

Simulation Analysis on Frequency Control of Superconducting Elliptical Cavity for CSNS-II Linac

Bo Li^{1,2}, Huachang Liu^{1,2}, Yun Wang^{1,2}, Peihua Qu^{1,2}, Ahong Li^{1,2}, Xiaolei Wu^{1,2}, Mengxu Fan^{1,2}, Qiang Chen^{1,2}

¹Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing

²Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan Guangdong

Email: libo0910@ihep.ac.cn

Received: Jun. 26th, 2020; accepted: Jul. 7th, 2020; published: Jul. 14th, 2020

Abstract

Controlling frequency drift is very important during superconducting elliptical cavity development. If the frequency deviation is too large, it may cause the cavity to bear too large tuning force, or exceed the tuning range of the tuner, or produce plastic deformation, which will affect the cavity mode and mechanical properties. So, only when the frequency reaches the required tuning range, the cavity can be applied in practical engineering. Factors that affect the frequency of elliptical cavity were simulated for China Spallation Neutron Source upgrade in this paper, including vacuum medium and vacuum deformation, 2 K cooling contraction, polishing, gravitation, variation of frequency with equator radius and tuning sensitivity. To ensure the accuracy of the final frequency of elliptical cavity, it can be used in the engineering of CSNS-II upgrading.

Keywords

Superconducting Elliptical Cavity, Frequency, Vacuum, Cooling Contraction, Polishing, Gravitation, Tuning Sensitivity

CSNS-II超导椭球腔频率控制仿真研究

李波^{1,2}, 刘华昌^{1,2}, 王云^{1,2}, 瞿培华^{1,2}, 李阿红^{1,2}, 吴小磊^{1,2}, 樊梦旭^{1,2}, 陈强^{1,2}

¹中国科学院高能物理研究所, 北京

²散裂中子源科学中心, 广东 东莞

Email: libo0910@ihep.ac.cn

收稿日期：2020年6月26日；录用日期：2020年7月7日；发布日期：2020年7月14日

摘要

超导椭球腔研制过程中工作频率的控制至关重要,工作频率偏差过大,可能会使腔体承受过大的调谐力,或者超出调谐器调谐范围,或者产生塑性形变,影响腔体模式和机械性能。因此,工作频率要控制到要求的调谐范围内,腔体才能很好的应用在实际工程上。本文使用COMSOL软件对影响CSNS-II (China Spallation Neutron Source upgrade)椭球腔工作频率的各个因素进行了仿真模拟,包括真空介质及抽真空形变,腔体2 K降温收缩,抛光的厚度,重力作用,频率随赤道半径的变化,调谐灵敏度进行了仿真分析,确保椭球腔最终工作频率的准确,能用于CSNS-II升级的实际工程。

关键词

超导椭球腔, 工作频率, 真空, 降温收缩, 抛光, 重力作用, 调谐灵敏度

Copyright © 2020 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

CSNS-II 束流功率计划提高到 500 kW, 直线加速器出口能量需要提高到 300 MeV 以上, 脉冲流强提高到 50 mA, 脉宽和重复频率不变[1] [2]。其直线加速器升级方案如图 1 所示, 在 DTL 后方 97 m 的长度内, 选择 Spoke 腔加中 β 椭球腔的超导加速方案, Spoke 腔的几何 βg 为 0.5, 能量增益到 150 MeV, 椭球腔采用 5-cell 结构, $\beta g = 0.6$, 工作频率 648 MHz, 能量增益到达 300 MeV 以上[3]。

