



·粒子束及加速器技术·

同轴线法在小孔径真空元件阻抗测量中的应用*

孙元胜^{1,2}, 田赛克¹, 王娜¹, 岳森^{1,2}, 张源^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 粒子加速器中真空元件的阻抗是引起束流不稳定的重要原因。基于储存环的新一代同步辐射光源的设计发射度更小, 相应地要求更小的真空盒孔径, 进而带来阻抗的显著增加, 这就要求在设计阶段对真空元件的阻抗进行准确的评估和优化。阻抗测量是验证阻抗模型准确性的重要手段, 而同轴线法是常用的实验室测量方法。对小孔径真空元件同轴线法纵向阻抗测量进行了研究, 针对窄带阻抗元件, 使用 pillbox 腔开展了相关的阻抗测量, 研究了不同的内导体尺寸对于测量结果的影响, 同时基于尾场模拟、散射参数模拟以及本征模模拟对测量结果进行了验证, 模拟和测量结果符合很好, 并证明原有的内导体导致谐振峰频移的理论分析应用于小孔径元件时存在偏差。此外针对非窄带阻抗元件, 对条带冲击磁铁结构进行了同轴线法阻抗测量, 研究了内导体对结果的影响, 验证了同轴线法测量的有效性。

关键词: 耦合阻抗; 粒子加速器; 小孔径; 阻抗测量; 同轴线法; 频率偏移

中图分类号: O56

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210439

Application of coaxial wire method in impedance measurement of small aperture vacuum component

Sun Yuansheng^{1,2}, Tian Saikē¹, Wang Na¹, Yue Sen^{1,2}, Zhang Yuan^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In particle accelerators, the impedance of vacuum components is an important cause of beam instabilities. Smaller emittance is required in the new generation storage-ring-based light source, where smaller vacuum chamber is needed and the impedances are increased correspondingly. Therefore, the impedance of the vacuum components should be evaluated accurately and well optimized during the design stage. Impedance measurement is an important way to check the impedance model. The coaxial wire method is commonly used for laboratory bending measurements. For small-aperture vacuum components, the measurement error caused by the inner conductor is studied in this paper. For narrow-band impedances, pillbox cavity is used to study the influence of different inner conductor radius on the measurement results. As benchmarks, different numerical simulations, such as wake field, scattering parameters and eigenmodes, are carried out. The results show that the simulations are in good agreement with the measurement. It is also found that there exist deviations between the measurement and the existing theories on the dependence of the resonant frequency shift on the inner conductor radius. For non-narrowband impedances, we measured the impedance of a strip line kicker and studied the influence of the inner conductor, which verified the validity of the coaxial wire method.

Key words: coupling impedance; particle accelerator; small aperture; impedance measurement; coaxial wire method; frequency shift

基于电子储存环的同步辐射光源为实现更高的同步辐射亮度和更好的横向相干性, 物理设计上趋于更小的束流发射度。低发射度储存环设计为了满足超强磁铁的要求, 真空盒孔径要尽量小。目前正在设计或建造的电子储

* 收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2021-11-24
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11775239)
联系方式: 孙元胜, sunystw@126.com。
通信作者: 田赛克, tiansk@ihep.ac.cn。

存环真空盒半径在 10 mm 量级。小孔径真空元件的引入增大了阻抗,同时截止频率提高,更多的模式可能被俘获在真空元件内,从而引起真空盒部件发热、损坏等。因此在设计阶段就需要对真空元件的阻抗进行准确的评估。同时,低发射度同步辐射光源束流频谱的范围可达到几十 GHz,对阻抗的准确计算提出了更高的难度,通常情况下需要容纳上亿网格数据的超大内存以及多核高性能的工作站并行计算,计算精度和效率也大大降低,对于复杂的结构,还需要对模型做大量的简化,因此阻抗测量是验证阻抗模型和理论的重要手段。

