

# HI-13 串列加速器升级工程 QWR 超导腔冷模实验

彭朝华, 吕 钊, 王修龙

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**为验证理论计算, 获取相关高频参数, 进行了 QWR 超导腔冷模实验。用网络分析仪测量了相同尺寸的谐振腔模型, 获得了谐振腔在常温下的频率、品质因子及耦合器对谐振频率的影响等数据。用实验对理论计算结果进行验证, 经理论分析后, 反演得到低温超导态下的 QWR 超导腔及耦合器的工作参数。

**关键词:**冷模实验; 超导腔; 耦合器

中图分类号: TL53 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)01-0005-05

## Cold Test of QWR Superconducting Cavity for HI-13 Tandem Accelerator Upgrade Project

PENG Zhao-hua, LU Zhao, WANG Xiu-long

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-62, Beijing 102413, China)

**Abstract:** In order to verify theoretic calculation, frequency, quality factor and influence of coupler to frequency of resonator were measured in cold test of QWR superconducting cavity with a prototype resonator at normal temperature status by network analyzer. The measured data verified the physical design. Main RF parameters at low temperature were derived by theoretic analysis.

**Key words:** cold test; superconducting cavity; coupler

北京 HI-13 串列加速器升级工程中的超导增能器需要 4 个 144 MHz 的 QWR 超导腔。利用 3D 电磁场数值计算软件, 在初步设计中给出了 QWR 超导腔的几何尺寸及相关的高频性能参数, 同时, 还通过计算设计了配套的磁耦合器。为了检验设计的合理性, 采用实验的方法对 QWR 超导腔参数进行测量。

### 1 QWR 超导腔参数实验测量

实验的主要设备为 1 个 QWR 超导腔冷模实验腔, 1 台惠普网络分析仪 8720C, 1 个可调式耦合器。

QWR 超导腔冷模实验腔的材料为防锈铝 (LF21), 设计尺寸与正式腔完全一致。为便于测量, 实验腔的外侧开有 5 个高频端口, 各端口的位置示于图 1。各端口与顶部圆角顶点的距离分别为 98、98、238、308、378 mm。实验腔主

要几何尺寸的实测值列于表 1。

与耦合器配套的绝缘材料为聚四氟乙烯。耦合器的尾端设计为标准的 L27 公头接口,用 L27-N 双母转换头和 N 型头电缆连接。信号拾取器则直接把 N 型双母头安装在法兰上,插入铜导线。

测量时,还需用调谐板封住 QWR 腔的开路端,并利用高频端口塞子封闭多余的端口。

## 2 实验数据及其分析

在冷模实验中,用单端口测量电耦合器和磁耦合器的高频参数,用双端口测量耦合器和信号拾取器的高频参数。需说明的是,由于不是在恒温环境中测量,温度变化会导致频率发生十几 kHz 的变化,但针对 1 次测量,可认为是恒温的。

### 2.1 频率与 $Q$ 值

实验时,QWR 超导腔的开路端需一直用调谐板封闭,经测量,端口塞子对频率的影响可

忽略不计。

根据理论计算,当内导体长 512 mm、开路端距离 73 mm 时,QWR 超导腔的谐振频率为 143.55 Hz。QWR 超导腔几何尺寸对频率的影响为:内导体长度,  $-274$  kHz/mm;开路端,  $8$  kHz/mm;内导体外径,  $-14$  kHz/mm;外导体内径,  $-21$  kHz/mm。

基于表 1 的实际测量尺寸,QWR 腔的理论频率应为 143.469 MHz,实测频率为 143.448 MHz(有时为 143.438 MHz),3D 电磁场数值模拟值为 143.457 MHz。

QWR 超导腔的理论计算值比实验测量值约大 20 kHz,即理论设计值为 143.55 MHz,实际频率可能为 143.53 MHz,低温下 QWR 超导腔的频率变高,理论值变为 144.00 MHz,可满足工程要求。

通过测量 S11 参量的半高宽点算得  $Q$  值。分别测量了 QWR 超导腔在临界耦合、过耦合和欠耦合状态下的频率、带宽和驻波比,计算出各种情况下的有载  $Q$  值,并换算出 QWR 腔的无载  $Q$  值。实验数据表明,各种情况下的测量均能得到同样的无载  $Q$  值,约为 4 800。

