

铁氧体的时间响应特性及其测量方法

严太玄

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

随着加速器技术的发展,快速型的质子同步加速器获得愈来愈多的用途而受到重视,从而对此种加速器中用的铁氧体性能提出更高的要求,其中之一是铁氧体的时间响应特性.本文对铁氧体时间响应进行了论述,提出了它的测试方法,对测量结果作了简短的讨论.

一、引 言

铁氧体由于具有磁导率随外界偏磁场值变化的特性及良好的高频损耗特性,因而被广泛地用作质子同步加速器中高频加速腔的充填材料.近年来,随着加速器技术的发展,一种具有高重复频率的质子同步加速器,因其具有某些特殊的优点而引人注目.他们或作为更高能量加速器的注入器^[1](增强器)或成为具有重要应用研究的工具^[2].但由于高重复频率的要求,对铁氧体的要求也随之提高,特别是高频损耗特性及时间响应特性.关于前者已有成熟的测量办法^[3],对于后者则是本文所要介绍的一种时间响应的测试方法.

二、铁氧体时间响应的一些特点

在高重复频率的加速器中,铁氧体工作于高偏磁变化率的条件下,因此时间响应特性将严重影响高频加速腔自动调谐回路的正常工作.在选择铁氧体材料时,对各种型号的铁氧体时间特性进行测试,发现时间响应可以从小于1秒直到几十秒.

在一个铁氧体加载的谐振腔中,如加上一突变的偏磁场 ΔH ,由于铁氧体的时间特性,谐振腔的共振频率不能立即跟随 ΔH 的变化,而有一定的时延,可以认为此时延为由三种分量所引起的综合效果^[5].

设 $f(0)$ 为初始频率,则腔频率变化为

$$f = f(0) + \Delta f(t).$$

其中

$$\Delta f(t) = \delta f_q + \delta f_N(t) - \delta f_d(t).$$

式中 δf_q 为无惰性分量,即铁氧体磁导率能立即跟随偏磁变化而无时间上的滞后.

$\delta f_N(t)$ 为粘滞分量。由于磁性物质磁化时,不但磁矩的方向将发生改变,而且为了满足最小自由能的要求,还将产生离子的扩散,使离子在晶格中重新排列,这种扩散和磁矩方向的改变并不是立即完成的,而是有时间上的滞后,才能达到新的平衡状态。如果用弛豫时间 τ 来表示,则

$$\delta f_N = \delta f_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad \delta f_\infty = \delta f_{t \rightarrow \infty}$$

实际情况下,铁氧体存在着弛豫时间谱^[4], τ 将分布于一很宽的范围内,如

$$\tau_{\min} < \tau_j < \tau_{\max}$$

则

$$\delta f_N(t) = \delta f_\infty \left[1 - \sum_{j=1}^N \alpha_j e^{-t/\tau_j} \right]$$

式中 α_j 为相应于 τ_j 的分量。

$\delta f_d(t)$ 为减落分量(disaccomodation),它与偏磁方向无关,但具有负的效应,即磁导率呈现突然增加,然后再按照一定的弛豫谱减小,由于减落分量是不可控的,它所产生的 δf_d 会引起加速器中束流的损失^[5],而且根据[6],减落分量还会使高频加速腔的频率自动调谐回路工作不稳定。

三、时间响应的测量方法

铁氧体时间响应的测量方法基于下列原理。设计一自激振荡器,振荡器的频率由铁氧体环充填的共振腔所决定,在加了一突变的 ΔH 偏磁后,铁氧体的磁导率的时间变化特性可从自激振荡器的频率变化中反映出来。如在自激振荡器后接一频率/幅度转换器,则频率的变化可转换成电压幅度的变化,借助于示波器可直接看出频率变化的全过程。