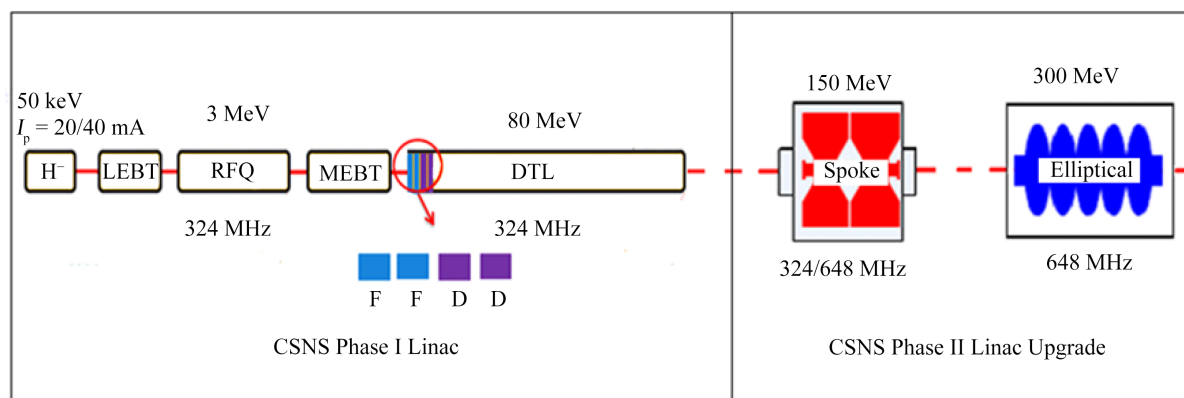


Figure 1. Layout of CSNS-II linac

图 1. CSNS-II 直线加速器布局图

椭球腔结构模型如图 2 所示。超导椭球腔机械结构简单, 加工及表面后处理相对容易, 束管孔径大, 束损小, 且可以达到非常高的加速梯度。另外, 椭球腔已有较多的腔体运行经验、且其附属配件功率耦合器, 调谐器及恒温器设计制造也相对成熟, 工程风险较低[4]。

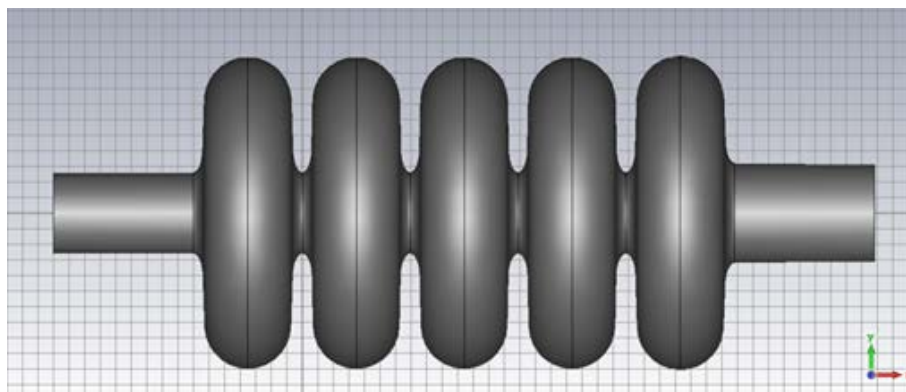


Figure 2. Model diagram of CSNS-II 5-cell elliptical cavity

图 2. CSNS-II 5-cell 椭球腔模型图

椭球腔多采用铝板冲压、焊接的加工工艺[5] [6]，后处理主要有机械抛光和化学缓冲抛光[7]，最后运行在 2 K 低温和高真空环境下。这些外部因素都会改变椭球腔的工作频率[8]，目前国内外没有看到对这种大型多单元的超导椭球腔频率控制进行系统的分析研究，本文首先利用 COMSOL Multiphysics 软件的本征模块计算腔体的原工作频率，然后根据实际情况，带入形变因素，用固体力学模块计算腔体的形变，把形变后模型再次计算工作频率，系统全面的分析了外部因素对腔体工作频率的影响。最后，根据计算结果及调谐范围适当修正腔体的设计频率，保证腔体的可用。

2. 真空介质及抽真空形变对频率的影响

抽真空改变了超导椭球腔内介质的相对介电常数，超导腔的工作频率与其内介质相对介电常数的平方根成反比关系[9]。空气的相对介电常数为 1.000585，因此，空气介质时工作频率为 647.81 MHz 时，抽真空后工作频率变为 648 MHz，增加约 190 KHz。由于腔体最终工作在真空状态下，这部分频移不会在加工过程中考虑，半腔测量时应考虑介电常数带来的影响。

抽真空还会对腔体产生一定的形变，如图 3 所示，这部分形变会使椭球腔的工作频率发生漂移，不同的真空度跟频移的关系如图 4 所示。考虑到腔体工作在 2 K 状态下，内外压强差约为 30 mbar，不考虑液氦重力产生的压强差，腔体由于抽真空形变工作频率会增加 0.18 kHz。

