

# 同轴线法阻抗测量平台中高频接头的研制\*

黄刚 黄文会 陈怀璧 郑曙昕 童德春 林郁正

(清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

赵振堂

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 研制宽带传输性能良好的高频接头是用同轴线法测量纵向阻抗的一个技术关键. 介绍根据同轴器件设计中的错位过渡和共平面补偿的原理, 利用MAFIA软件设计高频接头的方法. 利用该方法, 已成功地设计了一种可同时完成拉紧内导体细丝和阻抗匹配两种功能的高频接头; 优化设计后, 模拟计算结果为20GHz带宽内反射系数小于0.1, 加工件初测已达到17GHz内反射系数基本小于0.2的良好效果.

**关键词** 同轴线法 纵向阻抗 宽带匹配 MAFIA

## 1 引言

储存环中各真空部件的耦合阻抗是影响束流不稳定性的主要因素. 准确估计储存环上各部件的耦合阻抗并采用适当的方式降低耦合阻抗是建造加速器中一个重要课题. 在设计建造过程中, 储存环上部件耦合阻抗通常可以采用经验公式估算、计算机模拟计算或进行实验测量. 同轴线法是实验室测量耦合阻抗的重要手段.

同轴线法测量耦合阻抗是 M. Sands 和 J. Rees 在 1974 年首次提出的<sup>[1]</sup>. 自那以后, 国内外各大实验室都开展了类似的工作, 成功地测量了许多真空部件的阻抗值<sup>[2-6]</sup>.

同轴线法测量耦合阻抗是通过在待测件中引入细导线, 使之形成同轴线结构. 在此结构上通过电流脉冲, 模拟束团通过待测件时的情况. 当此同轴结构内导体足够细时, 两种情况在腔中激励起的场相似. 在束团系统中, 纵向电场改变跟在后面的粒子的能量, 而在同轴系统中, 纵向电场改变电流脉冲的形状. 测量电流脉冲经过同轴腔结构的形状变化就反映出束团经过待测件的能量变化, 从而可以得到结构的阻抗.

传统方法在时域进行测量, 利用示波器观察电流脉冲形状的改变. 随着仪器的发展, 也可以利用网络分析仪在频域进行测量. 测量原理见图 1. 图 1(a)表示束团经过腔结构

2001-06-29 收稿

\* 国家自然科学基金(19875065)资助

与电流通过同轴腔结构后产生的尾场相似,图 1(b)是等效电路. 待测件阻抗与系统的传输特性的有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$Z_w = 2R_0 \frac{S_{21,REF} - S_{21,DUT}}{S_{21,DUT}}$$

其中  $S_{21,DUT}$  为将待测件接入测量系统测得的值,  $S_{21,REF}$  为将校准臂接入测量系统测得的值,  $R_0$  为两端传输线的特性阻抗. 这样,待测件阻抗测量的问题就转化成了同轴系统  $S$  参数的测量的问题. 图 1(c)是同轴线法阻抗测量的装置图. 测量装置包括漂移段、匹配过渡段、拉紧接头以及矢量网络分析仪. 上面引用的公式,对  $T_2, T_2'$  参考面之间的部分适用,即假设  $T_2, T_2'$  参考面以外整个微波系统匹配传输. 而实际测量中,仪器校准在  $T_1, T_1'$  参考面上进行,则测出的值中包含了拉紧接头、匹配过渡段的传输或反射在内. 所以  $T_1 (T_1')$  参考面和  $T_2 (T_2')$  参考面之间器件宽带的传输特性和反复拆装时的重复性是测量系统中的一个重要问题. 即便可以通过特殊的校准方法,使校准面移到匹配过渡段和漂移段之间,但如果微波功率在两端接头上反射过大,仍会导致实际进入腔体的微波功率很低,使信噪比降低,从而很难真正得到由于腔引起的波形幅值的变化. 理论上,传输特性的测量可以由  $S_{11}$  或  $S_{21}$  的测量来实现,但分析表明,各种反射对  $S_{11}$  的影响比  $S_{21}$  大,所以通常采用  $S_{21}$  进行测量.<sup>[7]</sup>

