

超导回旋加速器 谐振腔电压分布测试方法

Superconducting cyclotron
Test method of voltage distribution for radiofrequency cavity

2018 - 12 - 29 发布

2019 - 01 - 29 实施

安徽省市场监督管理局

发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由合肥中科离子医学技术装备有限公司提出。

本标准由安徽省超导回旋加速器标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：合肥中科离子医学技术装备有限公司、中国科学院等离子体物理研究所、安徽省质量和标准化研究院。

本标准主要起草人：宋云涛、刘广、陈根、赵燕平、黄崑成、张鑫、陈永华、杨庆喜。

超导回旋加速器 谐振腔电压分布测试方法

1 范围

本标准规定超导回旋加速器谐振腔电压分布测试方法的术语和定义、方法原理、测试设备、测试要求、测试步骤、数据处理、测试报告。

本标准适用于超导回旋加速器谐振腔电压分布的测试。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1

特性阻抗 characteristic impedance

射频传输线中影响无线电波电压、电流的幅值和相位变化的固有特性，数值上等于各处的电压与电流的比值。

2.2

阻抗匹配 impedance matching

信号源内阻与所接传输线的特性阻抗大小相等且相位相同的状态，或传输线的特性阻抗与所接负载阻抗的大小相等且相位相同的状态。

2.3

微波网络 microwave network

电子系统中用于检测、传输、处理信息或能量的微波电路。

2.4

散射参数 S parameter

建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数，以器件端口的反射信号以及从该端口传向另一端口的信号来描述微波电路。

2.5

谐振腔 resonant cavity

在射频波段能够提供加速粒子所需电场的封闭空腔。

2.6

D 形结构板 Dee

谐振腔中平面处的 D 形结构板块，主要用于产生加速电压。

3 方法原理

根据谐振腔并联分路阻抗测试理论，谐振腔可作为微波二端口网络进行处理，根据传输矩阵原理及互易条件，分析了探针直接测量、探针并联特性阻抗电阻测量这两种情况的原理，并分别计算出下腔体并联分路阻抗与传输系数的关系式。见附录A 公式 (A. 24) 和 (A. 30)。

谐振腔电压分布测试原理的公式推导见附录A。

4 测试设备

测试设备包括：

- 矢量网络分析仪及标准校准器件，矢量网络分析仪宜为 2 端口或 4 端口，本地噪声小于 -100 dbm；
- N 型接头、阻抗匹配的同轴线缆；
- 探针、无感电阻，探针直径宜为 $4\text{ mm}\sim 8\text{ mm}$ ，无感电阻的阻抗为特性阻抗，一般为 $50\ \Omega$ 。

5 测试要求

测试要求包括：

- 测试环境温度应为 $10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，空气湿度应为 $40\%\sim 60\%$ ；
- 谐振腔外壳及矢量网络分析仪都需接地保护；
- 绝缘要求：工装条的材质表面电阻率应大于 $10^4\ \text{M}\Omega$ 。

6 测试步骤

6.1 以腔体中心点为圆点以孔距 $15\text{ mm}\sim 30\text{ mm}$ 取若干等距的测量点，如图 1 所示。

6.2 制备工装条，依照测量点在工装条上开孔，开孔直径应大于探针直径 $3\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$ 。工装条应贴合谐振腔 Dee 上下间隙。