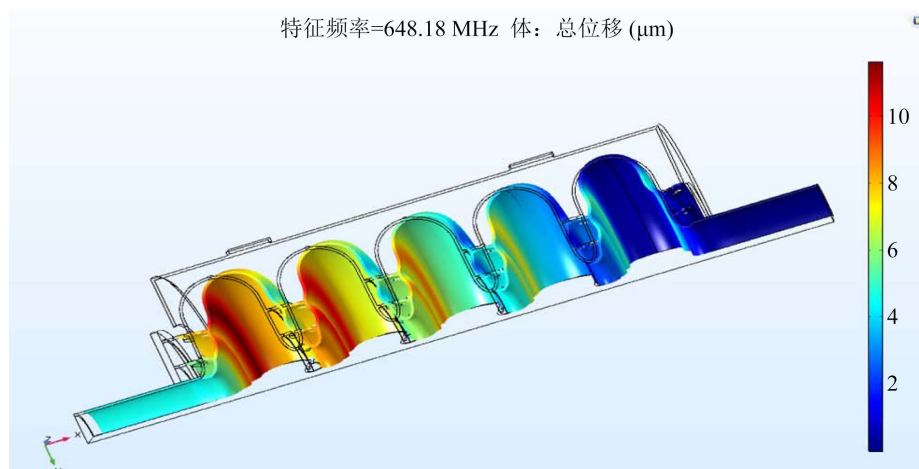


Figure 3. Deformation caused by vacuum pumping

图 3. 抽真空产生的形变

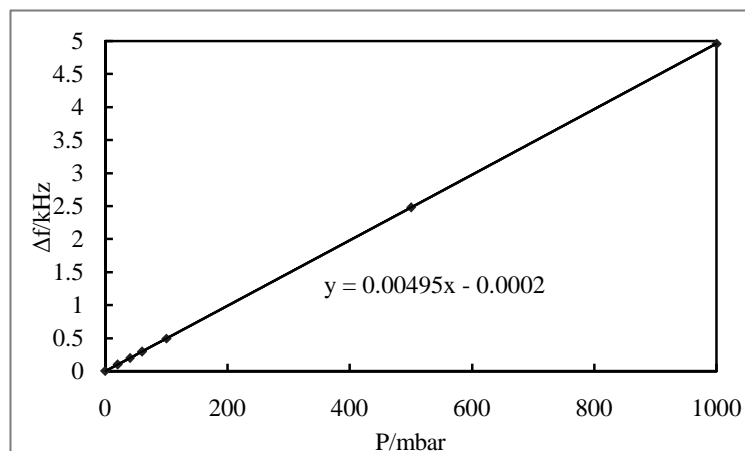


Figure 4. Frequency shift varies with vacuum

图 4. 频移随真空度的变化

3. 腔体 2 K 降温收缩频率的改变

CSNS 椭球腔工作温度为 2 K，降温产生的形变如图 5 所示，电容区由于加强筋的存在，形变相对较小，而电感区则相对产生了很大的收缩，最大形变量 320 μm ，导致腔体的工作频率增加 486 kHz。

