

# X 波段盘圈加速结构(DAW)优化设计

胡 源 唐传祥 陈怀璧 童德春 林郁正

(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 介绍了 X 波段 DAW 加速结构的优化过程, 给出了利用 SUPERFISH 程序进行腔形优化的数学模型以及利用该模型对 X 波段 DAW 结构的优化设计结果, 给出了利用 MAFIA400 程序对加支撑杆的 DAW 结构进行优化设计的结果, 讨论了支撑杆对 DAW 结构微波特性的影响, 同时, 对 DAW 加速结构有无支撑杆的色散曲线分别进行了计算, 对 Washer 支撑杆对 DAW 加速结构色散特性的影响进行了讨论。

**关键词** X 波段 盘圈加速结构 优化设计 支撑杆 色散特性

## 1 前言

在加速结构中, 腔间耦合系数越高系统的工作就越稳定, 同时可以降低对加工精度的要求;  $ZT^2$  和  $Q$  值越大, 馈入加速结构的微波功率转化为加速粒子能量的比例就越高<sup>[1]</sup>. 1972 年 V. G. Andreev 等在设计 600MeV 质子直线加速器时提出了一种新的加速结构——盘圈加速结构<sup>[2]</sup>, 即 DAW 结构(如图 1 所示). 它可以看作是环耦合结构的变形, 环耦合

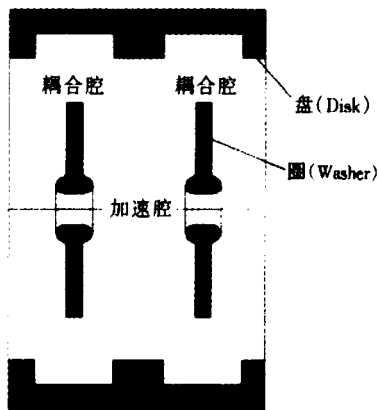


图 1 DAW 加速结构

结构是典型的双周期结构. 虽然 DAW 结构无明确的加速腔和耦合腔边界, 但它与环耦合结构相对应的部分也具有相应功能. 可以把两 Washer 之间靠近轴线的区域看作加速腔区, 把 Washer 端部内外导体之间看作耦合腔区. 所以, DAW 结构也是双周期结构, 双周期结构的所有理论对 DAW 结构同样适用.

传统直线加速结构难以使分流阻抗和腔间耦合同时提高, 而 DAW 结构由于几乎是最大限度的实现了各加速腔间的耦合, 比较好地解决了这一问题. 同传统加速结构相比, DAW 结构具有加工简单, 品质因数  $Q$  和有效分流阻抗高(S 波段的 DAW 光速腔的分流阻抗可达 120—130M $\Omega$ /m, 而轴耦合和边耦合加速

结构的为 80—100M $\Omega$ /m), 耦合强(耦合系数可达 50%, 一般轴耦合与边耦合加速结构的

耦合系数仅为3%—5%),工作稳定,加工公差要求松,腔链不用单腔调谐等优点.

但是在 DAW 结构的实际应用中出现了两个难于解决的难题:

1. 模式重叠问题:DAW 结构在加速模式(类 TM02 模)附近存在模式重叠问题,散焦模式 TM11 模的色散曲线在工作频率附近,与加速模式互相重叠,对被加速粒子的稳定性有很大影响<sup>[3]</sup>.

2. 支撑杆问题:在实际使用 DAW 结构时,必须给中间的盘片加上支撑杆,它将影响加速腔内的场分布、谐振频率,并且导致品质因数、分流阻抗下降,使 DAW 加速结构的优越性在实际上得不到充分发挥.

由于以上两个原因,世界上对 DAW 结构的研究逐渐减少,目前只有少数几个单位还在继续研究<sup>[4]</sup>.我国在 80 年代末有清华大学加速器实验室对 S 波段 DAW 加速结构进行一些研究,并制作出模型腔列<sup>[5]</sup>.

在 X 波段加速器中,加速腔尺寸较小,对加工精度敏感(频率对加速腔内径灵敏度为 6MHz/ $\mu\text{m}$ ). DAW 加速结构由于腔间耦合系数大,对加工精度要求比较宽.同时 X 波段磁控管功率比较小(一般在 1.5MW 以下),DAW 加速结构的高分流阻抗带来的高效率使其能充分利用磁控管提供的功率.另外高能电子直线对撞机多采用 X 波段加速结构(如日本的 JLC,美国的 NLC 等),通过对 X 波段 DAW 加速结构模式重叠、支撑杆问题及尾场效应的研究,可探讨其在高能加速器中的应用前景.

