

双线法测量横向阻抗中双线间距及线径的影响*

何小中, 张开志

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 根据双线法测量横向阻抗的原理, 从理论和模拟计算两方面对双线间距、线径因素造成的系统误差进行讨论。给出谐振腔近似下双线法测量横向阻抗的等效电路, 通过此等效电路对双线间距、线径因素造成的系统误差进行讨论。通过模拟计算的方法分析了双线法测量类腔体 TM_{110} 模式横向阻抗时, 不同双线间距、不同线径带来的系统误差, 模拟计算的结果与等效电路结果分析得到的定性结果一致。模拟计算分析表明, 对于管道半径为 50 mm 的类腔体结构, 线径小于 6 mm 及双线距离小于 50 mm 时, 双线间距及线径引入的横向阻抗系统误差小于 8%。

关键词: 横向阻抗; 双线法; 模拟计算; 系统误差

中图分类号: TL50 **文献标志码:** A

强流储存环、累积环、直线感应等类型加速器的设计中, 需严格控制各部件的横向耦合阻抗。直线感应加速腔、冲击磁铁等是直线感应加速器和储存环、累积环中横向阻抗的主要贡献者, 这类部件结构复杂且采用频率特性复杂的铁氧体等材料, 其横向阻抗的准确计算非常困难, 因此, 对其横向阻抗的离线测量非常重要。同轴线法是国际上广泛使用的测量阻抗的方法, 导线和待测元件/参考元件(DUT/REF)组成类同轴结构, 利用导线上通过的电脉冲信号模拟束流, 通过测量待测元件和参考元件并对两者传输参数进行比较, 从而计算得到待测元件的阻抗值。横向阻抗的测量通常采用脉冲双线法和单线法^[1-2]。脉冲双线法是利用一对离轴导线代替束流得到相同的偶极模场。该方法的优点是双线共模抑制, 退去奇次模和偶次模之间的耦合, 经过许多实验验证, 结果比较准确。双线法测量横向阻抗的系统中, 由于离轴双导线对待测部件形成了扰动, 因此实验测量的横向阻抗与真实阻抗之间会有一定差异, 双线间距及线径的大小决定了该差异的大小。理论上, 双线间距及线径越小, 实验测量结果越接近待测件的真实阻抗。但是实践中需分别对待测元件及参考元件进行测量, 由于连接接头电连接的差异以及微波传输参数测量仪器(一般为矢量网络分析仪)的多次测量重复性等因素的影响, 需要增加电连接可靠性及提高测量的信噪比, 因此实践中希望采用较大的双线间距及线径。在直线感应加速腔的横向阻抗测量中, 由于加速腔的横向阻抗很小(约 $500 \Omega/m$ ^[3]), 测量的重复性和信噪比问题变得比较突出。本文从理论及模拟计算两方面分析双线间距及线径引入的系统误差, 旨在定量地得到双线间距及线径引入的系统误差。

1 测量原理

双线法横向阻抗测量系统如图 1 所示。系统主要由待测腔体、置于待测腔体两侧的漂移管道、距离管道中心 $\pm d/2$ 的双金属线、双金属线的电缆接头和矢量网络分析仪构成。有些横向阻抗测量系统在双金属线与电缆接头之间还有阻抗匹配部件。系统在两端的电缆接头外都接有 180° 功率分配/合成器或在一端接有 180° 功率分配/合成器(此时另一端的两个电缆接头中的一个接匹配负载), 用以在双金属线上通以等幅反向电流。采用网络分析仪测出传输参数, 就可以模拟出尾场对束的作用, 进而确定横向阻抗。

文献[4-5]采用的横向阻抗定义为

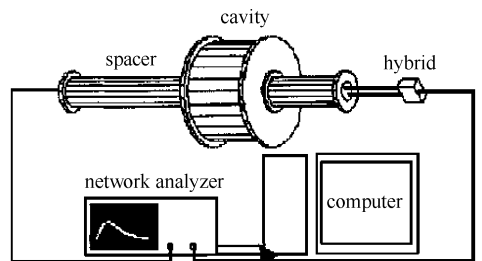


Fig. 1 Schematic of transverse impedance measurement system using dual-wire method

