

基于谐振腔的超级陶粲装置注入器束团 长度与电荷量监测器设计

吕 涛¹ 王 妍^{1,2} 罗 箐^{1,3}

1(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230027)

2(中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023)

3(中国科学技术大学 核科学技术学院 合肥 230027)

摘要 超级陶粲装置(Super Tau Charm Facility, STCF)是前沿的新一代正负电子对撞机,其对高精度、高亮度的要求对加速器技术提出了重大挑战。由于该装置储存环束流寿命极短且动力学孔径较小,为了保证注入效率,需要精确测量注入束团长度及电荷量等参数,从而监测注入过程,这对束流诊断方法及设备提出了更高的要求。基于谐振腔特征模式信号提取直线加速器束流信息的监测技术具备较高的信噪比,且属于非拦截测量,有潜力满足高品质直线加速器的在线高分辨测量需求。本文针对STCF注入器束流参数及测量需求,进行了谐振腔束团长度和电荷量监测器的物理设计与仿真。利用电磁仿真软件CST(Computer Simulation Technology)建模设计了两个Pill-Box型谐振腔,并对其结构进行优化。仿真结果表明,对于束团长度与电荷量的仿真测量误差分别达到3.3%和0.02%,依据同类型谐振腔式探头的在线测试结果,推算该监测器束团长度测量分辨率有望达到100 fs@1.5 nC,电荷量测量相对分辨率好于0.07%,能够满足STCF的束团长度及电荷量的诊断需求,后续将制作实物以进行在线测试

关键词 束团长度, 束团电荷量, 谐振腔, 束团监测器, 超级陶粲装置

中图分类号 TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.100204

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2024.47.100204

Design of bunch length and charge monitor based on cavity resonator for injector of Super Tau-Charm Facility

LYU Tao¹ WANG Qian^{1,2} LUO Qing^{1,3}

1(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

2(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

3(School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract [Background] The Super Tau Charm Facility (STCF) is a new generation electron-positron colliders at the forefront of high precision, and its high brightness requirements pose a major challenge to accelerator technology.

国家重点研发计划(No.2022YFA1602201)、国家自然科学基金青年科学基金(No.12105278)、中国科学院国际合作局国际伙伴计划国际大科学计划培育专项项目(No.211134KYSB20200057)、安徽省高等学校省级质量工程项目(No.N2021JYXM1731)资助

第一作者: 吕涛, 男, 1996年出生, 2021年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器束流测量技术

通信作者: 王妍, E-mail: wangqian93@ustc.edu.cn; 罗箐, E-mail: luoqing@ustc.edu.cn

收稿日期: 2023-12-06, 修回日期: 2024-02-22

Supported by the National Key R&D Program (No.2022YFA1602201), National Natural Science Foundation of China Youth Science Fund (No.12105278), the Bureau of International Cooperation of Chinese Academy of Sciences (International Partnership Program for Creative Research Teams) (No.211134KYSB20200057), Anhui Provincial Quality Engineering Project of Higher Education (No.N2021JYXM1731)

First author: LYU Tao, male, born in 1996, graduated from Lanzhou University in 2021, master student, focusing on accelerator beam measurement technology

Corresponding authors: WANG Qian, E-mail: wangqian93@ustc.edu.cn; LUO Qing, E-mail: luoqing@ustc.edu.cn

Received date: 2023-12-06, revised date: 2024-02-22

Resonant cavity-based monitors utilize characteristic mode signals for non-intercepting, high signal-to-noise ratio measurements, hence may meet the online high-resolution measurement requirements of various high-quality linear accelerators. **[Purpose]** This study aims to address the challenges posed by the short lifetime and the small dynamic aperture of the storage ring beams in the STCF by developing high-resolution monitoring techniques for bunch length and charge to ensure efficient injection and precise measurement of these parameters. **[Methods]** According to the beam parameters and measurement requirements of the STCF injector, the physical design and simulation of the resonator bunch length and charge monitor were carried out. Two Pill-Box cavities were designed by using Computer Simulation Technology (CST) modeling, and their structures were optimized. Subsequently, the beam load in the CST particle studio for simulation was conducted to analyze influences of beam tilt and lateral offset on the measurement accuracy, and the measuring resolutions of bunch length and charge were evaluated using cavity beam position monitor (CBPM). **[Results]** Simulation results show that the measurement errors of bunch length and charge are 3.3% and 0.02%, respectively. According to the online test results of the same type monitor, it is estimated that the resolution of bunch length of the monitor is expected to reach 100 fs@1.5 nC, and the relative resolution of charge measurement is better than 0.07%. **[Conclusions]** The currently designed monitor meets the diagnostic requirements of bunch length and charge of STCF, it will be manufactured in future for online testing.

