

RFQ 加速器高频测量软件和分析软件开发*

傅世年

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 强流 RFQ 加速器要求严格控制束流损失和束流发射度增长,因此必须准确测量和正确分析 RFQ 加速器的场分布和模式的场分量,并使它们符合设计要求. LebView 是一个广泛应用于自动测量和数据处理的计算机软件平台,介绍在此平台上开发的 RFQ 自动测量软件 and 数据分析软件,同时给出这些软件的一些应用实例.

关键词 强流 RFQ 加速器 高频测量 LebView 程序

1 引言

强流质子直线加速器有着广泛而又重要的科学和应用价值^[1]. 它可以作为散裂中子源,为 21 世纪初中子核科学以及材料科学、航天科技、生命科学等交叉学科的发展提供平台;也可用来驱动次临界反应堆,用于洁净核能生产、嬗变核废物等;还可用于中微子工厂、 μ 子对撞机等高能物理领域. 因此,近十年来,强流质子加速器的研究正成为国际加速器界的一个重点,美国、日本、西欧、俄国以及韩国均提出了各自的强流质子直线加速器建造计划,有的已经开始建造. 在国家重点基础研究发展规划项目(即“973 计划”)的支持下,我国也已开展强流质子加速器的研究,用于洁净核能生产的目的.

现代强流质子直线加速器均以 RFQ 加速器作为低能段的加速结构,这是因为它同时具有横向聚焦、纵向聚束和加速的作用,特别适合于加速低能强流束. 因此,研制一台强流 RFQ 加速器是我们“973 计划”项目中的一项重要任务.

控制束流损失和束流发射度的增长,对于强流质子加速器来说,是一项基本而又困难的要求,RFQ 也不例外. 它要求 RFQ 加速器的场沿纵向的分布和场的横向模式分量要符合设计指标. 比如,场的平整度 $\frac{\Delta E}{E} \leq 2\%$, 二极模分量要小于 2%. 对于常用的四翼型 RFQ,要达到如此要求十分困难,必须保证加工和安装误差大约在 40 微米以内. 因此,需要对加工出来的 RFQ 结构进行高频测量,然后对测量数据进行分析处理,给出有物理意义的结果,并指导对场的调整,使场逐渐趋向设计值. 同时,高频测量也是检验 RFQ 加工

2001-12-06 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022600)和中国科学院百人计划基金资助

工序中公差大小的一种手段,人们可以比较某次加工工序前后高频测量的结果,来判断该次加工中所产生的误差,以选取适当的加工方法。

LabView 是一种基于图形数据流编程语言(即 G 语言)的程序开发平台^[2],它以直观的框图形式进行编程.它还包括一些特殊的库,用于数据获取、GPIB 和串行仪器控制、数据分析、数据显示和储存.这些功能使它特别适合用于科学实验和测量的自动化与图形化.由于这些优势,我们选择它编制了 RFQ 高频测量和调谐程序,并用于意大利国家核物理研究所一台强流 RFQ 冷模的实验中.本文将简要介绍这些程序,并以在该冷模上的实际测量和数据处理为例,说明它们的应用。

2 测量硬件与软件

2.1 测量硬件

图 1 是 RFQ 高频测量装置示意图.微机和 GPIB-ENET 均连接在网络上,网络上的微机通过该 GPIB 盒的 IP 地址与 GPIB 盒对话,GPIB 盒与网络分析仪 HP8753 的 GPIB 接口相连接,这样可在网络上实现微机与网络分析仪之间的对话,因此微机不需要在测量现场.GPIB 盒上还可以再并接一个信号发生器,它输出的脉冲可作为马达的开关触发信号,这个信号发生器同时也与微机相连接了,这样,微机可同时控制网络分析仪和马达,使它们的运行同步。

