”

2.2 MOLFLOW+软件计算

MOLFLOW+^[18-20]是欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)开发的一款采用蒙特卡洛方法计算超高真空系统压强分布及流导的软件。超高真空下,气体分子的平均

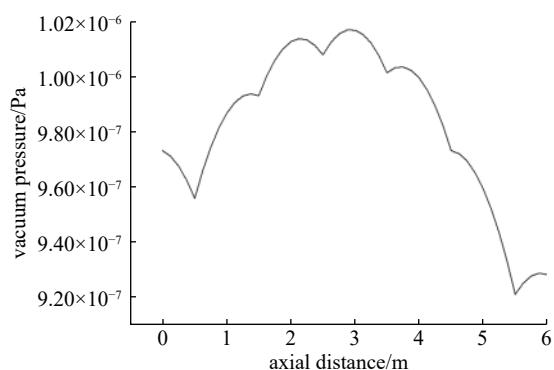


图3 LEAF RFQ 真空压强分布 (VAKTRAK 软件)

Fig. 3 LEAF RFQ vacuum pressure distribution (calculated by VAKTRAK)

自由程远超真空室的特征长度, 因此 MOLFLOW+ 软件忽略分子间的碰撞, 只考虑分子与壁面的相互作用。MOLFLOW+ 可以对任意复杂几何结构进行真空压强分布模拟。

根据 LEAF RFQ 系统的实际几何尺寸, 建立三维模型并导入 MOLFLOW+ 软件, 系统被划分成 784 个平面。给定每个平面的出气率、抽速、反射能力和温度等属性, 软件可通过蒙特卡洛方法模拟追踪每个气体分子的运动轨迹, 从而获得各个平面的压强分布。综合 1.1 节所述三部分气载, 除泵口外的其余平面出气率等效为 $9.75 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 8 个泵口面设定为抽速 600 L/s 的吸附面。

MOLFLOW+ 对 LEAF RFQ 真空系统建模计算的界面及束流中心面的压强分布曲线如图 4 所示。模拟计算结果显示 LEAF RFQ 系统真空度在 $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 范围内波动, 均值 $1.4 \times 10^{-6} \text{ Pa}$, 高于 VAKTRAK 模拟结果。分析两软件结果存在较大差异的原因为: VAKTRAK 软件无法直接考虑腔室内部四翼型结构, 而是将腔室简化视为等流导的圆管进行计算, 流导等效过程中的误差导致了真空压强结果的差异。

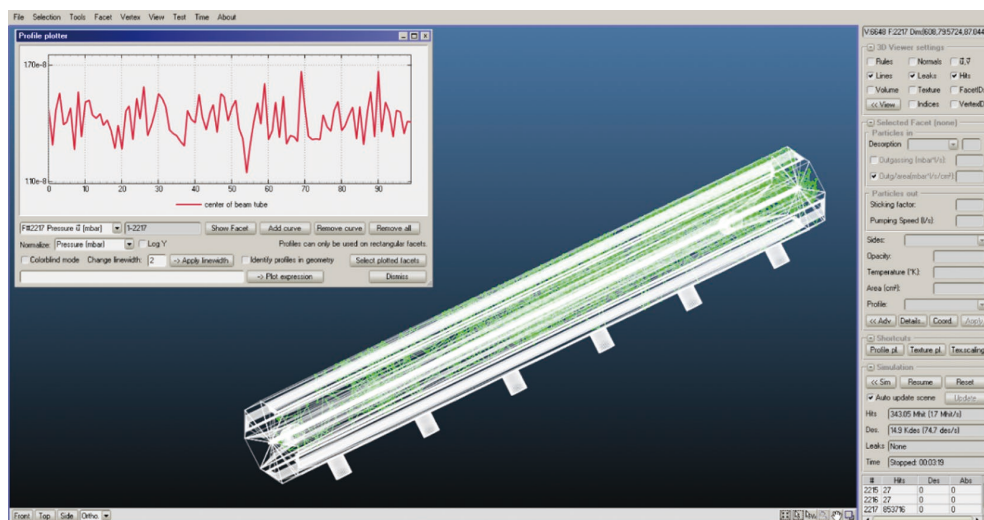


图4 MOLFLOW+ 对 LEAF RFQ 真空系统建模计算的界面及束流中心面的压强分布曲线

Fig. 4 MOLFLOW+ interface for LEAF RFQ vacuum system modeling calculation and pressure distribution curve of beam center surface

