

三次谐波超导腔高次模抑制研究

于海波^{1,2,3} 刘建飞^{1,3} 侯洪涛^{1,3} 马震宇^{1,3} 封自强^{1,3} 毛冬青^{1,3}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (上海市低温超导高频腔技术重点实验室 上海 201800)

摘要 对上海同步辐射装置中超导三次谐波腔开展了高次模深度抑制研究。分析了上海光源对三次谐波腔高次模的抑制要求,用电磁场计算软件 SEAFISH 作高次模吸收器长度、安装位置等参数的模拟计算和优化设计,以深度抑制各有害高次模,使高次模的分路阻抗降至能满足束团不稳定性阈值的要求。用 ABCI 计算得到了谐波腔的高次模功耗理论值。

关键词 三次谐波腔,高次模吸收器,模拟计算,损耗因子

中图分类号 TL503.2

上海光源(SSRF)的束流亮度高于 10^{20} photons/(s·mm²·mrad²·0.1%·BW),其特点为高空间分辨率、高动量分辨、超快时间分辨,但其储存环在水平发射度为 3.9 nm·rad 和束流动力学孔径小的工作参数下,导致了以托谢克寿命(Touschek lifetime)为主的束流寿命短、束流不稳定性等不利因素。

超导高次谐波超导腔可在不影响亮度的前提下提高束流寿命,同时提供朗道阻尼以克服强流不稳定性。国际上诸多光源,如 ALS^[1], NSLS^[2], BESSY-II^[3]已成功安装运行了三次谐波腔,束流寿命提高了 2-3 倍。根据“低损耗,高阻抗”设计原则,已在 SSRF 上完成优化设计和初步加工的无源三次谐波超导腔^[4-5],频率为 1499.69 MHz,基模模式采用 TM010 模式,设计工作腔压达到 0.5 MV,设计加速间隙 100 mm,图 1 为采用“深冲压-电子束焊接”工艺完成的纯铌腔。

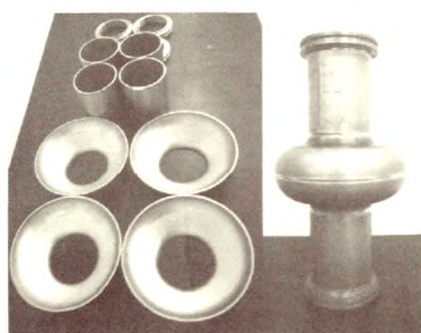


图 1 加工完成的三次谐波腔纯铌腔^[4]
Fig.1 The 3rd harmonic superconducting Nb cavity at SSRF.

三次谐波腔在储存环的安装运行,其自身的高次模也得进行深度抑制,才能在提高束流寿命等性能的同时,不再引入新的束流不稳定性因素。优化设计后的三次谐波超导腔,各有害高次模式可传输出超导腔^[4-5]。高次模抑制方案,则在超导腔两侧安装束管式高次模吸收器吸收高次模功率,降低高次模的阻抗,从而满足束流不稳定性阈值的要求。

1 多束团不稳定性阈值要求

高频腔的高次模是引起多束团不稳定的主要原因,须用高次模吸收器进行高次模抑制,降低高次模的阻抗,以满足多束团束流不稳定性要求。同时,高次模品质因数的下降,也降低高频腔内所激励尾场的衰减时间,减小尾场效应所带来的束流不稳定性。

上海光源的纵向束团不稳定性阈值 $R_{||}$ 和横向不稳定性阈值 $R_{\perp}$ 可由式(1)估算^[5]。

$$R_{||} < 2v_s(E/e)/(f_r\eta|\tau_s I_0) \quad R_{\perp} < 2(E/e)/(\tau_{\perp} f_0 I_0 \beta_{\perp}) \quad (1)$$
其中, $E/e=3.5 \times 10^9$ V, $v_s=7.42 \times 10^{-3}$ Hz 为同步振荡频率, f_r 为高次模频率(GHz), $\eta=4.2 \times 10^{-4}$ 为滑相因子, $\tau_s=3.49$ ms 为纵向辐射阻尼时间, $I_0=0.3$ A 为平均流强, $\tau_{\perp}=6.97$ ms 为横向阻尼时间, $f_0=c/C=0.694$ MHz 为回旋角频率, $\beta_{\perp}=8.7$ m 为横向 β 函数。结果表明,在束流流强 300 mA 时,纵向和横向不稳定性阈值要求为 $R_{||} < 118.2/f_r$ k Ω 和 $R_{\perp} < 554.5$ k Ω /m。

