

用于 2 GeV 固定场交变梯度质子加速器的高品质因数、高分路阻抗波导型高频腔设计

裴士伦, 殷治国*, 张天爵, 杨光

(中国原子能科学研究院 回旋加速器研究设计中心, 北京 102413)

摘要:在核工业、民用及基础研究领域,高能强流质子加速器有着十分广泛而重要的应用,中国原子能科学研究院提出了1台2 GeV连续波固定场交变梯度质子加速器的解决方案。在该方案中,工作在44.4 MHz的大功率高品质因数、高分路阻抗波导型高频腔研制极其重要。本文首先对工作在44.4 MHz的矩形、欧米伽形、跑道形及船形等4种形状的波导型高频腔进行了模拟计算研究,经比较发现,船形高频腔具有最高的品质因数和分路阻抗,是2 GeV连续波固定场交变梯度质子加速器的较好选择。在此基础上,为掌握船形高频腔的实际加工工艺,同时利用现有230 MeV超导回旋加速器的功率源设备开展高功率实验研究,设计了71.26 MHz的缩比例船形高频腔样机。

关键词:高能强流质子加速器;固定场交变梯度加速器;波导型高频腔;品质因数;分路阻抗

中图分类号:TL53

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)08-1519-06

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0495

Design on High Quality Factor and High Shunt Impedance Waveguide-type RF Cavity for 2 GeV FFAG Proton Accelerator

PEI Shilun, YIN Zhiguo*, ZHANG Tianjue, YANG Guang

(Research and Design Center for Cyclotron, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: High-energy and high-intensity proton accelerators were widely applied in the fields of the nuclear industry, civil applications and fundamental researches. In this scenario, a 2 GeV continuous wave (CW) fixed field alternating gradient (FFAG) proton accelerator was proposed by the China Institute of Atomic Energy. Development of the 44.4 MHz high power waveguide-type RF cavity with high quality factor and high shunt impedance is extremely important. The simulation study results on four geometries of waveguide-type RF cavities, which were rectangular, omega, racetrack and boat ones were presented. It is found that the boat shape cavity has the highest quality factor and the highest shunt impedance, and is the most promising candidate for the 2 GeV CW FFAG proton accelerator. In order to obtain the fabrication technology of the boat shape

收稿日期:2019-07-02;修回日期:2019-09-11

作者简介:裴士伦(1979—),男,河北辛集人,副研究员,博士,核技术及应用专业

*通信作者:殷治国, E-mail: bitbearAT@hotmail.com

网络出版时间:2020-02-26;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200225.1535.004.html>

cavity, and conduct high power RF conditioning study in the future by using the existing power source for the 230 MeV superconducting cyclotron, a 71.26 MHz scaled-down cavity prototype was designed.

Key words: high-energy and high-intensity proton accelerator; fixed field alternating gradient accelerator; waveguide-type RF cavity; quality factor; shunt impedance

自1958年以来,中国原子能科学院长期致力于高能强流回旋加速器的设计研究,建成了一系列紧凑型回旋加速器^[1-3]。近年来,随着高能强流质子加速器在核工业、民用以及基础研究领域的应用越来越广泛,中国原子能科学院长提出一套可产生2 GeV、6 MW连续波质子束的强流圆形加速器组合解决方案,其中包括100 MeV直边分离扇回旋加速器、800 MeV螺旋分离扇回旋加速器以及2 GeV连续波(continuous wave, CW)固定场交变梯度(fixed field alternating gradient, FFAG)加速器各1台,3台加速器的高频腔均工作在44.4 MHz,最终可实现加速器组合全流程连续束、等时性高效率加速和高平均质子束流功率输出^[4]。100 MeV回旋加速器用作注入器,之后质子束再经过800 MeV回旋加速器和2 GeV CW FFAG加速器的逐级加速,最终束流功率可达到6 MW。在设计2 GeV CW FFAG加速器时,结合了回旋加速器高平均流强和同步加速器高能量的优势,束流注入后、引出前的运动轨道为回旋分圈式。经单粒子数值跟踪结果显示,其等时性能量高达2 GeV,在国际上从理论设计层面首次超越了等时性加速器1 GeV的能量极限。