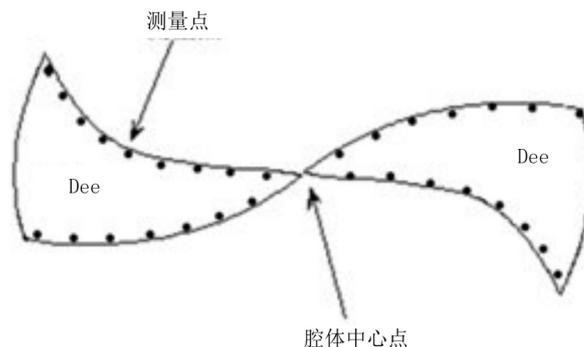


图1 测量点分布示意图

6.3 打开矢量网络分析仪，以腔体谐振频率为中心频率，频宽宜设置为 $20\text{ MHz}\sim 50\text{ MHz}$ ，校准矢量网络分析仪。

6.4 将矢量网络分析仪 1 端口接入谐振腔耦合馈口，调节谐振腔的调谐结构使其达到谐振频率，再调节腔体耦合结构使其达到临界阻抗匹配状态。

- 6.5 将矢量网络分析仪 2 端口连接探针。测量时探针穿过工装条的测量孔，探针顶端接触 Dee 边缘，待矢量网络分析的正向传输系数 (S_{21}) 稳定后记录。如图 2 所示。
- 6.6 从谐振腔中心位置开始，沿着测量点依次向外测量 Dee 的 S_{21} 数据。
- 6.7 将无感电阻与探针并联（接地并联），重复步骤 6.3~6.6 进行测试。测量并记录一组新的 S_{21}' 数据。

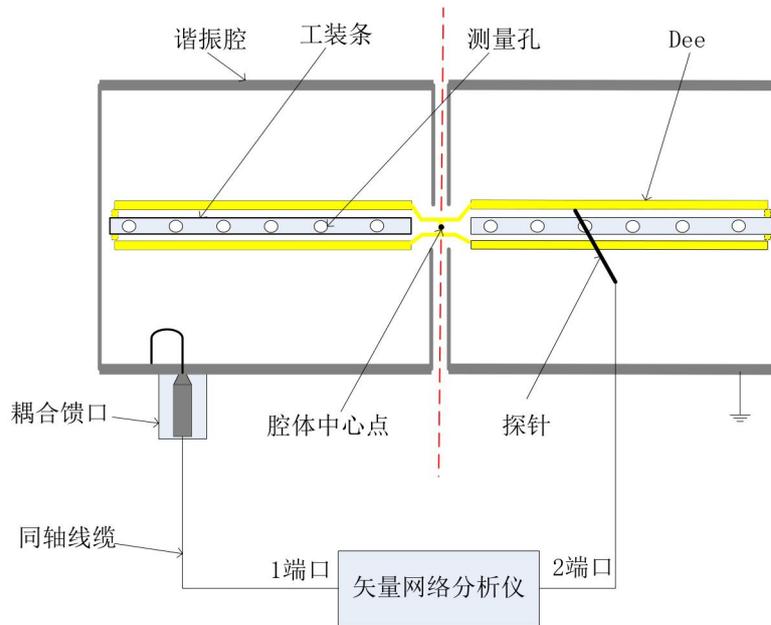


图2 电压分布测试示意图

7 数据处理

- 7.1 根据附录 A 式 (A. 24) $R \approx 4Z_0 / S_{21}^2$ ，由 S_{21} 数据计算出腔体并联分路阻抗。
- 7.2 根据附录 A 式 (A. 30) $R \approx Z_0 / S_{21}'^2$ ，由 S_{21}' 数据计算出腔体并联分路阻抗。
- 7.3 分别得到两种腔体并联分路阻抗分布（腔体并联分路阻抗与测量点位置关系）。
- 7.4 由电压与并联分路阻抗的关系：

$$V = \sqrt{2PR} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- P ——腔体功率损耗，单位为瓦 (W)；
- V ——腔体 Dee 板某测量点处电压，单位为瓦 (W)；
- R ——并联分路阻抗，单位为欧姆 (Ω)。

根据腔体功率损耗不变，依据并联分路阻抗 R_p (R_p') 的分布，计算出腔体电压分布。

8 测试报告

测试报告应包含以下内容：

- 本标准号；
- 环境温度，湿度；
- 测量方法；
- 测量时间；
- 矢量网络分析仪的型号；
- 谐振腔电压分布测试前腔体临界匹配的输入反射系数 (S_{11}) 图以及 Smith 阻抗圆图；
- Dee 各测量点 S_{21} 参数数据；
- 腔体并联分路阻抗分布；
- 腔体电压分布。

