

文章编号: 1007-4627(2016)04-0437-05

SSC 直线注入器 RFQ 腔体多物理场分析

王静¹, 黄建龙¹, 张小奇², 何源², 杨雅清², 陆元荣³, 朱昆³

(1. 兰州理工大学, 兰州 730000;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: SSC-LINAC 是为兰州重离子研究装置(HIRFL)设计的直线注入器, 它将 U^{34+} 离子加速到 1 MeV/u 注入到分离扇回旋加速器(SSC)中, 为冷却储存环(CSR)提供 10 MeV/u 的 U^{34+} 。该注入器可以将 SSC 引出的重离子流强提高一个量级以上。SSC-LINAC 由一个 RFQ(Radio Frequency Quadrupole) 加速器和 4 个 DTL(drift tube linac) 组成, 设计频率为 53.667 MHz。RFQ 工作在连续波模式, 设计功率 30 kW, 如果不能有效地冷却, 高频电流在电极表面产生的热量会使 RFQ 的腔壁和电极发生形变, 从而导致腔体频率的漂移以及加速和聚焦电场的改变。因此, 为了保证连续波工作的 RFQ 加速器稳定运行, 对水冷模式和通道设计提出了很高的要求。作者用有限元软件 ANSYS 对 RFQ 进行高频电磁场、温度场、结构应力的耦合分析, 验证了冷却方案设计的可行性和可靠性。

关键词: SSC-LINAC; RFQ; 多物理场耦合; 频率漂移; 有限元

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.437

1 引言

兰州重离子研究装置(HIRFL)由扇聚焦回旋加速器(SFC)、分离扇回旋加速器(SSC)、冷却储存环主环(CSRm)和实验环(CSRc)4个加速器组成。SSC 是大型分离扇回旋加速器, 1988 年建成出束。

兰州重离子加速器国家实验室出于三方面的考虑, 决定为 SSC 增加一个直线注入器 SSC-LINAC^[1-2], 用于提高整个装置的性能。首先, 作为 CSRm 的注入器, SFC+SSC 的传输效率很低, 不能保证 Pb, Bi, U 等较重离子的流强; 其次, 考虑到超重元素合成谱仪对中等质量核素流强的要求, 需要将 SSC 引出的 Ca, Kr 等离子的流强提高到 1 pμA; 最后, 使用 SSC-LINAC 注入时, SFC 可独立运行, 提高装置的可用束流时间。

SSC-LINAC 由电子回旋共振离子源(ECRIS)、低能传输段(LEBT)、RFQ 加速器、中能传输线(MEBT)和 4 个 DTL 组成。注入器将 $^{238}U^{34+}$ 离子加速到 1.02 MeV/u, 然后注入 SSC 进行进一步的加速。RFQ 加速器是该注入器的重要组成部分, 将以连续波(Continue Wave)运行。

RFQ 加速器的特点是利用电四极场对束流进行横向聚焦, 调制电极产生的纵向分量对束流同时进行聚束和加速。现有的 RFQ 加速腔体主要有两种类型, 四翼型和四杆型^[4]。四翼型 RFQ 加速器由一个导体腔及四根均匀、对称地排列于腔体中的翼状电极组成。在四杆型 RFQ 加速器中, 四根电极由一排底部跟底座相连的支撑臂支撑着, 并且在某一位置相对的两根电极由同一支撑臂支撑, 沿着腔体长度方向支撑臂交替地支撑着两组相对的电极。四杆型适宜工作在 200 MHz 以下, 而四翼型适宜工作在 200 MHz 以上。四杆型加速器具有结构简单、易于加工安装、成本较低、场型便于调节的优点^[5]。

SSC 的直线注入器中的 RFQ 加速器频率采用 53.667 MHz, 所以高频结构采用四杆型结构。其包括两对射频电极, 支撑电极的 12 个支撑板和 1 个底板。沿束流方向计数, 所有奇数的支撑板支撑着一对射频电极, 所有偶数的支撑板支撑着另一对电极(见图 1)。RFQ 加速器各项参数见表 1。

RFQ 加速器运行时, 腔壁上损耗的能量转变成热

收稿日期: 2016-02-28; 修改日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11079001, 91026001)

作者简介: 王静(1984-), 女, 河北邢台人, 博士研究生, 从事计算机辅助工程研究; E-mail: wangj1984@impcas.ac.cn

通信作者: 何源, E-mail: hey@impcas.ac.cn.