QWR 腔在超导态下的无载  $Q$  值通常处在  $10^8 \sim 10^9$  量级,本工作设计的 QWR 腔的真实无载  $Q$  值在现阶段无法通过测量得到,在分析和设计中取为  $5 \times 10^8$ 。

### 2.2 耦合器

耦合器的单端口测量刻度频率范围为 142.5~144 MHz,记录了耦合器谐振频率和 S11 参数,结果示于图 2、3。

由图 2、3 可知,在临界点附近,磁耦合器对 QWR 超导腔频率的影响较小,而电耦合器的影响可达到几十 kHz/mm。不管是磁耦合器还是电耦合器,在临界耦合时,内导体伸入腔体的部分均有几十 mm 长。表 2 列出临界耦合时耦合器内导体到 QWR 内柱的距离、谐振频率和频率变化率。

冷模实验在常温下进行,实验结果仅反映 QWR 超导腔在常规态下的高频特性。超导态下的高频特性需进一步做理论分析。

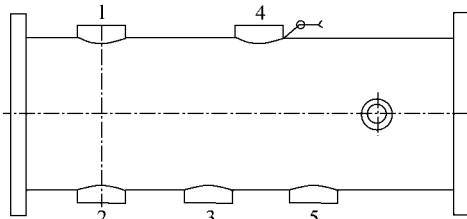


图 1 端口示意图

Fig.1 Scheme of RF ports on QWR superconducting cavity

表 1 实验腔实物的主要尺寸

Table 1 Dimension of real cavity

内柱长度 (理论值/实测值)/mm	开路端距离 (理论值/实测值)/mm
512.0/512.3	73.0/73.5
$\phi 180$ 孔 (理论值/实测值)/mm	$\phi 60$ 柱 (理论值/实测值)/mm
180.0/180.05	60.0/60.04

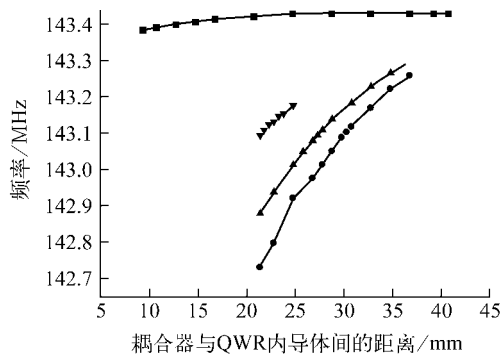


图 2 谐振频率与耦合器位置关系

Fig. 2 Relationship between cavity frequency and coupler position

■——磁耦合, 端口 2; ●——电耦合, 端口 5;  
▲——电耦合, 端口 4; ▼——电耦合, 端口 3

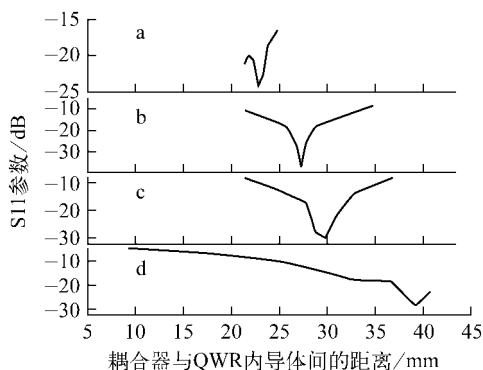


图 3 端口 S11 参数与耦合器位置关系

Fig. 3 Relationship between S11 parameter and coupler position

a——电耦合, 端口 3; b——电耦合, 端口 4;  
c——电耦合, 端口 5; d——磁耦合, 端口 2

表 2 单端口测量时耦合器临界耦合实验数据

Table 2 Measured data of one port at critical coupling status

耦合方式	距离/mm	谐振频率/ MHz	频率变化率/ (kHz · mm <sup>-1</sup> )
端口 2, 磁耦合	39.2	143.438	0
端口 3, 电耦合	22.8	143.138	23
端口 4, 电耦合	27.3	143.1	30
端口 5, 电耦合	29.8	143.108	35