在分圈式等时性加速器中,束流引出区的螺旋轨道圈间距越大,留给引出装置的径向安装空间则越大,这可有效降低引出过程中由于束流轰击到引出装置上造成的束流损失,从而提高引出效率,实现单圈引出。在加速器引出半径、引出能量等参数一定的情况下,引出区的束流轨道圈间距正比于束流的单圈能量增益^[5]。在回旋式等时性加速器中,束流运动方向上的纵向聚焦力较弱,由纵向空间电荷效应引起的流强阈值正比于束流圈能量增益的3次方^[6-7],较横向空间电荷效应引起的流强阈值低很多。此外,纵向空间电荷还将导致束流的能散增大,其直接后果是使引出区的束流横向尺寸增大、引出效率降低。因

此,在综合考虑各种因素的情况下,为提高所引出束流的总功率和引出效率,要求加速器高频腔提供的最高加速电压尽可能高,以获得较高的圈能量增益。

100 MeV回旋加速器的高频腔确定采用同轴线型双间隙谐振腔,单腔最高加速电压要求达到500 kV^[8],该种类型的高频腔已在中国原子能科学院长100 MeV强流回旋加速器中成功应用并稳定运行^[5]。800 MeV回旋加速器确定采用波导型高频腔中的欧米伽形腔,单腔最高加速电压要求达到1 MV,该种腔体较同轴线型腔体的品质因数Q和分路阻抗更高,也已在瑞士的保罗谢尔研究所(PSI)的590 MeV分离扇回旋加速器中成功应用并稳定运行^[9]。

2 GeV CW FFAG加速器高频腔单腔最高加速电压要求达到2 MV^[4],为利用相对较少的高频功率获得如此高的加速电压,要求腔体具有更高的Q和分路阻抗,此种情况下欧米伽形腔已不能满足要求,需要寻找具有更高性能的波导型高频腔。此外,与同步加速器相比,2 GeV CW FFAG加速器需径向改变轨道的范围达2 m左右,这同时要求高频腔能在如此大的尺寸范围内为束流提供稳定的加速电场。在没有成功应用和稳定运行经验可借鉴的情况下,2 GeV CW FFAG加速器给高频腔提出了相当高的要求,必须预先开展关键技术研究。

基于此,本文针对2 GeV CW FFAG的设计需求对工作在44.4 MHz的矩形、欧米伽形、跑道形及船形等4种类型的波导型高频腔进行模拟设计研究,以找到最优的高频腔腔形,同时设计并给出同样腔形的缩比例高频腔样机。

1 波导型高频腔理论

常用的波导型高频腔有矩形波导型和圆柱形波导型,两者在电磁场分布和特性参数计算上类似^[5]。由于2 GeV FFAG加速器中所使用的高频腔为矩形波导型,此处只介绍矩形波

导型高频腔。

图 1 示出了矩形波导型高频腔的示意图,此种类型高频腔中的模式可分为 TE_{mnp} 模和 TM_{mnp} 模 2 种, m, n 及 p 分别对应 x, y 及 z 方向上出现电磁场极大值的个数, a, b, d 分别为腔体的长度、高度、宽度。 TE_{mnp} 模或 TM_{mnp} 模的谐振频率可表示为:

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (1)$$

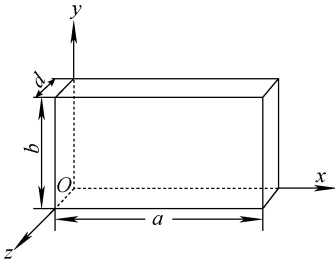


图 1 矩形波导型高频腔示意图
Fig. 1 Schematic of rectangular waveguide-type RF cavity

对 TE_{mnp} 模,有电场强度 $E_z = 0$;对 TM_{mnp} 模,有磁场强度 $H_z = 0$ 。由式(1)可知,若 $d > a > b$,基模为 TE_{101} 模;若 $b > d > a$,基模为 TE_{011} 模;若 $a > b > d$,基模为 TM_{110} 模。

为使束流穿过高频腔时能获得加速,需腔体能在其运动方向上提供加速电场。若束流沿 z 轴运动,考虑到高频腔中用于加速的模式通常为基模,则矩形波导型高频腔的工作模只能选 TM_{110} 模。图 2 示出了矩形波导型高频腔中 TM_{110} 模的场分布形式^[5]。