已优化设计完成的三次谐波超导腔,其各谐振模式的特性阻抗 r/Q 只与腔体的形状有关,为高次

第一作者:于海波,男,1980年生,2011年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位

通讯作者:刘建飞

收稿日期:2011-10-10,修回日期:2011-11-15

模阻抗降低到满足不稳定性阈值要求, 需高次模吸收器降低高次模的有载品质因数 Q_L 。SSRF 中, 三次谐波腔引起的横向束流不稳定性很快被抑制, 故纵向束流不稳定性更为危险, 因此, 我们对三次谐波腔中高次模引起的纵向束流不稳定性进行研究。用 Superfish 计算软件计算了 SSRF 多束团纵向不稳定性阈值和三次谐波腔的高次模阻抗, 结果见图 2。在 $f=2.77\text{GHz}$, 高次模 TM011 的阻抗高于不稳定性阈值, 在 $f=4.4\text{GHz}$ 附近, 高次模其阻抗也高于不稳定性阈值, 这些都须用高次模吸收器降低模式的阻抗, 避免导致束流不稳定。

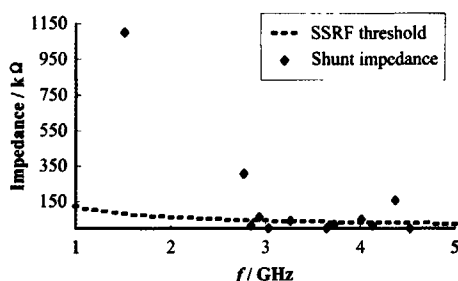


图 2 上海光源纵向多束团不稳定性阈值以及谐波腔分路阻抗

Fig.2 Threshold of longitudinal multi-bunch instability and shunt impedance of the 3rd harmonic superconducting cavity of SSRF.

2 高次模吸收器设计

束管式高次模吸收器在超导腔的高次模抑制上已成功应用^[6-7], 用铁氧体可吸收高达 10 kW 的高次模功率, 最大限度地抑制超导腔的高次模。吸收器所采用的功率吸收材料、吸收器在超导腔模组中的安装位置、吸收器的长度, 都对高次模的抑制效果产生重大影响。图 3 为三次谐波超导腔模组的示意图, L_t 为吸收器安装位置到铌腔的距离, L_f 为吸收器的长度。三次谐波腔的高次模研究表明^[5], 对束流影响最大的高次模是 TM011, 下文就抑制该模式进行高次模吸收器的安装位置、吸收器长度等进行模拟计算和优化设计, 并计算带有吸收器后所有有害高次模的阻抗, 以达 SSRF 的不稳定性阈值要求。

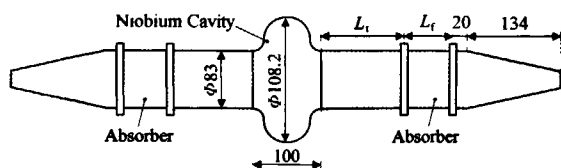


图 3 SSRF 三次谐波腔尺寸示意图

Fig.3 Schematics of the 3rd harmonic superconducting cavity of

SSRF.