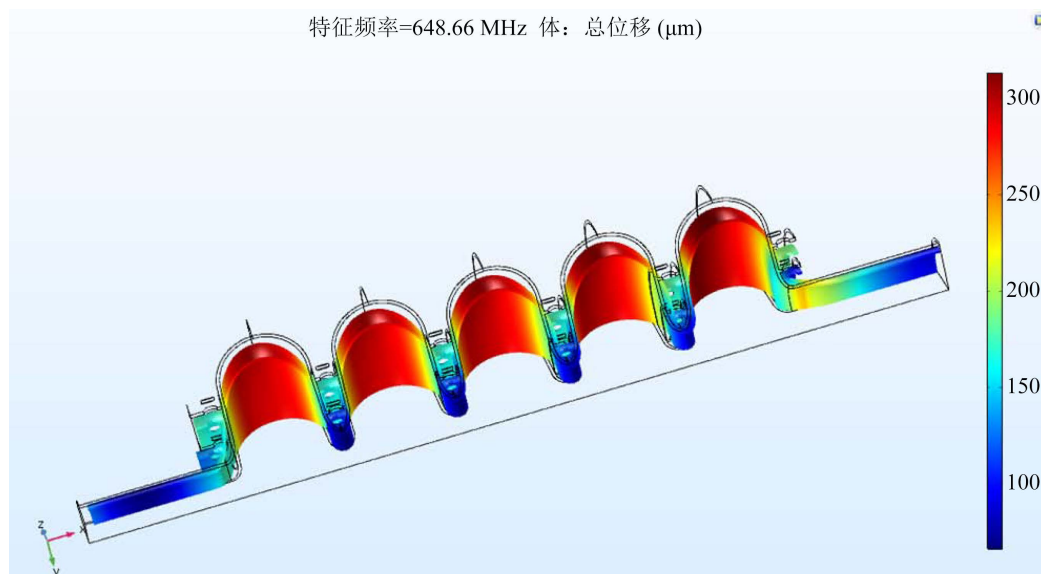


Figure 5. Deformation of cavity cooling to 2 K

图 5. 腔体降温到 2 K 的形变

4. 腔体抛光厚度对频率的影响

在超导腔研制过程中，抛光是其表面后处理中的一道非常重要的工序。抛光包括滚磨抛光、局部研磨抛光、缓冲化学抛光、电抛光等。抛光的厚度会影响超导腔工作频率，本文在原始壁厚的基础上，分别对抛光 50 μm ，100 μm ，150 μm ，200 μm ，250 μm 后超导腔的工作频率进行了仿真计算，以了解抛光厚度对超导腔工作频率的影响，计算结果如图 6 所示。可以看出，每抛掉 10 μm 的厚度，超导腔的工作频率减小 26.3 kHz，这对椭球腔表面后处理抛光有非常重要的指导意义。

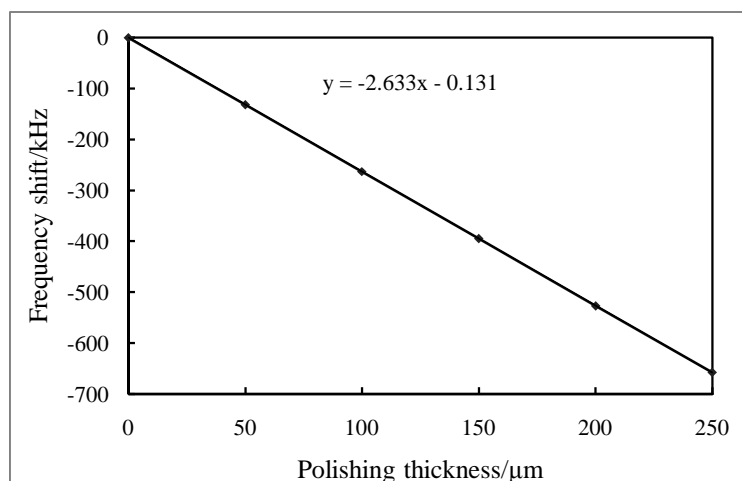


Figure 6. Frequency shift varies with polishing thickness
图 6. 频移随抛光厚度的变化

5. 重力对椭球腔的影响

超导椭球腔有效长度约 0.7 m，自重约 50 kg，运行时水平放置，两端相对固定，在重力的作用下会出现中间下沉形变。如图 7 所示是带加强筋的椭球腔下沉形变图，最大形变 20 μm，较没带加强筋的 250 μm 有了很大的改善，频移 1.4 Hz，可以忽略不计。