图 2 中,为使束流能无阻碍穿过高频腔,在腔上沿 x 轴(即圆形加速器的半径方向)开设

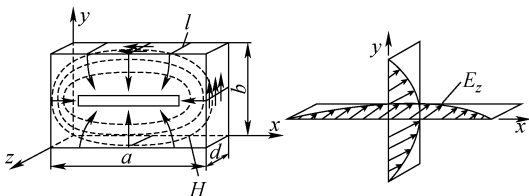


图 2 矩形波导型高频腔中 TM_{110} 模场分布
Fig. 2 Field distribution of TM_{110} mode in rectangular waveguide-type RF cavity

了长条形束流孔道。腔内 E_z 沿 x 轴和 y 轴均呈半正弦分布。在靠近腔体沿 x 轴两端时, E_z 太低,不能用于加速,因此长条形束流孔道沿 x 轴方向的长度需在满足设计要求的情况下小于 a 。

由式(1)可知,矩形波导型高频腔 TM_{110} 模的频率与 d 无关,因此该类型的高频腔可设计成窄长形(即 d 较小),这对于在束流运动方向上受安装空间限制的加速器来讲非常有利。

在加速器中,为满足不同的指标要求,例如获得较高的 Q 、分路阻抗等,实际的矩形波导型高频腔在形状上相对图 2 会有所差别,此时需借助 3 维计算机软件来对其进行计算和优化,但基本工作原理相同。

2 波导型高频腔腔形研究

图 3 示出了 2 GeV FFAG 加速器的平面布局示意图,束流注入与引出加速器的能量分别为 800 MeV 和 2 GeV。全环共布置 10 个工作在 44.4 MHz 的腔体,单腔最高加速电压要求达到 2 MV,径向孔径要求达到 2 m^[4]。

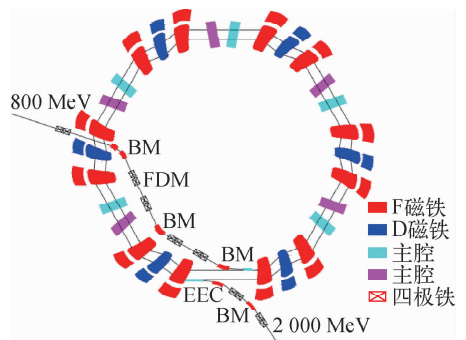


图 3 2 GeV FFAG 加速器平面布局示意图
Fig. 3 Layout of 2 GeV FFAG accelerator

束流通过每个高频腔的能量增益可表示为:

$$\Delta W = qV(x)T \cos \varphi_0 \quad (2)$$

$$T \approx \frac{\sin \frac{\Delta \varphi}{2}}{\frac{\Delta \varphi}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi g}{\beta \lambda}}{\frac{\pi g}{\beta \lambda}} \quad (3)$$

式中: q, β 分别为粒子的电荷量和相对论速度; $V(x)$ 为 x 处的峰值腔压,不同能量的粒子穿过高频腔时对应的坐标 x 不同; T 为渡越时间因子; φ_0 为加速相位,一般为粒子穿过加速间隙

中心处对应的相位; $\Delta\varphi$ 为粒子穿过加速间隙时所经历的相位宽度; g 为腔体中加速间隙的长度; λ 为腔体工作模的波长。

图 4 示出了由式(2)计算得到的渡越时间因子与加速间隙长度之间的关系曲线, 为使 800 MeV 至 2 GeV 全能量区间的渡越时间因子均大于 0.95, 需要将加速间隙长度控制在 1 m 以下。在加速电压一定的情况下, 间隙长度太小又会使间隙内和腔体内表面上的最大电场强度高, 腔体高功率运行时易引起打火。此外, 考虑到高频腔上在束流孔道内存在一定的漏场, 最终将加速间隙长度确定为 0.8 m。

