

# 上海光源储存环注入段纵向耦合阻抗的计算\*

姜伯承<sup>1,2;1)</sup> 刘桂民<sup>1</sup> 戴志敏<sup>1</sup> 赵振堂<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 对上海光源注入段的纵向耦合阻抗进行了分析计算. 注入段耦合阻抗主要来自镀膜陶瓷真空室及过渡段. 分别用解析法和Mafia数值算法对其进行了估算, 包括窄带阻抗和宽带阻抗的计算. 在对由两个过渡段形成的类腔体进行计算时, 没有发现束缚模(Trapped mode); 在对宽带阻抗的计算时, 发现它和原先人们常用的宽带共振模型有出入, 为配合对微波不稳定性的研究, 把宽带阻抗转化成了有效宽带阻抗.

**关键词** 耦合阻抗 注入段 不稳定性 束缚模

## 1 引言

上海同步辐射装置(SSRF)是我国正在建设的第三代高性能同步辐射装置. 电子能量3.5GeV, 储存环周长432m, 设计多束团运行电子流强300mA, 单束团运行电子流强5mA. 为使机器能稳定的运行、抑制不稳定性的发生, 我们需要有效地控制储存环的耦合阻抗.

耦合阻抗来自于真空室截面尺寸的突变和真空室壁的有限电导率. 本文关注的重点是纵向耦合阻抗, 其中的纵向宽带阻抗可能引起纵向微波不稳定性; 纵向窄带阻抗(这里主要指束缚模)可能会引起纵向耦合不稳定性和真空室局部过热.

## 2 镀膜陶瓷真空室耦合阻抗

注入段在有冲击磁铁的地方采用陶瓷真空室, 目的是为了消除真空室壁的涡流对快速冲击磁场的影响, 实现冲击场的快速变化. 为了给镜像电流提供一个有效通路, 减小耦合阻抗; 同时为了减小二次发射, 提高真空度, 需要在陶瓷内壁镀一层金属膜. 金属膜不能太厚, 否则不能消除涡流的影响. 我们初步设计镀TiN膜1.5 $\mu\text{m}$ .

对于镀膜结构, 用数值解法求解耦合阻抗是十

分困难的, 因为金属膜非常薄, 建模时需要将网格划地非常细, 这样计算量非常巨大. 简单的圆柱腔内壁镀膜结构的纵向耦合阻抗有解析公式可以分析(公式(1), (2), (3))<sup>[1]</sup>. 虽然上海光源陶瓷腔截面不是圆形, 但在粗估其耦合阻抗时可以借用.

$$Z_{//} = Z_{\text{met}} \frac{A + \tanh[\kappa d_m]}{1 + A \tanh[\kappa d_m]} L, \quad (1)$$

$$Z_{\text{met}} = \frac{1 - \text{isgn}(\omega)}{bc} \sqrt{\frac{|\omega|}{2\pi\sigma}} \frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{1 - \text{isgn}(\omega)}{d_s}. \quad (3)$$

其中 $L$ 表示陶瓷真空室的长度, 取0.6m;  $c$ 是光速;  $b$ 表示真空室的有效半径取20mm;  $d_m$ 是金属膜厚度;  $d_s$ 为电磁场在金属膜中的趋肤深度;  $A$ 是变量, 和电磁场在金属膜内的趋肤深度、陶瓷壁厚及其介电常数有关.

从公式(1), (2), (3)可以看出 $|Z_{//}(\omega)/n|$ 并非一个近似常数(这里 $n = \omega/\omega_0$ ,  $\omega_0$ 为回旋频率). 特别是对于SSRF储存环中束团长度只有4mm, 对应的频谱非常宽,  $|Z_{//}(\omega)/n|$ 在这样宽的频段范围内变化非常大, 因此我们需要一个更好的量来表征宽带阻抗.