图 1 双线法横向阻抗测量系统

* 收稿日期: 2008-10-27; 修订日期: 2009-05-14

作者简介: 何小中(1979—), 男, 博士, 副研究员, 从事带电粒子加速器研究; siddel.he@gmail.com。

$$Z_t = \frac{cQ \left| \int B_y dz \right|^2}{2U} \tag{1}$$

式中： c 是光速； Q 是品质因子； B_y 是横向磁场； U 是腔的储能。实际上，式(1)仅在腔体轴向长度远小于波长时成立。通常应采用更一般化的定义

$$Z_t = \frac{cQ \left| \int (E_x/c - B_y) ds \right|^2}{2U} \tag{2}$$

式中： E_x 为 x 方向的横向电场；积分为对束流路径的积分。

如果待测件的轴向长度不大于管道直径，在双线法横向阻抗测量系统中，可将待测件看作一个集中阻抗 $Z^{[6]}$ 。根据待测件测量得到的微波传输参数 S_{21} 及参考元件测量得到的传输参数 $S_{21,ref}$ 可以计算得到^[6]

$$Z = 2Z_0 \left(\frac{S_{21,ref}}{S_{21}} - 1 \right) \tag{3}$$

式中： Z_0 为双线与管道构成的类同轴线的特性阻抗。

横向阻抗可表示为^[6]

$$Z_t = \frac{cZ}{\omega d^2} \tag{4}$$

式中： d 为双线间距。要计算特定模式的横向阻抗时，式(3)中 Z 应取该模式频率对应的 Z 的实部。实际上，式(3)仅在双线间距远小于管道半径时严格成立。国外实验室一般采用双线间距小于束流管道半径 10% 的设计方案。

2 双线法测量横向阻抗等效电路

双线法测量横向阻抗原理如图 2 所示。双线上通过等幅反向电流，双线与管道构成的系统中，电磁波以偶极子 TEM 模式传播，双线上的电压、电流大小相等、符号相反。当 TEM 波传至待测件时，在待测件中激励起特定模式的电磁场，待测件中的电磁场进而与双线相互作用，影响双线上 TEM 波的传播。

对于偶极子模式，在双线偏轴不远的情形下，双线内部区域的电磁场将主要是沿径向近似均匀分布的磁场分量 B_y 及横向电场分量 E_x 。这样，待测件中电磁场模式在双线两侧激励的电压差可以表示为

$$V = (V_C - V_D) - (V_A - V_B) = d \int \frac{\partial E_x}{\partial z} ds - j\omega d \int B_y ds = j\omega d \int \left(\frac{E_x}{c} - B_y \right) ds \tag{5}$$

由于待测件在双线内部区域的偶极子模式的电磁场主要是磁场分量 B_y ，因此可以将双线与待测件看作电路中的电感耦合回路，将待测件看作 RCL 并联谐振回路，那么等效电路如图 3(a) 所示，变换得到的等效电路如图 3(b) 所示。

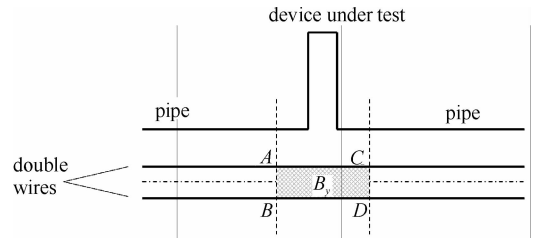


Fig. 2 Principle of transverse impedance measurement system using dual-wire method

图 2 双线法测量横向阻抗原理

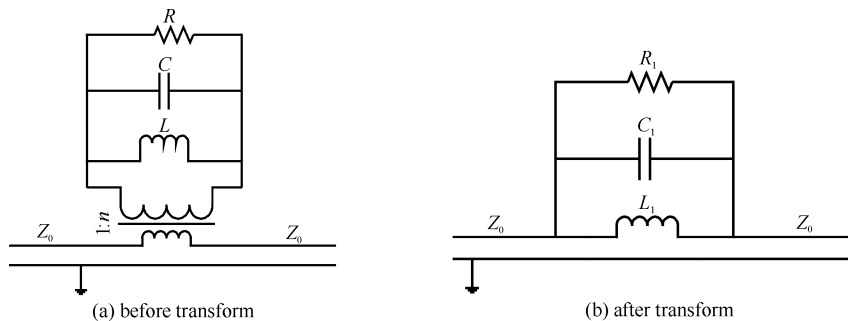


Fig. 3 Equivalent circuit diagram of transverse impedance measurement system

图 3 双线法测量横向阻抗等效电路

图 3(a) 中， R, L 和 C 满足 $\omega_0^2 LC = 1$ 及 $Q = R/\omega_0 L$ 。变换到图 3(b) 所示电感耦合变压器原边后，在小耦