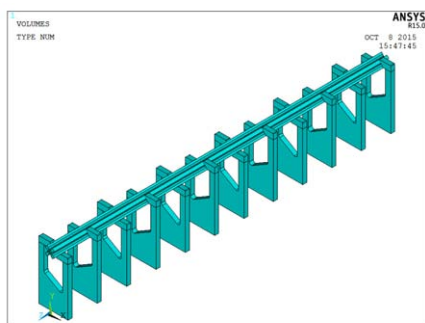


图 1 (在线彩图) 计算模型中支撑板与电极的位置关系示意图

表 1 RFQ 腔体主要参数

参数	数值	参数	数值
加速粒子	238U ³⁴⁺	占空比/%	CW
频率/MHz	53.667	结构总长度/mm	2510.1
极间电压/kV	68	直径/mm	858
功率/kW	30		

量, 体受热后温度升高导致形变产生。而 RFQ 腔体的运行频率取决于腔体本身的几何形状和尺寸, 当腔体发生形变时, 运行频率会不可避免地发生漂移。频率漂移会直接造成束流品质和传输效率的降低。为了最大限度地降低频率漂移幅度, 就要严格控制腔体的温度变化, 所以腔体的冷却系统至关重要。相比四翼型结构, 四杆型结构的冷却效果不够充分, 而且其对于高频热功率导

致的腔体形变以及频率偏移更加敏感。这也是国际上有些四杆型 RFQ 腔体不能正常运行的主要原因^[6]。为了较准确地预测温度升高对腔体频率带来的变化, 以及最大程度地降低温度升高对工作频率的影响, 在设计过程中, 必须对 RFQ 加速器腔体进行多物理场耦合分析。

2 多物理场耦合分析流程

连续工作方式和高束流强度对 RFQ 加速器的冷却系统提出了很高的要求, 冷却方式会直接影响 RFQ 加速器的稳定运行。为了确定频率发生漂移, 以及电极的形变是否在保证腔体稳定运行的范围内, 就必须要对加速器腔体进行高频分析-热力学分析-结构分析-高频分析这一系列的多物理场耦合分析。

进行分析所使用的物理模型是按照设计形状和尺寸, 在 ANSYS 软件^[7]中建立的三维模型, 模型包括 RFQ 的实体部分 (包括支撑板、电极、底座、腔壁和两个端盖)、真空腔体部分以及贯穿于实体内部的冷却水管道。RFQ 模型实体部分的材料性质为理想的无氧铜, 真空部分的材料性质为真空。冷却水管道贯穿于支撑板、电极和底座之中, 冷却水管道如图 2 所示, 图 2(a) 是四个电极的冷却水管道, 图 2(b) 是底板和支撑板的冷却水管道。采用此物理模型进行多物理场耦合分析, 来评估温度的升高和频率的漂移是否在可控范围内。