为验证 LEAF RFQ 腔体内部真空度的均匀性, 分别在腔室四个象限中心平行于端面取一计算面, 如图 1(右)中蓝色线所示, 计算了四个象限内的真空压强分布, 计算结果如图 5 所示。结果显示, 象限①和②由于远离泵口, 压强最高, 约 $1.8 \times 10^{-6} \text{ Pa}$; 象限④配备 6 台分子泵, 压强最低, 约 $7 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 。RFQ 腔室内整体压强差小于半个量级, 真空均匀度满足要求。

2.3 实际测量结果

LEAF 装置于 2018 年完成安装调试, 由于 LEAF RFQ 的高真空度, 在高功率射频锻炼期间, 仅耗时 44 h 即达到了设计功率, 同年正式开始供束, 目前平稳高效运行。LEAF RFQ 现场图及腔体真空读数如图 6 所示, RFQ 腔体稳态真空测量值在 $1.4 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 左右, 满足腔体稳定运行、加速器供束及实验要求。

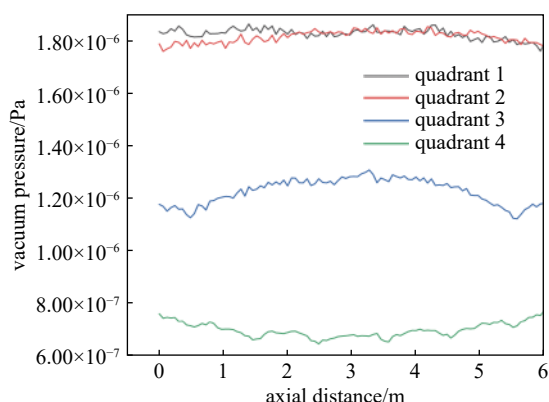


图5 LEAF RFQ 腔室四个象限内的真空压强分布对比

Fig. 5 Comparison of vacuum pressure distribution in the four quadrants of LEAF RFQ cavity

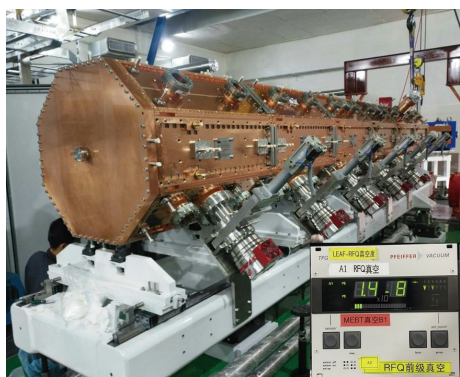


图6 LEAF RFQ 现场图及真空读数图(图中单位为 mbar)

Fig. 6 LEAF RFQ field photo and vacuum gauge reading interface photo (the unit in this photo is mbar)

LEAF RFQ 真空实际测量值与两种软件的模拟计算结果相近, 误差小于半个量级, MOLFLOW+的结果相对更准确。

3 总结

采用二级分子泵方案实现了 LEAF RFQ 加速器的超高真空系统设计, 分别使用 VAKTRAK 和 MOLFLOW+软件模拟计算了设计方案下的真空分布。运行测试结果显示实际真空度在 1.4×10^{-6} Pa 左右, VAKTRAK 和 MOLFLOW+模拟结果误差在半个量级以内。本文工作为 HIAF 装置真空系统设计积累了可靠经验。