Key words Bunch length, Bunch charge, Resonant cavity, Bunch monitor, Super Tau Charm Facility

超级陶粲装置 (Super Tau Charm Facility, STCF) 是一台在研的超高亮度环形正负电子对撞机, 工作能量在 1.0~3.5 GeV, 其亮度将是现有运行在陶粲能区的北京正负电子对撞机 (Beijing Electron Positron Collider II, BEPC II) 的 50~100 倍, 将是一台高束流流强、低发射度的机器。STCF 的注入器由直线加速器、正电子阻尼环和输运线等部分组成, 输运线末端束流参数如表 1 所示, 其束流结构为单脉冲形式。实时、高精度地测量输运线末端注入束团的长度和电荷量, 对于提高注入效率、提升装置整体性能具有重要意义^[1]。

表 1 STCF 束流参数
Table 1 Beam parameters of STCF

参数 Parameter	值 Value
束团能量 Bunch energy / GeV	1.0~3.5
单脉冲长度 Bunch length / ps	3.3
正电子束团电荷量 Positron bunch charge / nC	1.5
单脉冲重复频率 Bunch Reptition rate / Hz	50

对于直线加速器, 束团电荷量的测量方法包括直流电流互感器 (Direct Current Current Transformer, DCCT)、束流积分变压器 (Integrated Current Transformer, ICT)^[1]、法拉第筒、纽扣/条带/谐振腔式束流监测器等^[2]。通过 DCCT 可以直接测得平均流强, 进而推算多发束团的平均电荷量, 无法实现逐束团的测量; 法拉第筒为拦截式测量设备, 不能在运行过程中实时监测电荷量变化; ICT 常用于皮秒至纳秒级短脉冲的测量, 但输出信号容易受到电磁噪声干扰; 条带/纽扣型束流监测器的对电荷量

的测量精度显著依赖于束流横向位置的变化, 测量误差会随束团偏离中心位置的增大而增大^[3]。

而直线加速器的束团长度测量方法包括条纹相机^[4]、横向偏转腔法^[5]、电光采样法^[6]和谐振腔法^[7-10]等, 其中, 横向偏转腔法属于拦截式测量。电光采样法对激光产生及探测技术要求很高, 成本和技术难度也很高。

谐振腔法通过提取直线加速器束团经过腔体激励起的特定谐波模式电信号, 从而同时得到束团长度和电荷量信息。由于该方法具有非拦截、结构简单^[11]、低成本、高分辨^[12]、动态范围大^[13]等优势。在近轴近似下, 谐振腔基模的输出信号与束流位置无关, 因此, 测量分辨率不依赖束团横向位置^[14-15], 并且可以实现多参数实时测量, 非常适合 STCF 注入器直线加速器和输运线对束团长度及电荷量的测量需求。

本文针对 STCF 输运线末端束流参数及测量需求, 利用 CST 进行了谐振腔式束流监测器探头设计与仿真优化, 并根据同类型装置的在线实验结果对该监测器性能进行了评估。

1 基本测量原理

带电粒子束团通过谐振腔时可以激励起一系列满足边界条件的本征模式, 这些模式场可以分为两组基本模式: 横磁 TM 模式 (Transverse Magnetic Mode, 无纵向磁场分量) 和横电 TE 模式 (Transverse Electric Mode, 无纵向电场分量)。TM 模式还分为共模与差模, 如图 1 所示, 共模电场关于轴线对称, 差模电场关于轴线中心对称。

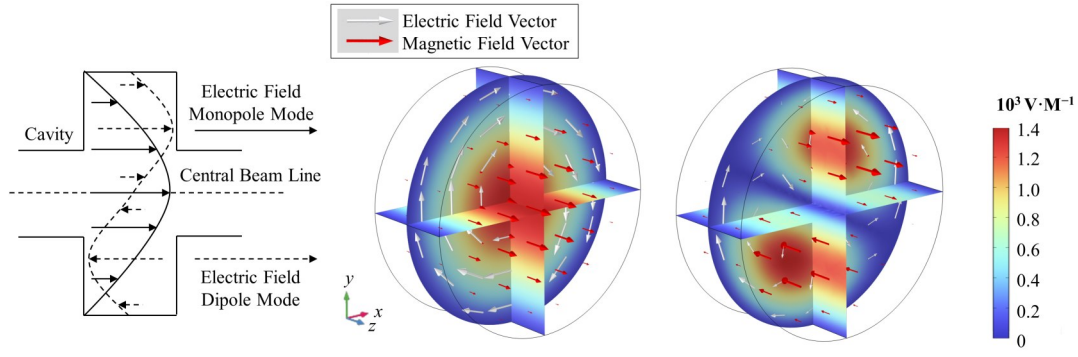


图1 共模与差模电磁场示意图
Fig.1 Electromagnetic field diagram of monopole mode and dipole mode

选取束流管道轴线方向为 z 方向,束流通过 Pill-Box 腔激励起 TM_{mn0} 模式电场强度在柱坐标系下的表达式为:

$$E_r = E_\phi = 0, E_z = E_0 J_0 \left(\frac{r p_{mn}}{R} \right) e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中: p_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数的第 n 个零点,当 $m=0$ 时为共模,否则为差模。考虑到共模信号的强度比差模要高,后续电子学的信噪比更好,分辨率相应提高,因此普遍采用共模作为谐振腔的工作模式。

对于高斯束团,Pill-Box腔模式电压为^[16-19]:

$$V = \frac{1}{2} \omega_n Q_{\text{beam}} \sqrt{\frac{Z}{Q_{\text{ext}}}} \frac{R}{Q_0} e^{-\omega_n^2 \sigma_z^2 / 2} \quad (2)$$