## 2 使用 SUPERFISH 对无支撑杆腔形的优化

DAW 加速结构中的各尺寸参数的变化对于其谐振频率和品质因数、分流阻抗都有影响,在设计腔形时,有必要调整这些尺寸参数,对腔形进行优化.

SUPERFISH 腔形优化计算程序可以对三维对称加速腔中的单极子模进行计算,由于在 DAW 加速结构中的加速模式为 TM02 $\pi$  模,耦合模式为 TM01 $\pi$  模,因此可以使用该程序计算加速腔在 TM02 模和 TM01 模下的谐振频率  $f_a$  和  $f_c$ ,以及加速模式的品质因数  $Q$  和分流阻抗  $ZT^2$ .

由于对称性,在计算时只需计算四分之一腔,在 DAW 四分之一加速腔中共有 10 个尺寸参数<sup>[6,7]</sup>(如图 2 所示),优化设计的目的是通过调节这些尺寸参数,使该加速结构的谐振频率稳定在工作频率 9300MHz,同时使其  $Q$  值和  $ZT^2$  尽可能大.

由于粒子动力学和机械加工的方面的要求,在  $R_{BH}$  固定为  $\phi 4\text{mm}$  的条件下选择  $g, t_D, R_C, R_D, R_W$  等 5 个尺寸参量进行调节.这样加速模和耦合模谐振频率以及加速模品质因数  $Q$ 、分流阻抗  $ZT^2$  就为余下 5 个尺寸参量的函数:

$$Q = Q(g, t_D, R_C, R_D, R_W),$$

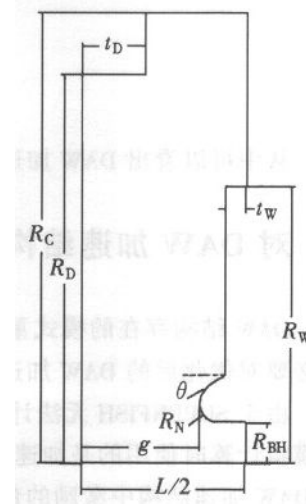


图 2 DAW 加速结构的尺寸参数

$$\begin{aligned}
 ZT^2 &= Z(g, t_D, R_C, R_D, R_W), \\
 f_a &= f_a(g, t_D, R_C, R_D, R_W), \\
 f_c &= f_c(g, t_D, R_C, R_D, R_W).
 \end{aligned} \tag{1}$$

将(1)式两边取微分得到:

$$\begin{aligned}
 dQ &= \frac{\partial Q}{\partial g} dg + \frac{\partial Q}{\partial t_D} dt_D + \frac{\partial Q}{\partial R_C} dR_C + \frac{\partial Q}{\partial R_D} dR_D + \frac{\partial Q}{\partial R_W} dR_W, \\
 dZ &= \frac{\partial Z}{\partial g} dg + \frac{\partial Z}{\partial t_D} dt_D + \frac{\partial Z}{\partial R_C} dR_C + \frac{\partial Z}{\partial R_D} dR_D + \frac{\partial Z}{\partial R_W} dR_W, \\
 df_a &= \frac{\partial f_a}{\partial g} dg + \frac{\partial f_a}{\partial t_D} dt_D + \frac{\partial f_a}{\partial R_C} dR_C + \frac{\partial f_a}{\partial R_D} dR_D + \frac{\partial f_a}{\partial R_W} dR_W, \\
 df_c &= \frac{\partial f_c}{\partial g} dg + \frac{\partial f_c}{\partial t_D} dt_D + \frac{\partial f_c}{\partial R_C} dR_C + \frac{\partial f_c}{\partial R_D} dR_D + \frac{\partial f_c}{\partial R_W} dR_W.
 \end{aligned} \tag{2}$$

为了使谐振频率稳定在 9300MHz, 谐振频率的变化量必须为工作频率与调节前谐振频率之差, 即  $df_a = 9300 - f_a$ ,  $df_c = 9300 - f_c$ ; 同时为了使品质因数  $Q$  和分流阻抗  $ZT^2$  达到最大值,  $dQ, dZT^2$  要尽可能大, 这样腔形优化问题就转化为一个有约束条件的极值问题.

在小变化范围内, 可以认为各微波参量随尺寸参量的变化是线性的, 即可以把各微波参量随尺寸参量变化的变化率作为其偏导数值. 实际在模拟计算中发现各尺寸参量变化在  $\pm 0.2\text{mm}$  范围内时, 微波参量的变化是比较好的符合线性的.

在优化中, 先将原始各个尺寸参量变化一个小范围, 由此求出微波参量对于尺寸参量的变化系数, 代入(2)式, 求解上述极值问题, 得到一个较优解, 然后将该较优解作为原始尺寸, 重复上述步骤, 直至得到最优解.