同轴线法是阻抗实验室测量的常用方法,其基本原理是在待测件中穿插一根内导体细丝,进而与待测件形成同轴结构,通过测量两端的散射参数得到束流耦合阻抗^[1]。同轴线法测量中由于内导体的引入,会产生一定的测量误差,因此通常要求内导体和真空盒孔径的比值小于 1/10,同时要兼顾信号在内导体上的损耗,以及端部与同轴电缆的阻抗失配引入的误差^[2-7]。T. Toyomasu 等人基于半径 230 mm 的 pillbox 腔理论研究了不同内导体直径导致的共振峰谐振频率的偏移^[8],而该理论在小孔径真空盒阻抗测量中是否适用有待进一步研究。同时,基于同轴线法对非窄带小孔径真空元件的阻抗测量的有效性也需要深入的研究。因此,本文一方面基于半径 32.5 mm 的 pillbox 腔(两端束管半径 17.5 mm)开展同轴线法阻抗测量,研究了不同内导体尺寸对结果的影响,与 T. Toyomasu 的理论模型进行了对比,并通过尾场模拟、散射参数模拟、以及本征模模拟计算,对测量结果进行了验证。此外,对高能同步辐射光源的条带冲击磁铁进行了同轴线法阻抗测量,该磁铁结构最小间隙为 10 mm,两端束管半径为 11 mm,实验中分别采用不同内导体尺寸进行阻抗测量,同时与尾场模拟得到的阻抗进行对比验证同轴线法测量的有效性。

1 Pillbox 腔阻抗测量与模拟

1.1 Pillbox 腔阻抗测量

为了评估内导体对小孔径真空元件阻抗测量的影响,我们对半径 32.5 mm、长度 150 mm、两端束管半径 17.5 mm 的 pillbox 腔进行了阻抗测量。内导体分别采用直径 0.5 mm 和 0.8 mm 的未经退火的无氧铜丝,与 pillbox 腔形成同轴结构,两端通过高性能同轴电缆连接矢量网络分析仪。矢量网络分析仪型号为 Keysight E5071C,频率范围为 300 kHz~20 GHz。整个阻抗测量实验平台如图 1 所示。

根据实验测得散射参数,可以通过 Walling(或 log)公式计算得到纵向阻抗^[9]

$$Z_{L,Log}(\omega) = -2Z_c \ln\left(\frac{S_{21,DUT}}{S_{21,REF}}\right) \quad (1)$$

式中: $S_{21,DUT}$ 为待测件散射参数; $S_{21,REF}$ 为等长比较件散射参数; Z_c 为同轴线的特征阻抗。测量得到 pillbox 腔的纵向阻抗如图 2 所示。从结果可以看出,采用不同直径的内导体丝测量得到的阻抗谐振频率发生了明显偏移。