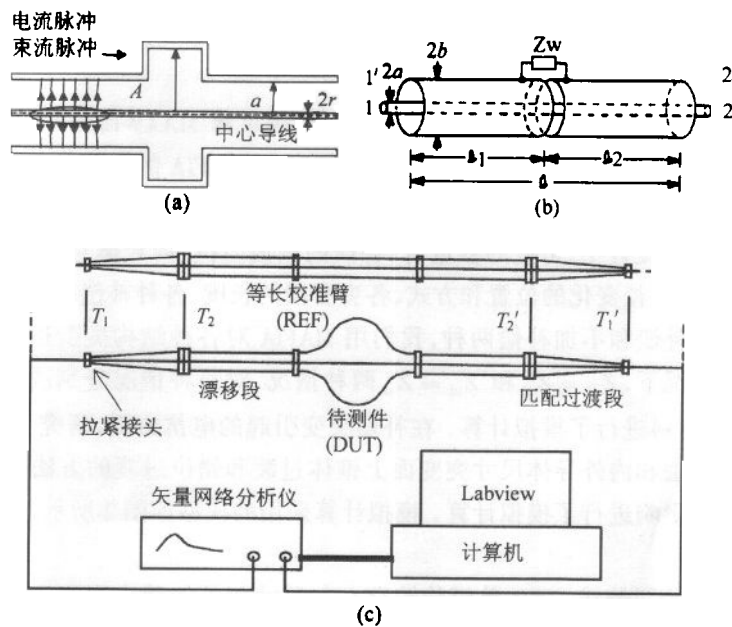


图 1 同轴线法测阻抗原理与装置

(a) 束团与电流脉冲的近似; (b) 等效电路; (c) 测量装置图.

在利用如上方法进行阻抗测量的过程中,我们认识到,要准确可靠地进行阻抗测量,必须研制满足如下要求的拉紧接头:

- (1) 拉紧接头必须能够保证内导体准确地位于中心线上. 为了减小内导体对场引起

的扰动,我们希望采用尽可能细的内导体.但是包含了匹配段、漂移段及待测结构的测量系统又很长,要保证内导线准确地位于中心轴线上,就需要拉紧接头提供一定的力量拉直内导体.

(2) 拉紧接头要在尽可能宽的频带内实现匹配传输.测量系统的匹配传输频带决定了能够可靠测得的阻抗的频率范围.我们采用网络分析仪的工作频带为 130MHz 到 20GHz,所以希望设计 20GHz 以内匹配传输的拉紧接头.

(3) 拉紧接头在分别测量校准臂和待测件时的微波传输特性必须相同.如果校准臂和待测件的测量采用同一组拉紧接头和匹配过渡段,靠拆装连接来切换,就要求拉紧接头的重复性好.如果校准臂和待测件的测量采用不同的拉紧接头和匹配过渡段,就要求两组拉紧接头的一致性要好.对接头的一致性和重复性的要求即是要求在接头反复连接过程中,不改变接头内外导体的电边界.

综上所述,设计一个同时实现机械上将内导体拉紧和电气上尽可能好的宽带传输特性,并且在与待测件反复连接过程中,不改变内外导体电边界,是保证测量结果可信的重要因素,是同轴线法测量纵向阻抗的一个技术关键.

下面介绍满足上述要求的拉紧接头的优化设计.依照优化设计,我们加工了拉紧接头,并测量了其传输特性,取得了令人满意的结果.

## 2 利用 MAFIA 进行接头设计的方法

MAFIA 是一个交互式电磁场计算的程序包,直接求解 MAXWELL 方程.该程序包采用有限积分(FIT)方法在双网格上进行计算.我们利用 MAFIA 的 T 模块计算 S 参数的功能,对接头的结构进行了模拟计算和优化设计.

在同轴高频接头设计中,可变的参量有:各段的微波阻抗、内导体直径、外导体直径、选用的介质、内外导体直径变化的位置和方式、各突变段的长度、各种补偿附加电容的方法等.通常阻抗匹配有加补偿和不加补偿两种,我们用 MAFIA 对各种结构突变进行了模拟计算,研究了不加补偿情况下,  $Z_{c1} = Z_{c2}$  和  $Z_{c1} \approx Z_{c2}$  两种情况,对每种情况分别改变内导体外径、外导体内径、介质材料进行了模拟计算.在补偿突变引起的电抗方面,研究了在介质突变面上共平面补偿的方法和内外导体尺寸突变面上锥体过渡和错位过渡的方法<sup>[8]</sup>.并就突变段长度对传输特性的影响进行了模拟计算.模拟计算采用的模型如图 2 所示.

模拟计算表明:

(1) 一定尺寸的同轴线,TEM 单模传输存在与尺寸相关的截止频率  $f_c$ ,当频率高于截止频率时,出现非 TEM 模式.对图 2(a)的结构,当  $f < f_{c2} < f_{c1}$  时,若  $Z_{c1} = Z_{c2}$ ,低频段反射很小,随着频率增高,反射略有加大,当  $f > f_{c2}$  时,反射很大.通过调节结构尺寸,可以提高  $f_{c2}$ ,仍保持  $f < f_{c2} < f_{c1}$ ,扩展工作频带;这时  $Z_{c1} \approx Z_{c2}$ ,这样低频段的反射略有增大,但只要  $Z_{c1}, Z_{c2}$  变化不大,可以得到一个总体较好的传输特性.