最后得到优化后 DAW 加速腔各微波参量为:

$$\begin{aligned}
 Q &= 22040.8 \\
 ZT^2 &= 175.047\text{M}\Omega/\text{m} \\
 f_{\text{TM01}\pi} &= 9300.29926\text{MHz} \\
 f_{\text{TM02}\pi} &= 9299.53799\text{MHz}
 \end{aligned}$$

从中可以看出 DAW 加速结构的微波特性确实要优于一般加速结构.

### 3 对 DAW 加速结构色散特性的研究

DAW 结构存在的模式重叠问题对被加速粒子的动力学稳定性有比较大的影响, 因此有必要对优化后的 DAW 加速结构的色散特性进行研究.

由于 SUPERFISH 无法计算多极子模, 因此在对优化好的 DAW 加速结构色散特性进行模拟计算时使用的是加速腔模拟计算程序 Urmelt, 得到了 4000MHz 到 13000MHz 间可能在 DAW 加速结构中激励的色散模式(见图 3).

从图中可以看到在  $\pi$  模附近 DAW 加速结构的耦合系数比较大, 同时 TM11 模色散曲线与加速模色散曲线重叠, 这对于实际应用 DAW 结构时被加速粒子的稳定性将有比较

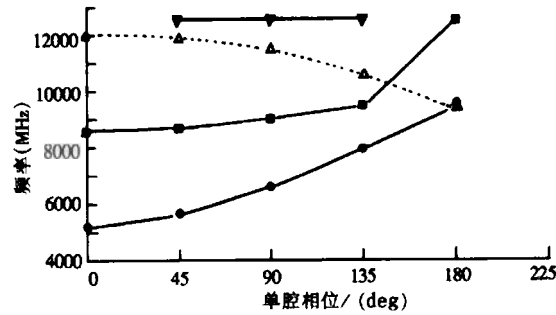


图3 Urmelt 计算所得的加速结构色散曲线

—■—TM11, —●—TM01, -△-TM02, -▽-TE11.

大的影响.

#### 4 对加上支撑杆后的 DAW 加速结构的优化设计

实际使用的 DAW 需要有支撑杆,加上支撑杆后对加速腔内部的电磁场分布会有较大的扰动,加速腔的谐振频率会改变,品质因数和分流阻抗也会有一定程度的下降,所以有必要对加上支撑杆后的加速结构再次进行优化.

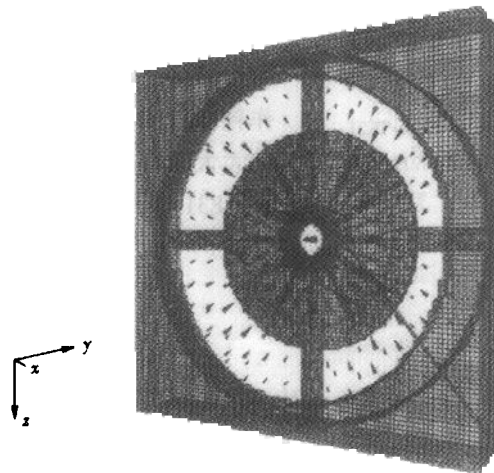


图4 用 MAFIA400 做出的 DAW 结构中 TM02 模电场场型图

加上支撑杆后的 DAW 结构为非轴对称形状, SUPERFISH 无法计算,可以使用 MAFIA400 电磁场计算程序进行计算,得到的加支撑杆后的优化结果与无支撑杆时的优化结果对比如表 1 所示.

支撑杆的加入对于加速结构中的电磁场分布有较大的扰动,造成谐振频率的移动.为了把谐振频率调回工作频率处,不得不付出加速腔的品质因数和分流阻抗都有较大下降的代价.

表 1 有无支撑杆时加速腔优化结果对比

	$Q$	$ZT^2/(M\Omega/m)$	$f_{TM01\pi}/(MHz)$	$f_{TM02\pi}/(MHz)$
有支撑杆	14665.3	154.025	9302.771	9296.894
无支撑杆	22040.8	175.047	9300.299	9299.538

在调节谐振频率的过程中发现,加入径向支撑杆后对于加速结构中加速模式的影响较大,对于耦合模式的影响则要小得多.其原因在于加速模式中支撑杆处的电场方向与支撑杆表面平行,而耦合模式中支撑杆处的电场方向与支撑杆表面垂直.