式中: V 为共模输出电压信号; ω_n 为选定的模式角频率; Q_{beam} 为束团电荷量; Z 为信号引出后接入的负载阻抗; Q_{ext} 为外部品质因数; R/Q_0 归一化分流阻抗; σ_z 为束团长度。因此,若要求得电荷量 Q_{beam} 与束团度 σ_z ,需要测量得到其中两个模式电压信号联立方程,即可解得:

$$\begin{cases} Q_{\text{beam}} = \frac{V_1}{2K_1} \left(\frac{K_2 V_1}{K_1 V_2} \right)^{\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}} \\ \sigma_z = \sqrt{\frac{2 \ln \left(\frac{K_2 V_1}{K_1 V_2} \right)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $K = 0.5 \omega_n \sqrt{Z/Q_{\text{ext}}} \cdot R/Q_0$ 可以定标拟合得到。

式(2)仅有束团电荷量与束团长度为未知量,其他物理量均可测量得到。由此可见,需要设计两个腔分别给出模式频率的耦合输出电压,得到二元方程组,即可提取束团长度与电荷量信息。

2 测量系统整体结构

基于谐振腔的束团长度与电荷量监测系统如图2所示,探头输出两路本征模式信号接入前置放大器,放大信号以克服长距离传输衰减,射频前端电子学用于调理信号及下变频至中频信号,基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的数字化电子学用于采集处理接收到的中频信号并得到测量结果。

3 探头设计与优化

双腔基本结构如图3所示。谐振腔的 TE_{11} 模式截止频率为:

$$f = \frac{c p_{mn}}{\pi d} \quad (4)$$

式中: d 为内径,STCF束流管道内径25.9 mm,为保证模式信号不泄露,谐振腔最高工作频率应小于6.787 GHz。

由(3)式可得,束长分辨率与电荷量分辨率(其中SNR为信噪比(Signal-to-Noise Ratio),即模式信号幅度与噪声信号幅度之比):

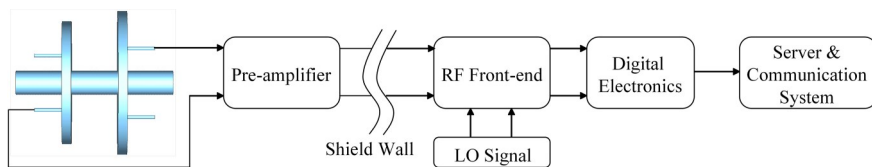


图2 测量系统框图
Fig.2 Block diagram of measurement system

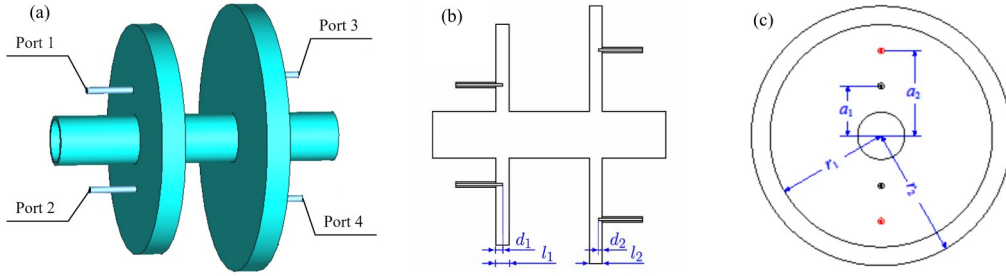


图3 双腔整体结构示意图 (a) 3D视图, (b) 剖视图, (c) 侧视图
Fig.3 Schematic diagram of the overall structure of the double cavity (a) 3D view, (b) Sectional view, (c) Side view

$$\Delta\sigma_r = \frac{10^{-\text{SNR}/20}}{4\pi^2\sigma_r(f_2^2 - f_1^2)} \quad (5)$$

$$\Delta Q = Q \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{\Delta V_{\text{out1}}}{V_{\text{out1}}} + \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{\Delta V_{\text{out2}}}{V_{\text{out2}}} \right) \quad (6)$$

由式(5)、(6)可见,两个腔的频率差距越大,分辨率越好。同时同轴探针的放置位置需要预留出焊接空间,谐振腔半径不能过小。为了结构轻便小巧,半径也不能过大。最终选定1号腔工作频率1.5 GHz,工作于 TM_{010} 模式;2号腔工作频率

6.5 GHz,工作于 TM_{030} 模式,由此两个腔半径也随之确定。

束流结构为单脉冲形式,在选定工作模式之后,由于所有的模式信号都会被激励,通过合理选择信号引出探针的位置,可以使得选定的模式信号强度尽可能大,其他模式信号对目标模式信号干扰尽可能小。根据场形分布,将探针插入目标模式信号一个波峰处,即如图4所示的探针在横向面上的插入点处。

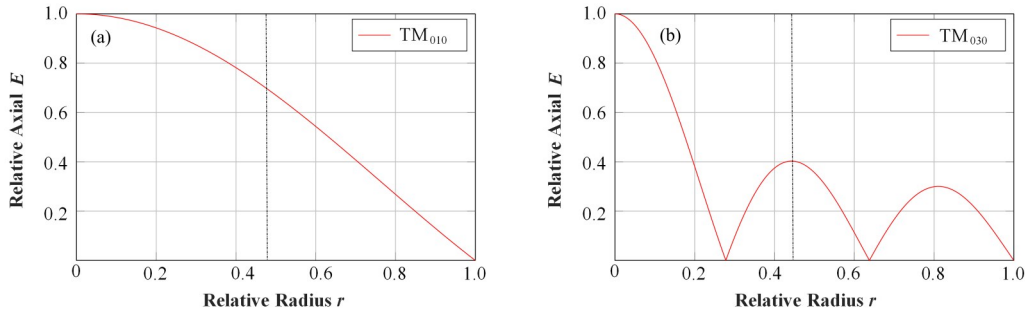


图4 腔场形与探针插入位置的选择 (a) 1号腔, (b) 2号腔
Fig.4 Cavity field shape and choosing probe insert position (a) Cavity 1, (b) Cavity 2