由表 2 可知, 常规态下电耦合器和磁耦合器均须深入腔体几十 mm 才能达到临界耦合。在超导态下, 超导腔的表面电场通常为几十 MV/m, 耦合器尖端和内柱过于靠近容易造成

打火, 导致腔内场水平无法达到设计值。另外, 在 HI-13 串联加速器升级工程中, 电耦合器对低温冷却要求低, 易于实现, 但电耦合器在常规态下临界点附近的频率变化率达到了几十 kHz/mm, 如果超导态下频率变化率太大, 超导腔在加工、调试和运行时的锁频会很困难。耦合器和腔体的关系可用等效电路(图 4)来表示。

定义  $\rho$  为驻波比,  $\Gamma$  为反射系数,  $\beta$  为耦合强度,  $R_{L0}$  为耦合器和 QWR 腔的分路阻抗,  $Z_0$  为传输线特征阻抗,  $L_0$  为 QWR 腔的电感,  $C_0$  为 QWR 腔的电容,  $n$  为耦合系数, 则有:

$$S_{11} = 20 \lg |\Gamma|$$

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$$\beta = \frac{R_{L0}}{n^2 Z_0}$$

$$\rho = \begin{cases} \beta & \beta > 1 \\ 1/\beta & \beta < 1 \end{cases}$$

其中, 耦合系数  $n$  只取决于耦合器和 QWR 腔的相对位置。

当 QWR 腔处于超导态时, 如果不考虑由于降温带来的形状上的微小变化, 等效电路中腔的  $C_0$  和  $L_0$  则是不变的(因频率不变), 但  $R_{L0}$  将变化很大。  $R_{L0}$  的变化由腔的无载  $Q$  因子的变化来反映。

现假设常温下 QWR 腔的无载  $Q$  因子为  $Q_0$ ,  $Q_0$  的值通常约为数千; 超导态下无载  $Q$  因子将达到  $10^8 \sim 10^9$  量级, 变化系数为  $K$ 。无载  $Q$  因子满足如下公式:

$$Q = \frac{\omega W}{P}, P = \frac{V_c^2}{R_{sh}}$$

式中:  $\omega$  为谐振腔角频率;  $W$  为腔内储能;  $P$  为

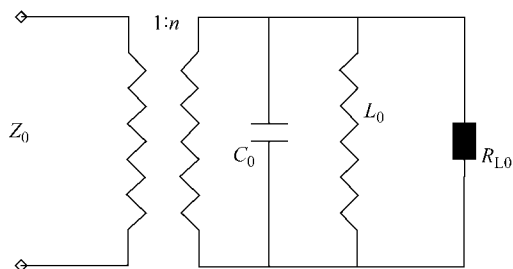


图 4 耦合器和 QWR 腔等效电路

Fig. 4 Circuit diagram used to model a cavity coupled to a generator

腔内功率损耗;  $V_c$  为内外导体的加速电压;  $R_{sh}$  为分路阻抗, 等效于等效电路中的  $R_{L0}$ 。

加速电压完全取决于腔内的储能, 储能相同, 则腔内的场水平相同, 加速电场相同, 则加速电压也相同。由此可知, 当 QWR 超导腔进入超导态后, 无载  $Q$  因子放大  $K$  倍, 在频率和储能不变的情况下, 功率损耗  $P$  减小  $K$  倍, 即分路阻抗变大  $K$  倍, 常规态下的耦合强度在其它条件不变的情况下也变成原来的  $K$  倍。相反, 欲在超导态下得到与常规态同样的耦合强度, 耦合系数需变为原来的  $1/\sqrt{K}$ 。预计 QWR 腔工作在超导态时的无载  $Q$  值为  $5 \times 10^8$ , 常规态下的无载  $Q$  因子测量值为 4 800, 则  $K$  为  $1.04 \times 10^5$ , 其平方根值为 322。

耦合系数  $n$  反映耦合平面内的通量与耦合器所包围的通量的比。磁耦合器和电耦合器的耦合系数分别为  $\Phi_H/\Phi_{Hc}$  和  $\Phi_E/\Phi_{Ec}$ , 其中,  $\Phi_H$  和  $\Phi_E$  分别为耦合平面内的总磁通量和总电通量,  $\Phi_{Hc}$  和  $\Phi_{Ec}$  分别为耦合器在耦合平面上包围的磁通量和电通量(图 5)。