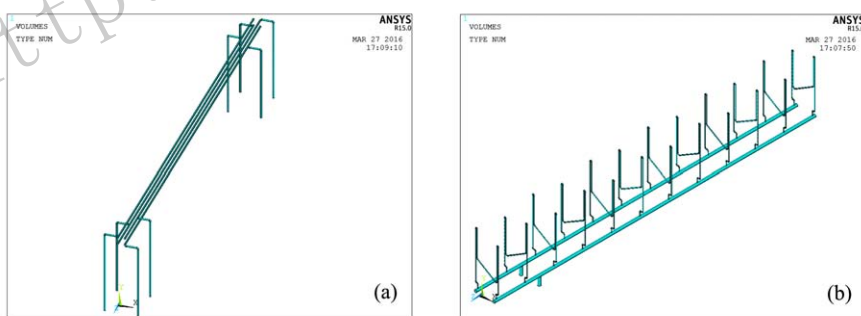


图 2 (在线彩图) 腔体内部冷却水管道分布示意图

在 ANSYS 软件中建立了实体模型后, 在进行有限元分析之前, 还需要通过网格划分将实体模型转化为能够直接计算的网格。由于要进行高频分析、热分析和结构分析, 在分析前先要选择相应的单元类型, 即: HF119 单元 (高频分析时使用)、SURFACE152 单元和 SOLID87 单元 (热分析时使用), 在热分析结束后, 将 SOLID87 单元转换成 SOLID187 单元 (结构分析时使用)。在划分网格时, 也按照耦合分析的对顺序来划分网格, 先划分 HF119 单元, 再划

分 SURFACE152 单元和 SOLID87 单元。HF119 单元网格划分的对象为真空体, 四面体单元, 单元尺寸设置为 0.06。SURFACE152 单元网格划分的对象为真空体与实体互相接触处的共有面, 三角形单元, 单元尺寸设置为 0.06。SOLID87 单元网格划分的对象为支撑板、电极、底座、腔壁和两个端盖, 四面体单元, 单元尺寸根据每个对象的形状的复杂程度分别设置从 0.02 到 0.06 不等。所有的网格均为自由网格, Smart Size 网格划分水平为 5, 总网格数约为 618 万。

2.1 高频分析

高频分析是为了计算出RFQ腔体的频率,并在频率正确的条件下给出腔体内表面的电流分布,以此作为热力学分析的输入边界条件。进行高频模态分析时的区间为RFQ模型的真空部分。由于RFQ设计的频率为53.667 MHz,为了减少计算量,将求解的搜索范围频率设置为50 MHz,结束频率设置为60 MHz。计算得到,腔体频率为53.43 MHz, Q 值为12 576.831 4。

2.2 热力学分析

由热力学分析可以求解得到经水冷系统冷却后,RFQ腔体温度升高的数值,并得到稳定状态下腔体的温度分布图,可以掌握RFQ加速器腔体在运行状态下的升温状况。热力学分析所用的模型是RFQ腔体模型的实体部分。进行热分析时需要读取高频分析的结果中的热量信息,通过表面效应单元将高频产生的热量传递到热力学分析过程中,作为热力学分析的热源。冷却水与RFQ的实体部分进行对流换热,而RFQ腔体的外表面与空气进行对流换热。通过传热学知识可以对冷却水的对流换热系数进行估算。影响对流换热强弱的主要因素有^[8]:

- (1) 流体流动的起因;
- (2) 流体有无相变(如气态与液态之间的转化);
- (3) 流体的流动状态;
- (4) 换热表面的几何因素;
- (5) 流体的物理性质。

在不同工作环境的情况下,传热强度会发生倍的变化,所以对流换热是一个受很多因素影响且其强度变化幅度又很大的复杂过程。在这里,为了简化计算过程,我们只考虑其中一部分影响对流换热系数较大的因素,对对流换热系数进行近似估算,将计算结果作为边界条件代入到有限元分析中使用。

由于在仿真模拟中不涉及冷却水的流体分析,只进行稳态的热力学分析,分析过程中认为管道中不同位置的冷却水温度是相同的,所以在冷却水管道的表面上加载对流传热系数和恒定的温度值。RFQ腔体的外表面是与空气接触的,空气温度也会对腔体温度造成一定程度的影响,所以在腔体的外表面上也要施加对流传热系数和恒定的温度值。