在用Keil-Schnell-Boussard判据(公式(4))计算微波不稳定性阈值时, 我们将用到有效宽带阻抗

\* 上海光源工程资助

1) E-mail: jiangbocheng@sinap.ac.cn

$|Z_{//}(\omega)/n|_{\text{eff}}^{[2, 3]}$ , 其表达式见公式(5)

$$I_{\text{th}} = \frac{\sqrt{2\pi}\alpha_p \frac{E}{e} \sigma_{\varepsilon 0}^2 \sigma_{i0}}{R \left| \frac{Z}{n} \right|_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

$$\left| \frac{Z_{//}}{n} \right|_{\text{eff}} = \frac{\int | \frac{Z}{n} | h_m^2 dn}{\int h_m^2 dn}, \quad (5)$$

其中  $h_m$  是和束流谱有关的一个量,  $m$  通常取 1. 因此把宽带阻抗转化为有效宽带阻抗的形式.

通过积分运算, 得到 4 个陶瓷真空室总的有效宽带阻抗为  $0.21\text{m}\Omega$ , 其对储存环总的有效宽带阻抗贡献不大.

### 3 过渡段耦合阻抗

注入段真空室为满足注入凸轨要求, 截面比两端的真空室要大, 其两端我们计划用梯度约为 1:5 的过渡段连接. 真空室截面图如下所示, 其中小跑道形截面是注入段两端真空室, 大跑道形截面是注入段真空室, 椭圆形截面是注入管道.

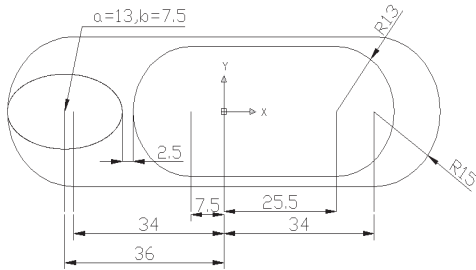


图 1 注入段截面尺寸图

过渡段是宽带阻抗的一个重要来源. 在用 Mafía T3 模块计算过渡段这种两端波导口不相等结构的尾场时, 尾场积分只能采用直接积分法算, 其计算结果不准确. 因此我们计算由两个过渡段和中间管道形成的整个结构的尾场(如图 2 所示), 其中一个过渡段上开注入孔, 过渡段长度  $0.15\text{m}$ , 中间管道长度  $4.0\text{m}$ . 这样我们还可以检验由两个过渡段形成的类腔体是否存在束缚模.

计算中, 水平剖面设为磁边界条件, 管道两端设为波导边界条件. 激励源采用高斯电流脉冲, 电流脉冲沿  $z$  轴穿过真空室, 脉冲半高宽  $0.004/c$  ( $c$  为光速), 脉冲峰值  $10^{-12}c/\text{sqrt}(2\pi)$ ; 等效于电荷量为  $1\text{pC}$ , 半高宽为  $0.004\text{m}$  高斯分布的束流. 据此计算得到的尾场势如图 3 和图 4 所示, 其尾场势是尾场函数和束流电荷

密度的卷积:

$$W(\Delta t) = \int_0^{-\infty} w(\Delta t - t)\lambda(t)cdt. \quad (6)$$

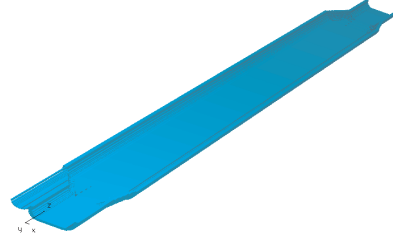


图 2 Mafía 计算建模图

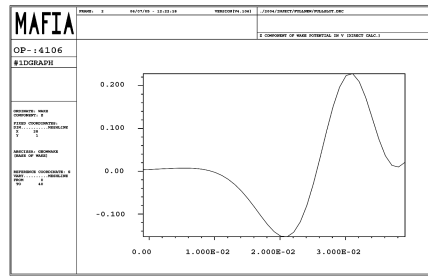


图 3 注入段短程尾场势(水平单位 m, 垂直单位 V/pC)