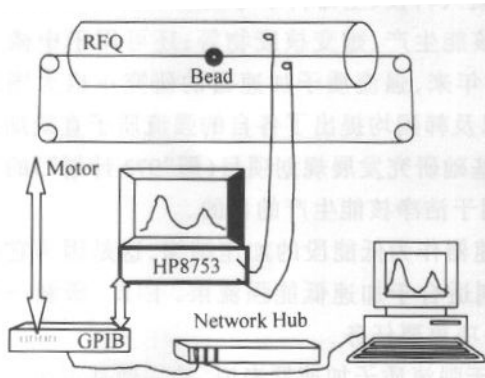


图 1 RFQ 高频自动测量装置示意图

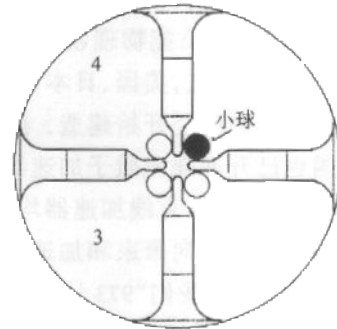


图 2 RFQ 场分布测量中的微扰小球

测量 RFQ 腔中的电场分布需采 4 个电介质小球,它们分别走过 RFQ 的 4 个象限,如图 2 所示.因此图 1 中的马达驱动系统实际上是 4 个.为保证测量的准确性,每个小球应该具有相同的体积和形状,轻贴在相邻的两个翼上,测量时只在被测象限中放入相应小球,由细尼龙线(比如钓鱼线)拉动,沿加速器方向移动。

2.2 扫频测量软件

该软件用于测量 RFQ 的频谱、有载 Q 值等.它需要事先在网络分析仪中储存一个校

准文件,程序读出该文件后,开始进行测量.首先在校准文件规定的带宽内对散射参量S21进行扫频测量,计算机屏幕上会呈现网络分析仪的扫频频谱,然后,程序会探测出各个峰的频率,以此为根据,程序收窄扫频带宽,以各峰为中心依次再次进行扫频测量,从而获得更准确的频率响应,并据此测量各峰的有载Q值.程序在计算机上列出这些峰的准确频率,并与相应的Q值和S21参数一起,储存在一个文件之中.图3是该程序在计算机屏幕上的显示窗口.由于测得的频谱实际上有噪声,为避免它们的峰计入,设有一个阈值控制输入窗口,用户可根据测量的情况确定此值,使低于此值的峰不在考虑之列.

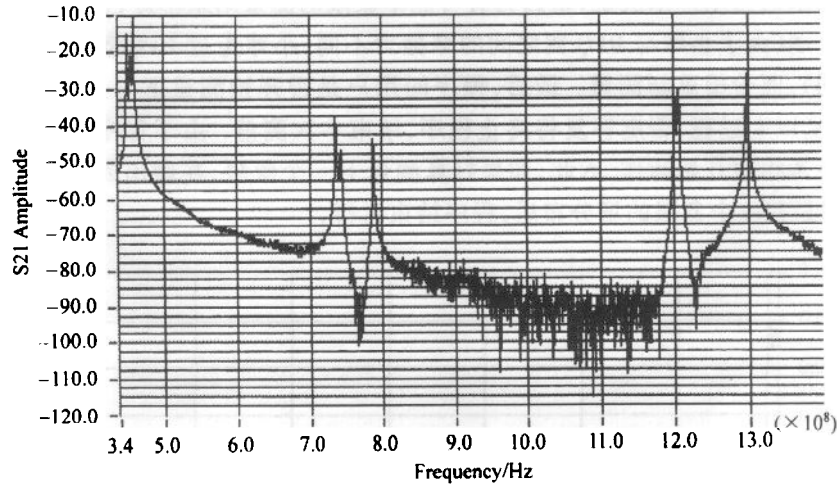


图3 扫频测量程序的显示窗口

由于频率响应的峰较多,采用程序自动测量会比手动测量快许多倍,而且能够在微机中记录下测量结果.

2.3 微扰测量软件

此程序用于小球微扰法测量RFQ的场分布.根据Slater的微扰理论^[3],电介质小球在RF腔中引起的频率变化 $\Delta\omega$ 正比于小球位置处的电场大小 E 的平方:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{cV}{U}E^2, \quad (1)$$

式中 c 为常数, V 是小球体积, U 为腔中储能.因此,在不同场强处,小球微扰引起的频率变化不同.而对于特定频率的激励,腔频率变化对应的相移近似为(当 $\Delta\phi$ 小于 5° 时):

$$\Delta\phi = 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega}. \quad (2)$$