Fig. 1 Coaxial wire measurement setup for the pillbox cavity

图 1 Pillbox 腔同轴线法阻抗测量装置

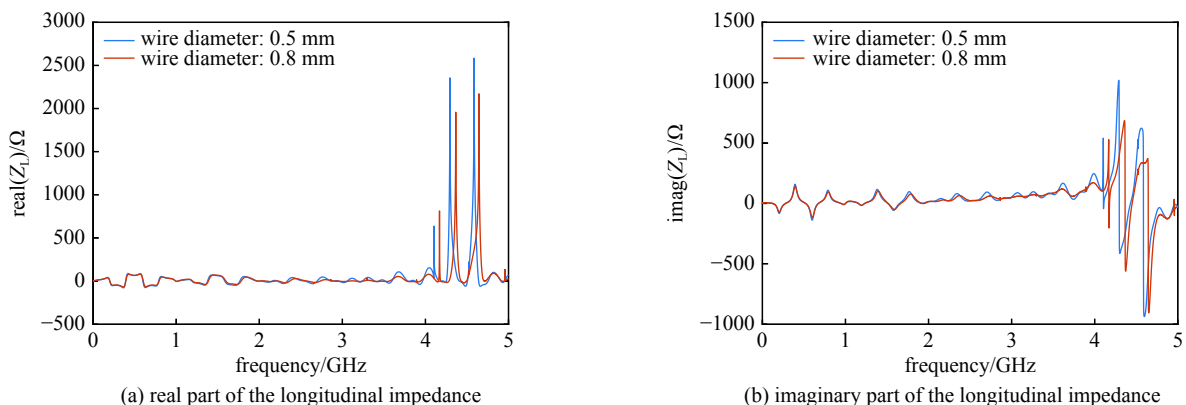


Fig. 2 Real part and imaginary part of the longitudinal impedance of the pillbox cavity measured with different inner conductor diameter

图 2 采用不同内导体直径测量得到的 pillbox 腔纵向阻抗实部和虚部

1.2 阻抗模拟

首先利用 CST 粒子工作室的尾场求解器(Wakefield Solver)计算 pillbox 腔的尾场和阻抗。模拟中,采用高斯分布激励束团,均方根束团长度为 3 mm,采用理想导体材料(PEC),网格总数量约 5000 万。模拟计算尾场长度为 50 m,通过傅里叶变换得到纵向阻抗如图 3 所示。阻抗主要表现为窄带阻抗,第一个和第二个窄带共振峰分别位于 3.54 GHz 和 3.73 GHz,结合本征模模拟判断第一个共振峰对应 TM_{010} 模式。这里需要指出的是由于窄带阻抗 Q 值较高,模拟中尾场幅度并未收敛到 0,因此窄带阻抗的幅值和宽度不具有定量的意义。

为了定量评估同轴线法测量中内导体对窄带阻抗元件散射参数的影响,采用 CST 微波工作室(CST Microwave Studio)模拟实验测量过程,在 pillbox 腔结构内部加入铜丝,电导率设置为 59.6 MS/m,并在模型两端设置波导端口,通过模拟给出两端端口之间的散射参数,模型如图 4 所示。由于内导体直径较小,在模拟过程中对内导体采用局部加密网格处理。模拟频率范围为 3.5~8 GHz。

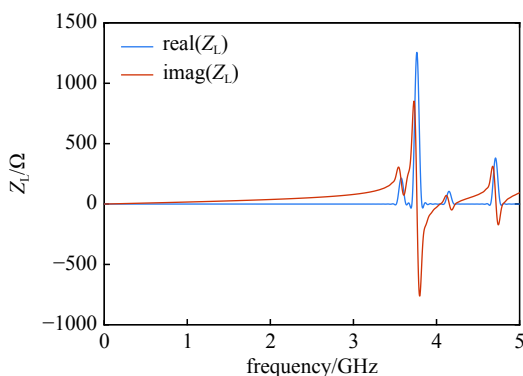


Fig. 3 Real part and imaginary part of the longitudinal impedance of pillbox cavity simulated by CST Wakefield Solver

图 3 CST 尾场求解器模拟计算的 pillbox 腔纵向阻抗实部和虚部

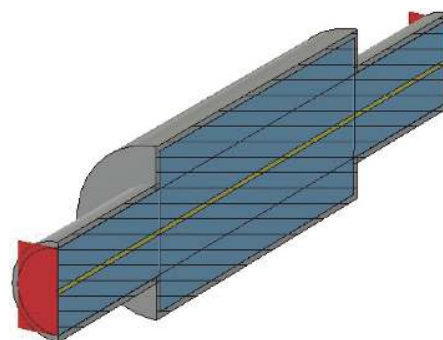


Fig. 4 3D model used for the simulation of scattering parameters, where the waveguide ports have been set at both ends of the beam pipe