合近似($n \gg 1$)下, $L_1 = n^2 L$, $C_1 = C/n^2$, $R_1 = n^2 R$, 仍有 $\omega_0^2 LC = 1$ 及 $Q = R/\omega_0 L$ 。因此, 待测件变换到双线上的集中阻抗

$$Z = \frac{1}{1/R_1 + 1/j\omega_0 L_1 + j\omega_0 C_1} = \frac{R_1}{1 + jQ(\omega_0/\omega - \omega/\omega_0)} \quad (6)$$

根据图 3(b), 可以写出待测腔储能

$$U = \frac{V^2}{2\omega_0^2 L_1} \quad (7)$$

进而利用式(4)及横向阻抗定义式(2)可建立 R_1 与横向阻抗 Z_t 之间的关系

$$R_1 = \frac{\omega_0 d^2 Z_t}{c} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得

$$Z = \frac{\omega_0 d^2 Z_t}{c[1 + jQ(\omega_0/\omega - \omega/\omega_0)]} \quad (9)$$

考虑到对待测件所作的谐振腔近似, 式(9)与广为采用的式(4)是一致的。这在一定程度上说明了所得等效电路的合理性。

在类腔体情形下, 磁场沿径向的分布将接近贝塞尔函数, 并在轴线上达到极大。随着双线间距的增加, 双线在待测件两端的电压差与式(5)计算的结果相比越来越小, 从而测量得到的横向阻抗与实际的横向阻抗相比越来越小。双线半径将通过占空比来影响测量得到的横向阻抗。在双线间距一定时, 双线半径越大, 双线之间非金属区域的面积越小, 因此双线在待测件两端的电压差与式(5)计算的结果相比越来越小, 从而测量得到的横向阻抗与实际的横向阻抗相比越来越小。

3 双线法测量横向阻抗模拟计算

对如图 4(a)所示类腔体结构进行横向阻抗测量的模拟计算(模拟计算过程与真实的测量过程相似, 因此可称之为虚拟测量), 考虑到对称性, 仅计算如图 4(b)所示的 1/4 模型。管道半径 50 mm, 类腔体半径 200 mm, 长度 40 mm。设置类腔体腔壁电导率为铜的 $1/10^6$, 使得腔体 Q 值较低, 分析横向阻抗值与实际测量工作中可比拟情形下双线线径、线距对横向阻抗测量结果的影响。模拟计算采用 HFSS 软件的 Driven Mode 完成, 模拟计算频率范围为 $0 \sim 1.2$ GHz, 计算图 4(b)中自管道一侧至另一侧的传输参数 S_{21} , 进而根据式(3)和式(4)计算横向阻抗。HFSS 本征模式计算表明, 没有双导线情形下, 腔体最低频率的模式(即 TM_{110} 模式)的谐振频率约 848 MHz, Q 值 17.3; HFSS 及 ABCI 程序^[7-8] 计算均表明腔体无损情形下, TM_{110} 模式频率为 875 MHz。腔体 Q 值 17.3 时的谐振频率比无损情形时的低 27 MHz, 可以理解为低 Q 情形下趋肤深度内的电磁场对频率扰动的结果。