在保证束流孔道横截面尺寸 $g_a \times g_b$ (长度 \times 宽度) = 2 m \times 0.15 m、加速间隙长度为 0.8 m 不变的情况下, 为确定能满足 2 GeV FFAG 加速器要求的波导型高频腔形, 对图 5 所示的矩形、欧米伽形、跑道形及船形等 4 种形状的高频腔特性进行计算和比较研究。由于束流螺旋轨道圈间距正比于圈能量增益、反比于轨道半径, 因此将长条形束流孔道偏心放置, 使孔道中心位于半径较小处, 这样可使半径大于孔道中心处的加速电压下降速度较半径小于孔道中心处的加速电压下降速度慢一些, 有利于增大高

能量时的螺旋轨道圈间距, 同时使圈间距沿径向的分布较束流孔道中心放置时更均匀些。

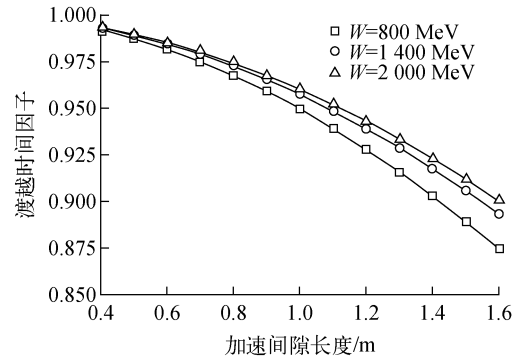


图 4 渡越时间因子与加速间隙长度之间的关系
Fig. 4 Relationship between transit time factor and acceleration gap length

表 1 和图 6 给出了图 5 所示的 4 种形状高频腔的具体性能计算结果。一般, 在谐振频率一定的情况下, 高频腔体的储能 U 和功率损耗 P_r 分别近似正比于其体积和表面积。在体积一定的情况下, 球形的表面积可做到最小; 在表面积一定的情况下, 球形的体积可做到最大。与其他形状的高频腔相比, 船形高频腔更接近于球

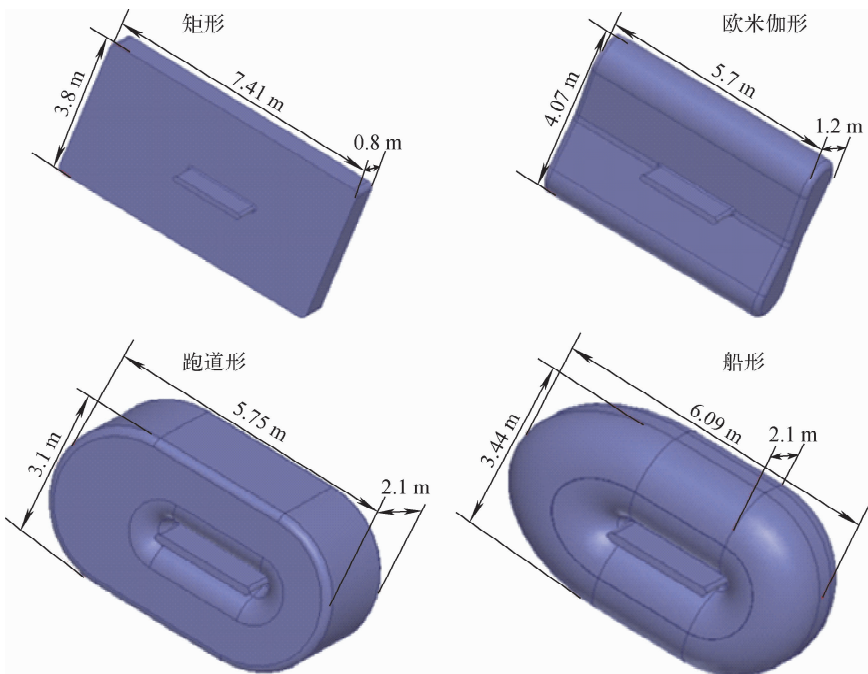


图 5 4 种形状的波导型高频腔
Fig. 5 4 geometries of waveguide-type RF cavity

表 1 4 种形状波导型高频腔的性能参数

Table 1 Performance parameter for 4 geometries of waveguide-type RF cavity

基本参数	4 种波导型高频腔的性能参数值			
	矩形	欧米伽形	跑道形	船形
工作频率, MHz	44.40	44.39	44.39	44.38
工作模式	TM ₁₁₀	TM ₁₁₀	TM ₁₁₀	TM ₁₁₀
Q	58 491	74 641	90 621	98 863
束流孔道内最大分路阻抗, MΩ	5.37	10.06	23.92	25.02
束流孔道内最小分路阻抗, MΩ	3.68	5.09	16.07	17.06
2 MV 最高加速电压时对应的 P _{rf} , kW(未计入束流负载)	745	398	167	160