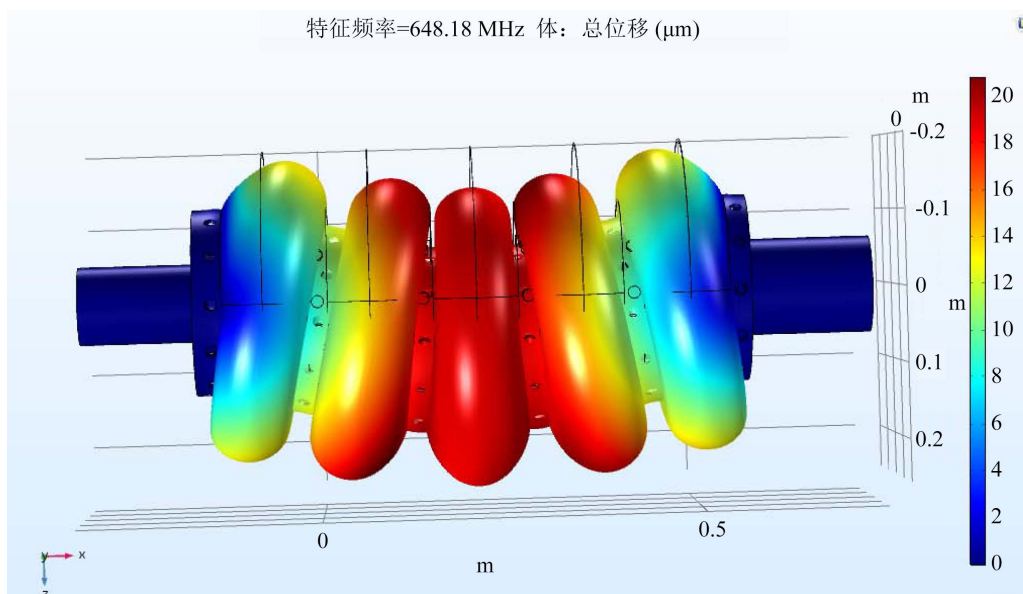


Figure 7. Frequency shift varies with polishing thickness
图 7. 频移随抛光厚度的变化

6. 工作频率与椭球腔赤道半径的关系

椭球腔的结构如图 8 所示，由七个参数构成。其中赤道半径 Re_q 对椭球腔的高频参数影响很小，对椭球腔的工作频率却非常敏感，因此，一般通过调节赤道半径来调椭球腔的工作谐振频率[10]。通过 CST 软件仿真赤道半径与工作频率的关系如图 9 所示，每增大 10 μm 赤道半径，椭球腔的工作频率减小 37 kHz。

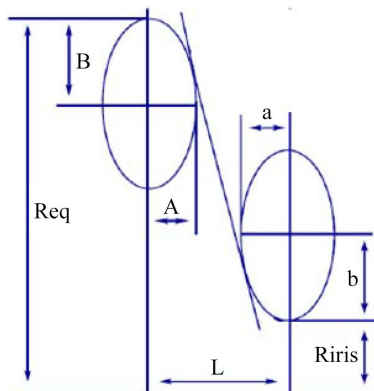


Figure 8. Structural parameter diagram of elliptical cavity
图 8. 椭球腔结构参数示意图

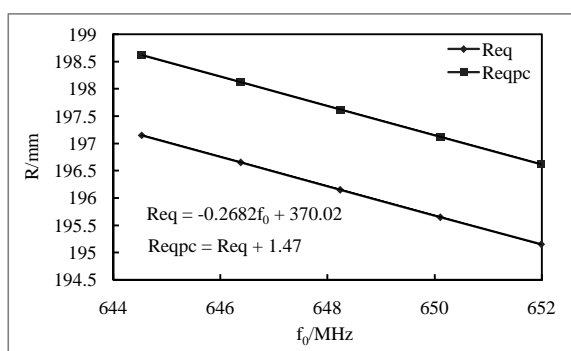


Figure 9. Frequency varies with R_{eq}
图 9. 椭球腔频率与赤道半径的关系

7. 调谐敏感度计算

超导椭球腔工作频率的调节是基于改变腔体的形状来实现的，调谐器通过挤压腔体产生轴向形变 [11]，如图 10 所示，进而带来频移。不同的调谐压力或位移产生不同的频移，如图 11 所示。通过仿真计算得到调谐器每推进 1 mm 的位移，腔体工作频率会减小 231 kHz，即调谐敏感度为 231 kHz/mm。