同轴探针的插入会导致其内导体暴露于谐振腔电场中,从而影响电磁场分布。随着插入深度增加,谐振腔内部电磁场分布将受到更大的影响,因此插入深度需适中,两腔同轴探针插入深度都选定为

2 mm。同轴探针的插入也会对谐振腔内部场形造成破坏、导致谐振频率发生改变,因此,在选定插入深度后,需对两个圆柱腔半径分别进行优化,让谐振频率回到预设值,仿真结果如图5所示,当 $r_1 =$

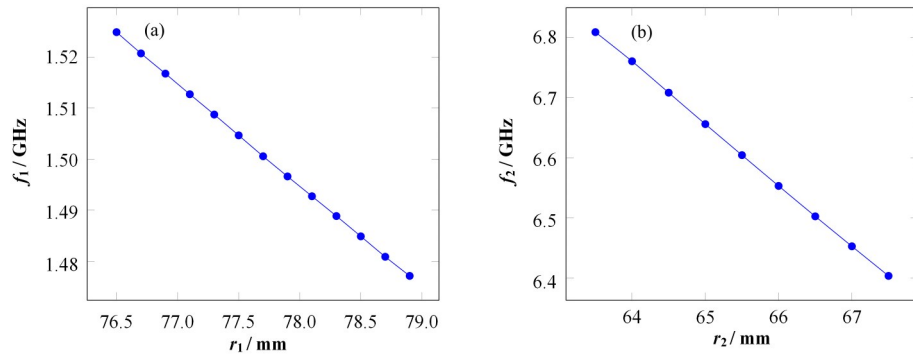


图5 谐振频率随腔半径的变化 (a) 1号腔, (b) 2号腔
Fig.5 Resonant frequency varies with the cavity radius (a) Cavity 1, (b) Cavity 2

77.73 mm, $r_2 = 66.53$ mm时,两腔谐振频率分别回到预设值。

在CST微波工作室中经过仿真优化后的谐振腔结构参数如表2所示。

表2 谐振腔结构参数
Table 2 Parameters of resonant cavity

参数 Parameter	值 Value
r_1 / mm	77.73
r_2 / mm	66.53
a_1 / mm	37.00
a_2 / mm	29.42
d_1 / mm	2.0
d_2 / mm	2.0
l_1 / mm	10.0
l_2 / mm	10.0
f_1 / GHz	1.5
f_2 / GHz	6.5

4 数值仿真分析

4.1 腔体性能

根据优化得到结构参数的在CST微波工作室中建立完整的双腔结构,仿真得到两个腔的品质因数结果如表3所示。其中,1号腔 $Q_L=687.4$,输出信

号长度为72.94 ns,2号腔 $Q_L=940.8$,输出信号长度23.04 ns,信号长度满足单脉冲结构下的实际采样需求。

表3 品质因数模拟结果
Table 3 Results of Q values

品质因数 Q values	TM ₀₁₀	TM ₀₃₀
Q_0	717.9	1 517.8
Q_L	687.4	940.8
Q_{ext}	16 168.8	2 474.8

4.2 束流仿真

在CST粒子工作室中加载束流仿真,设置正电子束团电荷量1.5 nC,束团长度3.3 ps^[10],可以得到时域及频域输出信号,如图6和图7所示。

快速衰减的时域信号满足单束团模式的信号长度要求。两腔的频域信号分别出现1.5 GHz与6.5 GHz的峰,与设计的谐振腔工作模式频率一致,并且其他频率的峰距离目标频率很远,因此实际装置信号引出后可以分别通过低通滤波与带通滤波装置进行滤波,目标模式信号不会受到其他模式信号的影响。

在CST粒子工作室中加载束流仿真,设定束团电荷量1.5 nC,脉冲频率50 Hz,对束团长度1~10 ps进行参数扫描。得到的仿真测量结果如表4所示。

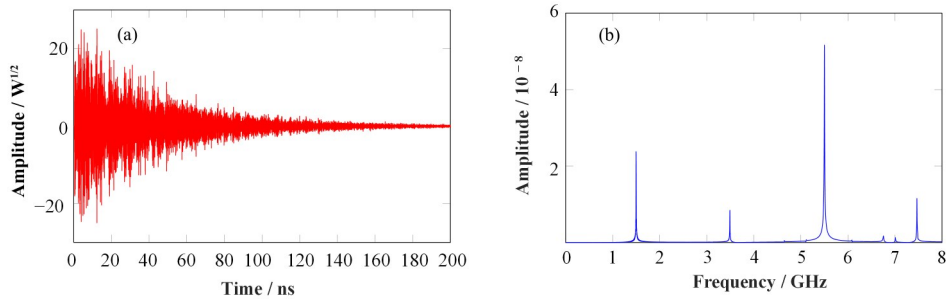


图6 1号腔输出信号 (a) 时域, (b) 频域
Fig.6 Output signals of cavity 1 (a) Time domain, (b) Frequency domain