经计算可得到RFQ腔体的温度分布情况,如图3所示,从中可见电极和支板的大部分区域的温度都获得了有效控制。由于支撑板顶端与电极的连接处没有水冷,因此温度相对较高。

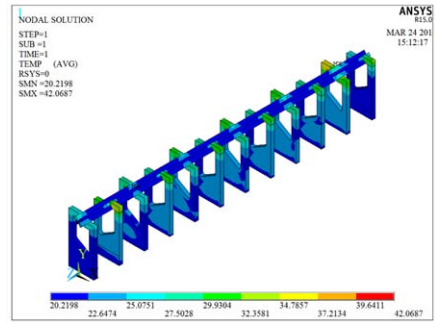


图3 (在线彩图)当馈入功率为30 kW时腔体支撑板和电极的温度分布图,温度最高处在支撑板顶端与电极的连接处(此处无冷却管路分布),温度升高为22.07 °C

2.3 结构分析

由于温度升高会使金属材料发生膨胀变形,结构分析可求解得出腔体受热而发生的变形量的幅度和趋势,结构分析计算所使用的是RFQ腔体的实体部分。但由于热力学分析和结构分析使用的是不同的单元类型,所以进行结构分析前,需要先转换模型的单元类型,将热力学单元转变成结构分析单元。

结构分析的依据是腔体温度变化的仿真结果,同样,需要将热力学分析的结果文件读入到结构分析中。考虑到在腔体的温度发生变化之前,腔体的温度与环境温度是相同的,而在ANSYS软件的结构分析过程中,默认状态下,初始的温度为零度,与环境温度相差很大,故在进行分析计算时,必须要设定腔体开始发生形变时的初始温度值,将初始温度设定成与环境温度相同。此外,依据腔体安装时的固定方式对腔体的相关部位进行对应的自由度的约束。

结构分析可以计算出RFQ腔体发生形变的数值,可以得到RFQ加速器腔体在运行状态下的变形情况。RFQ腔体的位移分布情况如图4所示,主要的形变现象发生在电极的末端,图示情况为在水流速度为2 m/s

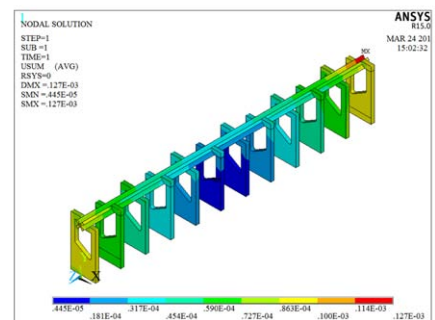


图4 (在线彩图)当水流速度为2 m/s时腔体的位移分布图,位移最大处在电极的末端,最大位移为127 μm

时，最大形变量为 127 μm。

2.4 二次高频分析

RFQ 腔体发生形变后，腔体内部的真空部分的形状也随之发生变化，而腔体内部形状和尺寸会直接影响到腔体频率，引发频率漂移。重新进行高频分析就是为了比较变形后的腔体频率与初始频率的差值，得出频率漂移的情况。高频分析所用的模型与第一步中使用的 RFQ 模型的部分是相同的。但这部分的形状已经受热发生了改变，故进行第二次高频分析前要先将真空腔体进行网格更新，即调整网格区域使之与变形的结构网格重合，在 ANSYS 中这种调整由网格随移来实现。进行二次高频分析的边界条件与求解设置与第一次高频分析相同。经分析，腔体频率为 53.51 MHz，与第一次高频分析的结果相比较得出，频率漂移量约为 84.7 kHz。

3 参数化分析与结果

在热力学分析中，可以改变计算的参数，如馈入功率的大小、热交换系数等，计算各种不同条件下的频率漂移情况，进行对比研究。

3.1 改变馈入功率对频率的影响

改变馈入功率值的参数化分析计算，其目的是分析功率大小与频率漂移的关系。将功率值从 30 kW 升高到 39 kW，对流换热系数和水温保持不变，环境温度保持不变，分析 RFQ 腔体在不同功率条件下对应的温度升高、形变位移及频率漂移情况，计算结果如图 5 所示。