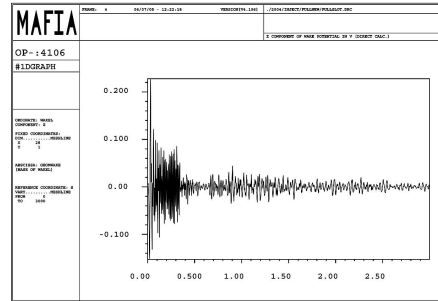


图 4 注入段长程尾场势(水平单位 m, 垂直单位 V/pC)

耦合阻抗为尾场函数的傅立叶变换, 由(6)式可得

$$Z(\omega) = \tilde{w}(t) = \frac{\tilde{W}(t)}{c\tilde{\lambda}(t)}. \quad (7)$$

通过上式对图 4 尾场势进行变换, 得到耦合阻抗的幅值如图 5 所示.

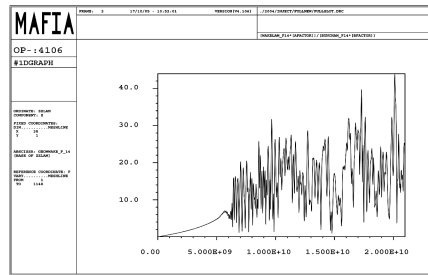


图 5 注入段耦合阻抗幅值谱图(纵坐标单位  $\Omega$ , 横坐标单位 Hz)

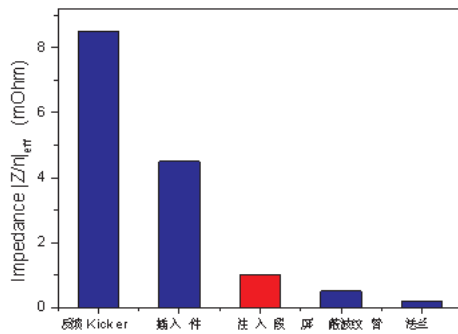


图 6 单个部件有效宽带阻抗比较图

从图4可以看出尾场衰减是比较快的,图5所示的耦合阻抗基本表现为宽带阻抗,上海光源储存环直线段真空室TM模截止频率大约在5.8GHz左右,基本可

以认定注入段不会产生束缚模.

同样,利用(5)式计算过渡段的有效宽带阻抗为  $|Z/n|_{\text{eff}} = 1\text{m}\Omega$ .

将储存环单个部件的宽带阻抗做了一个简单比较,如图6所示.从图中可以看出注入段单个部件有效宽带阻抗还是比较大的.

## 4 结论

通过上面的计算分析,我们发现镀膜陶瓷真空室的耦合阻抗很小;由过渡段形成的类腔体不会产生束缚模,其有效宽带阻抗不能忽略,但是由于数量有限,只有1个,对全环总的有效宽带阻抗(0.27Ω)贡献不大.

## 参考文献(References)

- 1 Danilov V. An Improved Impedance Model of Metallic Coatings, EPAC 2002, 1464—1466
- 2 Shaposhnikova E. Signatures of Microwave Instability, CERN-SL-99-008 HRF
- 3 Zisman M S. ZAP User's Manual. LBL University of California Berkeley. LBL-21270. 1986

# Calculation of Coupling Impedance of the Injection Section for the SSRF Storage Ring<sup>\*</sup>

JIANG Bo-Cheng<sup>1,2,1)</sup> LIU Gui-Min<sup>1</sup> DAI Zhi-Min<sup>1</sup> ZHAO Zhen-Tang<sup>1</sup>

1 (Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The longitudinal coupling impedance of the injection section for the SSRF is analyzed in this paper. The main contributions are coated ceramic chambers and the injection tapers. They are treated with the analysis method and numerical method, respectively. The broad band impedance as well as the narrow band impedance of the cavity like structure, which is formed by the two adjacent tapers is calculated. No trapped mode has been found. The broad band impedance is expressed in terms of effective broad band impedance, which is more convenient for microwave instability analysis.

**Key words** coupling-impedance, injection-section, instability, trapped-mode

<sup>\*</sup>Supported by SSRF Project

1) E-mail: jiangbocheng@sinap.ac.cn