由此,我们有 $E^2 \propto \Delta\phi$,这样,测量相移沿加速器的变化,可知场的相对变化:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{2} \frac{\delta(\Delta\phi)}{\Delta\phi}. \quad (3)$$

与上面的扫频测量程序一样,程序首先要读入另一个事先储存在网络分析仪中的校准文件,然后开始扫频测量,以找出四极模频率,并置此值为带宽等于零的中心频率,以此

频率激励 RFQ 腔体。程序开始测量每一象限的相位变化。在拖动小球前,应置小球于腔外,测量出参考相位,用于 $\Delta\phi$ 的计算。程序将把中心频率和参考相位储存在计算机中。然后,用户将小球放入腔中,此时,程序会弹出一会话窗口,问是否开始启动拖拉小球的马达,肯定回答后,网络分析仪也同时开始时间扫描。程序的显示窗口上还有一个扫描时间的控制输入口,用户可根据小球走过 RFQ 所需的时间,输入此值,以充分利用网络分析仪的精度。不过,此值应该在开始拉动小球前就输入。测量得到的相移变化曲线会显示在计算机上,如图 4 所示。然后另一个会话窗口弹出来,问是否保存测量结果。这里不直接储存测量结果而由用户来决定,是因为有可能本象限的测量结果不好,比如前面提到的扫描时间不合适(由于小球与 RFQ 翼之间的摩擦力不同,小球走过 RFQ 各象限所需时间可能有所不同),而希望重新测量。最后,程序问用户是否开始测量下一个象限,肯定答复后,程序重复以上过程,否定答复将终止程序,结束本次测量。由于程序此时是从测量下一个象限的参考相位开始运作,因此,如果打算测量下一个象限,在做出回答前应将小球置于腔外。测量完 4 个象限的场分布后,程序结束运行。

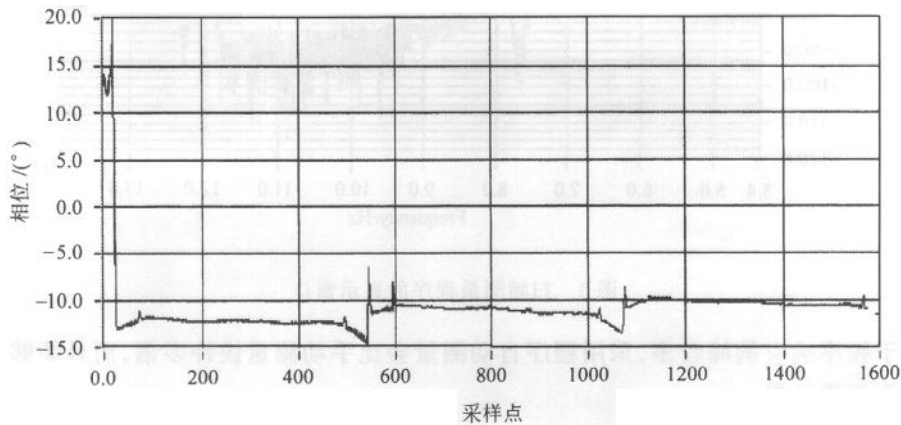


图 4 网络分析仪测得的三分段共振耦合 RFQ 腔中的相移变化曲线

3 分析软件

测量结果必须要经过一定的加工分析,以展示出被测 RFQ 的物理特性,定量地描述高频场目前的状态;不仅如此,更为重要的是,人们还需要根据目前测量和分析得到的结果,确定下一步调试中,每个调谐器适当的位置,以使高频频率和场分布接近设计值。为此目的,美国 Los Alamos 国立实验室开发了 RFQ 的分析软件 RFQTUNE。但是,不同于该实验室开发的其他 RFQ 动力学设计程序,Los Alamos 实验室并不对外发布该分析软件。因此,人们有必要开发自己的相应软件。

3.1 测量数据的处理

由于 4 个象限中的小球贴在两翼上的摩擦力不同,它们走过每个象限所花的时间也

就不同. 因此,有必要按照小球所走过的相同路程来归一化测量数据的时间轴,使4个象限中的相移曲线有相同的时间长度. 这里面涉及自动寻找相同路程的起始处和终点处标志点位置的分析 and 判断方法,比较繁琐,本文不再详述. 另外,也由于各象限小球的速度不同,象限间信号采样点并不一一对应,因此还需要对测量数据进行3次样条拟合插值,使象限间在同一位置上有对应的测量值,以便进行场分量的分析.

