

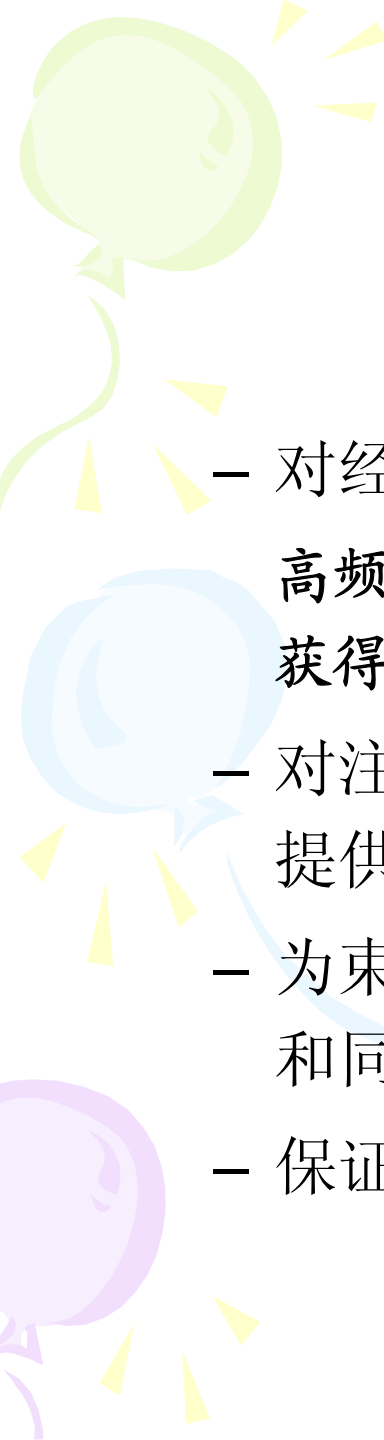
强流质子同步加速器 高频系统介绍

2010-8-5

IHEP 孙虹

内容提要

- 强流质子同步加速器高频系统概述
 - 高频系统的作用
 - 物理对高频系统的要求
 - RCS高频系统的特点与组成
- **CSNS / RCS**高频系统主要设备介绍
 - 铁氧体加载同轴加速腔
 - 高频功率源
 - 数字低电平控制系统



高频系统在强流 质子同步加速器中的作用

- 对经过高频电场的质子进行加速

高频谐振腔提供一个高频加速电场，带电粒子通过该电场时获得能量，得到加速。

- 对注入到环中的粒子进行俘获、聚束和加速，为束流提供足够的高频功率，增加束流能量。
- 为束流提供稳定的纵向相空间，保持合适的加速电压和同步相位，减小束流损失。
- 保证束流纵向运动的稳定性。

同步加速器中RF 加速

- 高频加速电压： $V_{rf}(t) = V_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_{rf} \cdot t)$
- 高频频率 $f_{rf} = n \cdot f_{rev}$ ， n ： RF 谐波系数， f_{rev} ： 回旋频率
- 带电粒子通过腔的加速间隙时受到RF电场的作用， 获得能量：
$$\Delta \varepsilon = e \cdot V_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_{rf} \cdot t)$$

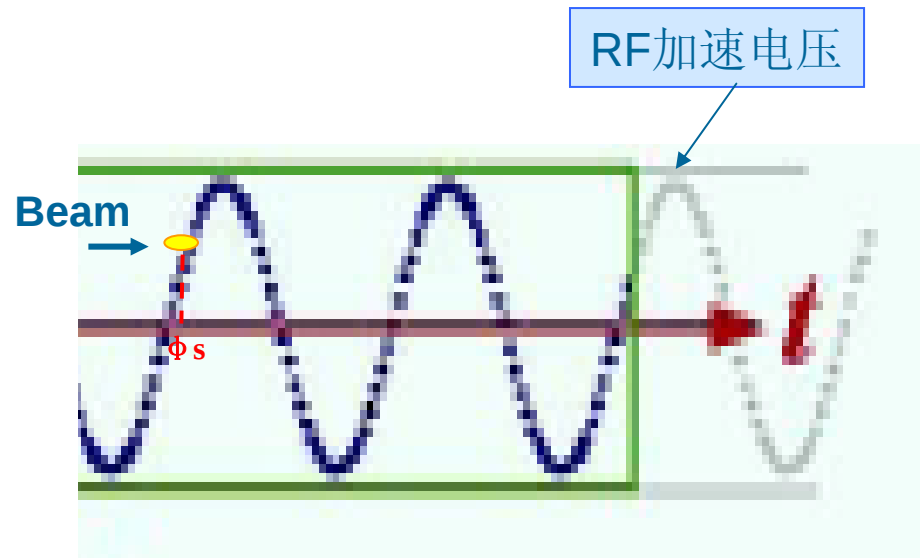
- 同步加速：
 - 粒子每圈得到的能量与二极铁磁场强度的变化量相对应

$$\Delta \varepsilon_{turn} = \rho e L \frac{dB(t)}{dt} = e V_0 \cdot \sin(\omega_{rf} \cdot t)$$

- Φ_s 同步相位， 束流与RF电压的相位

$$V_{acc} = V_0 \cdot \sin \phi_s$$

- 同步粒子位于高频相稳定区内， 围绕 Φ_s 做同步振荡

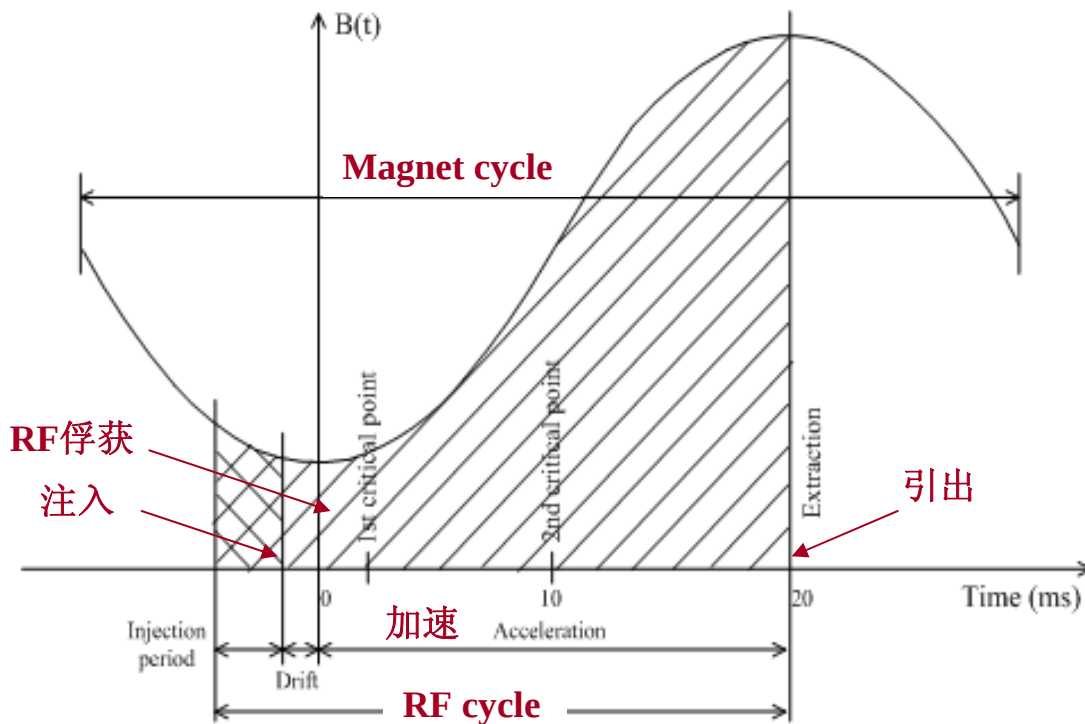


快循环质子同步加速器的工作模式

RCS(Rapid Cycling Synchrotron)质子同步加速器，采用快循环工作模式，每个高频循环时间是20ms，重复频率25Hz

在一个循环周期内
射频电压对束流的作用包括：

- 高频俘获（多圈注入）
- 加速
- 束流引出



CSNS环一个磁场和高频循环周期

控制束流损失

- 控制束流损失是强流质子加速器的一个重要指标
- 束流注入阶段的射频俘获和加速过程是束流损失最多的阶段。

注入和射频俘获阶段：束流的能量低 → 空间电荷效应严重 → 造成束团的频移和频散 → 束流损失

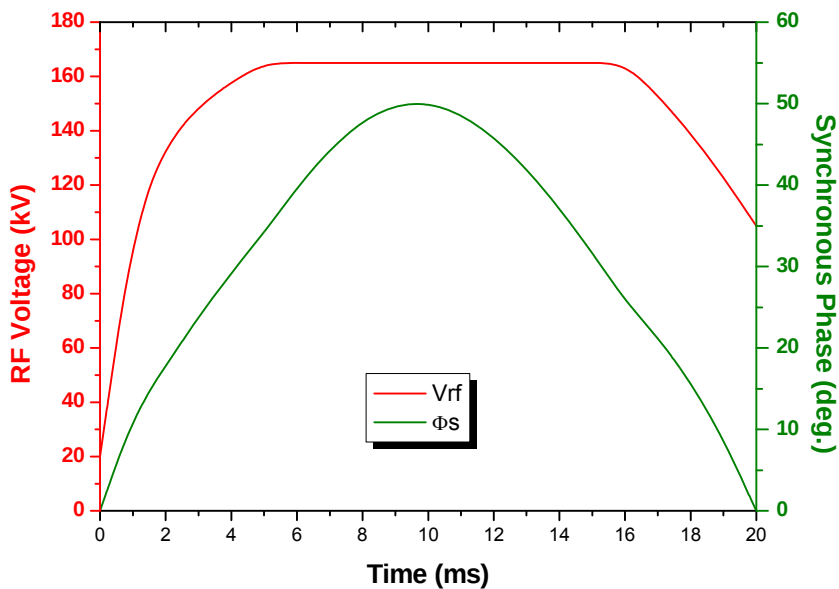
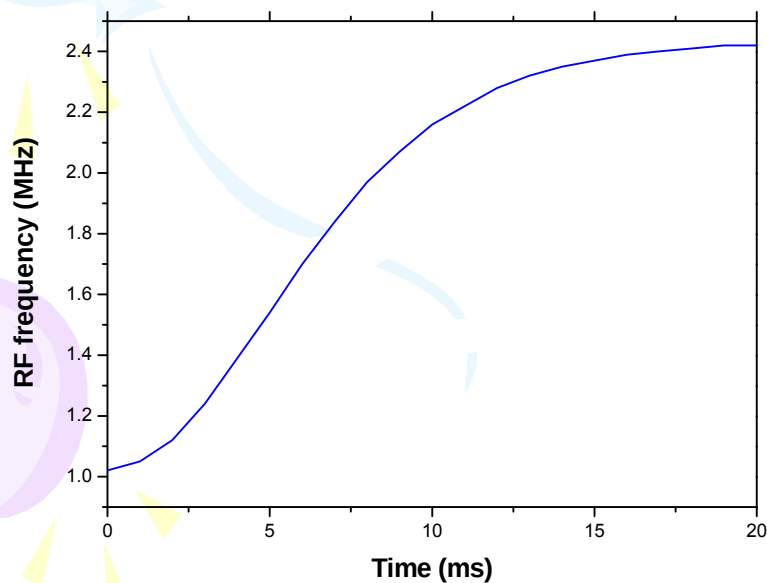
加速过程：同步相位增加 → 造成纵向接受度降低 → 束流损失

- 高频电压和相位的选择对控制束损很重要，通过RAMA程序优化加速电压曲线和相位曲线，最大限度减少束流损失。

加速器物理对高频系统的要求

— 加速电压、同步相位与RF频率工作曲线 (CSNS)

- 高频谐波数: $h = 2$ (2个束团)
- RF频率: 1.022 ~ 2.44MHz
- 最大RF电压: 165kV
- 最大加速相位: 50°



RCS高频系统特点

- 快循环方式工作(50 or 25Hz)，束流的注入和引出在一个循环内(10 or 20ms)完成：高频电压、频率、加速相位要严格按工作曲线变化。
- 高频加速电压的频率随粒子能量的升高而加大，在整个加速过程中高频腔工作在扫频状态
 - 需要对腔与发射机进行动态调谐；
 - 高频腔的工作带宽要满足频率变化范围
- 束流负载效应严重 (Large Circulating current)

RCS高频系统的基本组成部分

— 高频加速谐振腔

电感加载同轴谐振腔

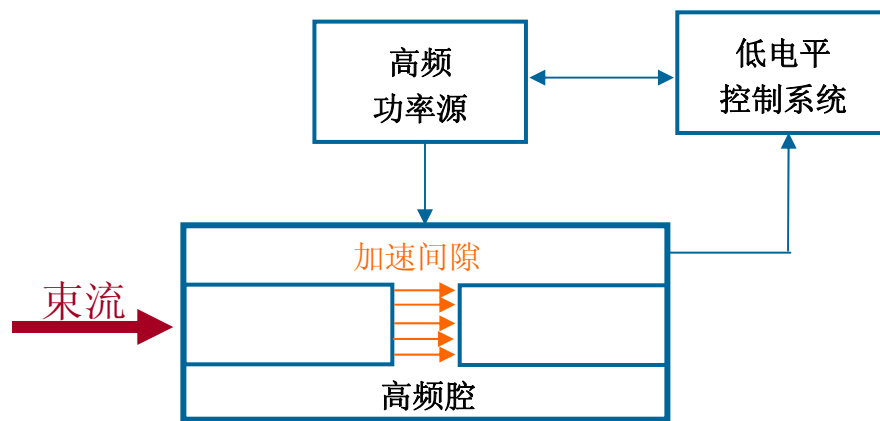
- 铁氧体加载同轴谐振腔
- 磁合金加载同轴谐振腔

— 高频功率源

- 四极管功率放大器
 - 受电子渡越时间的影响，工作频率低
 - 负载能力强，允许负载在较大范围内变化
- 固态功率放大器

— 低电平控制系统

- RF扫频控制
- 腔压、同步相位与调谐控制
- 束流前馈控制



高频系统等效电路

- 高频腔等效为**RLC**并联谐振电路

- L 腔的等效电感
- C 腔的等效电容
- R_s 腔的等效分路阻抗 $R_s = \omega Q L$
- 腔谐振频率 $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$$Y_c = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad Q = \frac{R_s}{L\omega_0}$$

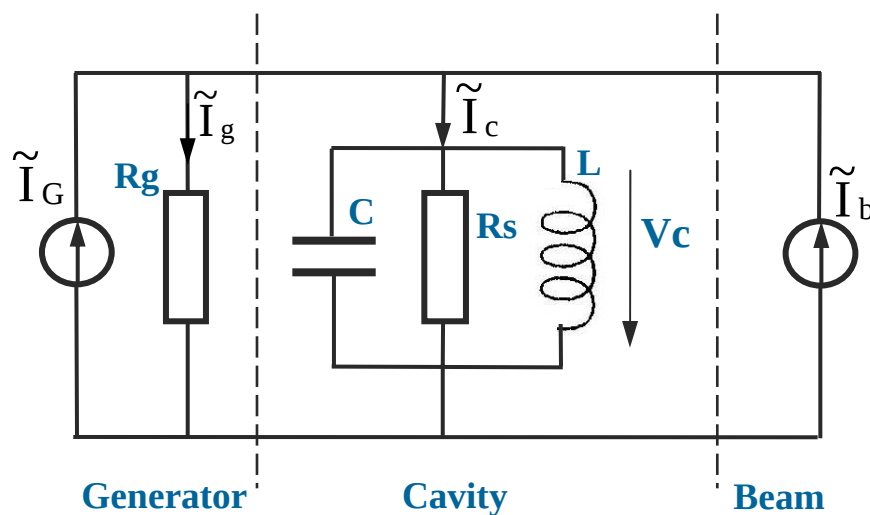
$$\tan \psi = -\frac{R_s}{L\omega_0} \left(\omega_{rf} \cdot \omega_0 \cdot L \cdot C - \frac{\omega_0}{\omega_{rf}} \right) \approx 2Q_L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$$

- RF**功率源等效为带内阻的电流源

- I_G : 功率源输出电流
- R_g : 功率源内阻

- 束流对高频系统的影响

- 束流在腔上的感应电流为 $\tilde{I}_b$
- $\tilde{I}_G = \tilde{I}_c + \tilde{I}_g - \tilde{I}_b$
- 束流看到腔的等效阻抗
- 束流在腔上的感应电压 $\tilde{V}_b = -\tilde{I}_b \cdot R_s \cdot \sin \phi_s$