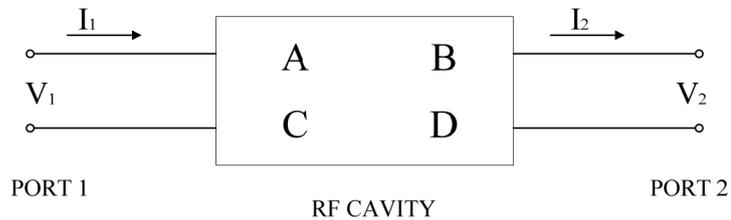
附 录 A
(资料性附录)
谐振腔并联分路阻抗测试理论

A.1 矢量分析仪测量法基础理论 (基于探针直接测量)

根据式 (1), 将测量加速电压等效转化为测量并联分路阻抗。

公式推导基于以下两点假设:

- 谐振腔耦合端口与传输线特性阻抗 Z_0 匹配;
- 谐振腔处于谐振状态, 腔体等效于并联分路阻抗 R 。



图A.1 谐振腔二端口网络

由上面假设, 可以得出传输矩阵 ABCD 之间的关系:

$$V_1 = AV_2 + BI_2 \dots \dots \dots (A.1)$$

$$I_1 = CV_2 + DI_2 \dots \dots \dots (A.2)$$

式中:

V_1 ——网络中端口1 (PORT 1) 电压, 单位为伏特 (V);

V_2 ——网络中端口2 (PORT 2) 电压, 单位为伏特 (V);

I_1 ——网络中端口1 (PORT 1) 电流, 单位为安培 (A);

I_2 ——网络中端口2 (PORT 2) 电流, 单位为安培 (A)。

A、B、C、D——待求解的未知系数。

由 (A.1) 式可知:

$$\frac{V_1^2}{2Z_0} = \frac{V_2^2}{2R} \dots \dots \dots (A.3)$$

式中:

由假设1, 端口1 匹配:

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_0 \dots \dots \dots (A.4)$$

令 $I_2 = 0$, 则:

$$A = \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{Z_0 / R} \dots\dots\dots (A. 5)$$

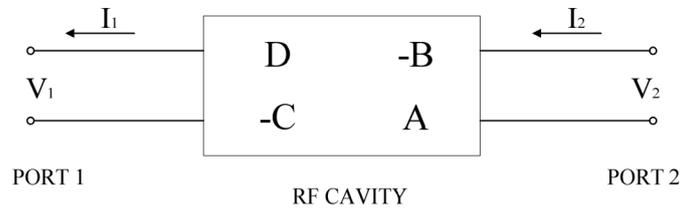
$$C = \frac{I_1}{V_2} = \frac{I_1 V_1}{V_1 V_2} = \frac{\sqrt{Z_0 / R}}{Z_0} \dots\dots\dots (A. 6)$$

令 $\xi = \sqrt{Z_0 / R}$, 则:

$$A = \xi \dots\dots\dots (A. 7)$$

$$C = \xi / Z_0 \dots\dots\dots (A. 8)$$

为了求解传输矩阵 B、D 的值, 采用如图A. 2 所示的倒置矩阵



图A. 2 谐振腔二端口网络倒置矩阵

令

$$I_1 = 0 \dots\dots\dots (A. 9)$$

端口1 开路时,

$$\frac{V_2}{I_2} = R \dots\dots\dots (A. 10)$$

由二端口网络互易条件:

$$AD - CB = 1 \dots\dots\dots (A. 11)$$

代入 (A. 1) 、 (A. 2) 可得到:

$$B = 0 \dots\dots\dots (A. 12)$$

$$D = 1 / \xi \dots\dots\dots (A. 13)$$

得出传输矩阵 ABCD 的参数:

$$M = \begin{bmatrix} \xi & 0 \\ \xi / Z_0 & 1 / \xi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A. 14)$$