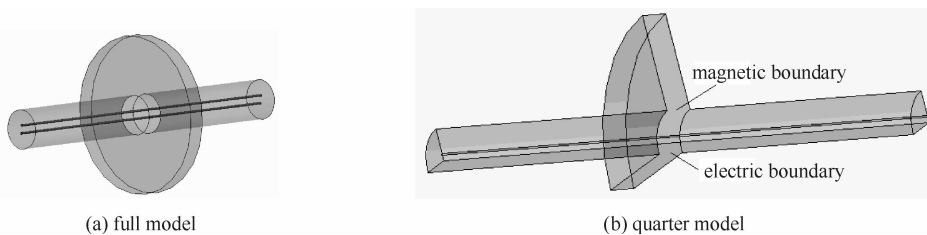


Fig. 4 Geometry structure of virtual measurement

图 4 模拟计算的几何结构

对该结构 TM_{110} 模式的 Z_t 的准确计算采取两种方式进行。第一种采用 ABCI 程序完成。ABCI 程序可以输出计算得到的尾函数, 对于这里的结构, 尾函数在激励脉冲后很快变成一个正弦波, 且不随距离增加而衰减, 表明腔体为无损腔, 尾场不衰减。通过引入一个附加的衰减 $e^{-\pi z/\lambda Q}$ 将 TM_{110} 模式的品质因数变为 Q , 进而通过对尾函数进行傅里叶变换, 得到该结构 TM_{110} 模式的 Z_t/Q 为 $444 \Omega/m$, 将其乘以 Q 值 17.3 后得到 Z_t 为 $7681 \Omega/m$ 。第二种采用 HFSS 本征模式计算, 此时腔内无双导线, 并通过式(2)计算得到低 Q 情形下的横向阻抗为 $8252 \Omega/m$ 。ABCI 计算结果与 HFSS 计算结果相差约 7%, 这种差异很可能由于 ABCI 仅能处理腔壁无损情形, 而 HFSS 计算的是腔壁损耗很大的情形。采用 HFSS 计算了无损情形下的 Z_t/Q , 计算结果为 $450 \Omega/m$, 与 ABCI 计算结果差约 1%。因此, 我们取 HFSS 计算的 $8252 \Omega/m$ 为 Q 值 17.3 情形下的准确横向阻抗值。

虚拟测量得到低 Q 情形下双线半径 1 mm、线距 20 mm 时的横向阻抗与频率关系如图 5 所示。其它双线半径、间距时的结果与此非常接近, 仅仅是横向阻抗峰值(即该模式的横向阻抗)和峰值对应频率(即该模式谐振频率)有微小的差异。虚拟测量得到双线半径为 1, 2 和 3 mm 及双线间距 20, 30, 40 和 50 mm 情形下模式的横向阻抗及谐振频率如图 6 所示。从图中可以看到, 双线间距越大, 线径越大, 虚拟测量得到的横向阻抗与理论的横向阻抗相比越小, 即双线间距和线径带来的系统误差越来越大。这与理论分析结果一致。在计算的参数范围内, 除了线半径 3 mm 双线间距 20 mm 情形外, 虚拟测量得到的横向阻抗与理论值的误差均小于 8%。另外, 在计算的参数范围内, 虚拟测量得到的模式频率与理论值的误差均小于 1%; 双线半径越大, 双线间距越大, 则频率误差越大。

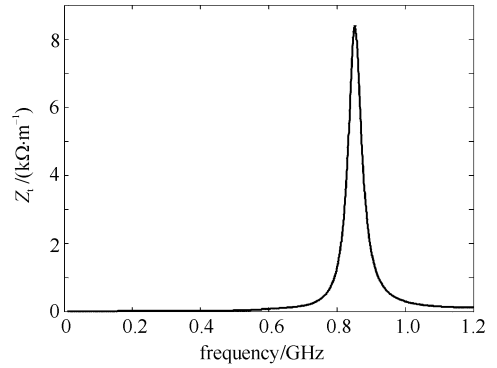
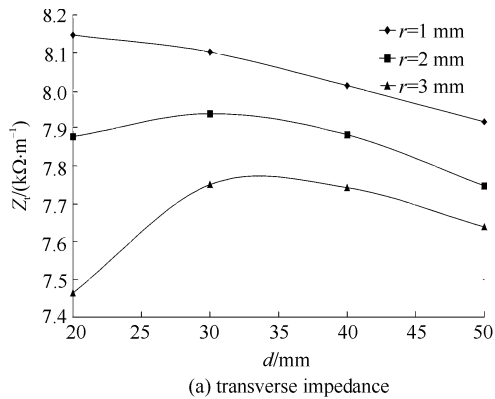
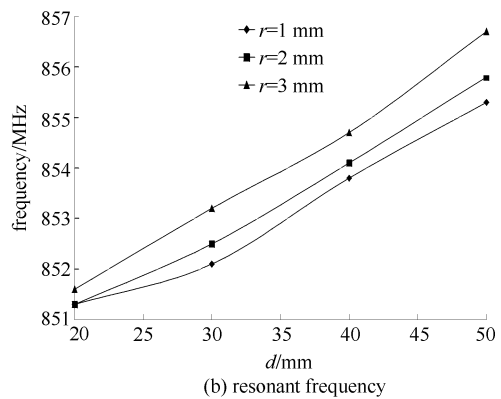