束流负载

- 束流在高频腔上的感应电流 $\tilde{I}_b$ 中的电抗分量使功率源感到是腔的阻抗发生了变化，产生频偏，导致系统失谐；

$$\Delta f = f_o - f_{rf} = \frac{\tilde{I}_b \sin \phi_s}{2V_{rf}} \cdot \frac{R_s}{Q} \cdot f_{rf} \quad f_o \text{腔的谐振频率,}$$

- 高频腔阻抗角（失谐角），

$$\tan \psi \approx 2Q_L \frac{\Delta f}{f_o} \approx \frac{R_s \cdot \tilde{I}_b \sin \phi_s}{V_{rf}} \approx \frac{\tilde{I}_b \sin \phi_s}{\tilde{I}_o} \quad I_o = V_{rf} / R_s$$

- 通过调腔失谐来补偿束流的电抗分量，使RF系统工作在最佳匹配状态：输入的功率最小， I_G 与 V_{rf} 同相。

- 束流功率： $P_b = V_{rf} \cdot I_b \cdot \sin \phi_s$

- 功率源输出功率： $P_G = P_c + P_b$

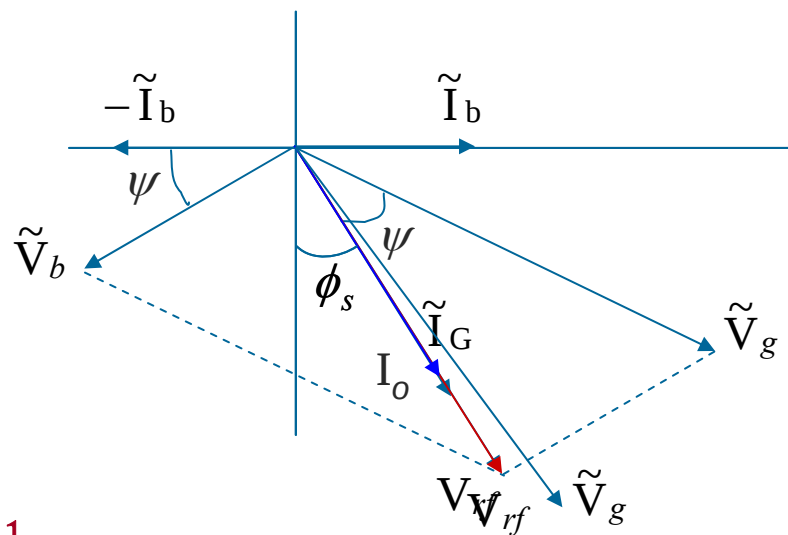
- 相对束流负载系数 $Y = \tilde{I}_b / \tilde{I}_o$

$Y < 1$ ，束流负载较轻，系统稳定

$Y > 1$ ，幅、相调制，系统出现不稳定

必要时需对束流负载效应进行补偿

强流质子机器的束流负载系数 $Y \gg 1$



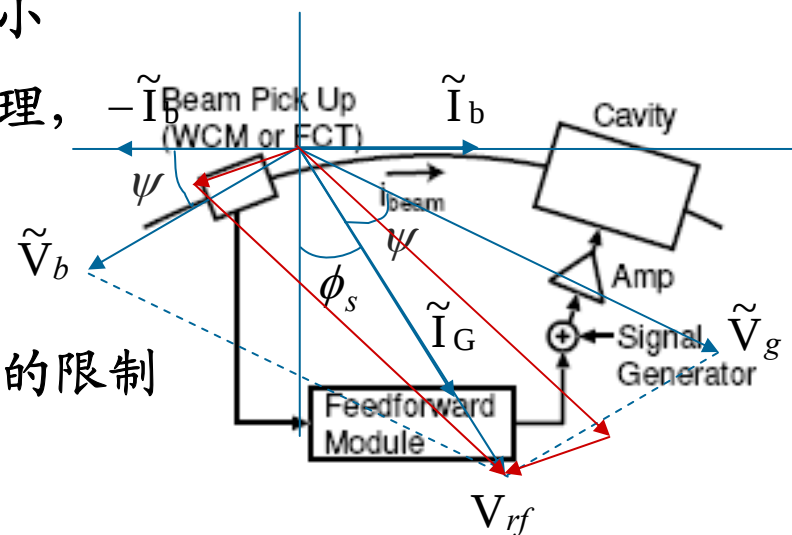
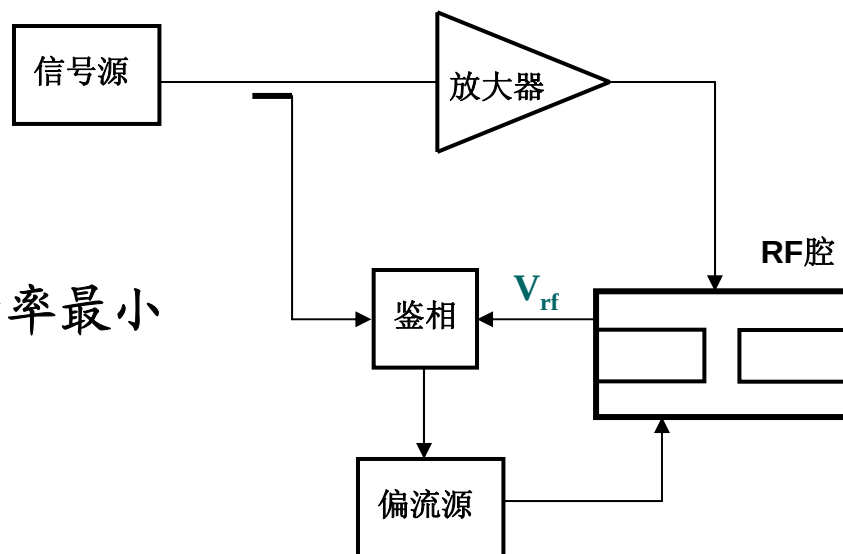
束流负载补偿

- 动态调谐控制

- 补偿束流引进的电抗分量
- 保证 V_{rf} 与放大器 I_G 同相
- 系统调谐, 反射小、使输入功率最小

- 束流前馈补偿

- 重束流负载导致腔失谐大
- 幅、相回路交叉调制, 系统稳定裕量小
- 取束流信号, 做适当的幅度和相位处理, 在腔上产生 $-I_b$, 抵消 I_b 的影响
- 补偿效果受到功率放大器的非线性、和变频情况下回路中元器件频率特性的限制
- 采用自适应的数字控制

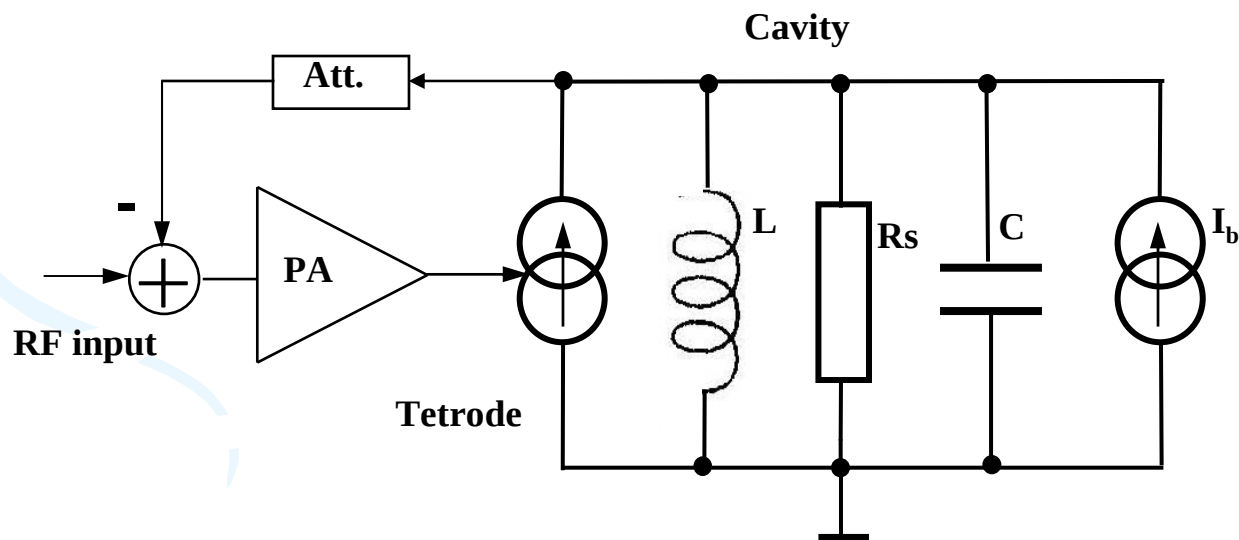


束流负载补偿

- RF直接反馈

- 等效为腔分路阻抗降低 $R_s \downarrow$

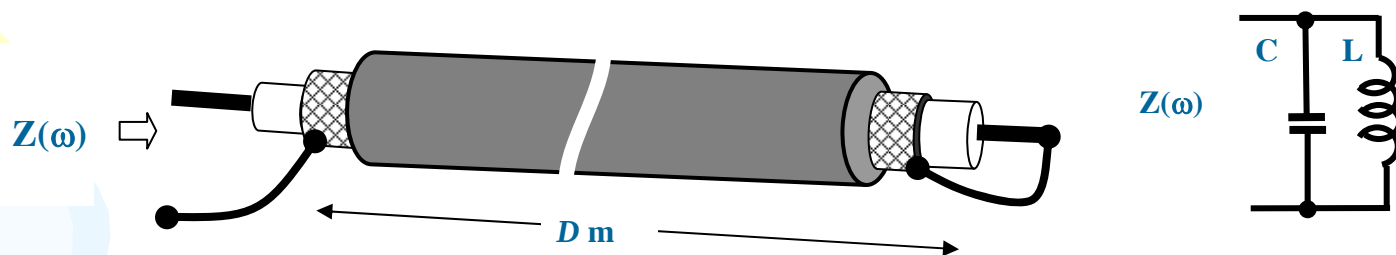
- 束流在腔上的感应电压降低 $V_b = I_b \cdot R_s \cdot \sin \phi_s \downarrow$



电感加载同轴谐振腔

- 1/4 λ 单端短路同轴谐振回路

- 同轴电缆



- ❖ 内、外导体之间为绝缘介质：聚乙烯， $\epsilon_r=2.2$ ， $\mu_r=1$
- ❖ 信号在同轴线中的传输速度： $c' = k \cdot c$ ， $k=1/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ， c 光速
- ❖ 频率为 ω 的信号波长： $\lambda' = 2\pi c'/\omega$
- ❖ $D = \lambda'/4$ 时发生谐振，此时阻抗 $Z(\omega)$ 最大，等效电路为LC并联谐振电路，

$$D = 2\pi c'/4\omega, \quad D = c'/4f,$$

$$\text{谐振频率 } f_{\text{res}} = k \cdot c / (4D) = 0.67 \cdot c / (4D)$$

当 $f_{\text{res}} = 1\text{MHz}$ 时，同轴线长度 D 需要50.2m ($\lambda'/4$)

— 磁性材料加载同轴线

❖ $f_{\text{res}} = k \cdot c / (4D)$ ，选择 μ_r 、 ε_r 高的介质材料，缩短同轴线长度
 $K \downarrow - D \downarrow$

❖ 内、外导体之间介质为铁氧体， $\varepsilon_r=25$ ， $\mu_r=130$

$$k = 1 / \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} = 0.0175$$

❖ 谐振频率为1MHz时， $\lambda'/4$ 同轴线的长度约为1.3m，大大缩短。

— 对加载材料的要求

❖ 高导磁率 μ_r

❖ 高饱和磁通密度 B_s ，保证 μ_r 有足够的变化范围满足RF腔扫频需要

$$\left(\frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} \right)^2 \propto \frac{\mu_{\text{max}}}{\mu_{\text{min}}}, \quad \text{如果腔频率增加3倍, } \mu_r \text{ 就要减小9倍}$$

❖ 剩磁小，矫顽力小、快恢复，适合快循环工作方式

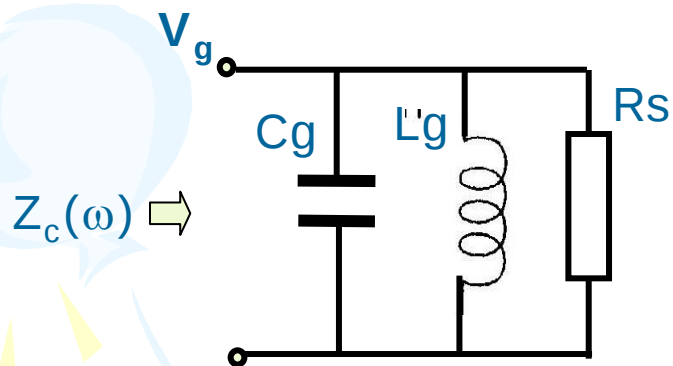
❖ $\mu Q f$ 值高，RF损耗低，

❖ 在高 $B r f$ （高频磁通密度）下性能稳定

• 电感加载同轴谐振腔

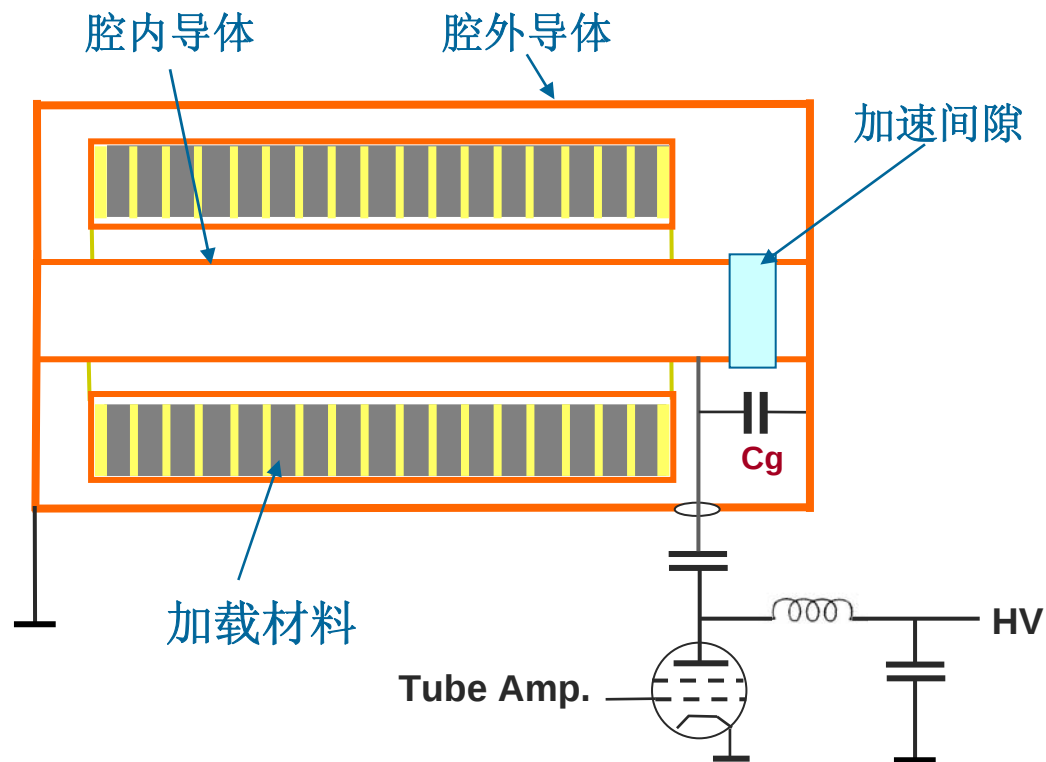
— 腔的并联谐振等效电路，用集中参数表示：

- 电感 L_g ：磁性材料加载的同轴腔体
- 电容 C_g ：同轴腔体结构的分布电容 + 外加间隙电容
- 腔分路阻抗 $R_s = \omega Q L = V_g^2 / 2P_c$ ：主要是加载材料的损耗



$$Z_c = \frac{R_s}{1 + jQ \left(\frac{\omega_{rf}}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_{rf}} \right)}$$

$$Q = R_s \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R_s}{L \omega_0} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



— 电感加载同轴谐振腔的等效电参数

• 同轴腔等效电感

$$L \cdot i = \psi = n \cdot \Phi = \int_S n \cdot B ds, \quad \oint_l \vec{H} dl = n \cdot i$$