形,因此其 Q 和分路阻抗也最高。相对于跑道形腔,船形高频腔的 Q 和分路阻抗平均值分别提高 9%和 4.6%,提高量不大且腔体加工略复杂。由于频率调谐将采用在束流运动方向上利用液压压缩或拉伸腔体金属外壳弧形部分的方式,这更适用于船形高频腔。因此,船形高频腔仍是 2 GeV FFAG 加速器高频腔的较好选择。

图 7 示出了船形高频腔径向对称平面内的电场与磁场分布。加速间隙内最大加速电压为 2 MV 时,腔内最大表面电场为 7.5 MV/m,小于 44.4 MHz 所对应 Kilpatrick 限值 8.5 MV/m,在可接受范围内。

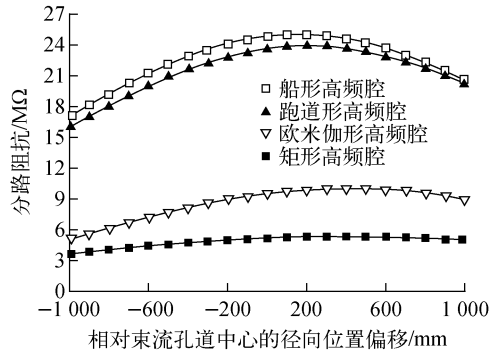


图 6 束流孔道内分路阻抗与径向位置的关系
Fig. 6 Relationship between shunt impedance and radial position in beam pipe

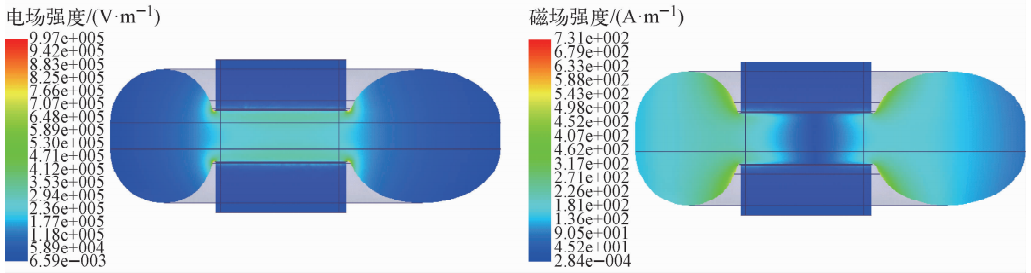


图 7 船形高频腔径向对称平面内的电场与磁场分布

Fig. 7 Electric and magnetic field distributions in radial symmetry plane for boat RF cavity

3 缩比例船形高频腔样机设计

44.4 MHz 船形高频腔的尺寸较大,形状也相对复杂,有很多加工工艺需摸索。在这种情况下,为掌握船形高频腔的实际加工工艺,同时利用现有 230 MeV 超导回旋加速器的功率源设备开展高功率实验研究,设计工作在 71.26 MHz 的缩比例船形高频腔样机。在确定 71.26 MHz 高频腔体尺寸时,为获得最佳性能,首先固定束流孔道及加速间隙的基本尺寸,然后从轴对称形结构开始逐步过渡到船形结构,具体过程如图 8 所示。表 2 列出了最终得

到的缩比例船形高频腔样机参数。

图 9 示出了缩比例船形高频腔样机上的耦合器配置,包括电感和电容耦合器各 1 个。通过改变电感耦合器耦合环或电容耦合器内导体伸入到腔体内的深度可改变耦合度,模拟计算表明这两种形式的耦合器耦合度调整范围均可达 2 以上。之所以配置 2 个耦合器,是为了将来在高功率实验中使用电容耦合器模拟束流负载,电感耦合器用于功率馈入。