下面我们将会看到,在数据分析时需要求曲线的二阶导数,因此有必要去除测量信号中的噪声,使其成为二阶光滑曲线,而同时又不能过滤掉反映场分布的信息. 比较发现,高斯-克内尔光滑方法是一个较好的滤波方法. 它是一个采用高斯窗口作为滤波器窗函数的平均移动法,它的当前点具有最大的加权因子1,其附近其他所有点按高斯分布确定加权因子,进行平均. 输入信号 (x_i, y_i) 与输出信号 (x_i, Y_i) 的关系为:

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

其中加权函数 $K(t) = \frac{1}{0.37 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2(0.37)^2}\right)$. 显然,适当地选取高斯窗口的宽度 b 值,是达到过滤高频噪声、并保持原信号特性的关键.

3.2 测量数据的分析

经过信号处理后的测量数据,通过分析,可以给出有物理意义的测量结果. 根据(1), (2)两式可知,腔中沿加速器某点处的场强的平方正比于小球在此处微扰所产生的相移,由于我们只需要考虑场的相对变化,而不考虑其幅值的真实大小,因此,我们可以认为: $E_i = \sqrt{\Delta\phi_i}$. 用4个象限中的场对每个象限进行归一化处理后:

$$E_i^{nor} = \frac{E_i}{\frac{1}{4n} \sum_{q=1}^4 \sum_{j=1}^n E_{j,q}} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

所得到的结果反映了各个象限中场的倾斜程度. 另外,我们还可以得到各种模式分量的场分布:

$$\text{四极模: } E_Q = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4}, \quad (6)$$

$$\text{二极模 1: } E_{D1} = \frac{|E_1 - E_3|}{2}, \quad (7)$$

$$\text{二极模 2: } E_{D2} = \frac{|E_2 - E_4|}{2}, \quad (8)$$

$$\text{单极模: } E_M = \frac{E_1 - E_2 + E_3 - E_4}{4}, \quad (9)$$

这里的单极模实际上并不存在,它的大小反映了测量的误差.

为了从测量结果中得到下一步调试中每个调谐器的插入深度,我们需要根据场分布 $E(z)$ 导出局部频率扰动分布 $\Delta f(z)$, 然后再由频率变化对调谐器插入深度的敏感程度,

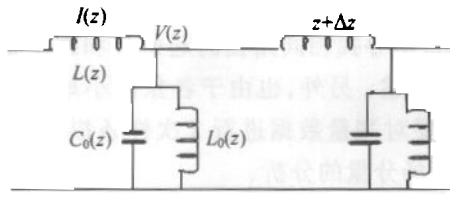


图 5 RFQ 腔四极模的传输线模型

四极模的翼间电压 V 和翼上的纵向电流 I 满足方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial z} &= -j\omega LI(z), \\ \frac{\partial I}{\partial z} &= -\left(j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_0}\right) V(z). \end{aligned} \quad (11)$$

其中, L 是单位长度的耦合电感, 它与翼上的纵向电流相关; C_0 是并联分路上单位长度的电容, L_0 是并联分路上的积分电感, 它们是由 RFQ 腔的横截面形状决定的. 由方程(10)和(11)可得翼电压的波动方程:

$$\frac{d^2 V}{dz^2} + k^2 V(z) = 0, \quad (12)$$

此处, 色散关系为:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{k^2}{LC_0},$$

其中, $\omega_0^2 = \frac{1}{C_0 L_0}$ 是腔的截止频率, 按均匀波导的色散关系, 可以认定(13)式中的 $1/LC_0$ 为真空光速的平方 c^2 . 我们要研究的是腔的横截面微扰而产生的场变化, 由此, 截止频率 ω_0 应该是纵向位置 z 的函数. 将(12)式写为

$$\frac{d^2 V}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega_0^2(z)}{c^2}\right) V(z) = 0, \quad (14)$$