单片加载同轴线的电感 L_t :

$$L_t = \frac{n^2 \cdot d_1}{2\pi} \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 \cdot dr}{r} + \int_{r_2}^{r_3} \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot dr}{r} \right)$$

n : RF绕组匝数

d_1 : 加载环厚度

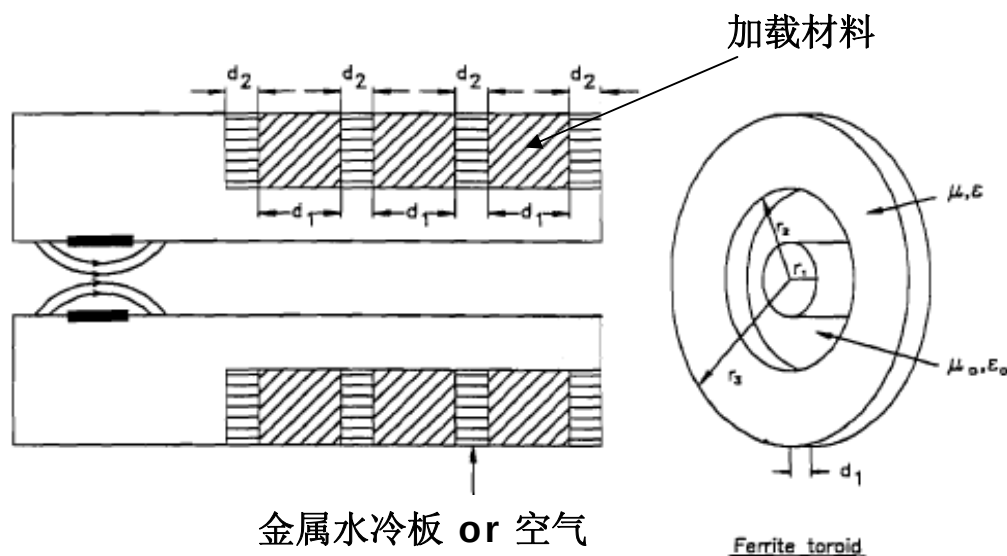
$$= \frac{n^2 \cdot d_1 \cdot \mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \mu_r \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

腔电感 L_g :

N : 加载环片数

$n = 1$

$$L_g \approx \frac{N \cdot d_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \ln \frac{r_3}{r_2}$$



• 同轴腔等效电容

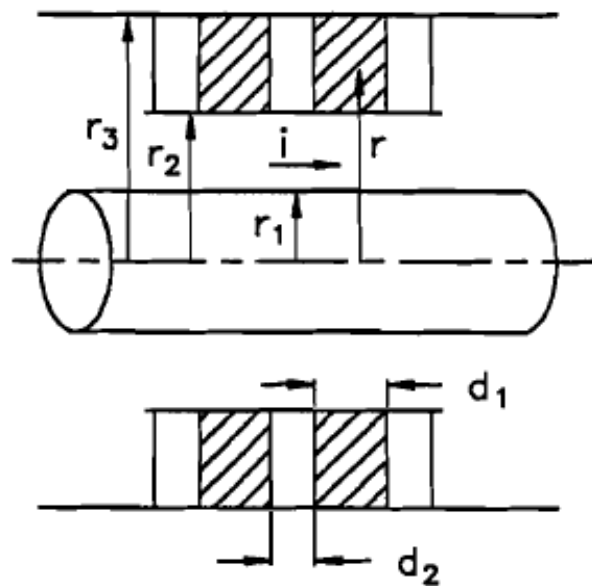
$$E = \frac{q}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r}$$

$$V = \int_r E dr$$

$$V = \int_{r_1}^{r_2} E dr + \int_{r_2}^{r_3} E dr = \frac{q}{2\pi \varepsilon_0} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$C \cdot V = q$$

$$C_g = \frac{2\pi \cdot N \cdot d_1 \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}}$$



- 等效电容较小 $\sim 0.12\text{nF}$
- 通常采用外加电容做同轴谐振腔的谐振电容

— 电感加载同轴谐振腔的主要参数

- 高频磁通密度 B_{rf} :

加载材料内的高频磁场, 对 μ_r 、 Q 有影响, $B_{rf} \uparrow$ — 非线性 $\uparrow$

$$B_{rf} \equiv B_{\max} \cdot \frac{r_i}{r} \quad \text{强度与半径成反比, 在内径处最强}$$

- 间隙电压 V_{gap} : 加速电压 V_{rf}

$$V_{\text{gap}} = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{d}{dt} \int_{r_i}^{r_o} B_{rf} \cdot l \cdot dr = B_{\max} \cdot \omega \cdot l \cdot r_i \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}$$

r_i : 加载环内径

r_o : 外径

l : 加载材料长度

$$B_{\max} = \frac{V_{rf}}{\omega \cdot l \cdot r_i \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}} \quad \text{与频率成反比, 低频下 } B_{rf} \text{ 高}$$

- 腔耗 P : 主要是加载材料的损耗 $P = \frac{V_{rf}^2}{2 R_s}$

- 腔分路阻抗 R_s

$$R_s = \omega Q L = A(\mu_r Q f) \quad , \quad A = \mu_0 \cdot l \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad \text{— 只与腔的结构有关}$$

强流质子同步加速器对高频腔的要求

- 满足RF扫频的需要——

质子能量 $\uparrow$ — 质子运动速度 $\uparrow$ — RF频率 $\uparrow$

- RF频率较低（几MHz）—— 质子回旋频率低

- 频率范围宽（1~3MHz）→ 高频腔工作频带要宽

- 电感加载同轴谐振腔

- ❖ 腔的谐振频率不可调：Q $\downarrow$ ，损耗 $\uparrow$ ，不需调谐，系统结构简单

- ❖ 腔的谐振频率可调：Q $\uparrow$ ，损耗 $\downarrow$ ，需调谐控制，系统结构复杂

世界主要散裂中子源环高频系统

	SNS (美国)	J-PARC (日本)	ISIS (英国)	CSNS (中国)
能量(GeV)	1	3	0.8	1.6
加速器类型	AR	RCS	RCS	RCS
重复频率 (Hz)	60	25	50	25
环周长 (m)	248	348	163	228
RF频率范围(MHz)	1.05	0.94~1.67	1.3~3.1	1.02~2.44
RF加速电压(kV)	60	450	160	165
高频腔加载材料	铁氧体	磁合金	铁氧体	铁氧体
腔数 (基波/谐波)	3/1	12	6/4	8/3
功率源 (kW)	四极管 500	四极管 600*2	四极管 250*2	四极管 500

两种加载材料的比较

- 铁氧体 **Ferrite**, **NiZn**软磁材料
- 磁合金 **Magnetic Alloys** (**FINEMET** 微晶材料)

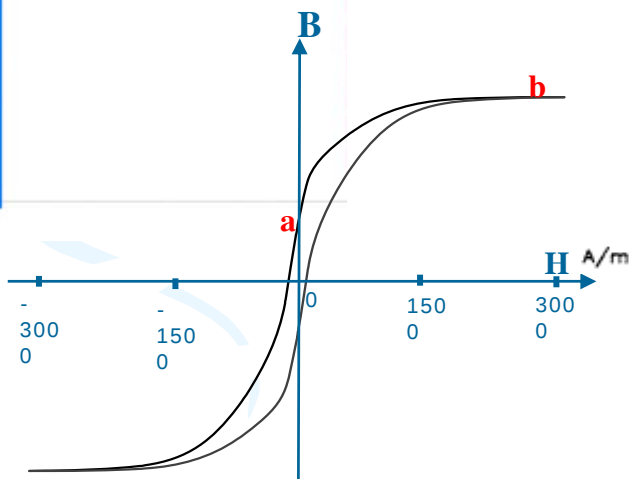
	Ferrite (4M2)	MA (FT-3)
初始磁导率 μ_i	低 (~ 140)	高 (~ 2000)
居里温度 T_c	低 ($\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)	高 ($\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$)
有载品质因数 Q	高 (~ 50)	低 (~ 0.6)
损耗	低 (磁滞损耗)	高 (涡流损耗)

铁氧体与磁合金比较

B 1.5T
Magnetic Alloy

0.2T Ferrite

H



B-H
Loop

— 磁合金环

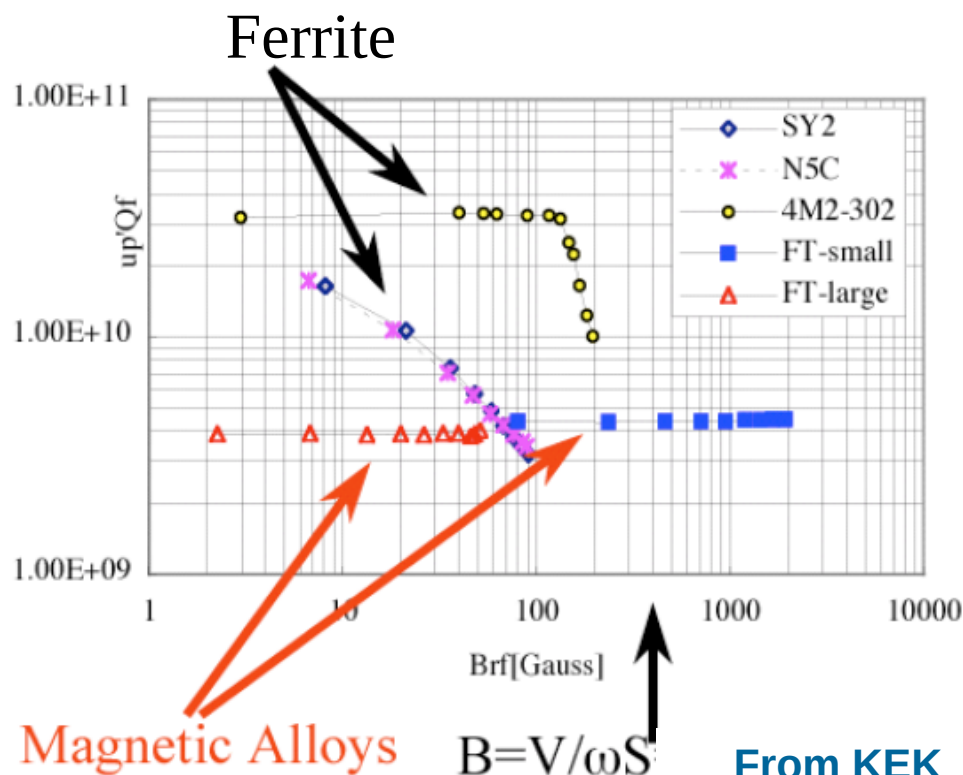
- 微晶薄带 ($\sim 10\mu\text{m}$) 绕制, 外表面不能加工
- 饱和磁通密度 B_s 高, $\sim 1.5\text{T}$
- 导磁率 μ_r 高, 不易控

— 铁氧体环

- 高温烧结, 外表面可加工
- 饱和磁通密度 B_s 低, $< 0.2\text{T}$
- 导磁率 μ_r 相对低, 随 H 改变, 可通过改变偏置磁场强度调节 μ_r
 - a 点 $H=0$, $\mu_r \approx 140$
 - b 点进入饱和区, $H=3000\text{ A/m}$, $\mu_r \approx 8$
- 剩磁小, 去掉偏磁场后, 能快速恢复

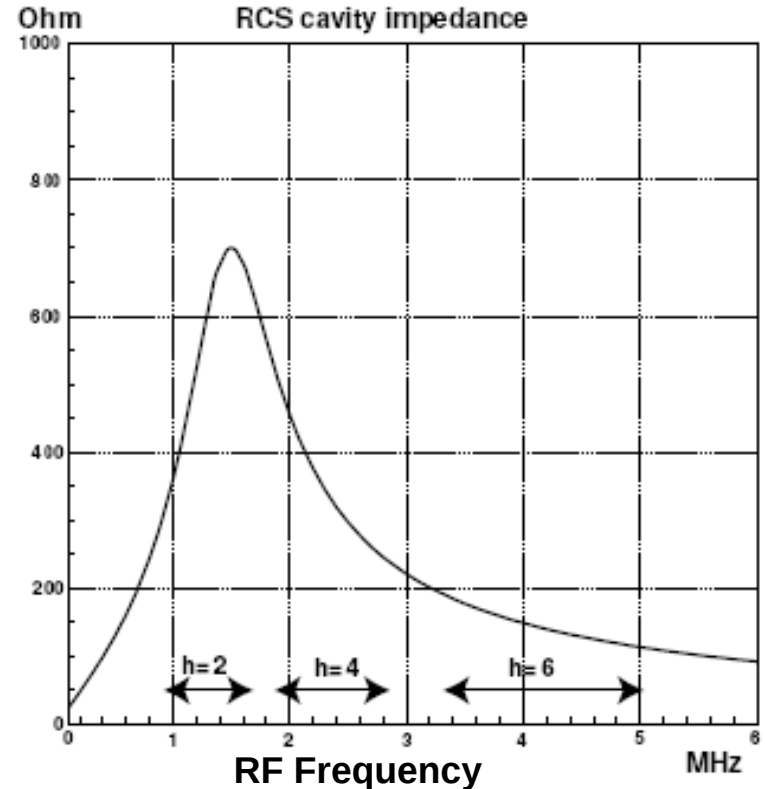
铁氧体与磁合金比较

- 加载材料的 μQf 值决定腔的分路阻抗
- $B_{rf} < 200$ Gs, 铁氧体的 μQf 值较高, MA较低
- $B_{rf} > 200$ Gs, 铁氧体的 μQf 值急剧下降, 而MA几乎不变
- 铁氧体材料的性能受 B_{rf} 的限制, MA在高磁场下性能稳定
- 在低场下铁氧体腔的损耗远小于MA腔



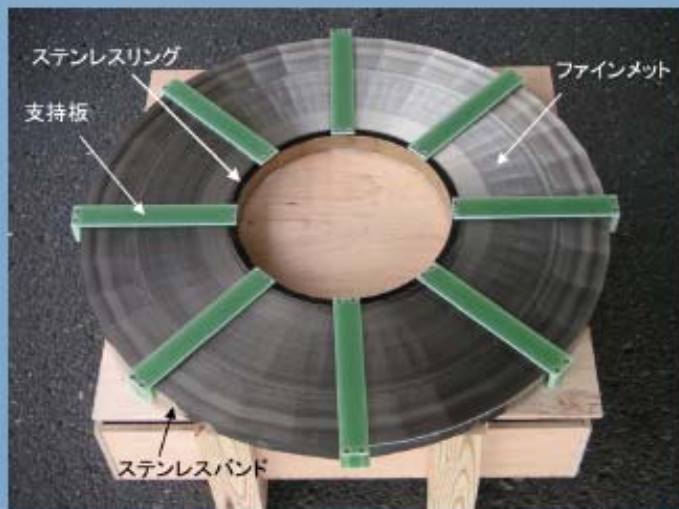
磁合金加载腔特点

- 高 B_{rf} 下性能稳定，非线性小
- Q值低(0.6~2)
 - 宽带
 - 不需要腔调谐，控制系统简化
 - 可用于多谐波工作
 - 损耗大
 - 冷却是关键问题
 - 磁合金环表面不可加工
 - 直接水冷对材料腐蚀
 - 功率源输出功率大，耗电大
- 在医用加速器（质子、重离子治癌）上MA腔应用较多
 - 较低的磁场 B_{rf}
 - 风冷方式