如图 5 所示, 对于磁耦合, 耦合平面不变, 当场水平不变时,  $\Phi_H$  也不变; 当磁耦合器的位置前后移动时, 耦合器处于耦合平面的面积随之变化, 磁通量也发生变化, 导致耦合系数变化。在耦合平面内的磁感应强度均匀时, 面积变化  $n$  倍, 耦合系数变化  $1/n$  倍。磁耦合器深入, 耦合面积变大,  $n$  值变小, 耦合强度变大, 处于过耦合状态。

对于电耦合, 随着耦合器前后移动, 大部分情况下耦合器在耦合平面内占据的面积不变, 但耦合平面的位置发生变化。如图 5 所示, QWR 超导腔的电耦合平面为一环形平面, 此平面随着耦合器前后移动, 耦合平面的面积与环形的半径  $R$  成正比。电耦合器越深入, 耦合平面的面积变小,  $n$  值变小, 耦合强度变大, 处于过耦合状态。

由以上分析可知, 耦合系数  $n$  取决于耦合器与 QWR 超导腔的相对位置和 QWR 超导腔内的相对电场分布, 与 QWR 超导腔内的绝对电场分布无关。

表 3 列出 QWR 超导腔高频端口 1 磁耦合器单端口的测量数据。表中的  $D_{is}$  为耦合器顶部到内柱表面的距离, SWR 为驻波比, RSWR 为相对驻波比, 是 SWR 与临界耦合时 SWR 的比值,  $N_r$  为基于相对驻波比计算出的相对耦合系数的倒数,  $N_{dis}$  为  $N_r$  与  $D_{is}$  值的比值。

磁耦合器几何尺寸和 QWR 超导腔内径向磁场分布的数据表明, 当  $D_{is}$  小于 22.6 mm 时, 耦合器的耦合面积变化相对  $D_{is}$  值变化很小, 场分布的影响更大; 当  $D_{is}$  处于 22.6 ~ 53.6 mm 时, 耦合面积变化大, 且接近线性变化, 此时, 场分布的影响较小。

表 3 QWR 超导腔高频端口 1 磁耦合器单端口的测量数据及处理结果

Table 3 Measured and analyzed data at RF port 1 with coupling loop

$D_{is}/\text{mm}$	SWR	RSWR	$N_r$	$N_{dis}$
9.3	3.3	3.235	0.556	0.059 780 6
15.1	2.7	2.647	0.615	0.040 704 4
20.24	2.2	2.157	0.681	0.033 641 7
25.52	1.72	1.686	0.770	0.030 175 5
28.06	1.51	1.480	0.822	0.029 290 3
29.74	1.38	1.353	0.860	0.028 908 1
32.46	1.15	1.127	0.942	0.029 013 7
33.22	1.11	1.088	0.959	0.028 856 2
33.5	1.06	1.039	0.981	0.029 282 1
34.4	1.02	1.000	1.000	0.029 069 8
35.76	1.07	1.049	1.024	0.028 641 4
37.3	1.22	1.196	1.094	0.029 320 5

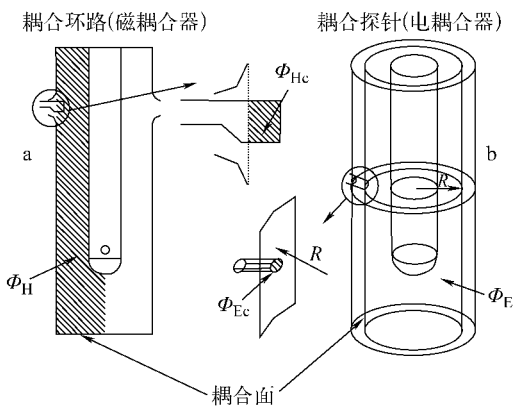


图 5 电耦合与磁耦合中耦合系数物理意义示意图

Fig. 5 Sketch for electrical coupling and magnetic coupling from physical point of view

a——磁耦合; b——电耦合

表 3 数据表明,对耦合器伸入深度与耦合系数的分析是正确的。

表 4 列出端口 5 电耦合器的测量数据。由电耦合器的结构可知,当  $D_{is}$  小于 57 mm 时,可认为电耦合器的耦合面积不变,耦合平面的面积与  $D_{is}$  成正比,故耦合系数  $n$  和  $D_{is}$  成反比,即  $N_{dis}$  应为一常数。