(2) 结构突变引起的附加电抗必须采取措施予以补偿.对介质突变的情况,共平面补偿是一个有效的方法.所谓共平面补偿就是在介质突变面上挖去一部分介质,人为引

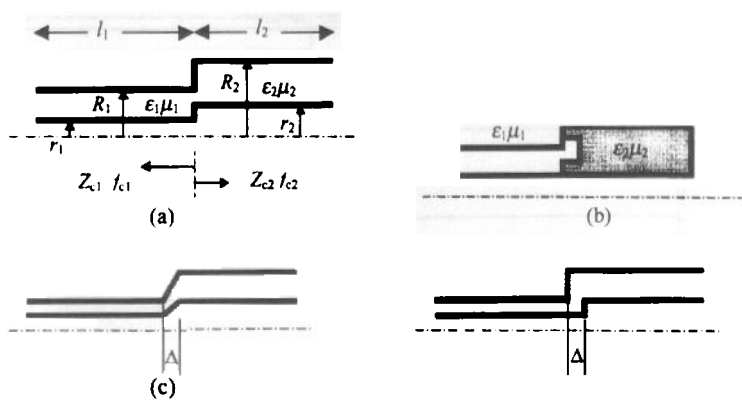


图2 模拟计算模型

- (a) 不连续性两端的内外导体直径、长度、填充的介质材料及相应的阻抗均可改变；  
 (b) 介质突变面上采用共平面补偿的方法；(c) 内外导体尺寸突变面上采用锥体过渡；  
 (d) 内外导体尺寸突变面上采用错位过渡。

入电容的补偿方法。对内外导体尺寸突变的情况，错位过渡比锥体过渡更为有效。但错位的大小  $\Delta$  必须仔细设计。

(3) 对宽带设计要求，各不连续段的长度对传输特性影响不大。

(4) 将两个优化好的不连续结构连接起来，仍然可以得到较好的传输特性。

### 3 拉紧接头的优化和实测

根据模拟计算的结果，我们设计了专用的拉紧接头，接头结构如图3所示。接头两端的尺寸是给定的，A端用标准N型接头座连接，B端与匹配过渡段连接，连接处参照N型接头，也采用外径为6.9mm，内径为3mm，阻抗为50Ω的同轴线。所以在研究单个突变引起的反射时，一端采用这个尺寸，其截止频率为18GHz。为了实现拉紧内导体的功能，并且在拉紧过程中电边界不发生变化，必须将中间一段的内导体(工件5)尺寸加大，并攻上内螺纹，而在被拉动的内导体(工件7)上套上外螺纹。这样内外导体尺寸要同时加大，如果采用等阻抗过渡，则 $f_c$ 减小，限制了工作频带，所以我们选用两段不等阻抗的连接。为了支撑接头中的内导体，采用介质填充支撑的办法。对介质突变面和尺寸突变面分别采用共平面补偿和错位过渡的方法进行补偿，补偿量的大小可以通过微调介质尺寸调整。

在拉紧接头的设计中，我们首先计算了有两个结构突变面不连续性的结构，如图3(a)，第一个结构突变面两侧，内导体尺寸不变，外导体尺寸和介质变化，保持两端特性阻抗不变，采用共平面补偿。第二个结构突变面两侧，介质材料不变，内外导体尺寸变化，两端特性阻抗变化，采用错位过渡方法补偿。将两段图3(a)结构对接起来，将中间连段尺寸加长，形成图3(b)优化设计的结构。中间连段尺寸加长可以增大拉紧时的可调范围，方便接头使用，但并不改变传输特性。利用MAFIA程序对图3(b)的模型进行模拟计算，得到反射系数如图3(c)。可以看到，在这种优化条件下，反射系数在0—20℃范围内小于0.1。