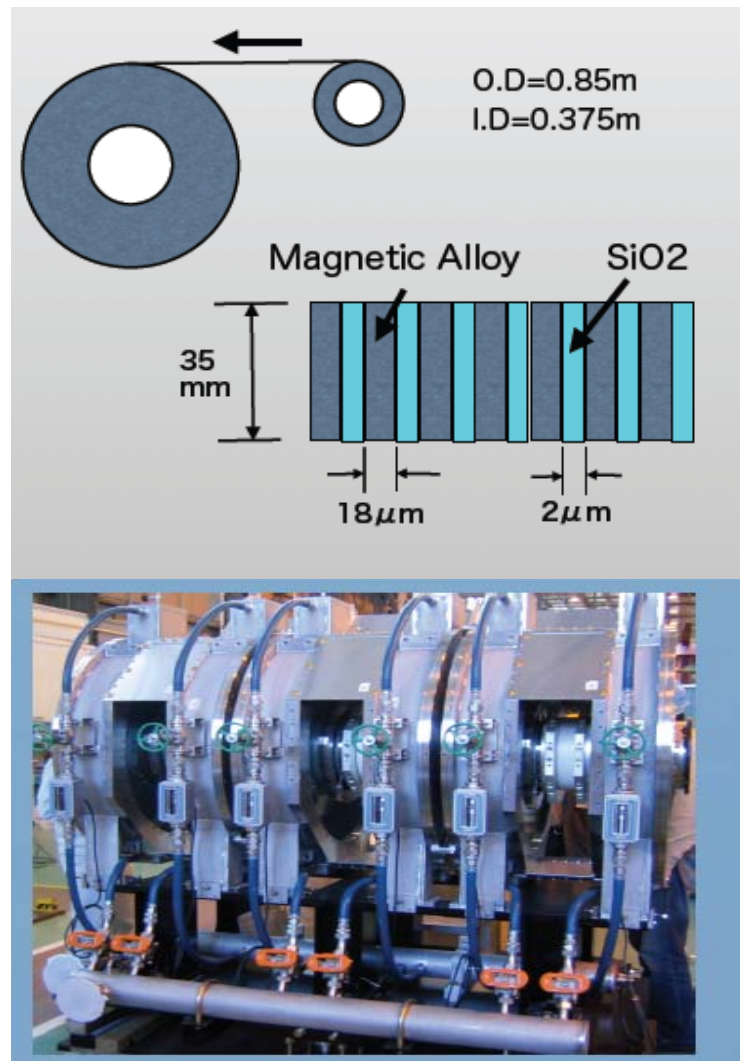


From J-PARC

磁合金加载腔



From J-PARC



RF电压: 3间隙, 腔压 ~ 45kV
频率: 0.94~1.67 MHz (h=2)
1.88~3.34 MHz (h=4)
2.82~5.01 MHz (h=6)

HITACHI MA 腔 用于医用加速器

Wideband RF Cavity

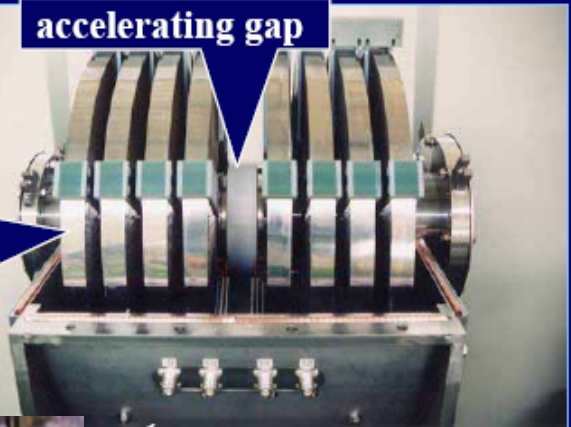
- **Reliable Operation**
 - Solid-state Amp.
 - Air Cooling
- **Simple Operation**
 - Non Resonant Freq.

FINEMET Core

- High complex permeability for Freq. Range 1-10 MHz
- High Curie temperature

450 mm

accelerating gap



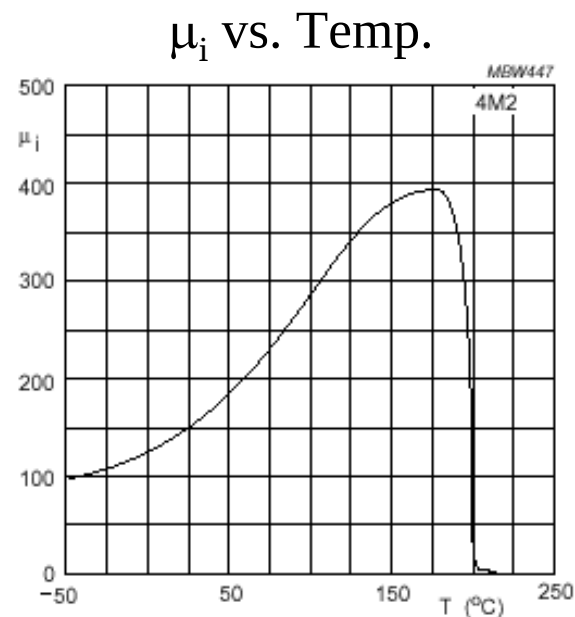
Multi-channel
**Solid-state
RF Amplifier**

HITACHI Ltd

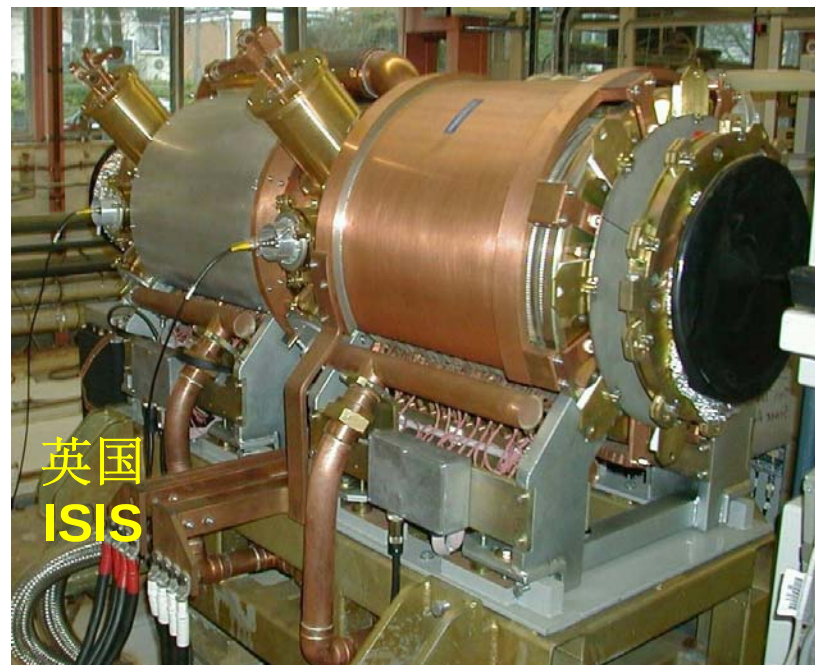
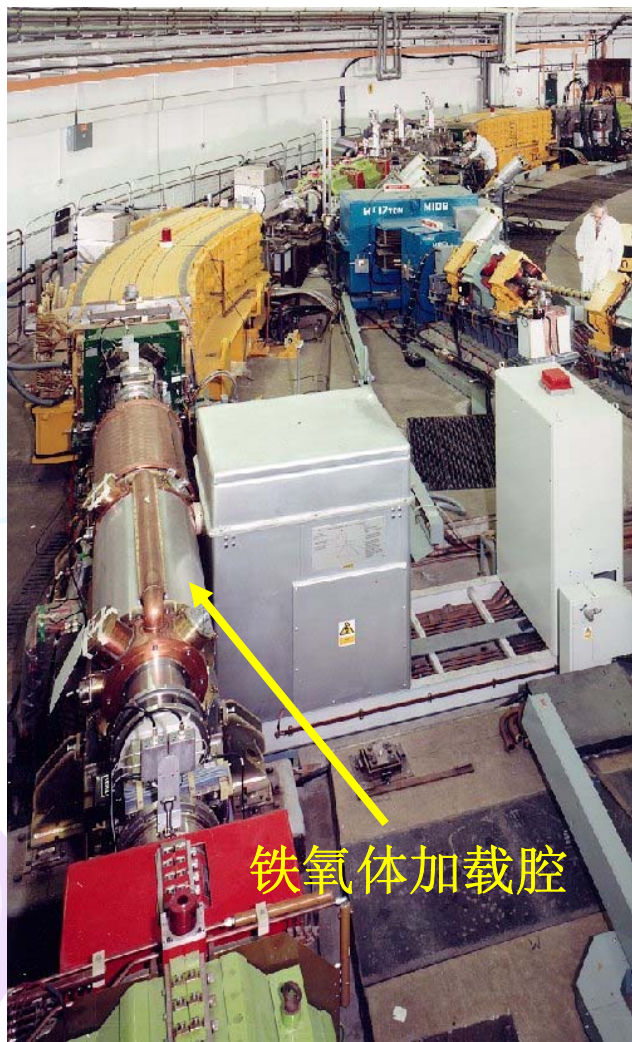


铁氧体加载腔特点

- **Q值相对较高** (~ 50)
 - 带宽窄
 - 腔分路阻抗相对较高
 - 腔耗较低
- **铁氧体导磁率随外加偏置磁场强度改变**
 - 可扫频工作
 - 通过控制偏流源实现对腔的调谐控制
 - 控制系统复杂
- **腔分路阻抗** (μQf) **随RF频率和RF场强而改变**
- **高磁场** (**Brf**) **下性能不稳定, 非线性严重**
- **热稳定性差, 功率密度** $< 0.3\text{W/cm}^3$, **工作温度** $< 50^\circ\text{C}$



铁氧体加载腔





CSNS环高频系统介绍

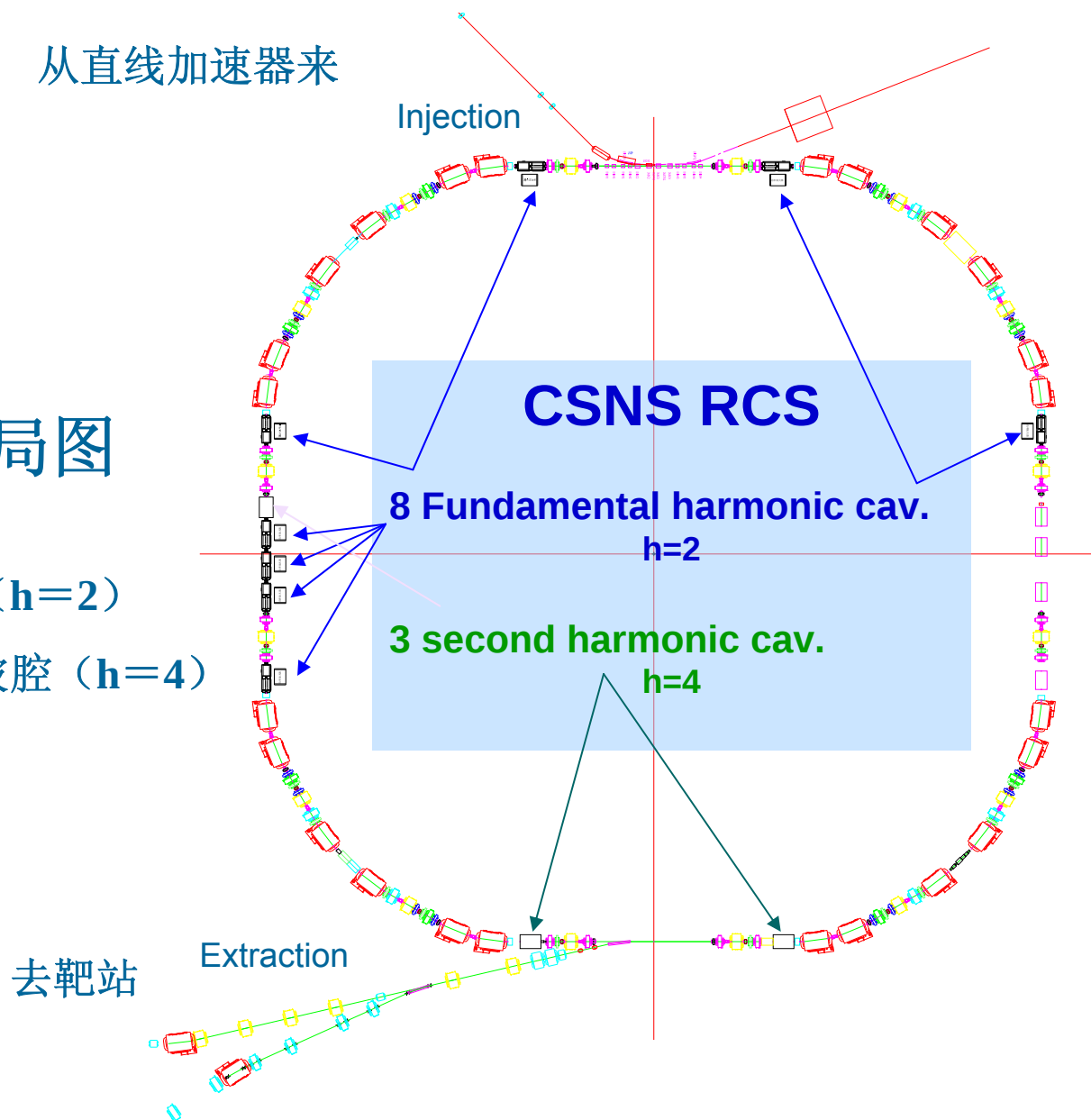
CSNS/RCS机器参数

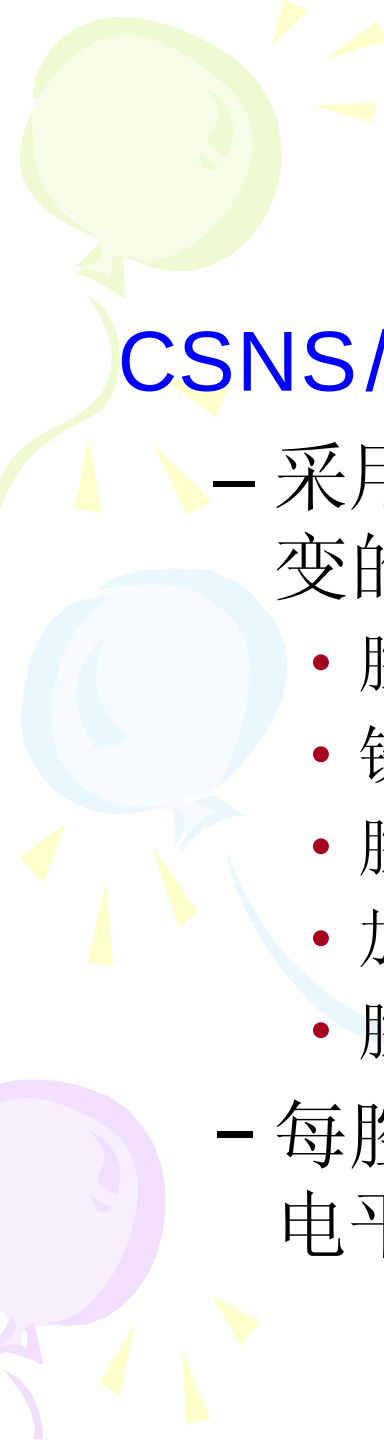
Parameters	Unit	Phase I
束流功率	kW	100
注入能量	MeV	80
引出能量	GeV	1.6
每脉冲质子数（@引出）	ppp	1.56×10^{13}
质子循环电流（注入/引出）	A	1.5 / 3.6
重复频率	Hz	25
RF谐波数		2
RF 频率（注入~引出）	MHz	1.02—2.44
最大RF电压	kV	165

CSNS / RCS 布局图

工程一期：8个基波腔 ($h=2$)

二期：增加3个二次谐波腔 ($h=4$)