测量线路的方框原理图及线路图示于图 1 及图 2。

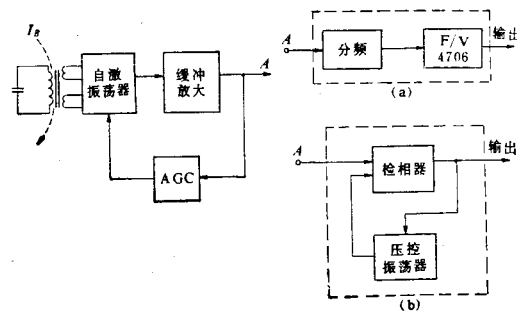


图 1 铁氧体时间响应测量方框图

测量装置即采用铁氧体 μQf 值测量设备^[3]。将欲测的铁氧体环置于同轴腔内,在环上绕有两组线圈作为自激振荡器的反馈线圈,振荡器采用场效应管组成。图 2 中所示的线路的优点是将偏磁回路与自激振荡器隔离以避免互相影响。高频讯号经过缓冲放大后即送至频率/幅度转换器。频率/幅度转换器采用过两种线路。一种直接选用 Telydyne Philbrik 的 4706 频率/幅度转换器;另一种线路为通过一检相器将自激振荡器输出讯号与

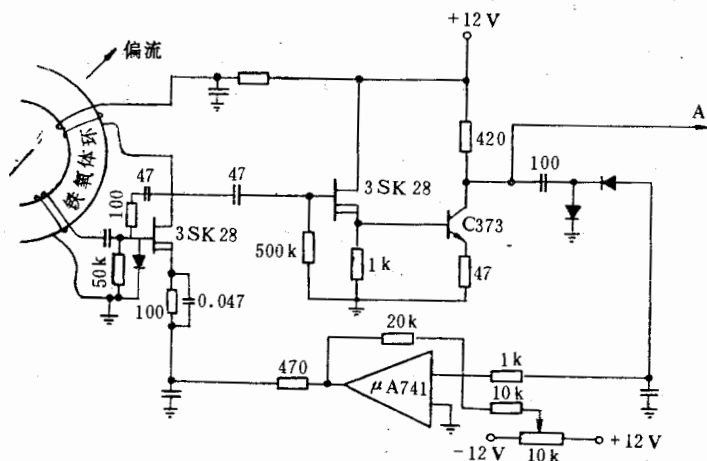


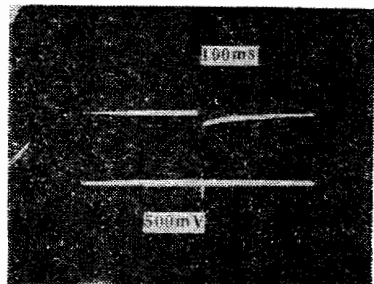
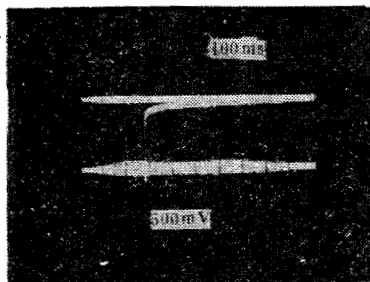
图2 自激振荡器线路图

一压控振荡器输出讯号进行检相, 检相输出的电压又控制压控振荡器, 使压控振荡器的频率跟踪自激振荡器的频率, 此时检相器的输出电压正比于自激振荡器的频率, 两种线路测出的结果是一致的。

脉冲的偏磁采用电流方波来得到, ΔI 为方波电流的幅值, I_0 为固定直流偏磁值, ΔI 的方波脉冲宽度可以任意选择, 但必须大于铁氧体磁导率达到稳定值所需的时间。必须指出, 在采用这种方法来获得的偏磁值反比于铁氧体环的半径, 因此在铁氧体环中的偏磁值不是均匀分布的。这种情况正与加速器应用时的实际情况相符, 因此测量结果可直接应用于加速器设计。

四、测量结果与讨论

图3及图4为两种不同型号铁氧体环在存贮示波器上所显示的频率/时间曲线测量

图3 MARK A $\Delta I = 400A$ 图4 MARK B $\Delta I = 400A$

结果。这些波形中皆可看到在起始部分有一负方向突变的分量。此种现象正是文献 [4] 及 [5] 中所提到的减落分量。图5及图6中减落现象消失, 这是在加了一定值的直流偏磁后的结果。图7及图8为同一种铁氧体材料, 但在不同偏磁场下的测量结果。根据测量结果可得出下列一些结论。

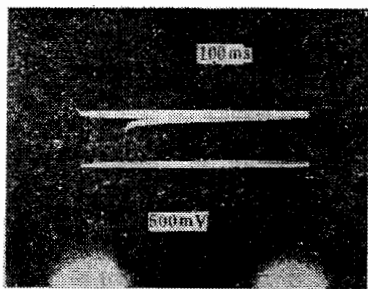


图 5 MARK A $I = I_0 + \Delta I$, $\Delta I = 300A$,
 $I_0 = 100A$, $f = 1.99 - 2.88MH$,