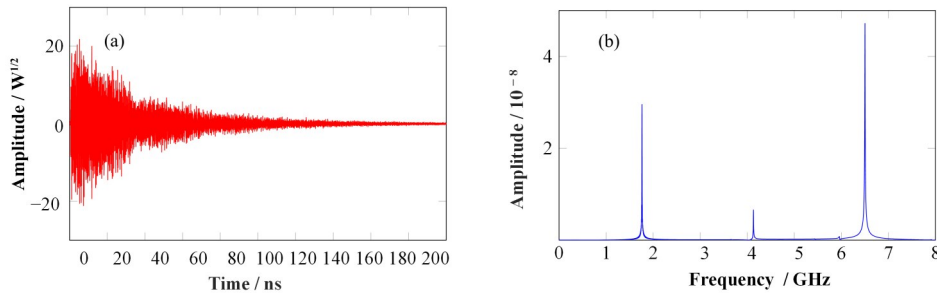


图7 2号腔输出信号 (a) 时域, (b) 频域
Fig.7 Output signals of cavity 2 (a) Time domain, (b) Frequency domain

表4 束团长度仿真误差
Table 4 Simulation error of bunch length

束团长度 Bunch length / ps	TM ₀₁₀ 频谱幅度 $V_{TM010} / 10^{-8}$	TM ₀₃₀ 频谱幅度 $V_{TM030} / 10^{-8}$	频谱幅度比值 V_{TM010} / V_{TM030}	束团长度测量值 Measured bunch length / ps	相对误差 Relative error / %
1.0	2.387 5	4.764 6	0.501 1	1.032	3.203
2.0	2.387 2	4.752 9	0.502 3	2.005	0.264
3.0	2.386 6	4.733 2	0.504 2	2.997	0.105
4.0	2.385 9	4.705 8	0.507 0	3.995	0.136
5.0	2.384 9	4.670 8	0.510 6	4.995	0.105
6.0	2.383 7	4.628 2	0.515 0	5.996	0.066
7.0	2.382 3	4.578 3	0.520 3	6.998	0.031
8.0	2.380 7	4.521 5	0.526 5	8.000	0.001
9.0	2.378 9	4.457 9	0.533 6	9.002	0.021
10.0	2.376 9	4.387 9	0.541 7	10.004	0.041

如图8所示, $e^{\sigma_z^2(\omega_z^2 - \omega_1^2)/2}$ (y轴)与两个模式输出信号的比值 V_{TM010}/V_{TM030} (x轴)满足很好的线性关系:

$$y = 2.0039 \times x - 0.0033 \quad (7)$$

因此,测得两个模式输出信号的比值就可以计算得到束团长度。

设定束团长度 3.3 ps 不变,对束团电荷量进行

参数扫描。得到的仿真测量结果如表5所示。

在束团长度不变的情况下,模式信号频谱幅度与电荷量成正比,由图9可见,束团电荷量(y轴)与模式信号频谱幅度(x轴)满足很好的线性关系:

$$y = 0.3178 \times x - 0.00009 \quad (8)$$

设计的双谐振腔探头对于束团长度 1~10 ps 的

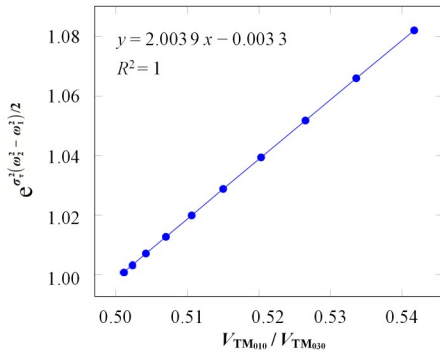


图8 束团长度线性关系标定
Fig.8 Calibration of linear relationship for bunch length

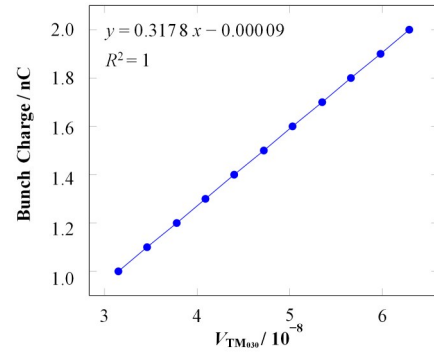


图9 束团电荷量线性关系标定
Fig.9 Calibration of linear relationship for bunch charge

表5 束团电荷量仿真误差
Table 5 Simulation error of bunch charge

束团电荷量 Bunch charge / nC	TM ₀₃₀ 频谱幅度 $V_{TM030} / 10^{-8}$	束团电荷量测量值 Measured bunch charge / nC	相对误差 Relative error / %
1.0	3.15	0.999 9	0.013 4
1.1	3.46	1.099 9	0.013 4
1.2	3.78	1.199 8	0.013 3
1.3	4.09	1.299 8	0.013 3
1.4	4.40	1.399 8	0.013 3
1.5	4.72	1.499 8	0.013 3
1.6	5.03	1.599 8	0.013 2
1.7	5.35	1.699 8	0.013 2
1.8	5.66	1.799 8	0.013 2
1.9	5.98	1.899 7	0.013 2
2.0	6.29	1.999 7	0.013 1