图 4 散射参数模拟中采用的三维模型,其中束管两端设置为波导端口

通过改变铜丝的直径,可以模拟不同内导体尺寸对 pillbox 腔散射参数的影响,其结果如图 5 所示。利用本征模模拟判断无内导体情况下 pillbox 腔的 TM_{010} 模式频率,如红色束线所示,以及加入内导体情况下该模式的场分布和谐振频率,进而判断 S 参数曲线中该模式对应的共振峰位置,如蓝色圆圈所示。可以看出内导体的引入导致显著的模式频率的偏移,且随着铜丝半径增大,频率偏移量随之增加。此外,黑色线段标记了 CST 尾场模拟得到的谐振峰频率,与不含内导体情况下本征模计算结果基本重合。

1.3 结果分析

基于以上实验测量和模拟计算,我们给出 pillbox 腔 TM_{010} 模式频率随同轴内导体尺寸的变化曲线,如图 6 所示。可以看出模拟与测量结果符合很好。此外,针对 pillbox 腔模型,T. Toyomasu 等对同轴线法中内导体导致的模式谐振频率的偏移进行了理论分析^[8]。

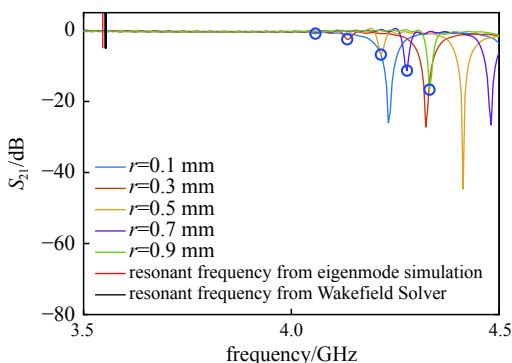


Fig. 5 Simulated scattering parameters with different inner conductor diameter

图 5 模拟得到不同内导体尺寸下散射参数

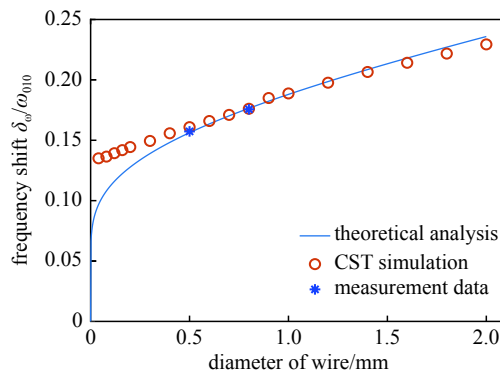


Fig. 6 Frequency shifts at different inner conductor diameter

图 6 不同直径内导体引起的频率漂移

$$\frac{\delta\omega}{\omega_{0mp}} = \frac{1}{\left\{1 + (p\pi/\mu_{0m})^2/f_L^2\right\} u_{0m} J_1(u_{0m})} \frac{N_0(u_{0m})}{2 \lg(2/Cu_{0m}f_w)} \pi \quad (2)$$

式中: J_1 和 N_0 分别表示一阶贝塞尔 (Bessel) 和 0 阶诺伊曼 (Neumann) 函数; $C = 1.78107$ 为常数; $f_w = a_w/a$, $f_L = L/a$, a 为 pillbox 腔半径, a_w 为内导体半径, L 为 pillbox 腔长度。 u_{nm} 为 n 阶贝塞尔函数的第 m 个解。我们利用该理论模型对实验中的 pillbox 腔 TM_{010} 模式的频率偏移进行了计算, 如图 6 中蓝色实线所示。对比实验测量、模拟和理论分析结果发现, 当内导体直径大于 0.5 mm 时, 理论分析与模拟、测量结果基本符合, 然而, 当内导体直径小于 0.5 mm 时, 模拟计算结果趋于线性变化, 与理论分析结果存在差异。我们分析差异的主要原因应是理论模型假定腔结构由内导体、真空和腔外导体三部分组成, 未考虑两端束管结构及其对应位置内导体丝, 边界条件做了较大简化。而 CST 模拟和阻抗测量所用模型包含腔两端束管结构, 如图 4 所示, 这两种结构的电磁场分布存在差别。考虑到内导体的功率损耗、阻抗匹配以及焊接可操作性等因素, 同轴线阻抗测量中不宜选用过细的导体丝, 因此可以认为在合理的内导体尺寸范围内, 原有理论模型仍适用于小孔径真空元件。