缩比例船形高频腔样机频率调谐同样将采用在束流运动方向上拉伸或压缩腔体弧形部分

的方式。模拟计算显示,弧形部分拉伸或压缩的形变达到 ± 4 mm(单侧 ± 2 mm)时,高频腔的谐振频率变化 ± 70 kHz。

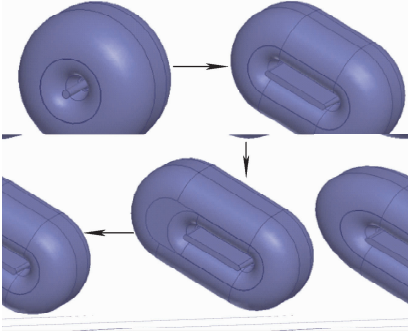


图8 缩比例船形高频腔样机优化过程示意图
Fig. 8 Optimization process of scaled-down boat shape cavity prototype

表2 缩比例船形高频腔样机性能参数

Table 2 Performance parameter for scaled-down boat shape RF cavity prototype

基本参数	数值
工作频率, MHz	71.26
工作模式	TM ₁₁₀
Q	76 796
束流孔道内最大分路阻抗, MΩ	21.08
束流孔道内最小分路阻抗, MΩ	13.92
a, m	3.74
b, m	2.03
d, m	1.50
g _a , m	1.35
g _b , m	0.12
g, m	0.6

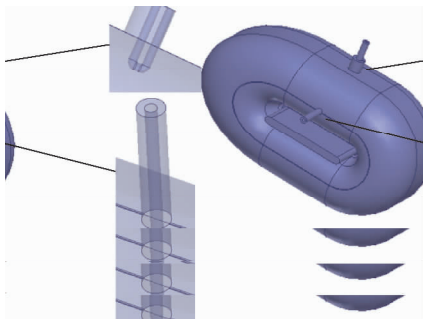


图9 缩比例船形高频腔样机耦合器具体结构形式
Fig. 9 Structural style of couplers for scaled-down boat shape cavity prototype

4种形状的波导型高频腔特性,确定了可满足2 GeV FFAG加速器要求的44.4 MHz高频腔腔形。设计完成了71.26 MHz缩比例船形高频腔样机,该样机配置2个耦合器,频率调谐计划通过拉伸或压缩腔体弧形部分的方式来完成。近期,将启动样机的加工,待加工完成后将开展高功率实验研究。在研制缩比例船形高频腔样机的过程中,不仅可摸索腔体加工工艺,研究相关工艺对Q、分路阻抗及频率调谐范围等的影响,还可利用现有条件开展高功率情况下的模拟束流实验,研究腔体与功率源形成完整系统时的整体性能,由此可为将来2 GeV FFAG加速器所需的44.4 MHz高频腔顺利研制储备关键技术。

参考文献:

- [1] FAN M W, ZHANG T J. Initial operation of CIAE medically used cyclotron[C]// Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada; [s. n.], 1997; 3 834-3 836.
- [2] ZHANG T, LI Z, CHU C. CYCIAE-100, a 100 MeV H⁻ cyclotron for RIB production[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 261: 1 027-1 031.
- [3] ZHANG T, AN S, LV Y, et al. mA beam acceleration efforts on 100 MeV H⁻ Cyclotron at CIAE[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2017, 406: 250-255.
- [4] 张天爵,安世忠,殷治国,等. “北方质子”—高能强流质子束综合性研究设施项目建议书[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2017.
- [5] 张天爵,樊明武. 回旋加速器物理与工程技术[M]. 北京:原子能出版社,2010.
- [6] JOHO W. Tolerances for the SIN Ring-Cyclotron [R]. Switzerland: Paul Scherrer Institute, 1968.
- [7] JOHO W. High intensity problems in cyclotrons [C]// Proceedings of the Cyclotrons 1981. Caen, France; [s. n.], 1981: 337-347.
- [8] LI M, YANG J, ZHANG T, et al. Conceptual design of a 100 MeV injector cyclotron[C]// Proceedings of the Cyclotrons 2013. Vancouver, Canada; [s. n.], 2013: 224-226.
- [9] FITZE H, BOPP M, FREI H. Development of a new high power cavity for the 590 MeV ring cyclotron at PSI[C] // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York, USA, 1999: 795-797.

4 小结

通过研究矩形、欧米伽形、跑道形及船形等