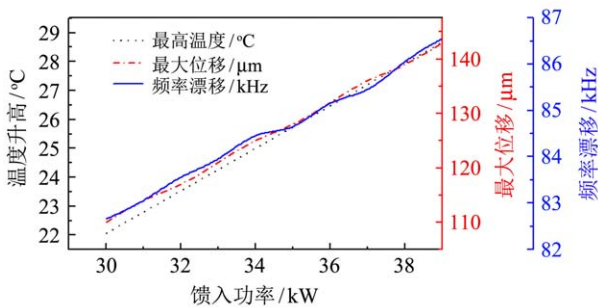


图 5 (在线彩图) 功率大小与腔体温度、位移及频率漂移的关系

由图 5 可看出 RFQ 腔体在运行功率 35 kW 下的温度升高造成的频率漂移在 100 kHz 内，可为腔体运行时的调谐提供参考。

3.2 改变冷却水流速对频率的影响

改变冷却水流速的参数化分析计算，只改变冷却水流速，馈入功率和水温保持不变，环境温度保持不变，

计算 RFQ 腔体在对流换热系数不同时对应的温度升高、形变位移及频率漂移情况。计算结果见图 6 所示。

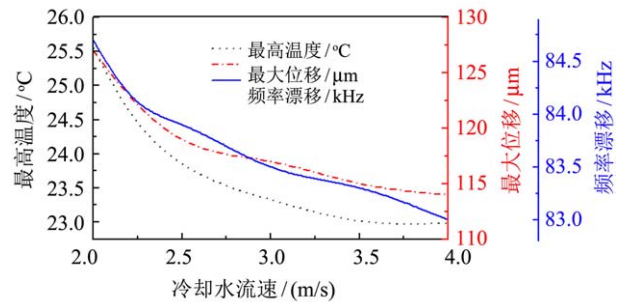


图 6 (在线彩图) 水流速度与腔体温度、位移及频率漂移的关系

分析计算结果，当增大冷却水的流速时，估算得到的对流换热系数随之增长，腔体的温度升高幅度随之减小，而当冷却水的流速提高到一定程度时，腔体的温度升高幅度的变化越来越小，也就是单纯提高冷却水流速并不能得到很理想的冷却效果。反之，当冷却水流速过高时，极可能造成腔体发生振动或腔壁发生腐蚀，会对腔体的稳定运行带来不利因素。为了使腔体充分冷却，还要满足冷却水保持较低的流速这一要求，将水流速度保持在 2.0 m/s 到 2.5 m/s 左右较好，且水流速度发生微小的波动时，对频率的影响范围在 1 kHz 以下，可以保证腔体运行时频率的稳定，也为腔体的调谐提供了一定的参考依据。

4 结果讨论

结构分析中，RFQ 腔体受热膨胀，长度的相对变化量 (dL/L) 与温度变化量 dT 之比，称为线胀系数^[9]，以符号 α 表示：

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} , \tag{1}$$

由式(1)可知，温度发生变化时，长度的变化量为

$$\Delta L = L\alpha\Delta T , \tag{2}$$

其中：ΔL 热膨胀造成的长度变化量；L 原来的长度；ΔT 温度的改变；

从式(2)可知，腔体受热膨胀的变形量，即结构分析结果中的最大位移量，应该是与温度的改变量成正比。而从热分析和结构分析的结果中可以看出，温度升高的数值与最大位移的数值是呈线性分布的，这一结论是合理的。

频率漂移的结果基本呈线性分布，且频率漂移的数值都集中在很小的范围内，变化不大。

2014 年 5 月，该 RFQ 进行高频锻炼时，在连续波运行模式下，馈入功率为 35 kW 时，频率漂移为 2.18

kHz/kW^[10]。本文中用ANSYS分析得出的结果为,当馈入功率为35 kW时频率漂移为84.7 kHz,即频率漂移比率为2.42 kHz/kW。RFQ的高频锻炼与本文中ANSYS分析预言的RFQ在相同功率下的频率漂移2.42 kHz/kW,误差约为10%,在可接受的范围内。论文的分析结果为RFQ的设计提供了正确的依据。