Fig. 5 Transverse impedance vs frequency

图 5 横向阻抗与频率的关系



(a) transverse impedance



(b) resonant frequency

Fig. 6 Transverse impedance and resonant frequency of TM_{110} mode at various wire diameters and distances between double wires

图 6 不同线径及双线间距下 TM_{110} 模的横向阻抗及谐振频率

4 结 论

本文给出谐振腔近似下双线法测量横向阻抗的等效电路, 得到微波传输参数 S_{21} 与横向阻抗的关系, 并采用该等效电路定性分析了双线间距、线径对横向阻抗测量结果的影响。模拟计算结果与此等效电路定性分析结果一致; 模拟计算进一步表明, 对于计算的管道直径 100 mm 的类腔体结构, 在线半径 1~3 mm 及双线间距 20~50 mm 情形(排除线半径 3 mm、双线间距 20 mm 占空比太小的情形)下, 虚拟测量得到 TM_{110} 模式的横向阻抗与理论值的误差不超过 8%, 频率与理论值的误差不超过 1%。因此, 在测量系统信噪比低及重复性较差的情况下, 可以通过加大双线间距(可达管道直径的一半)及加大双线线径(可达几 mm)来获得较高的信噪比及测量重复性, 而仍使由于大双线线径及线距带来的系统误差在 10% 以下。当然, 实际工作中需要测量的腔体与本文所计算的类腔体结构可能会有较大的差异, 对大双线线径及线距带来的系统误差还需进行具体的数值分析和实验研究。

参 考 文 献:

- [1] Baboi N, Jones R M, Bowden S G, et al. Wire measurement of impedance of an X-band accelerating structure[R]. LAC-PUB-10685, 2004.
- [2] 常利敏, 王琳, 李为民. 单线法测量横向阻抗系统设计与模拟计算[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8):1365-1368. (Chang Limin, Wang Lin, Li Weimin. Validity of coaxial wire method in impedance measurement. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8):1365-1368)
- [3] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006:100-116. (Deng Jianjun. Linear induction electron accelerator. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 100-116)
- [4] Candito M, Di Massa G, Galluccio F, et al. Transverse beam impedance measurement: a new coaxial method[C]//Proc of 1993 Part Accel Conf. 1993: 2154-2156.
- [5] 张开志, 王华岑, 章文卫, 等. 感应加速腔横向阻抗测量[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2):219-222. (Zhang Kaizhi, Wang Huacen, Zhang Wenwei, et al. Transverse impedance measurement of induction accelerating cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(2):

219-222)

- [6] Chao A W, Tigner M. Handbook of accelerator physics and engineering[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1999.
- [7] Chin Y H. User's guide for ABCI[R]. KEK Report, 2005.
- [8] Chin Y H, Takata K, Shobuda Y. ABCI progresses and plans: parallel computing and transverse Shobuda-Napoly integral[C]//Proc of 2007 Part Accel Conf. 2007: 3306-3308.

Effect of dual-wire distance and wire diameter on transverse impedance measurement using dual-wire method

He Xiaozhong, Zhang Kaizhi

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: The dual-wire method is a widely used transverse impedance measurement method. When the transverse impedance of the device under test is very small, large lateral distance between the two wires and large diameter of the wires are preferred to get large signal and thus the measurement results are reliable and reproducible. However, large lateral distance and diameter would lead to large systematic error. A numerical research using HFSS were carried out on the systematic error due to the dual-wire distance and diameter. Its result shows that, for moderately small dual-wire distance and wire diameter, the measured transverse impedance is smaller than the theoretical value calculated by ABCI and HFSS, and larger dual-wire distance and diameter lead to larger systematic error. In the case of a cavity-like structure with 50 mm pipe radius, the systematic error of transverse impedance measurement is less than 8% for the wire diameter less than 6 mm and the dual-wire distance less than 50 mm.

Key words: transverse impedance; dual-wire method; visual measurement; systematic error