参 考 文 献

[1] Yang Y, Zhai Y, Sun L, et al. Initial beam commissioning of LEAF at IMP[J]. Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conf(LINAC'18), Beijing, China, 16-21

September 2018. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2018: 332-335

- [2] Yang J, Xia J, Xiao G, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, 317: 263-265
- [3] Li C, Sun L, He Y, et al. Conceptual design of LEBT and RFQ for the HIAF linac[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 729: 426-433
- [4] Sun L, Zhao H, Lu W, et al. Intense beam ion sources development at IMP [J]. 2013: 2082-2084
- [5] Yang Y, Dou W, Sun L, et al. Simulation study of LEBT for transversely coupled beam from an ECR ion source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 02B910
- [6] Ma W. Study on the low energy high current high charge state RFQ[J]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics), 2018: 5 (马伟. 低能强流高电荷态RFQ加速器的研究[J]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2018: 5(in chinese))
- [7] Ma W, Lu L, Xu X, et al. Design of an 81.25 MHz continuous-wave radio-frequency quadrupole accelerator for low energy accelerator facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 847: 130-135
- [8] Kim S H, Aleksandrov A, Crofford M, et al. Stabilized operation of the spallation neutron source radio-frequency quadrupole[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2010, 13(7): 070101
- [9] Hasegawa K, Kobayashi T, Kondo Y, et al. Status of the J-PARC RFQ[J]. Proceedings of IPAC-2010, Kyoto, Japan, 2010: 621-623
- [10] Shen S, Behne D, Berg J, et al. Testing of vacuum system for APT/LEDA RFQ[J]. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat No 99CH36366), IEEE, New York, US, 1999: 1333-1335
- [11] Bultman N, Pozdeyev E, Morgan G, et al. Design of the FRIB RFQ[J]. Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference, IPAC-2013, Shanghai, China, 2013: 2866-2868
- [12] Dong H, Song H, Li Q, et al. The vacuum system of the China spallation neutron source[J]. *Vacuum*, 2018, 154:

- 75-81
- [13] Da D A, Vacuum design manual(the 3rd edition)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 100-124; 769-782 (in Chinese) (达道安. 真空设计手册(第三版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 100-124;769-782(in chinese))
- [14] Gruber A, Bourgeois W, Franzke B, et al. Internal gas-jet target for the ESR at GSI[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1989, 282(1): 87-93
- [15] Cai X H, Yang X T, Cao Z R, et al. Reaching the pressure of 10^{-9} Pa using two serial turbomolecular pumps[J]. *VACCUUM*, 2003, 04: 42-44 (蔡晓红, 杨晓天, 曹柱荣, 等. 串联分子泵获得 10^{-9} Pa真空的实验研究[J]. *真空*, 2003, 04: 42-44(in chinese))
- [16] Ziemann V. Vacuum Tracking [C]. Proceedings of the Proceedings of International Conference on Particle Accelerators, IEEE. 1993: 3909-3911
- [17] Zhang J H, Yang X T, Ma X L, et al. Application of VAKTRAK in CSR vacuum system design and calculation[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2007, 13(01): 28-31 (张军辉, 杨晓天, 马向利, 等. VAKTRAK在CSR真空系统设计中的应用[J]. *真空与低温*, 2007, 13(01): 28-31(in chinese))
- [18] Kersevan R. Analytical and numerical tools for vacuum systems[J]. Geneva:CERN, 2007, CERN-2007-003: 285-312
- [19] Kersevan R, Pons J L. Introduction to MOLFLOW+: new graphical processing unit-based monte carlo code for simulating molecular flows and for calculating angular coefficients in the compute unified device architecture environment[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A:Vacuum, Surfaces, and Films*, 2009, 27(4): 1017-1023
- [20] Ady M. Monte carlo simulations of ultra high vacuum and synchrotron radiation for particle accelerators[J]. Lausanne:É cole Polytechnique Fédérale de Lausanne(EPFL), 2016: 11-13