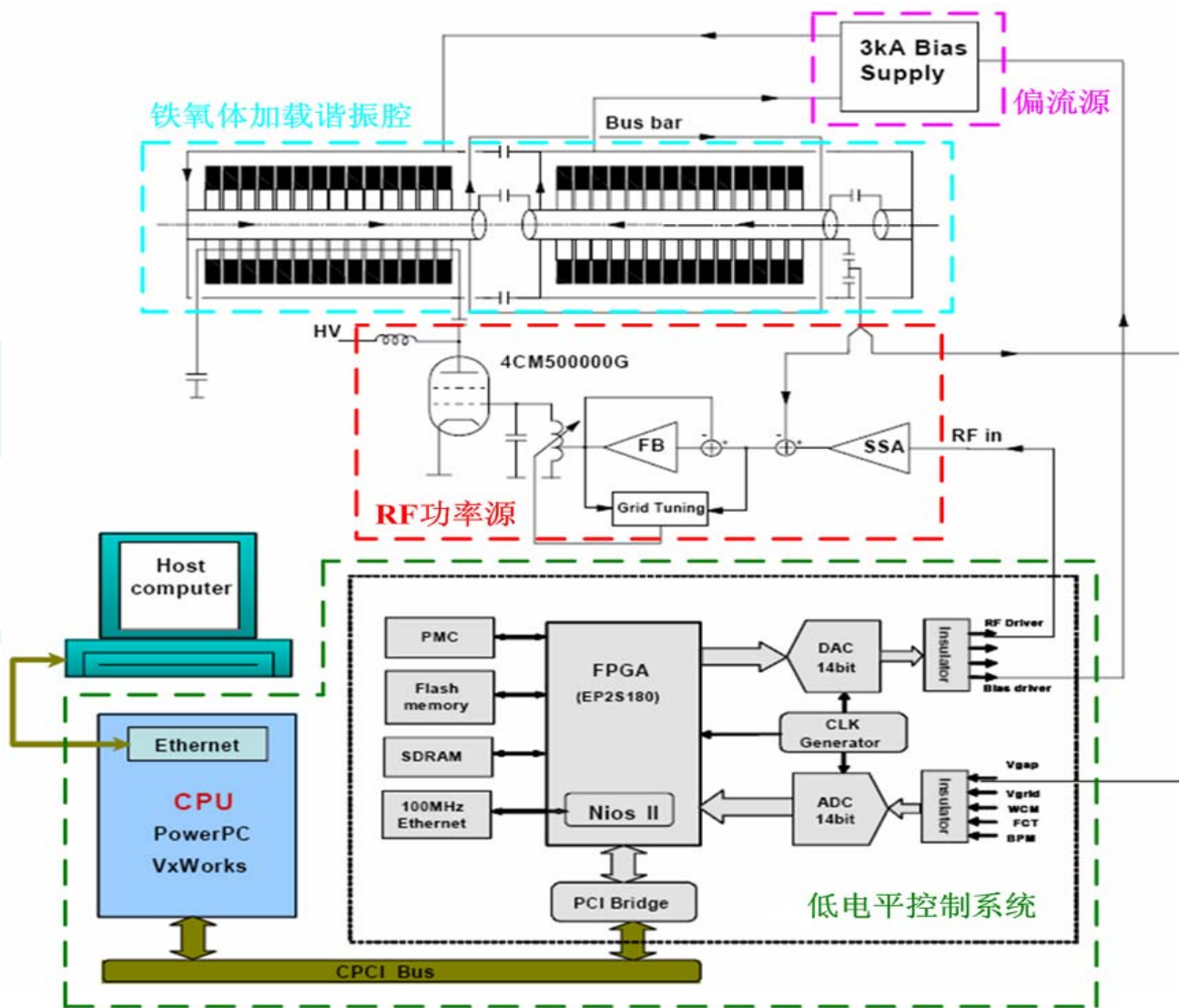


CSNS/RCS高频系统概述

CSNS/RCS高频系统组成

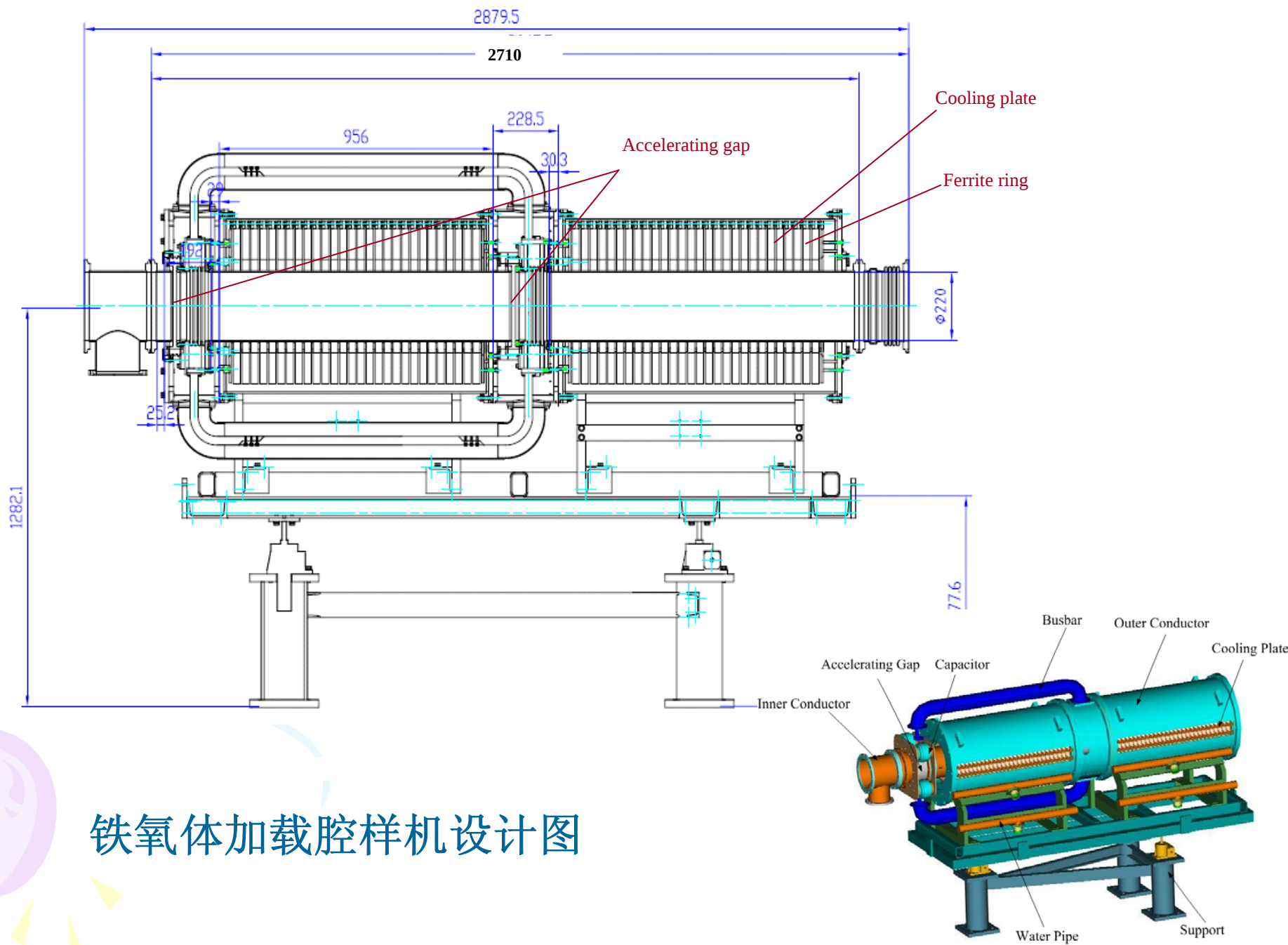
- 采用铁氧体加载同轴谐振腔为束流提供频率可变的射频加速电压
 - 腔数：8个
 - 铁氧体加载材料：Ferroxcube 4M2
 - 腔长： $\sim 2.7\text{m}$
 - 加速间隙：2个
 - 腔压： $> 20\text{kV}$
- 每腔配备一套四极管功率放大器、偏流源和低电平控制系统

RCS高频系统框图

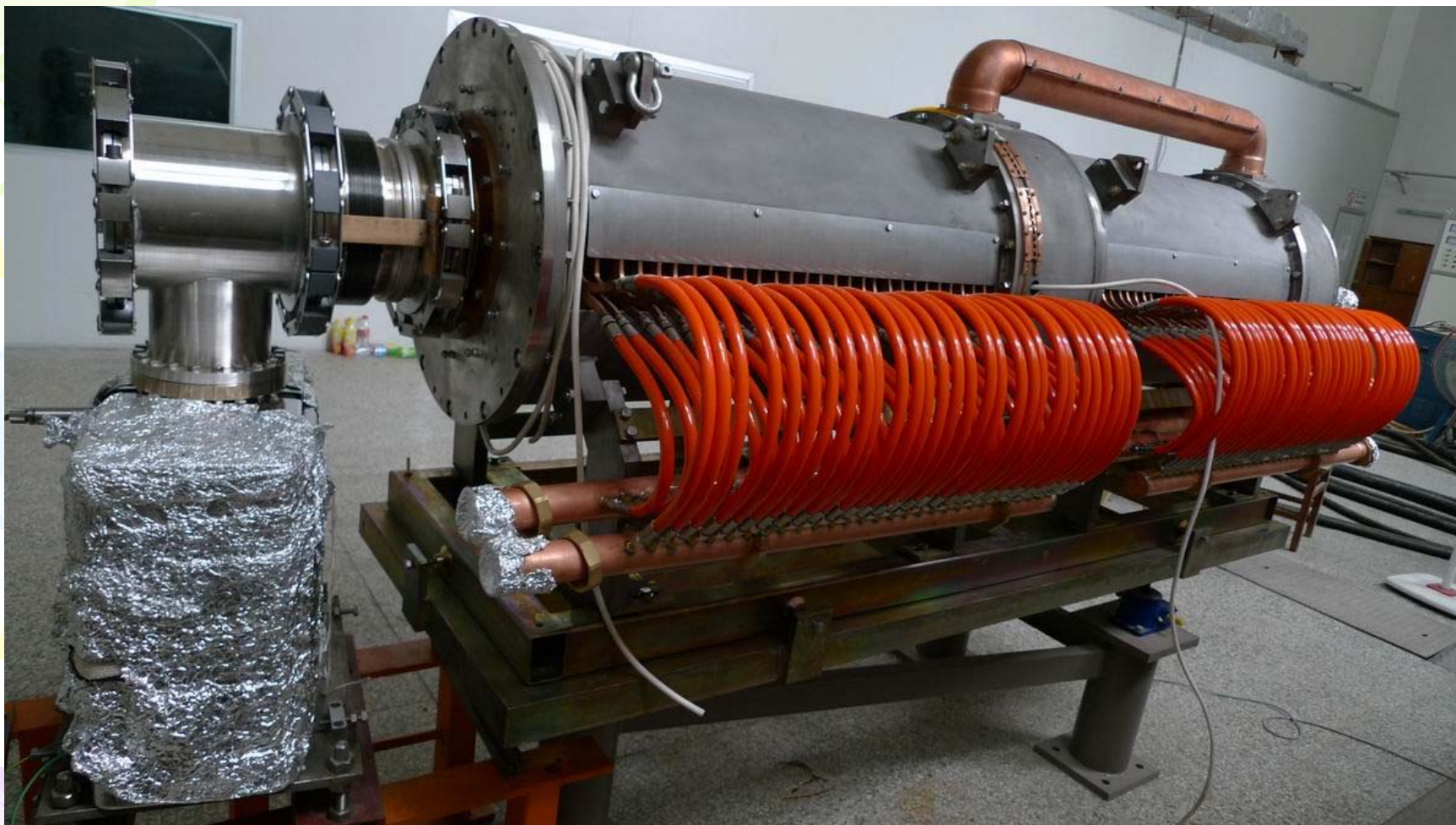




CSNS环高频系统研制样机

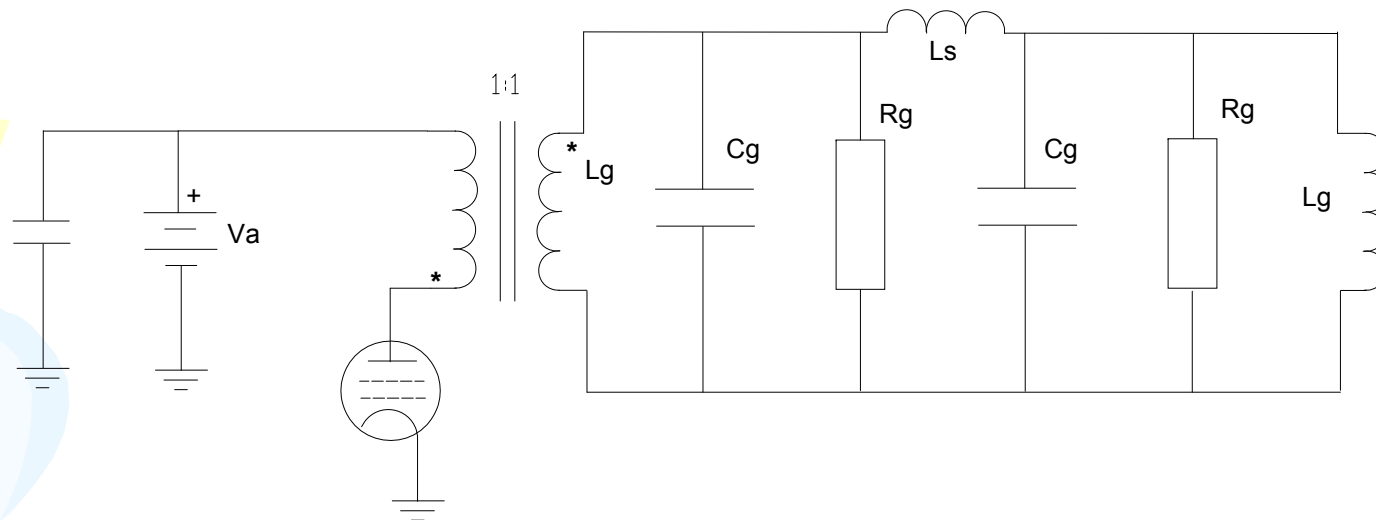


铁氧体加载腔样机设计图

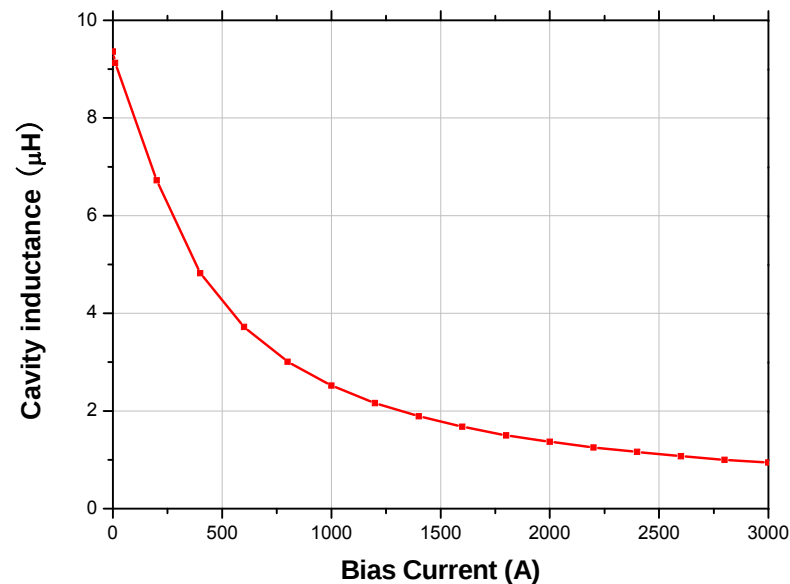


铁氧体加载腔样机

— 铁氧体加载腔的等效电路

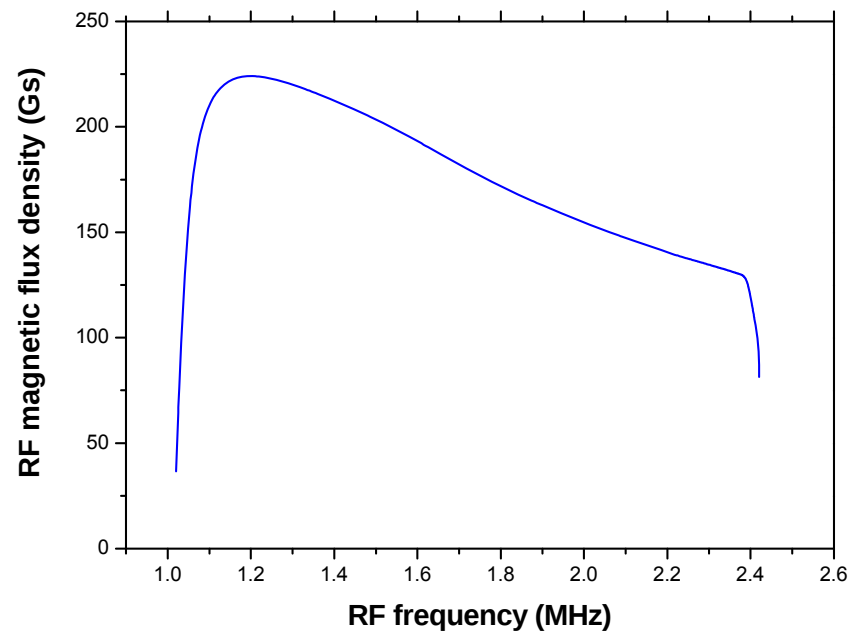
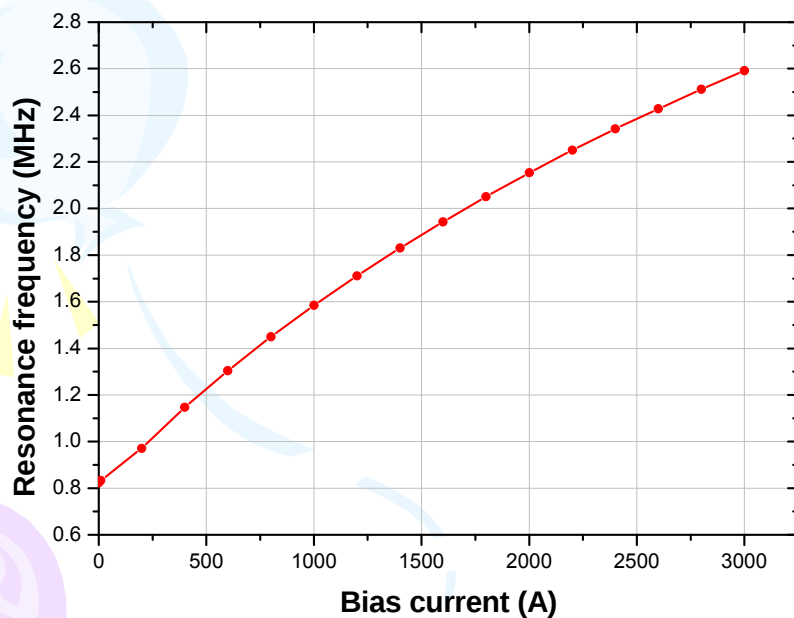