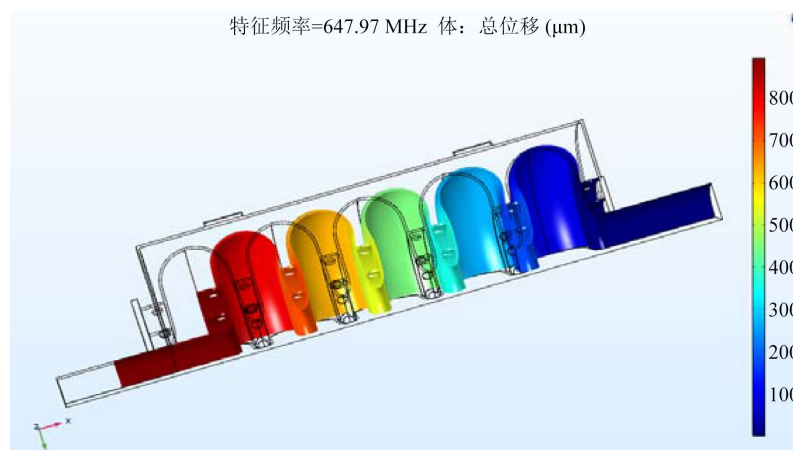


Figure 10. Deformation of elliptical cavity caused by tuning displacement
图 10. 椭球腔调谐位移形变

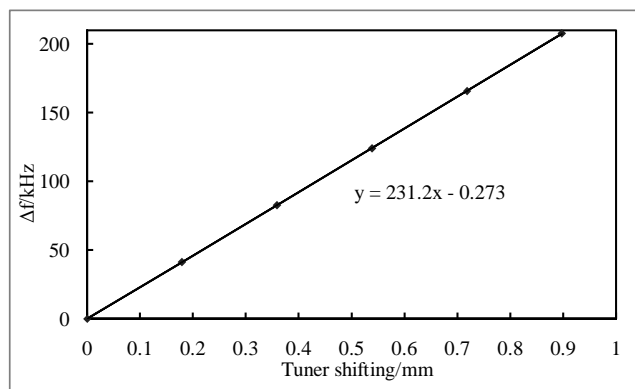


Figure 11. The relationship between tuning displacement and frequency shift

图 11. 调谐器位移与调谐频率偏移关系

8. 总结与展望

对 CSNS-II 超导椭球腔研制过程中工作频率的影响因素进行了仿真计算分析,腔体运行在真空环境下,仿真计算采用真空介质,因此介质的影响不需要计入,真空形变导致的频移较小。腔体 2 K 降温收缩导致的频率增加量与抛光 200 μm 厚度导致频率减小量相当。总的频移在几十 kHz,可以通过调整赤道半径修正,对于这个不大的量也可以通过预调谐机或调谐系统进行调整。赤道半径与频率的关系和调谐灵敏度本文已经给出,作为研制超导腔的重要指导,确保椭球腔最终工作频率的准确。下一步需要在腔体加工过程中对上述的仿真计算结果进行实测核对。

基金项目

广东省基础与应用基础研究基金联合基金,基金编号 2019B1515120012。

参考文献

- [1] Wang, S., Fang, S.X., Fu, S.N., et al. (2009) Introduction to the Overall Physics Design of CSNS Accelerators. *Chinese Physics C*, **33**, 1-3. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/33/S2/001>
- [2] Wei, J., Fu, S.N., Tang, J.Y., et al. (2009) China Spallation Neutron Source—An Overview of Application Prospects. *Chinese Physics C*, **33**, 1033-1042. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/33/11/021>
- [3] 李波, 刘华昌, 王云, 等. CSNS-II 超导椭球腔的高频设计和二次电子倍增研究[J]. 核技术, 2019, 42(8): 080201.
- [4] 温良剑. ADS 中 β 强流超导加速腔物理研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2016: 36.
- [5] Padamsee, H. (1998) RF Superconducting for Accelerators. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- [6] Chiaveri, E. and Lengeler, H. (1984) Welding of Niobium Cavities at CERN. *Proceedings of SRF Workshop*, Geneva, 611-625.
- [7] 陈向林, 唐县娥, 法涛, 等. 超导射频腔用铌材的表面化学抛光技术[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 2472-2476.
- [8] 刘亚萍, 李少鹏, 王光伟, 等. BEPCII 500MHz 超导高频腔的仿真计算[C]//中国核科学技术进展报告——中国核学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国核学会, 2009: 182-187.
- [9] 刘亚萍. BEPCII 500MHz 铌腔的研制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2011: 38.
- [10] 郑洪娟. ILC/CEPC 超导加速系统设计及关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2016: 74.
- [11] 米正辉. 超导腔调谐器设计研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2015: 29.