对于无微扰的四极工作模, $\omega_0 = \omega$, 并且由 RFQ 腔两端 $z = 0$ 和 $z = 1$ 处的开路边界条件 $I(0) = I(1) = 0$ 可知, 电压 V 为常数. 当腔横截面有微扰时, 腔的截止频率有微小变化: $\omega_0(z) = \omega + \Delta\omega(z)$, 代入(14)式并忽略掉二阶小量, 有

$$\frac{d^2 V}{dz^2} - \frac{2\omega\Delta\omega(z)}{c^2} V(z) = 0.$$

场分布测量已经给出 $V(z)$ 函数, 并且经平滑处理后该函数二阶可导, 因此, 可以得到腔中局部频率变化的分布:

$$\Delta f(z) = \frac{c^2}{8\pi^2 f} \frac{V''(z)}{V(z)}, \quad (16)$$

最后可得 z 处的调谐器深度 $s = \Delta f(z)/x$. 由于调谐器有一定直径, 所以可采用该直径范围的平均 Δf 来确定调谐器的深度.

按照算得的各调谐器深度进行调场, 虽然可以补偿局部频率变化, 使场分布趋向设计值, 但也可能使腔的共振频率偏离所设计的四极模频率, 这也是不容许的. 因此, 还必须修正调谐器深度. 若上次测量的腔共振频率正好在设计值上, 则应给每个调谐器附加同一修正量, 使腔上的所有调谐器的本次平均调节度为零. 若测得的共振频率本身就还

来确定新的调谐器位置, 使它正好补偿调谐器位置处的 Δf . 频率变化 Δf 与调谐器深度 s 的关系 $x = \Delta f/s$ 可以由 2D 电磁场程序 SUPERFISH 来估算, 或由 3D 的 MAFIA 程序来模拟, 而直接用实验测量来确定更为准确. 下面要导出 $E(z)$ 与 $\Delta f(z)$ 之间的关系式.

根据 RFQ 的传输线模型^[4], 如图 5 所示,

与设计频率有误差,则这附加修正量中还要再包括一调谐量,使腔频率回到设计频率上.另外,还要注意,对于分段共振耦合 RFQ,要求每段都共振在同一频率上,因此,调谐器的修正量是对一段而言的,而不是 RFQ 整体.否则,虽然整体 RFQ 共振在设计频率上,但各段可能会有各自的共振频率,结果使场产生倾斜.

通过几次测量—分析—调整调谐器的循环,最后可得到满足设计要求的场分布.

4 结束语

文中介绍了用于 RFQ 高频场调谐的计算机软件,它采用 LabView 图形数据流编程语言编写.其中,测量控制软件运用虚拟仪器驱动器完成测量过程的控制、数据获取和数据显示,提高了测量的速度,有利于保证测量环境的一致性,从而提高测量精度.测量分析软件对测量数据进行各种处理后,按照 RFQ 的场特性,给出有物理意义的结果,特别是它给出下一步调谐器的适当插入深度,以使场分布趋向设计值.

这些软件已经用于意大利 LNL-INFN 一台分段共振耦合 RFQ 冷模的调试,并得到了很好的结果,我们将另文介绍.

参考文献 (References)

- 1 FANG Shou-Xian. Important Applications of the Intense Beam Proton Accelerators, Proc. of 6th China National Conference on Particle Accelerators, 2000, Yangzhou
(方守贤. 强流质子加速器的重大应用. 第六届全国粒子加速器学术年会, 2000, 扬州)
- 2 LabView User Manual. National Instruments Cooperation, 1998
- 3 Slater J C. Microwave Electronics. D. Van Nostrand Princeton, N.J., 1950, 80
- 4 Wangler T P. Principles of RF Linear Accelerator. John Wiley & Sons, Inc., 1998, 247

Software Development for the RF Measurement and Analysis of RFQ Accelerator

FU Shi-Nian

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

Abstract In a high current RFQ accelerator, it is required to tightly control the beam losses and beam emittance growth. For this reason, it is demanded to accurately measure and to correctly analyze field distribution and mode components, and eventually, to tune the RF field to reach its design values. LabView is a widely used software platform for the automatic measurement and data processing. In this paper, we present our code development on this platform for the RFQ measurement and analysis, including some applications of the codes.

Key words high current RFQ accelerator, RF measurement, LabView codes.

Received 6 December 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G1999022600) and 100 Talent Programme of CAS