2.1 高次模吸收器的长度

高次模吸收器用铁氧体材料 C48 作为功率吸收材料, 复介电常数和复磁导率已知^[9]。对不同的低次模吸收器长度, 用 SEAFISH 程序计算单极子模的品质因数。该程序可在建立谐振腔模型的同时, 输入铁氧体材料的性能参数, 输出谐振模式的谐振频率和有载品质因数。图 4 给出了高次模吸收器安装位置 L_t 为 116 mm 和 126 mm 时的 TM011 模式的有载品质因数, 可见吸收器长度大于 100 mm 时 TM011 的有载品质因数降低幅度变化很小, 所以我们选择吸收器的长度 $L_f=100\text{ mm}$ 。

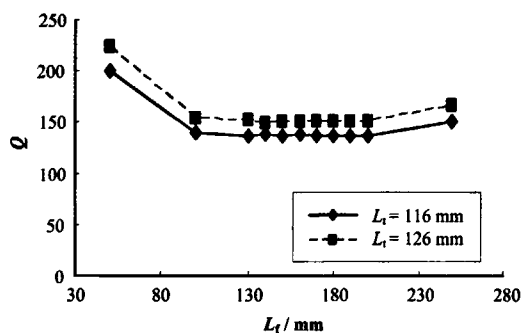


图 4 不同铁氧体长度下的有载品质因子
Fig.4 Q as the function of ferrite length.

2.2 吸收器安装位置

吸收器的安装位置和铁氧体材料 C48 的厚度也影响高次模的有载品质因数的降低。图 5 给出了吸收器长度 $L_f=100\text{ mm}$ 时, 用不同厚度铁氧体材料的吸收器安装在不同位置下的 TM011 模式的有载品质因数。TM011 的有载品质因数随铁氧体材料厚度增大, 并随吸收器安装位置 L_t 增大。由图 5, 在铁氧体厚度为 4 mm、吸收器安装位置 $L_t=120\text{ mm}$ 时, 高次模吸收器对 TM011 的抑制效果最好。

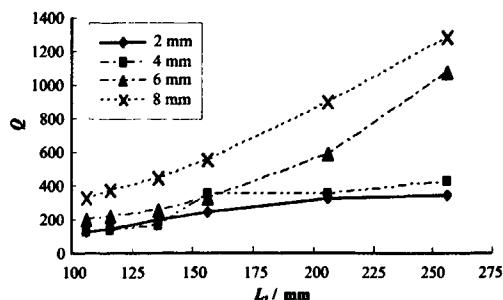


图 5 不同厚度铁氧体(长度为 100 mm)下有载品质因子
Fig.5 Q as function of the distance to install the ferrite absorber in thickness of 2–8 mm.

对 $L_r=100\text{mm}$, $L_t=120\text{mm}$, 铁氧体材料厚度为 4mm 的高次模抑制方案, 用 SEAFISH 程序计算了加载有高次模吸收器后的单极子阻抗(图 6), 各有害高次模的阻抗已远低于束流不稳定性阈值, 表明所选择的高次模吸收器的参数可以符合 SSRF 三次谐波腔的高次模抑制需求。

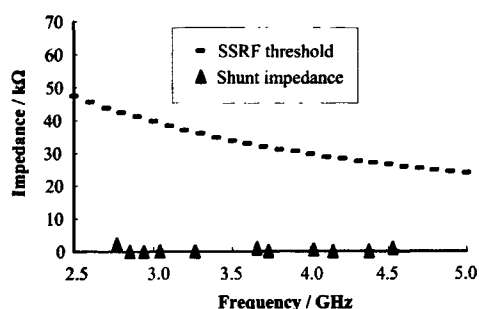


图 6 带有高次模吸收器情况下高次模分路阻抗和上海光源多束团不稳定阈值

Fig.6 Longitudinal multi-bunch instability with absorber.

2.3 高次模损耗因子

高次模损耗因子表征束团经过结构时的能量损失, 直接决定在一定束流下产生的高次模的功率高低和高次模吸收器的最大吸收功率。我们用 ABCI 程序计算了如图 4 所示的三次谐波腔模组的高次模损耗因子, 图 7 给出了束团长度为 4mm 时, 三次谐波腔高次模损耗因子随频率的积分曲线, 得到损耗因子三次谐波腔模组的损耗因子为 $k_L = 1.1\text{ V/pC}$, 减去基模的损耗因子 0.2 V/pC , 三次谐波腔高次模损耗因子为 0.9 V/pC 。SSRF 源运行在 150 束团填充模式、300 mA 束流流强下, 束团长度 4mm 的情况下, 高次模吸收器需吸收的功率将达 800 W 。