由散射 S 矩阵和传输 A 矩阵转换关系可得:

$$S_{11} = (A + B / Z_0 - CZ_0 - D) / E \dots\dots\dots (A. 15)$$

$$S_{21} = 2 / E \dots\dots\dots (A. 16)$$

$$S_{21} = S_{12} \dots\dots\dots (A. 17)$$

$$S_{22} = (-A + B / Z_0 - CZ_0 + D) / E \dots\dots\dots (A. 18)$$

其中：

$$E = A + B / Z_0 + CZ_0 + D \dots\dots\dots (A. 19)$$

将 ABCD 参数带入，可得：

$$S_{11} = -\frac{1}{1 + 2\xi^2} \dots\dots\dots (A. 20)$$

$$S_{21} = \frac{2\xi}{1 + 2\xi^2} \dots\dots\dots (A. 21)$$

$$S_{22} = \frac{1 - 2\xi^2}{1 + 2\xi^2} \dots\dots\dots (A. 22)$$

其中 S_{12} 为反向传输系数， S_{21} 为正向传输系数， S_{11} 为输入反射系数， S_{22} 为输出反射系数。并可知散射矩阵由特性阻抗 Z_0 与并联分路阻抗 R 的比值决定。并联分路阻抗通常远远大于特性阻抗，即：

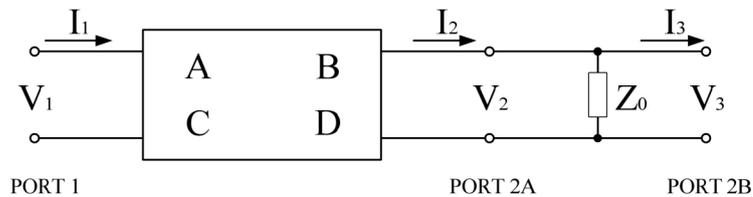
$$\xi \ll 1 \dots\dots\dots (A. 23)$$

则 S_{11} 和 S_{22} 反射系数接近于 1，受到 ξ 的影响小。通过测量 S_{11} 或者 S_{22} 计算并联分路阻抗可能出现较大误差。

通过测量传输系数 S_{21} （或 S_{12} ）计算并联分路阻抗，再根据（A. 23）式得到：

$$R \approx 4Z_0 / S_{21}^2 \dots\dots\dots (A. 24)$$

A. 2 基于在矢量网络分析仪测量基本理论，还可采用另一种二端口网络对腔体进行测量，即在谐振腔端口 2 并联分路阻抗 Z_0 ，具体测量原理图如图A. 3 所示。



图A. 3 谐振腔端口 2 并联分路阻抗 Z_0 后的网络

传输矩阵（在端口 2A 与 2B 之间），可以表示为：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A. 25)$$

端口1 与 2B 之间的级联传输矩阵，为腔体传输矩阵与端口 2A 与 2B 间的传输矩阵的积，表示为：

$$\begin{bmatrix} \xi & 0 \\ 1/Z_0(\xi + 1/\xi) & 1/\xi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A. 26)$$

其中 $\xi = \sqrt{Z_0 / R}$ 。

根据基本理论的相关结论，使用新的传输矩阵 (A. 26)，最终可以得到并联分路阻抗 Z_0 的散射矩阵 S ：

$$S_{11} = -\frac{1}{1 + \xi^2} \dots\dots\dots (A. 27)$$

$$S_{21} = \frac{\xi}{1 + \xi^2} \dots\dots\dots (A. 28)$$

$$S_{22} = -\frac{\xi^2}{1 + \xi^2} \dots\dots\dots (A. 29)$$

在 $Z_0 \ll R$, $\xi \ll 1$ 的近似条件下可知， S_{11} 反射系数接近于 1，全反射，而 S_{22} 接近于 0，在匹配状态下。

通过测量传输系数，根据公式 (A. 28)，可以求出并行阻抗 R ：

$$R \approx Z_0 / S_{21}^2 \dots\dots\dots (A. 30)$$