2 条带冲击磁铁阻抗测量

我们应用同轴线法对高能同步辐射光源^[10]的条带冲击磁铁的纵向阻抗进行了实验室测量^[11], 整体磁铁结构以及同轴线阻抗测量装置如图 7 所示。我们也进行了尾场模拟与阻抗测量对比验证, 条带冲击磁铁尾场模拟模型如图 8 所示。磁铁模组由 10 根长 300 mm 的条带电极组成, 为注入束流提供连续的偏转, 上下电极间隙为 10 mm, 磁铁入口和出口采用平滑过渡结构连接直径 22 mm 的圆真空盒, 结构总的纵向长度约 1.6 m。实验测量中, 端部阻抗失配引起的反射信号会带来测量误差。为了实现较宽频率的阻抗测量, 优化拉紧结构传输特性时需要同时兼顾低频率和高频率^[12]。我们分别选用了直径 0.8 mm 和 1.0 mm 的内导体丝, 测量得到阻抗如图 9 所示, 并与尾场模拟得到的阻抗频谱进行了对比。从结果可以看出, 采用不同直径的内导体丝测量得到阻抗基本重合, 个别频率段存在的偏差, 分析认为这一方面来自不同内导体直径引入的扰动不同, 同时导致的阻抗失配不同, 另一方面两次测量安装、焊接等亦会引入一定的测量重复性误差。此外, 测量结果与模拟结果符合得很好, 验证了同轴线法在小孔径真空盒阻抗测量中的有效性, 以及模拟计算中阻抗建模的合理性。

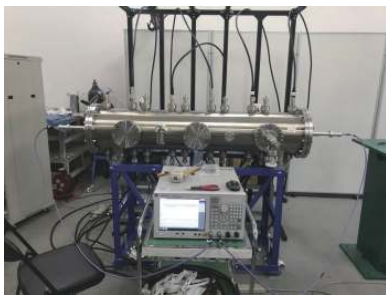


Fig. 7 Coaxial wire measurement setup for the stripline kicker
图 7 条带冲击磁铁同轴线法阻抗测量装置

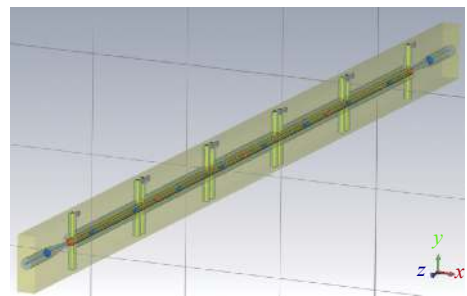


Fig. 8 3D model of stripline kicker
图 8 条带冲击磁铁三维模型

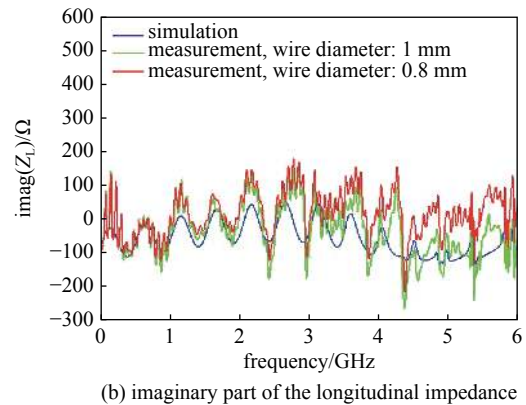
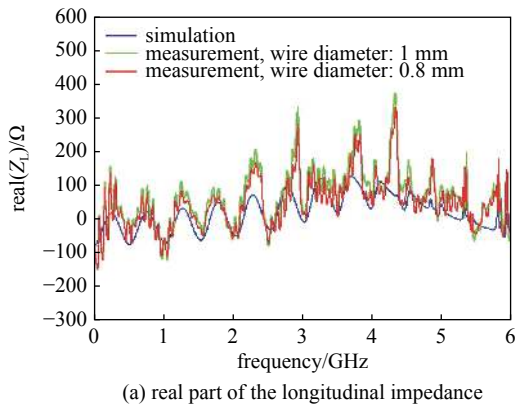