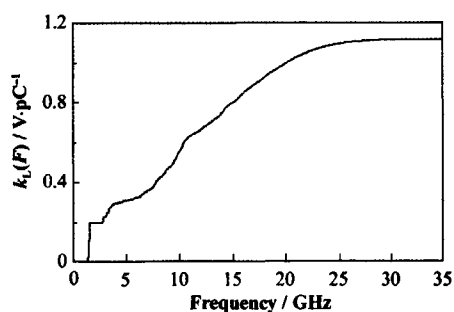


图 7 ABCI 计算的超导腔模组的高次模损耗因子

Fig.7 Loss factor of the 3rd harmonic cavity calculated by ABCI.

3 结论

本文利用电磁场计算软件 SEAFISH 和 ABCI 对上海光源用三次谐波腔的高次模吸收器进行了模拟计算和优化设计, 获得了优化后的高次模吸收器安装位置, 高次模吸收器的长度和所用铁氧体材料的厚度; 同时得到了加入高次模吸收器后各高次模的阻抗, 被降低到远低于束流不稳定性阈值。还给出了三次谐波腔的高次模损耗因子, 预估了在上海光源工作在多束团模式、300 mA 流强下的高次模吸收器所需要吸收的功率。

参考文献

- 1 Rimmer R A, Baptiste K, Byrd J, *et al.* A third-harmonic RF cavity for the advanced light source[C]. European Particle Accelerator Conference. 1998. Stockholm, Sweden
- 2 Biscardi R, Broome W, Buda S, *et al.* Progress on bunch lengthening at the NSLS VUV ring[C], Particle Accelerator Conference. 1991
- 3 Georgsson, M, Anders W, Byrd J M, *et al.* First experimental results on Landau cavities in Bessy II[C]. European Particle Accelerator Conference. 2000. Vienna, Austria
- 4 MA Zhenyu, Experimental studies on fabrication and surface treatments of the 3rd harmonic superconducting cavity[D], PhD thesis, SSRF, 2010 (in Chinese)
- 5 MA Guang-ming, Design and experimental research of harmonic cavities for SSRF[D], PhD thesis, SSRF, 2009(in Chinese)
- 6 Chojnacki E, Alton W J, Beamline RF load development at Cornell[C], The 18th Particle Accelerator Conference (PAC99), New York City, U.S.A, 1999
- 7 Tajima T. Development of higher order modes (HOM) for KEKB superconducting cavities[D]. PhD thesis, KEK
- 8 Mouris J, Hutcheon R M, Measurements of the complex microwave permeability of un-biased Ferrite C-48 and Ferrite-50, from room temperature to 200°C at frequencies between 915 MHz and 2800 MHz[R], Canadian Light Sources Report, MPN-41-00, 2000

Higher order mode damping of a higher harmonic superconducting cavity for SSRF

YU Haibo^{1,2,3} LIU Jianfei^{1,3} HOU Hongtao^{1,3} MA Zhenyu^{1,2,3} FENG Ziqiang^{1,3} MAO Dongqing^{1,3}

¹ (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³ (Shanghai Key Lab of Cryogenics & Superconducting RF Technology, Shanghai 201800, China)

Abstract Adopting a higher harmonic cavity on a synchrotron radiation facility can increase the beam lifetime and suppress the beam instability. In this paper, we report the simulation and preliminary design on higher order modes (HOMs) damping of the designed and fabricated higher harmonic superconducting cavity for Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). The requirements for the HOM damping are analyzed, and the length and location of the HOM damper are optimized by using the SEAFISH code. The results show that the design can provide heavy damping for harmful HOMs with decreased impedance, and the beam instability requirement of SSRF can be satisfied. By using the ABCI code, the loss factor is obtained and the HOM power is estimated.

Key words Higher harmonic superconducting cavity, Higher order modes damping, Simulation, Loss factor

CLC TL503.2