RF frequency range (h=2)	1.02~2.44 MHz
Gap capacitance C_g	4nF
Gap inductance L_g	6.06~1.08 μ H
Gap impedance r_g	3~0.8 k Ω
Permeability μ_r	90~15



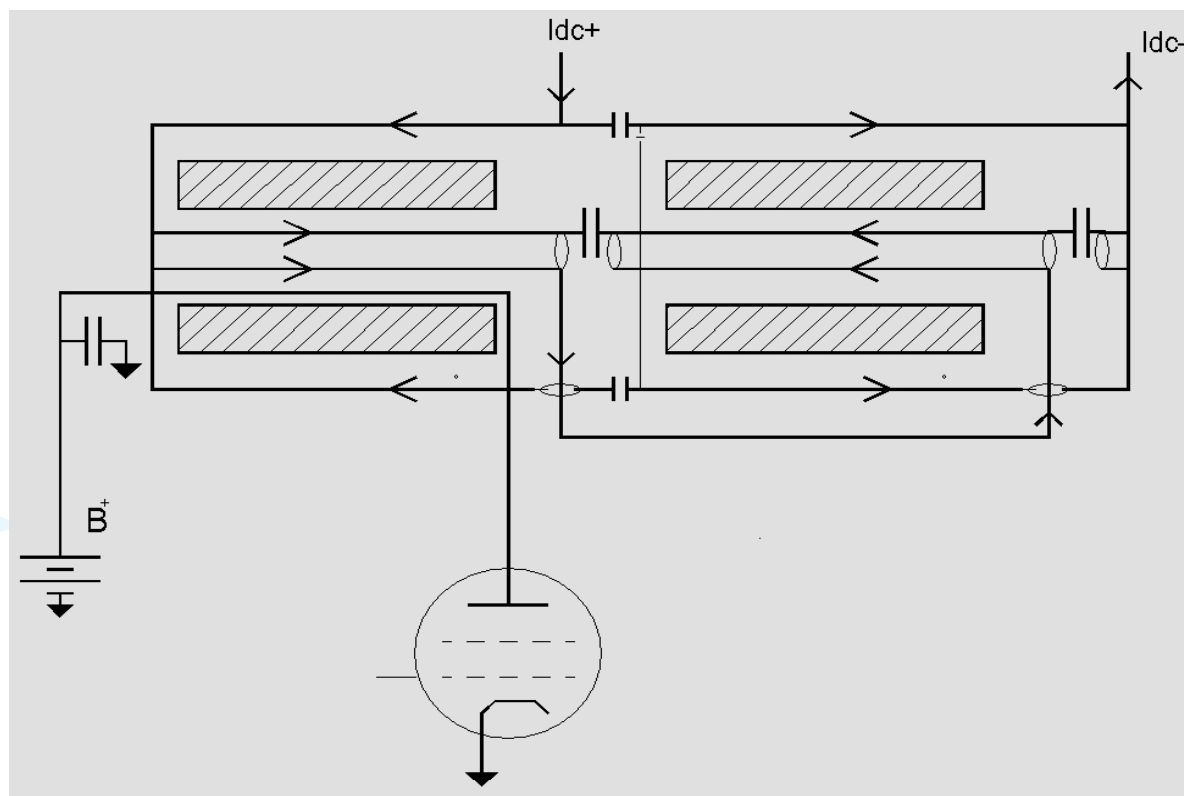
双间隙铁氧体加载腔

- 腔扫频范围：0.83~2.59MHz @偏流 0~3000A
- 腔内最大 B_{rf} ~230Gs



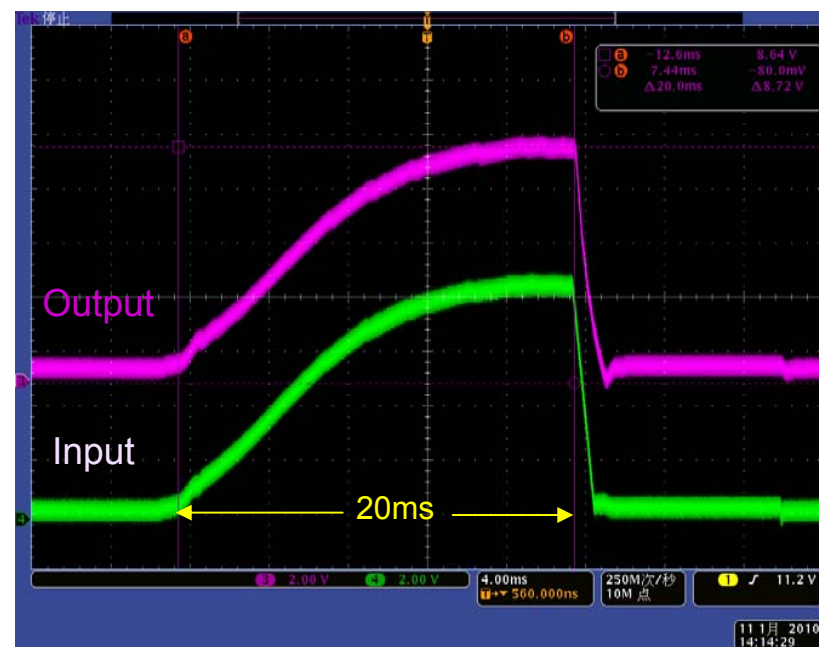
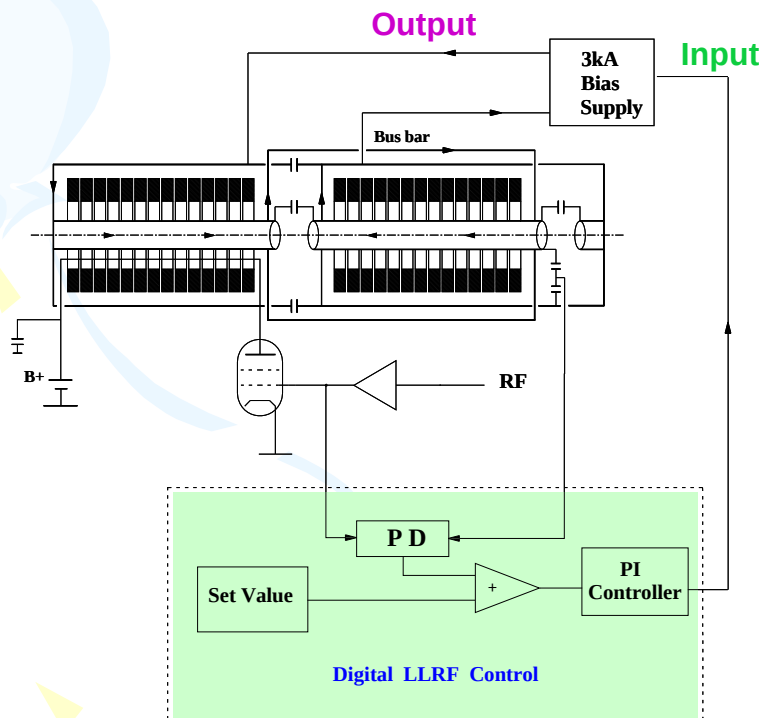
— 铁氧体腔中的偏磁电流通路和高频功率馈送

- 为避免高频场与偏流磁场相互干扰，内外导体构成单匝“8”字形偏流回路，使干扰互相抵消。
- 高频功率采用磁耦合方式馈入



铁氧体腔自动调谐控制

- 偏磁电流0~3000A，摆率 400A/ms.
- 自动调节腔的谐振频率跟随高频工作频率，保证腔压与栅极输入电压（即 I_G ）同相

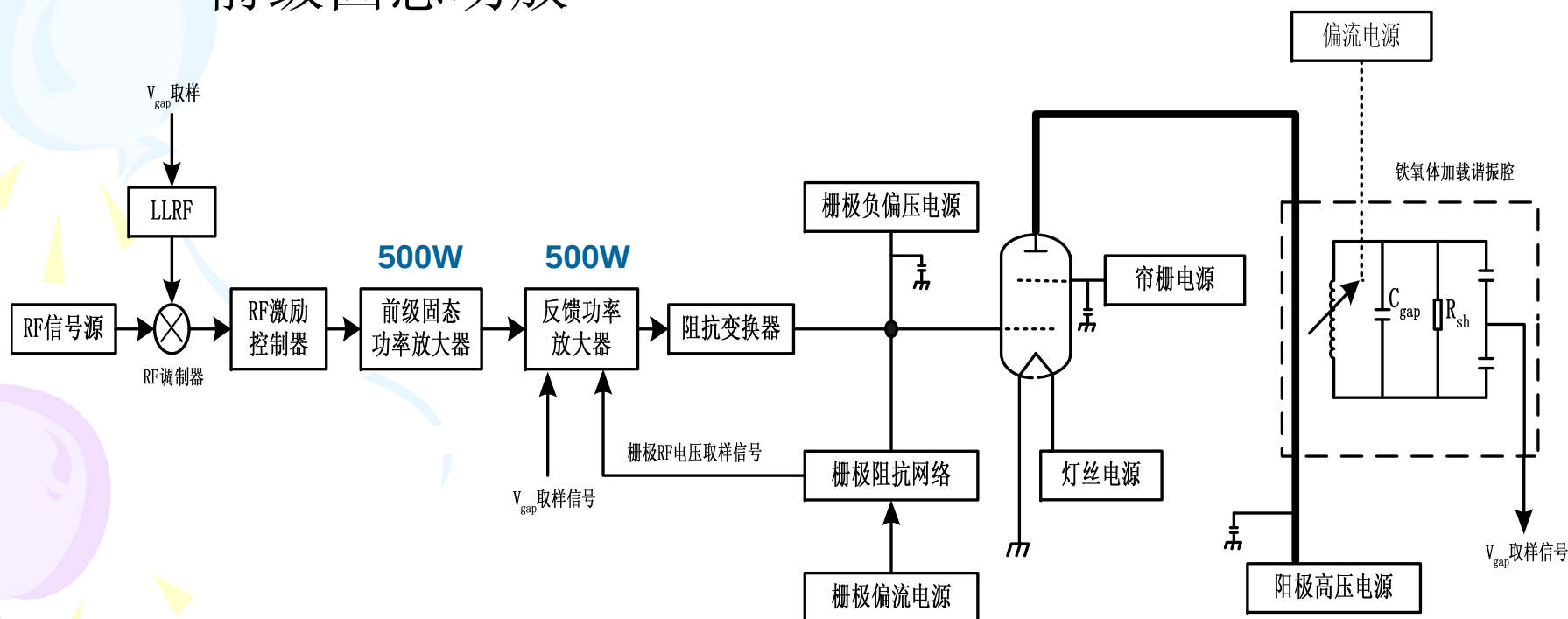


高频功率源

- 为铁氧体加载腔和束流提供所需的高频功率和能量
- 高频大功率四极管，最大输出功率**500kW**

工作频率较低；扫频工作；大束流负载

- 阳极高压**15kV**
- 前级固态功放



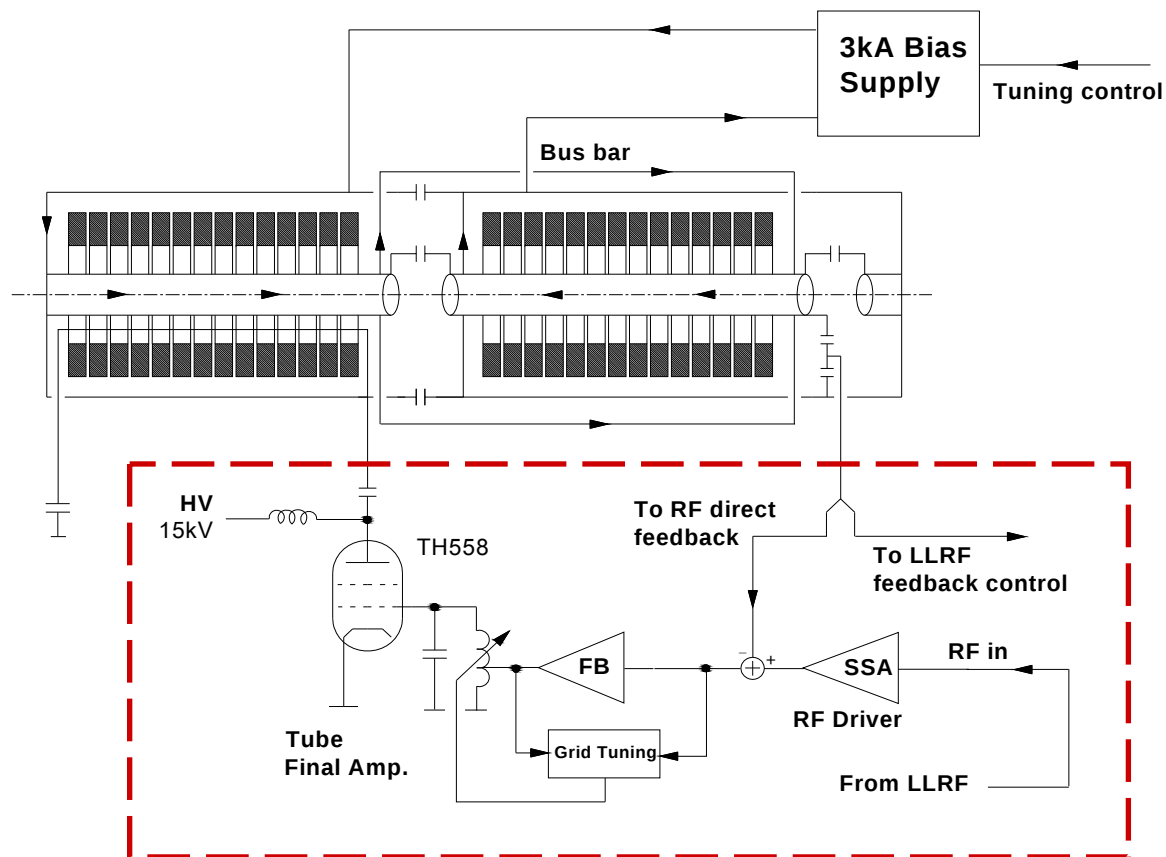
高频功率源系统

- RF直接反馈控制
- 栅极输入阻抗自动调谐控制

❖ 栅极电容→栅极阻抗随频率变化→前级失谐

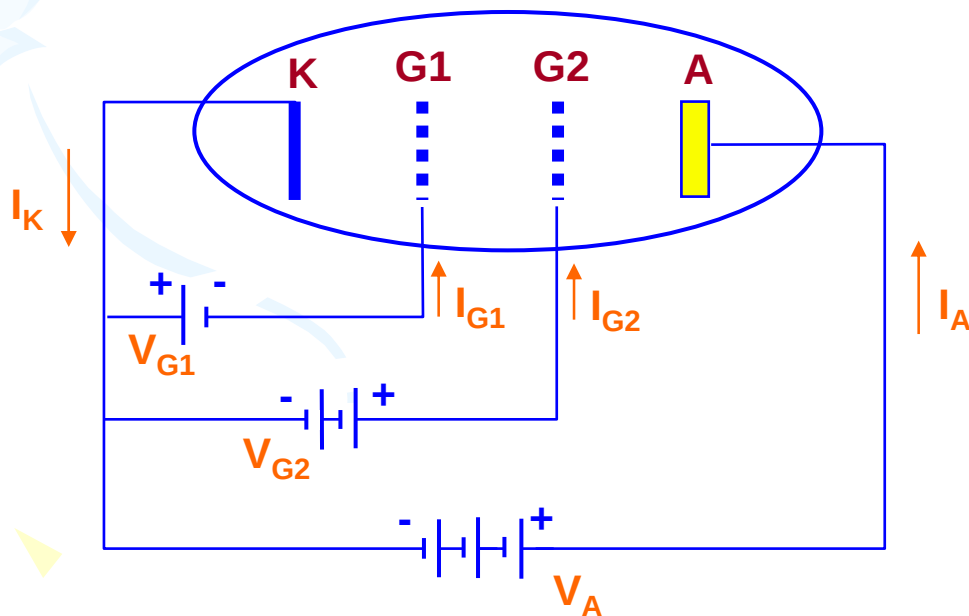
❖ 偏流控制可调电感补偿栅极电容

❖ 提高系统增益，保证系统宽带稳定工作



大功率四极管放大器

- 阴极K：电子源—高温下发射电子
- 阳极A：收集极—加正高压，收集电子
- 栅极G1：控制极—改变G1电压→阳极电压变化
电压放大倍数 = V_a/V_{g1} ，跨导 = I_a/V_{g1}
- 帘栅极G2：静电屏蔽层—减小阳极与栅极之间的电容，起到屏蔽阳极电场对栅极影响的作用