Fig. 9 Real part and imaginary part of the longitudinal impedance measured by the coaxial wire method with different inner conductor diameter, and compared with that calculated by CST wake field simulations

图 9 采用不同内导体直径同轴线法测量的纵向阻抗实部和虚部, 并与 CST 尾场模拟计算结果进行对比

3 结 论

本文针对同轴线法在小孔径真空元件阻抗测量的适用性进行了研究。对于窄带阻抗元件,同轴线法内导体会导致谐振频率发生偏移。通过模拟和实验测量,对偏移量随内导体尺寸的变化进行定量研究,模拟结果和实验测量结果符合较好,此外,与原有内导体产生谐振峰频率偏移的理论模型对比发现,在合理的内导体尺寸范围内,该理论仍适用于小孔径真空元件,但在较小的内导体尺寸下,模拟计算得到频率偏移随内导体尺寸近似线性变化,偏离理论模型。对于非窄带阻抗元件,以高能同步辐射光源的条带冲击磁铁为例,使用直径 0.8, 1.0 mm 内导体进行阻抗测量,实验测量与尾场模拟结果符合得很好,验证了阻抗建模的合理性以及同轴线法在小孔径真空盒阻抗测量中的有效性。

参考文献:

- [1] Sands M, Rees J. A bench measurement of the energy loss of a stored beam to a cavity[R]. Menlo Park, CA: SLAC National Accelerator Lab, 2016.
- [2] 王光伟. BEPC储存环纵向阻抗的测练[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 1989. (Wang Guangwei. Impedance measurement of BEPC storage ring[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 1989)
- [3] 黄刚. 纵向耦合阻抗测量及束流反馈系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2002. (Huang Gang. The study of coaxial line method longitudinal coupling impedance measurement and beam feedback system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002)
- [4] 周德民. BEPCII储存环真空部件纵向阻抗计算和测量[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2005. (Zhou Demin. Longitudinal impedance calculations and measurements of vacuum components for BEPCII storage rings[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005)
- [5] Zhou Demin, Wang Jiuqing, Zhou Lijuan, et al. Longitudinal impedance measurements of the components for the BEPCII[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville: IEEE, 2005: 3212-3214.
- [6] 黄良生. CSNS/RCS束流集体效应及阻抗测量理论和实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. (Huang Liangsheng. The theoretical and experimental study on the coupling impedance measurement and the collective effects in CSNS/RCS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014)
- [7] 王琳, 徐宏亮, 冯光耀. 同轴线方法测量束流耦合阻抗的有效性分析[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 920-924. (Wang Lin, Xu Hongliang, Feng Guangyao. Validity of coaxial-wire method in impedance measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(6): 920-924)
- [8] Toyomasu T, Izawa M, Kamiya Y. Effect of a wire on the electromagnetic field in an accelerating cavity in the coaxial-wire method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34: 340.
- [9] Argan A, Palumbo L, Masullo M R, et al. On the Sands and Rees measurement method of the longitudinal coupling impedance[C]//Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 99CH36366). New York: IEEE, 1999.
- [10] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(6): 1611-1618.
- [11] Wang L, Chen J H, Shi H, et al. A novel 5-cell strip-line kicker prototype for the HEPS on-axis injection system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 992: 165040.
- [12] Wang N, Tian S K, Wang L, et al. Impedance optimization and measurements of the injection stripline kicker[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 034401.