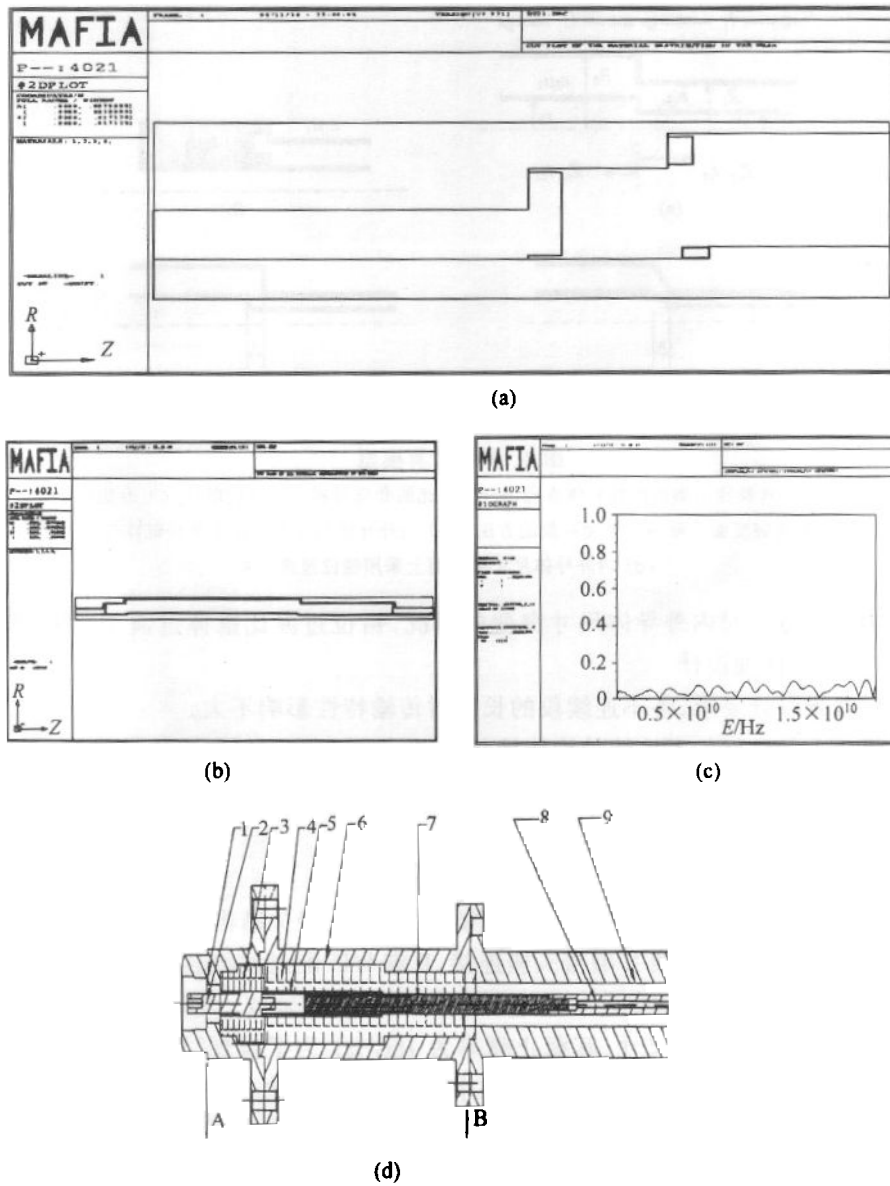


图 3 优化设计接头

(a) 有两个突变面的结构; (b) 优化设计的接头; (c)  $S_{11}$  计算结果; (d) 实际加工接头的示意图.

根据优化设计,我们加工了阻抗测量专用的微波接头,实际加工的机械示意图如图 3(d). 共平面补偿和错位过渡大小可以通过更换介质的方法调整. 图中 1 件、2 件的左侧,3 件的左侧采用的是标准 N 型接头尺寸. 5 件为一攻有内螺纹的套管,2 件右侧与之尺寸一致. 工件 7 为活动内导体,其右侧与待拉紧同轴线内导体相连,左侧套有外螺纹,与 5 件的内螺纹配合. 装配后,1,2,3,4,5,6 成为一体,就是接头的主要部分,转动它们带动 7 件向左侧运动,就实现了拉紧功能,并保证在拉紧时,电边界不变,从而传输特性的重复性

得到保证.

单个这样的专用接头的反射系数是很难进行测量的,参照《电子工业部射频连接器电压驻波比测试方法》<sup>[9]</sup>,将一对拉紧接头对接起来,测量一对接头的  $S$  参数,可计算出单个接头的  $S$  参数.测量结果见图4,图中 a 曲线是优化后接头的测量结果,b 曲线是原测量平台所用拉紧接头(称为优化前)的测量结果.可以看到,优化后的接头除个别频率点外,反射系数都小于 0.2.较优化前的接头有很大的改进.仔细调整共平面补偿和错位过渡的大小,将会得到更好的传输特性.