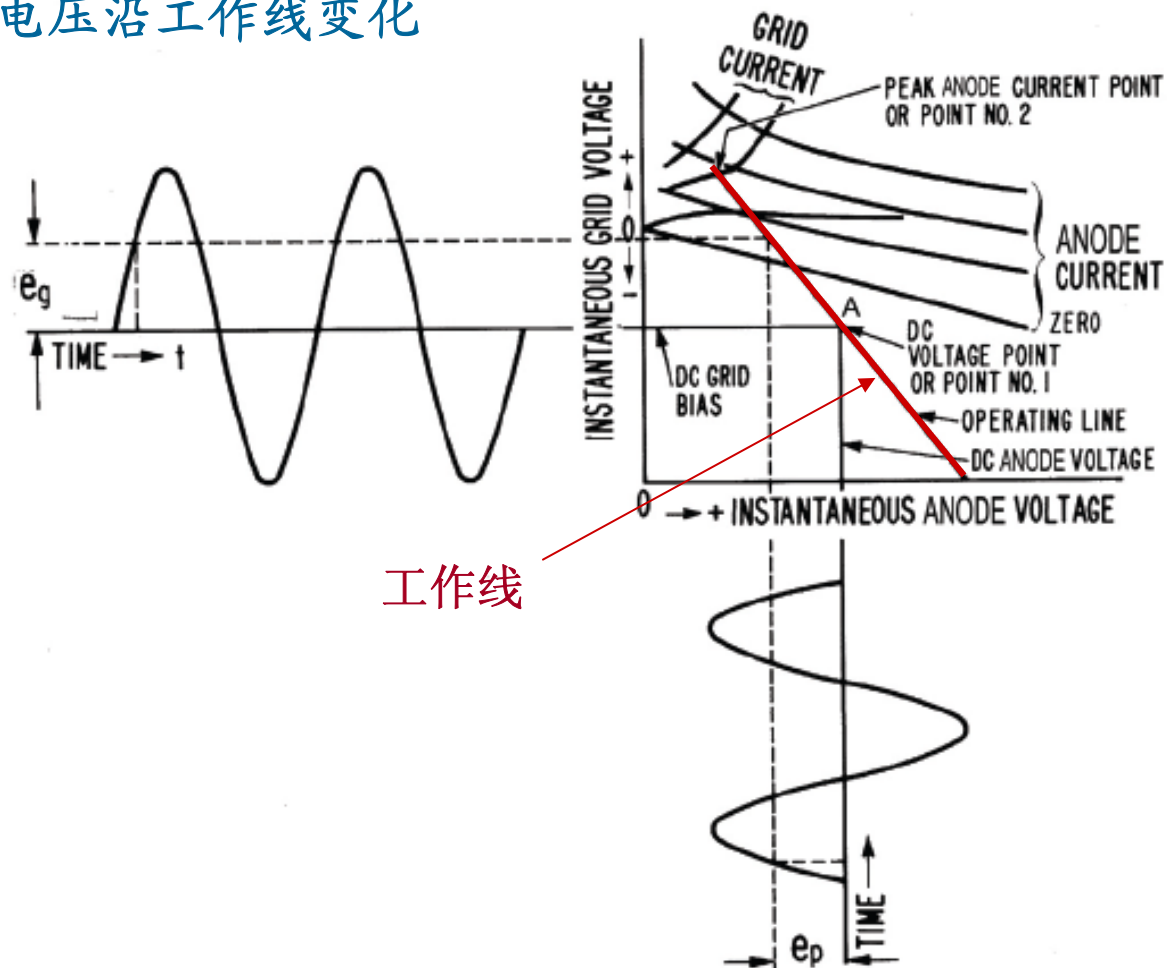


THALES



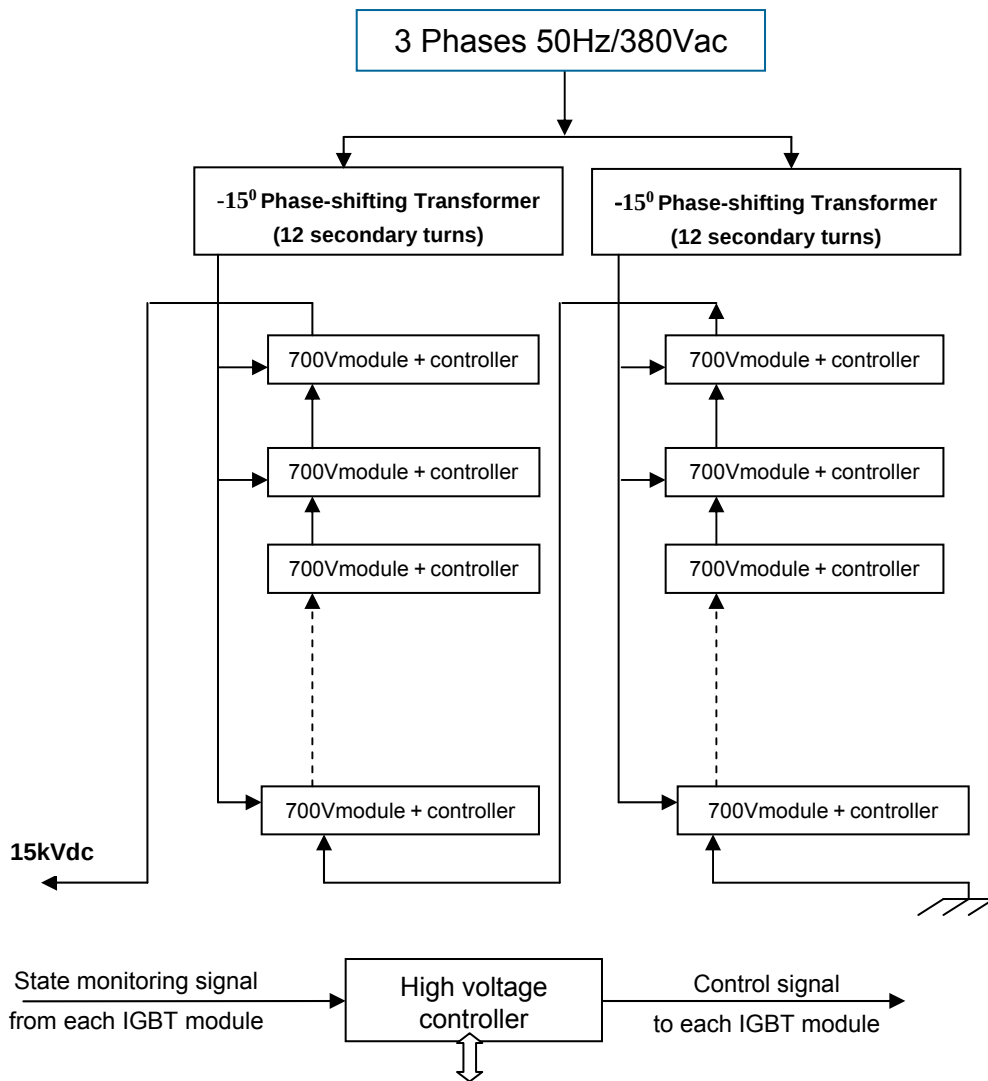
四极管工作原理

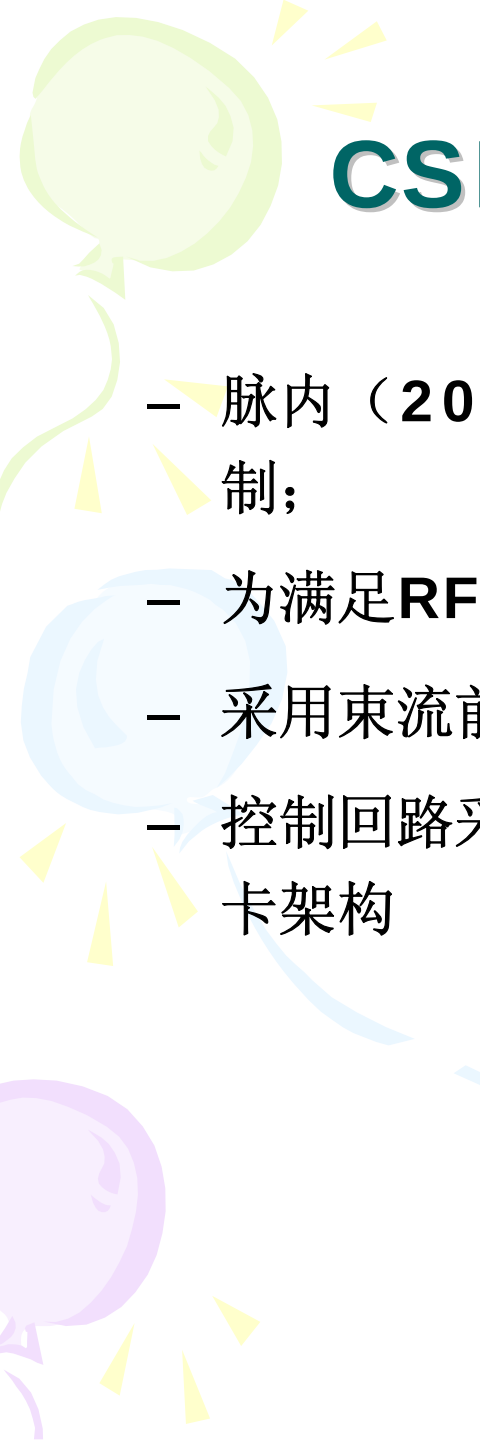
- ❖ 工作点由管子各极的直流偏置电压决定
- ❖ 栅极电压与阳极电压沿工作线变化



阳极高压电源

- 固态阳极高压电源，由**24块700V IGBT**模块组成，效率高
- 采用脉冲阶梯调制技术**PSM**，电压可调，使用方便
- 模块化结构，便于维护，可靠性高