理论测量相对误差小于 3.3%，对于束团电荷量 1~2 nC 理论测量的相对误差小于 0.02%。实际测量过程误差会增加，主要来自束团横向偏移、束团倾斜、电子学噪声。

束团的横向偏移会使共模信号幅度发生衰减，同时额外产生的差模信号可能会与待测量的共模信号叠加，从而引入一定的测量误差。加速器装置正常运行时，束团横向偏移一般在 1 mm 之内，先前的研究表明，这种程度的横向偏移对束团参数的测量误差在 2% 以下，当前使用 CST 仿真束团横向偏移

对待测信号幅度的影响，结果如表 6 所示，横向偏移在 1 mm 以内对束团长度测量造成的误差整体随偏移的增加而增加，总体小于 1.3%，对束团电荷量测量造成的误差小于 0.04%。为减小束团横向偏移所带来的误差，可在谐振腔探头安装上线后，通过束流实验测定不同束流位置对应的束团长度及电荷量测量误差，得到修正系数，在线运行时，利用该谐振腔差模或临近的 BPM 探头得到的束流位置，修正束团长度及电荷量测量结果。

表 6 束团横向偏移带来的束团长度与电荷量仿真测量误差
Table 6 Simulation measurement error of bunch length and charge brought by bunch transverse excursion

束团横向偏移 Transverse excursion / mm	TM ₀₁₀ 频谱幅度相对偏差 $\Delta V_{TM010}/V_{TM010}$	TM ₀₃₀ 频谱幅度相对偏差 $\Delta V_{TM030}/V_{TM030}$	束团长度测量相对误差 Measured σ relative error / %	束团电荷量测量相对误差 Measured q relative error / %
1×10^{-3}	3.375×10^{-7}	8.475×10^{-8}	0.322	0.013 2
1×10^{-2}	4.218×10^{-8}	1.229×10^{-6}	0.316	0.013 4
1×10^{-1}	5.948×10^{-6}	1.413×10^{-5}	0.206	0.014 7
1×10^0	9.090×10^{-5}	1.841×10^{-4}	1.274	0.031 7

束流倾斜也会带来束长测量误差。束流倾斜包括束团自身倾斜和束流轨迹倾斜。束团自身倾斜会使监测器测得倾斜后的纵向分布均方根结果，而束流轨迹倾斜可能造成以下影响：用于束团长度测量的共模信号幅度会减小，导致信噪比和分辨能力下降；轨迹倾斜的束流可能会激励起差模（如 Pill-box 腔内的 TM₁₁₀ 模式）及其他高次模式，这些模式有可能会对共模信号造成干扰；束流轨迹倾斜导致用于

束团长度和电荷量测量的共模信号相位发生偏移，这会影响幅度提取结果，进而带来测量误差。CST 仿真结果如表 7 所示，当轨迹倾角达到 0.057° (1 m·rad) 时，模式信号的幅度相对偏差量级达到 10⁻⁶，相当于 10⁻² mm 量级的横向偏移带来的影响，束团长度测量误差 0.316%，电荷量测量误差 0.013 4%。

表 7 束团轨迹倾斜带来的束团长度与电荷量仿真测量误差
Table 7 Simulation measurement error of bunch length and charge brought by oblique angle of the trajectory

束团轨迹倾斜角度 Bunch trajectory angle / mrad	TM ₀₁₀ 频谱幅度相对偏差 $\Delta V_{TM010}/V_{TM010}$	TM ₀₃₀ 频谱幅度相对偏差 $\Delta V_{TM030}/V_{TM030}$	束团长度测量相对误差 Measured σ relative error / %	束团电荷量测量相对误差 Measured q relative error / %
1×10^{-3}	6.732×10^{-7}	2.318×10^{-10}	0.327	0.013 2
1×10^{-2}	7.995×10^{-7}	7.524×10^{-9}	0.319	0.013 2
1×10^{-1}	1.262×10^{-7}	1.271×10^{-7}	0.322	0.013 3
1×10^0	2.987×10^{-6}	9.323×10^{-7}	0.311	0.013 1

电子学是系统主要的噪声来源，电子学噪声会直接影响系统分辨率。电子学噪声包括元器件的噪声、本振信号幅度与相位的稳定性、模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 采样时钟与触发的稳定性等，元器件噪声会直接影响信噪比，从而影响分辨率，探头信号幅度波动的均方根会随本振信号幅度与相位抖动增大而增大，ADC 触发的不稳定性会对信号相位产生影响。因此在混频器前后端采用低噪声元器件，对本振信号严格锁相，采用高位数的 ADC 等措施可以在一定程度上减小电子学噪声

带来的影响。

4.3 射频前端

射频前端电子学用于调理信号及下变频至中频信号以适配后续相应的数字化电子学。初步选定型号如图 10 所示，所有器件均为 Mini-Circuits 产品。

两个腔体输出信号经过带通滤波器及低噪声电压灵敏前置放大器后作为混频器的射频 (Radio Frequency, RF) 输入，混频器的噪声系数主要取决于前置放大器，因此前端全部采用低噪声器件，后端降