## 5 有支撑杆时的 DAW 结构色散特性研究

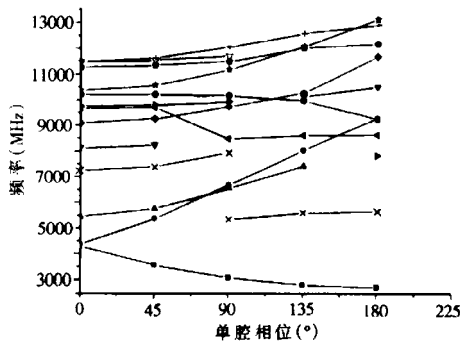


图 5 用 MAFIA400 计算得到的 DAW 加速结构色散曲线

■ Support, ● TM01, ▲ TE21<sub>∥</sub>, ▼ TE21<sub>⊥</sub>,  
◆ TE31, ◀ TM21<sub>∥</sub>, ▶ TM21<sub>⊥</sub>,  
● TM02, ★ TE41<sub>∥</sub>, ◆ TE11,  
▼ TE41<sub>⊥</sub>, + TE01, × TM11.

加上支撑杆后,对 DAW 加速结构中的电磁场进行了扰动,从而使各模式的色散特性也发生了变化.利用 MAFIA400 程序计算可以得到 DAW 加速结构中的各模式色散曲线图(如图 5).

由于支撑杆的影响,在加速结构中出现 SUPPORT 模式<sup>[8]</sup>.在对加速腔进行进一步调整优化后,对被加速粒子动力学稳定性影响最大的 TM11 模色散曲线向下移动,并在  $\pi/2$  处出现禁带,这使得 TM11 模色散曲线避开了工作频率点,对被加速粒子的动力学稳定性的影响大大减小.但在工作频率附近存在 TM21 模和 TE31 模,对被加速粒子动力学稳定性仍有影响.

## 6 结束语

在上文所述的优化工作中,对整个腔体的所有尺寸参量都进行了考虑,建立了腔形优化设计的数学模型,分别对无支撑杆和有支撑杆两种情况下的 DAW 加速腔进行了优化,得到了比较满意的结果,这种方法对于其他类型的加速结构优化也有借鉴作用.从优化好的 DAW 加速腔的微波参量来看,DAW 加速结构的分流阻抗要高于其他加速结构<sup>[9]</sup>,同时由于 DAW 加速结构的高腔间耦合系数,使得这种结构在 X 波段能发挥更大的作用.

### 参考文献 (References)

- 1 LIN Yu-Zheng. Theory of Low-Energy Electron Accelerator. Teaching material of the Department of Engineering Physics, Tsinghua University, 1990, 6 (in Chinese)  
(林郁正. 低能电子加速器原理. 清华大学工程物理系, 教材. 1990, 6)
- 2 Andreev V G et al. Study of High Energy Proton Linac Structure, LA-5115, Proceedings of the 1972 Proton Linear Accelerator Conference, Oct. 1972, 10-13

- 3 Iwashita Y. N.I.M. in *Physics Research* 1994, A348, 15—33
- 4 Iwashita Y, Noda H A etc. Fabrication of Biperiodic DAW Cavity, PAC 1999, 1203
- 5 LIN Yu-Zheng, LI De-Run, CHEN Hao et al. A Novel Traveling Wave DAW Accelerating Structure. CEBAF-Report-89-001 USA, 1989, 620
- 6 Manca J J, Knapp E A. Optimization of the Disk and Washer Accelerating Cavities. LA - 7407. UC - 28
- 7 Inagaki S. N.I.M. in *Physics Research* 1986, A251:41—436
- 8 Iwashita Y. N.I.M. in *Physics Research* 1994, A348:15—33
- 9 SUN Xiang TONG De-Chun, LIN Yu-Zheng. *Atomic Energy Science and Technology* 1998, 32(4) (in Chinese)  
(孙翔, 童德春, 林郁正. *原子能科学技术* 1998, 32(4))

## Optimization of the X-Band DAW (Disk-and-Washer) Accelerating Structure

HU Yuan TANG Chuan-Xiang CHEN Huai-Bi TONG De-Chun LIN Yu-Zheng  
(*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract** The Disk and Washer (DAW) accelerating structure not only has shunt impedance and high Q value, but also has a high coupling constant between the neighboring cells. At X band, its advantages are especially useful. In this work, a mathematical model used to optimize DAW (without supports) cavities by SUPERFISH was built and the solution was presented. Moreover, the optimization of DAW (with supports) by MAFIA400 was also carried out and the influence of supports was analyzed.

The dispersion curve of the optimized DAW cavities was calculated by URMELT (without supports) and MAFIA400 (with supports), the influence of the supports was studied, and the problem of the overlapping of passband in the accelerating frequency was discussed.

**Key words** X-band, DAW, optimization, support, dispersion property