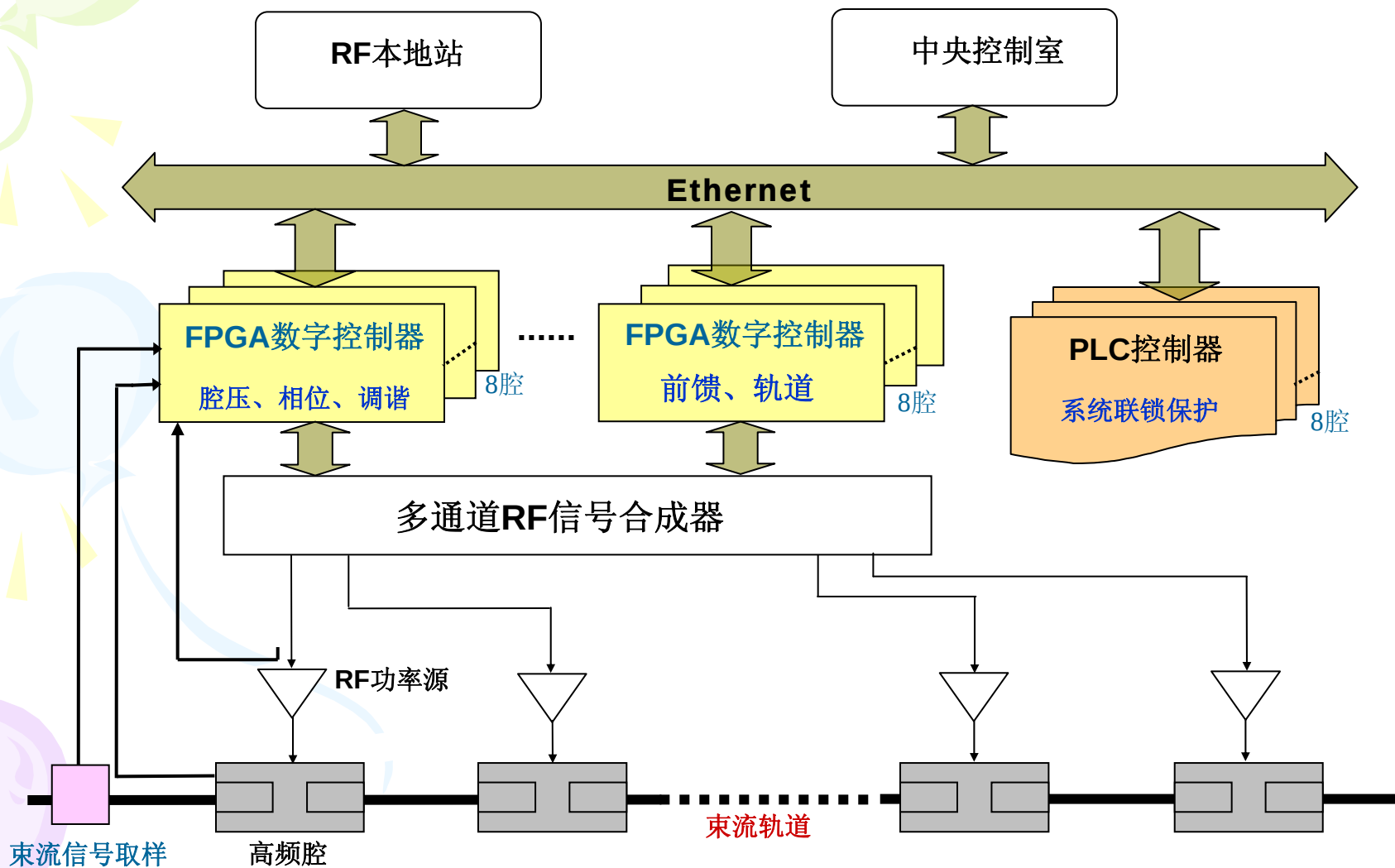




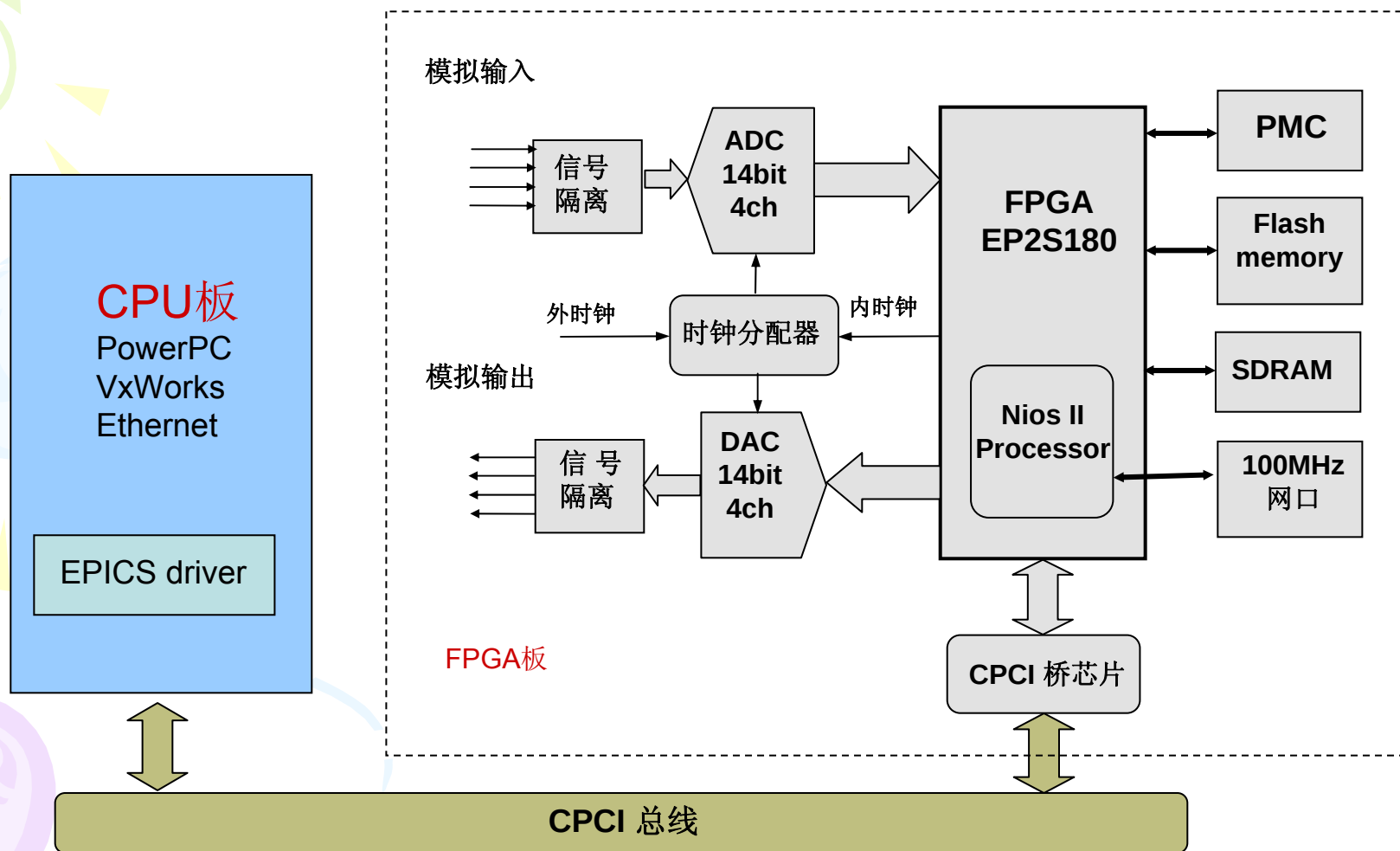
CSNS / RCS LLRF 控制系统

- 脉内（**20ms**）要完成对腔压、工作频率、加速相位的动态控制；
- 为满足**RF**系统扫频工作的要求，铁氧体腔要实现自动调谐；
- 采用束流前馈补偿技术对强束流负载进行控制；
- 控制回路采用全数字控制模式，**cPCI**总线+**CPU**+**FPGA**板卡架构

CSNS / RCS环射频控制系统框架



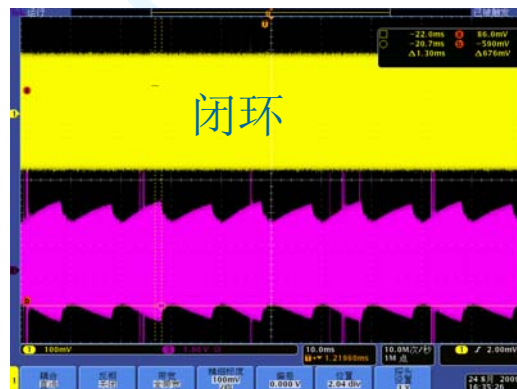
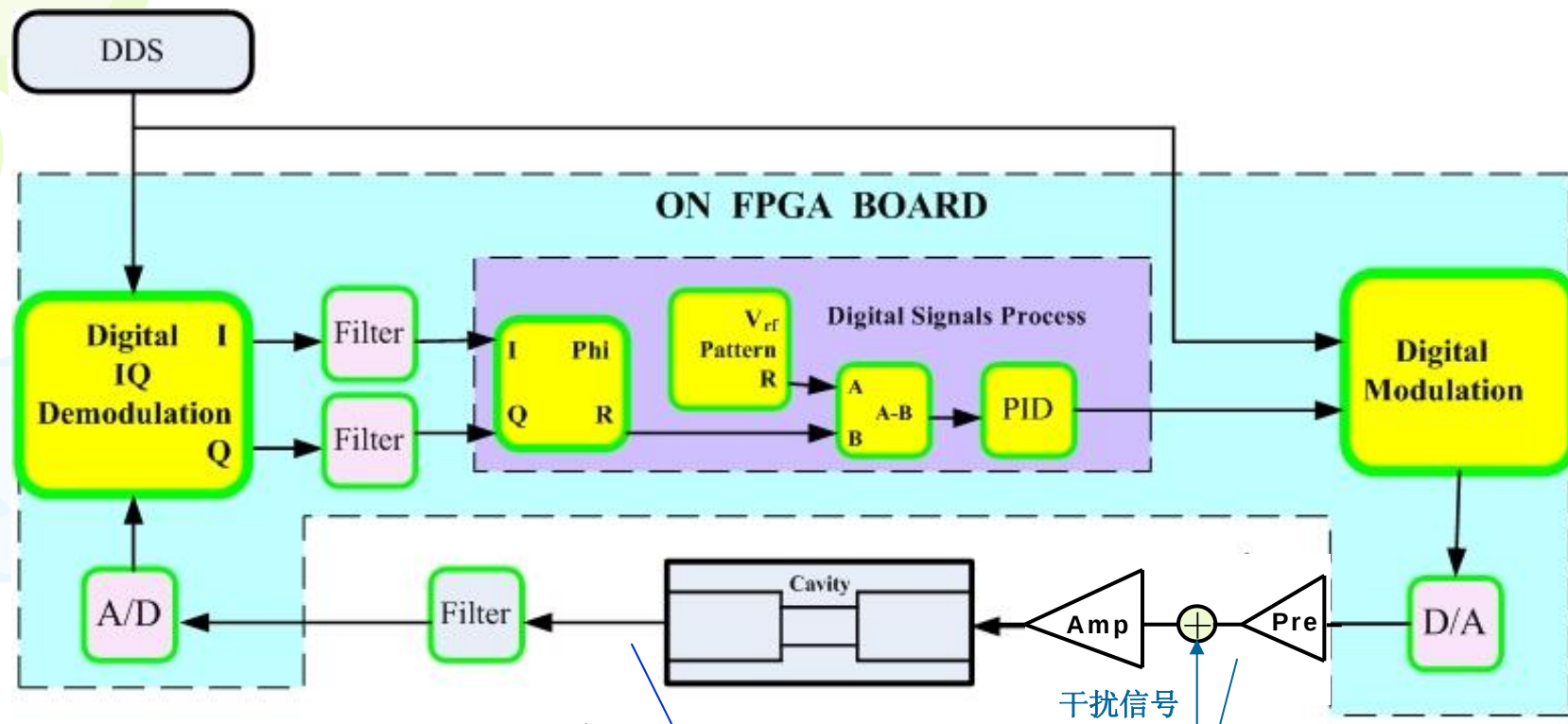
FPGA数字控制板卡



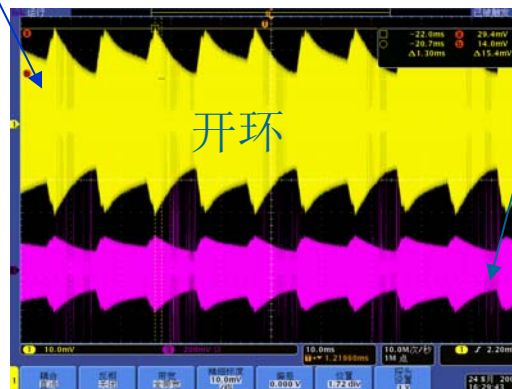
环LLRF的主要控制功能

- 高频信号发生器（DDS）
 - 产生1~2.4MHz RF工作频率
- 腔压幅度控制回路
 - 保证RF电压的幅度满足物理调束要求， $<1\%$
- 自动调谐回路
 - 保证发射机的负载（腔）处在谐振状态
- 同步相位控制回路
 - 保证束流与高频电压之间的加速相位满足物理要求，抑制束流的同步振荡， $<1^\circ$
- 束流前馈补偿：对束流负载进行补偿
- 轨道控制：根据束流运行的实际轨道对RF频率进行修正
- 安全联锁保护：设备与人身安全
- 高频本地控制：系统参数设置、系统状态显示与
- 与中控上位机实时数据通讯

腔压幅度控制回路



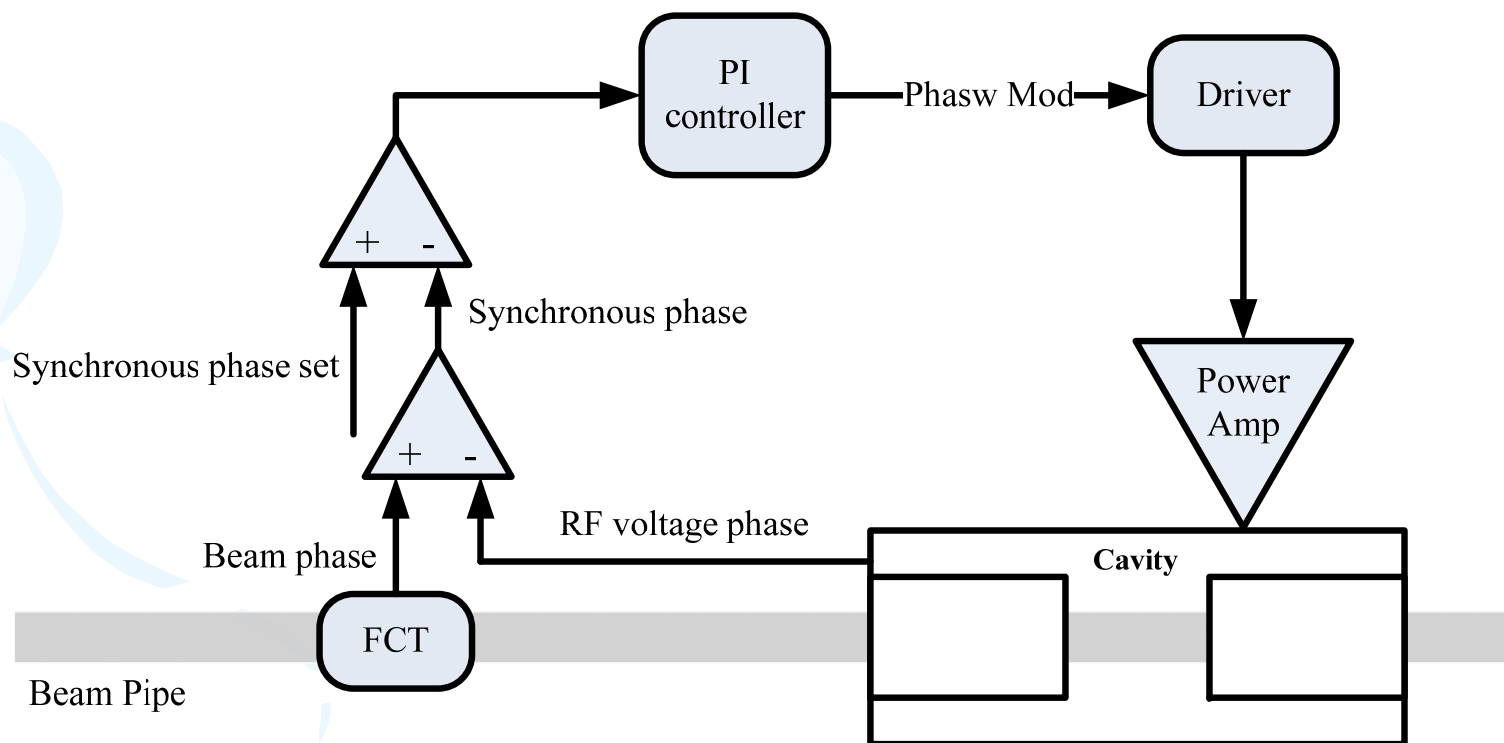
腔压



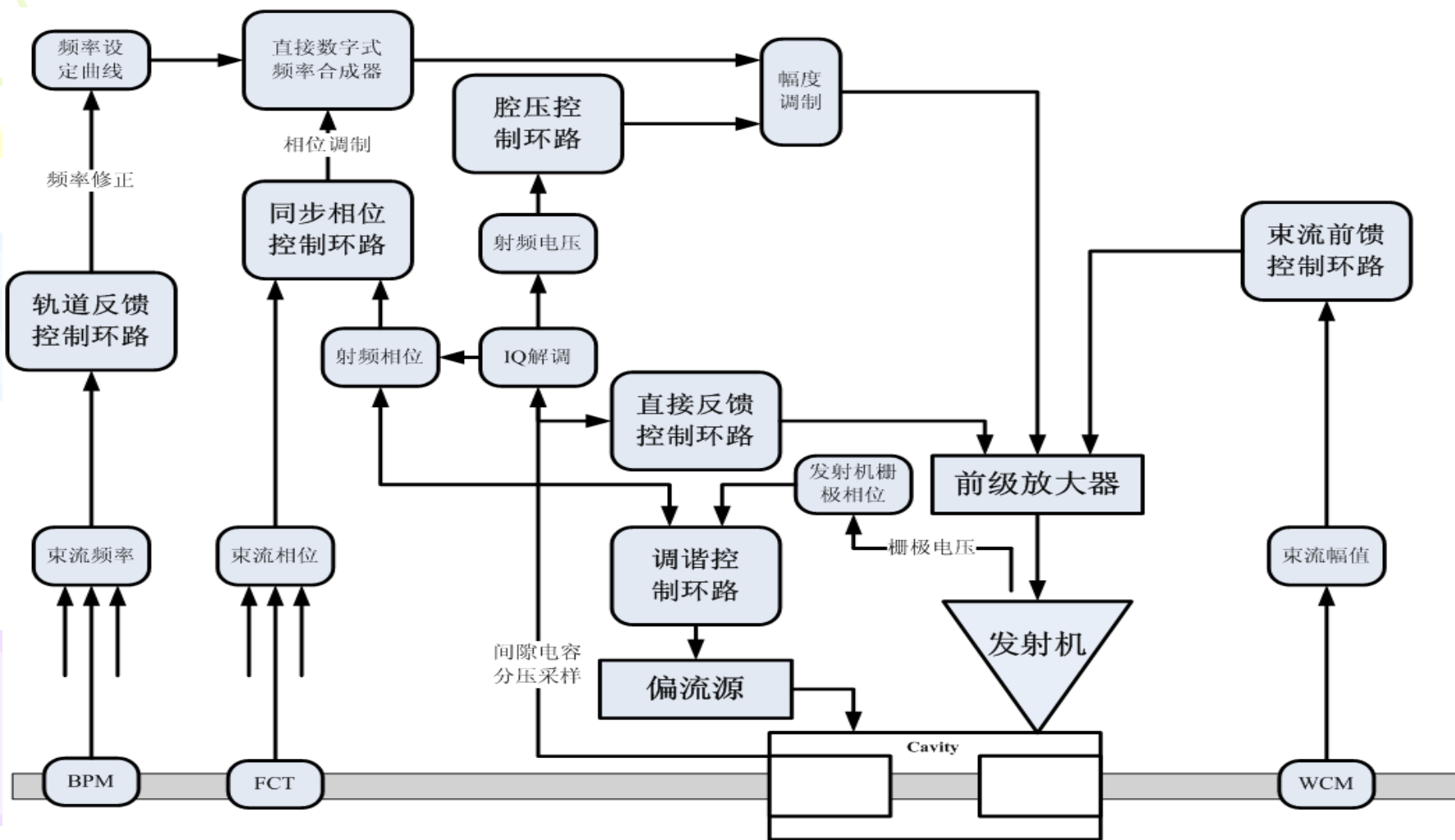
前级放大器输出波形

同步相位控制回路

将腔压与束流相位锁定在 ϕ_s



CSNS / RCS LLRF高频低电平控制系统





END