低对放大器件的噪声要求。其中1号腔的带通滤波器中心频率为1 525 MHz,带宽为90 MHz,本振信号滤波器中心频率为1 034 MHz,带宽为112 MHz,低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)工作频率0.7~1.6 GHz,噪声为0.7 dB。2号腔的带通滤波器中心频率为5 540 MHz,带宽为2 020 MHz,本振信号高通滤波器截止频率为5 000 MHz, LNA工作频

率0.5~8.0 GHz,噪声为1.3 dB。本振信号经滤波后作为混频器的本振输入(LO端),混频器用于模式信号变频至中频500 MHz,选用的型号都具有高隔离度、低噪声系数的优点。混频后的中频信号(IF端)再通过低通滤波器滤波,再接入放大器/衰减器,最终信号接入数字信号采集与处理模块进行ADC采样和数字信号处理,得到束团长度与电荷量信息。

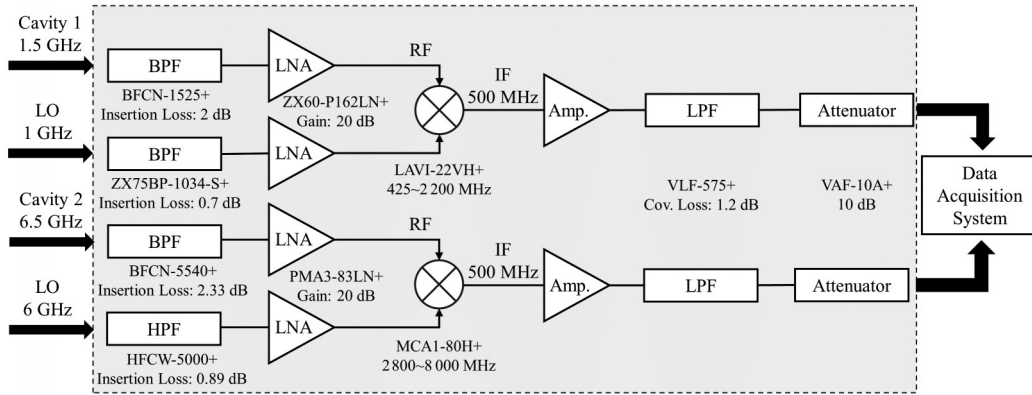


图10 射频前端框图
Fig.10 Block diagram of RF front-end

两腔工作模式频率的差异导致混频器前后信号通路截然不同,最终输出的信号的增益或衰减也不相同,这会给测量带来误差,后续可以进行在线定标,直接确定束团长度与输出信号间的系数关系,从而消除由于信号通路不同而带来的测量误差。

4.4 分辨率评估

谐振腔式探头已经在束流位置测量中广泛应用。谐振腔式束流位置监测器(Cavity Beam Position Monitor, CBPM)探头一般由工作在 TM_{110} 模式的位置腔和工作在 TM_{010} 模式的参考腔共同组成,系统布局架构也与本文中的谐振腔式束团长度及电荷量监测器基本类似。因此可以根据CBPM的信号特点评估腔式束长与电荷量监测器的系统性能。

以目前直线加速器及自由电子激光装置上在线运行的CBPM探头、模拟前端输出信号及数据作为参考,使用示波器直接采集谐振腔输出信号及混频器输出的中频信号,每一路信号都采集了300组时域信号数据,记录傅里叶变换后目标频率信号峰值,得到峰值的平均值(信号幅度)与标准差(噪声幅度),进而得到信噪比。测试装置束长4.5 ps,电荷量264 pC,考虑电缆衰减并扣除了10 dB的影响,信噪比最高可以达到63.2 dB。STCF的电荷量为1.5 nC,信号幅值与电荷量成正比,因此当前设计的腔式探头信噪比有望达到60 dB以上^[20-22]。此外,测试中采用的示波器位数低但信噪比尚可,如设计专

用于束长与电荷量测量的电子学,采用14 bits及以上的高位数ADC,并将ADC采样时钟与本振信号严格锁相,设定合适的时间窗口和采样点数^[23],获取到的谐振腔输出信号幅度信噪比有望达到65 dB以上。将评估结果代入式(5)、(6),对于束长为3.3 ps的束团,束长分辨率可达到100 fs水平,对于电荷量为1.5 nC的束团,电荷量相对分辨率可达0.07%。

5 结语

经过一系列的优化措施,本文设计的双谐振腔束团参数监测探头可以实现多参数联合测量,仿真结果与在线评估表明,该探头对于束团电荷量和束团长度的理论测量精度与分辨率很高,整个探头性能良好,可以应用于STCF束流测量,后续将对信号处理电子学进行进一步的研究设计,并根据结构参数制作实物器件,并考虑在超级陶粲装置关键技术验证装置上进行实验验证。