5 总结

本文针对HIRFL SSC注入器中的RFQ腔体进行了多物理场仿真。系统性地研究了不同输入功率以及水冷系统中水流速对腔体高频性能的影响。分析结果表明,该四杆型RFQ腔体在CW全功率的运行条件下,频率漂移范围在腔体的频率可控调节范围之内,水冷系统满足腔体正常运行的需求。由于模型尺寸较大,网格数量巨大,计算量过大且对计算机硬件要求较高,上述多物理场耦合分析是对真实情况的近似分析,得到的结果与实际情况相比,有一定的偏差存在。并且本文的热分析过程为稳态分析,在后续工作中可引入流体分析,会使计算结果更贴近实际情况,更有意义。

参考文献:

- [1] HE Yuan, WANG Zhijun, XIAO Chen, *et al.* Conceptual Design of Linear Injector for SSC of HIRFL[C]. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, 2010: 482.
- [2] LU Yuanrong, LIU Ge, ZHU Kai, *et al.* A CW High Charge State Heavy Ion RFQ for SSC-LINAC[C]. Proceedings of IPAC2013, Shanghai, 2013: 3878-3880.
- [3] LIU Ge, LU Yuanrong, HE Yuan, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2013, **701**: 186.
- [4] CHEN Jia'er, FANG Jiayun. Progress in Natural Science, 2001, **11**(11): 1121. (in Chinese)
(陈佳洱, 方家驹. 自然科学进展, 2001, **11**(11): 1121.)
- [5] YANG guojun, ZHANG zhuo, HE xiaozhong. High Power Laser and Particle Beams, 2008, **20**(8): 1349. (in Chinese)
(杨国君, 张卓, 何小中. 强激光与粒子束, 2008, **20**(8): 1349.)
- [6] Weissman L, Berkovits D, Eliyahu I, *et al.* The Status of The SARAF LINAC Project[C]. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, 2010: 679.
- [7] <http://www.ansys.com/>
- [8] YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. The Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 197. (in chinese)
(杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197.)
- [9] MA Qingfang, FANG Rongsheng, XIANG Licheng. Practical Handbook thermophysical properties[M]. Beijing: China Agricultural Machine Press, 1986: 12. (in chinese)
(马庆芳, 方荣生, 项力成. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986: 12.)
- [10] YIN X J, YUAN Y J, XIA J W, *et al.* Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2016, **19**: 010402.

Multi-physics Field Coupling Analysis of RFQ Cavity for SSC-LINAC

WANG Jing¹, HUANG Jianlong¹, ZHANG Xiaoqi², HE Yuan², YANG Yaqing², LU Yuanrong³, ZHU Kun³

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China;

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

3. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Heavy Ion Research Facility at Lanzhou(HIRFL) consists of SFC, SSC, CSRm and CSRc. A new linac injector, which will increase U^{34+} to 1 MeV/u, is designed for SSC to increase the beam intensity to ten times higher. The new injector, whose frequency is 53.667 MHz, is composed by a RFQ (Radio Frequency Quadrupole) cavity and four DTL(Drift Tube Linac) cavities. The RFQ cavity, whose RF power is 30 kW, is operated at CW(continuous wave) mode. The heat produced by HF (high frequency) electromagnetic will cause deformation of RFQ structure, lead to the resonant frequency shift, and reduce the focusing efficiency of the cavity. An efficient cooling system is necessary to ensure that the RFQ cavity can stably be operated at the nominal frequency. A detailed multi-physics field coupling analysis of RFQ has been finished with 3D finite elements software ANSYS. The result of the analysis shows that the water cooling system can cool the RFQ cavity fully and keep the frequency drift be in a acceptable level.

Key words: SSC-LINAC; RFQ; multi-physics field coupling; frequency shift; finite element

Received date: 28 Feb. 2016; Revised date: 18 Mar. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11079001, 91026001)

Corresponding author: HE Yuan, Email:hey@impcas.ac.cn.