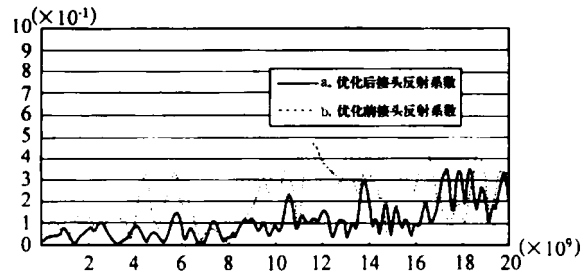


图4 改进前(a)后、(b)接头的反射系数比较

考虑拉紧接头将在阻抗测量平台中应用,我们利用矢量网络分析仪的时域功能,检查了该接头在系统中的传输性能.分别接入优化前和优化后的接头,对校准臂进行了测量,测量结果如图5.可以看出,经过改进,传输过来的时域信号幅值提高了一倍,反映到信噪比上,也随之提高一倍.

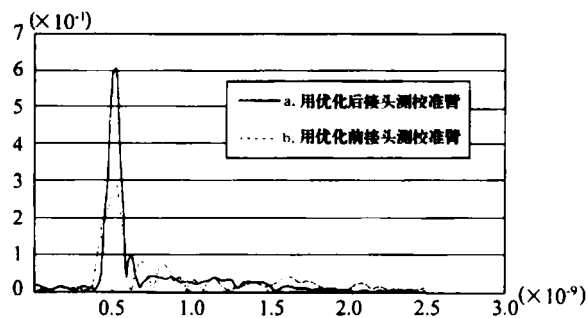


图5 改进后(a)、前(b)校准臂测量结果

## 4 结论

为了设计能同时实现内导体拉紧、阻抗匹配和较好重复性的阻抗测量用专用接头,我们利用 MAFIA 程序对微波同轴传输中的突变结构进行了模拟研究,在此基础上对拉紧接头进行了优化设计、加工和测量.模拟计算和测量得到了较好的符合.进一步改变补偿量、调配该接头的工作正在进行中.利用该接头进行的阻抗测量工作也在进行中.

## 参考文献 (References)

- 1 Sands M, Rees J. A Bench Measurement of the Energy Loss of a Stored Beam to a Cavity. PEP-95, 1974
- 2 Caspers F. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, vol. NS-32:1914—1916
- 3 Argan A, Masullo M R, Vaccaro V G. On the Sands and Rees Measurement Method of the Longitudinal Coupling Impedance. In: Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York: 1999, 1599
- 4 Kiuchi T, Izawa M, Tokumoto S et al. Evaluation of Ring Impedance of the Photon Factory Storage Ring; KEK-92-4; 1992
- 5 XU Zhong-Xiong, ZHAO Zhen-Tang, YANG Yun et al. Experimental Study on the Broadband Impedance of BEPC Storage Ring. Proceedings of 94' Particle Accelerator Physics Symposium. Particle Accelerator Society of China. 1994 (in Chinese)  
(徐中雄, 赵振堂, 杨云等. BEPC 储存环宽带阻抗的实验研究. 1994 年全国加速器物理讨论会论文集. 中国粒子加速器学会. 1994)
- 6 LENG Yong-Bin. Development and Experiment of Longitudinal Impedance Measurement System. USTC Ph. D Thesis, 1999 (in Chinese)  
(冷用斌. 纵向阻抗测量系统研制及实验. 中国科技大学博士论文 1999)
- 7 Harn H, Pedersen F. On Coaxial Wire Measurements of the Longitudinal Coupling Impedance. BNL-50870 1978
- 8 ZHENG Zhao-Jun. General Coaxial TEM Mode Passive Device. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1983. (in Chinese)  
(郑兆筠. 同轴式 TEM 模通用无源器件. 人民邮电出版社, 1983)
- 9 Standards Issued by Electric Industry Ministry. SJ2331-83. VSWR of RF Connector Test Method (in Chinese)  
(中华人民共和国电子工业部部标准 SJ2331-83 射频连接器电压驻波比测试方法)

## Developing a Special RF Connector for Coaxial Impedance Measurement Platform\*

HUANG Gang HUANG Wen-Hui CHEN Huai-Bi ZHENG Shu-Xin TONG De-Chun  
LIN Yu-Zheng

(Accelerator Laboratory, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ZHAO Zhen-Tang

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** This paper introduces the development of a special RF connector used in the Coaxial Impedance Measurement Platform. The connector has good broadband transmission performance while the structure of tightening the inner conductor included. The design is done with 3D-simulation code MAFIA, the calculated reflection factor less than 0.1 below 20GHz. The measured reflection factor of the manufactured connector is less than 0.2 below 17GHz.

**Key words** impedance measurement, coaxial line method, broadband match, MAFIA

Received 29 June 2001

\* Supported by NSFC(19875065)