致谢 感谢合肥综合性国家科学中心、中国科学技术大学双一流建设和超级陶粲装置关键技术攻关项目支持。

作者贡献声明 吕涛负责研究的提出及设计、数据的整理、文章的起草和最终版本的修订;王妍负责实验实施以及数据的收集;罗箐负责最终版本的修订、项目的监督及管理。

参考文献

- 薛磊, 杜应超, 胡超, 等. 基于积分束流变压器的加速器束团电荷量测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1207 - 1210.
XUE Lei, DU Yingchao, HU Chao, *et al.* Bunch charge monitoring system based on integrating current transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(7): 1207 - 1210.
- Webber R C. Tutorial on beam current monitoring[C]. AIP Conference Proceedings. Cambridge, Massachusetts (USA). AIP, 2000, **546**(1): 83 - 84. DOI: 10.1063/1.1342580.
- 曹珊珊, 冷用斌, 袁任贤, 等. 基于腔式探头的高分辨率束团电荷量测量方法研究[J]. 核技术, 2021, **44**(4): 040101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040101.
CAO Shanshan, LENG Yongbin, YUAN Renxian, *et al.* Methods study on high-resolution bunch charge measurement based on cavity monitor[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(4): 040101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040101.
- Zhang W, Zhu D C, Sui Y F, *et al.* Streak camera calibration for bunch length measurement at BEPC II[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**(3): 466 - 473. DOI: 10.1007/s41605-021-00272-7.
- 白金, 陈曲珊, 樊宽军. 基于射频偏转腔的束团长度测量系统[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(9): 1607 - 1611. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0206.
BAI Jin, CHEN Qushan, FAN Kuanjun. Bunch length diagnostic system based on RF deflecting cavity[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(9): 1607 - 1611. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0206.
- Steffen B, Casalbuoni S, Knabbe E A, *et al.* Electro optic bunch length measurements at the VUV-FEL at DESY [C]. Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. May 16-20, 2005, Knoxville, TN, USA. IEEE, Feb. 2006: 3111 - 3113. DOI: 10.1109/PAC.2005.1591381.
- Cao S S, Leng Y B, Yuan R X, *et al.* An application of a cavity-based beam arrival time measurement system: beam energy measurement[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1045**: 167456. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167456.
- 周逸媚, 冷用斌, 陈健, 等. 基于腔式探头的束团到达时间测量算法优化[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(10): 2104 - 2112. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0892.
ZHOU Yimei, LENG Yongbin, CHEN Jian, *et al.* Optimization of bunch arrival time measurement algorithm for cavity probe[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(10): 2104 - 2112. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0892.
- Chen J, Cao S S, Leng Y B, *et al.* Study of the optimal amplitude extraction algorithm for cavity BPM[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1012**: 165627. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165627.
- Zhang A L, Xu L C, Sun J, *et al.* Thermal research of a single crystal tungsten target positron source for the STCF project in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1039**: 167107. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167107.
- 王妍, 罗箐, 孙葆根. 单谐振腔束团长度监测器的设计与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(11): 125 - 129. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170258.
WANG Qian, LUO Qing, SUN Baogen. Design and simulation of a single resonator beam length monitor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(11): 125 - 129. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170258.
- Walston S, Boogert S, Chung C, *et al.* Performance of a high resolution cavity beam position monitor system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, **578**(1): 1 - 22. DOI: 10.1016/j.nima.2007.04.162.
- Kireeff C M. Nondestructive synchronous beam current monitor[J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, **85**(12): 125106. DOI: 10.1063/1.4902903.
- Lorenz R. Cavity beam position monitors[C]. Stanford, California (USA): AIP Conference Proceedings, 1998, **451**(1): 53 - 73. DOI: 10.1063/1.57039.
- 曹珊珊, 冷用斌, 袁任贤, 等. 基于双腔探头的流强精确测量[J]. 核技术, 2019, **42**(4): 040101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040101.
CAO Shanshan, LENG Yongbin, YUAN Renxian, *et al.* Study on precise bunch current measurement based on dual cavity monitor[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(4): 040101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040101.
- Wang Q, Luo Q, Sun B G. Design and performance study of an improved cavity bunch length monitor based on an

- optimized offline test scheme[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **968**: 163975. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163975.
- 17 Liapine A. Cavity beam position monitor for the TESLA energy spectrometer[C]. Mainz, German: Proceedings DIPAC (the European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators), 2003: 184.
- 18 Guo J, Zhou Z R, Luo Q, *et al.* Design and simulation of TM₀₂₀ cavity bunch length monitor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, **28**(9): 155 – 159. DOI: 10.11884/HPLPB201628.160112.
- 19 Bilanishvili S. Design and studying physical properties of cavity beam position monitors for electron accelerators [ED/OL]. [2021-04-28]. <https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1546022>.
- 20 Maesaka H, Ego H, Inoue S, *et al.* Sub-micron resolution rf cavity beam position monitor system at the SACLA XFEL facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **696**: 66 – 74. DOI: 10.1016/j.nima.2012.08.088.
- 21 Chen Z C, Zhou W M, Leng Y B, *et al.* Subpicosecond beam length measurement study based on the TM₀₁₀ mode [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2013, **16**(7): 072801. DOI: 10.1103/physrevstab.16.072801.
- 22 赖龙伟, 冷用斌, 阎映炳, 等. 自由电子激光装置数字化束流位置信号处理器研制及应用[J]. 核技术, 2018, **41**(7): 070402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070402.
- LAI Longwei, LENG Yongbin, YAN Yingbing, *et al.* Development and application of digital beam position measurement processor for FEL[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(7): 070402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070402.
- 23 曹珊珊. 基于腔式探头的束流到达时间及电荷量测量关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2019.
- CAO Shanshan. Key techniques study on beam arrival time and bunch charge measurement based on cavity-type monitors[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.