表 4 QWR 腔高频端口 5 电耦合器单端口的测量数据及处理结果

Table 4 Measured and analyzed data at RF port 5 with coupling probe

$D_{is}/\text{mm}$	SWR	RSWR	$N_r$	$N_{dis}$
21.4	2.12	1.981	0.710	0.033 198
23.12	1.8	1.682	0.771	0.033 348
25.3	1.48	1.383	0.850	0.033 608
26.86	1.24	1.159	0.929	0.034 584
27.68	1.22	1.140	0.937	0.033 833
27.72	1.17	1.093	0.956	0.034 499
28.14	1.12	1.047	0.977	0.034 734
28.52	1.11	1.037	0.982	0.034 426
28.62	1.07	1.000	1.000	0.034 941
29.36	1.28	1.196	1.094	0.037 253
30.1	1.33	1.243	1.115	0.037 04
32.98	1.54	1.439	1.200	0.036 376

基于以上分析,通过对耦合面积的计算,超导态下临界耦合时,端口 1 的磁耦合器距外导体内表面约为 0.09 mm,耦合强度为 200 时,距耦合器外导体内表面约为 1.5 mm,当耦合器宽度为 10 mm 时约为 2.8 mm,理论计算值为 1.77 mm;超导态下临界耦合时,端口 5 的耦合器距外导体内表面约为 0.02 mm,耦合强度为 200 时,耦合器距内柱表面约为 0.27 mm。两种情况下,耦合器对 QWR 腔的频率影响几乎为 0。

### 2.3 信号拾取器

信号拾取器同样采用电耦合的方式从 QWR 腔内的电场中提取信号。基于对电耦合的分析,当场水平一定时,信号强度只决定于拾取器的相对位置,信号拾取器距 QWR 超导腔的内导体越远,信号强度越小。

由于信号拾取器提取的信号强度与高频信号电缆和低频控制需求有关,故此次实验很难

确定信号拾取器与 QWR 腔内导体间的合适距离。但作为对以后信号拾取器设计的参考,测量了不同长度的信号拾取器在端口 3 拾取信号的强度。

用耦合器馈入功率,信号拾取器拾取信号,记录了不同耦合器和信号拾取器位置时的 S12 值(表 5)。表 5 中的  $L_p$  为信号拾取器到 QWR 腔内导体表面的距离。

表 5 不同长度的信号拾取器拾取信号的强度

Table 5 S12 parameters at different pickup probe lengths

$L_p/\text{mm}$	S12/dB	$L_p/\text{mm}$	S12/dB
23.2	-8.68	46.6	-22.14
29.3	-11.47	51.6	-26.9
29.3	-11.47	57.1	-34.1
40.7	-17.32	59.4	-36.7
40.7	-17.32		

### 3 结论

1) QWR 超导腔的理论计算与实际测量吻合很好,从实验数据来看,理论计算能达到 0.01% 的精确度。

2) 尽管在常规态下临界耦合时电耦合器对 QWR 超导腔频率的影响较大,但在超导态时,电耦合器内导体在 QWR 腔内的部分很少,对 QWR 腔的谐振频率和场分布影响很小,从高频角度可满足需要。QWR 超导腔的耦合器可采用电耦合方式,以简化耦合器的低温隔热设计。磁耦合器可在加工的最后阶段测量谐振频率时采用。

3) QWR 腔的 3D 数值模拟计算值比实验测量值约大 20 kHz,也就是说,理论设计值为 143.55 MHz,实际频率可能为 143.53 MHz,低温下实际频率理论上变为 144.00 MHz,达到设计频率。

4) 耦合器和信号拾取器的位置可选择在实验腔的端口 4。信号拾取器的探针可伸入腔内 3 mm 左右。

本次冷模实验验证了初步设计中的理论计算,测量了电耦合器和磁耦合器的高频特性,选择了电耦合的耦合器设计方案,确定了高频端口位置,并获得了可指导 QWR 腔、耦合器和信号拾取器设计的关键数据。