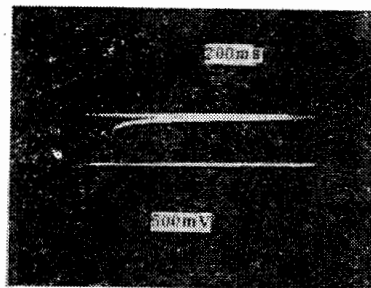


图 6 MARK B, $I = I_0 + \Delta I$, $\Delta I = 300A$
 $I_0 = 100A$, $f = 1.9 - 2.88MH$,

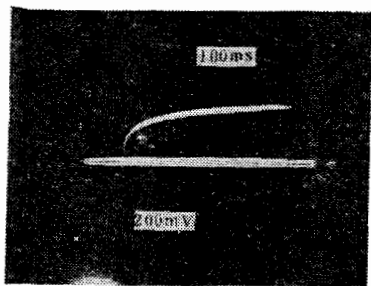


图 7 MARK A, $\Delta I = 150A$

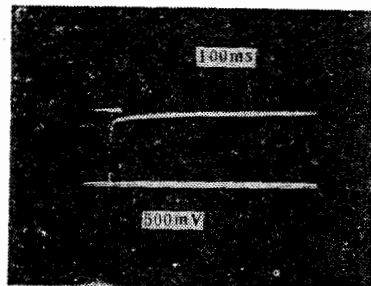


图 8 MARK A, $\Delta I = 400A$

1. 图 7 及图 8 告诉我们铁氧体的时间响应与所加的偏磁场幅值有关。幅度增加, 时滞时间减小, 但幅度大到一定程度后, 影响就较小了, 这说明时间响应与激活能有关。

2. 从测量的曲线来看, 铁氧体的时间特性的确可由三种分量组成, 因此上述的三种分量的分析是正确的。用文献[6]的办法还可以获得弛豫谱中各种不同的弛豫时间常数 τ 。

3. 一般有关铁氧体的书籍中^[7]皆以铁氧体在退磁后, 其起始磁导率随着时间而降低, 最后达到稳定值的现象称为减落, 并指出这种现象是一种可逆的陈化效应。因此铁氧体在退磁后, 经过一段时间再重新磁化时, 它的起始磁导率会先向增加的方向变化, 达到它原先的起始磁导率值后, 然后再向减小的方向变化, 这就是为什么在测量中可观察到起始部分有一负的频率变

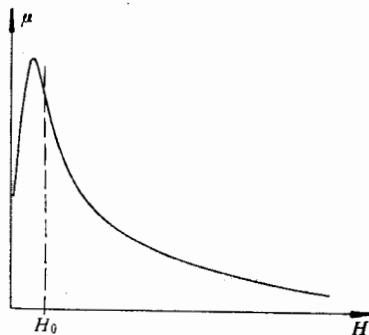


图 9 $\mu-H$ 特性曲线

化, 但在实验中发现当加一直流偏磁后, 随着直流偏磁值的增加, 减落分量逐渐减小, 当直流偏磁达到一定值后, 减落分量完全消失, 说明此种减落分量与直流偏磁值有关, 与一般讨论中所提到的铁氧体退磁后的磁导率变化不完全一致。作者认为频率在起始部分产生负变化的另一原因可能在于磁导率非线性特性引起。图 9 中为一般磁化曲线中较常见的, 在起始部分, 它的磁导率随着偏磁的增加, 先要达到一峰值后再下降。因此在加了直流偏磁后, 负的部分会逐渐减小, 当直流偏磁大于一定值后, 就可避开这一非线性区域, 从而不再出现负的部分, 此种解释正与实验结果相符。

4. 对于快速型的加速器所需的铁氧体, 它的时间响应特性的测量是十分必要的。目前世界上主要实验室仅有动态 μQf 值的测量, 只能提供动态损耗的特性。时间响应特性的测量结果则可提供较多的讯息, 它可以帮助设计者选择具有较快时间响应的铁氧体以满足高重复频率的工作条件; 此外还可选择较小减落分量的材料, 以避免过大的直流偏磁, 从而减少了偏磁电源的经费与技术上的困难, 通过对时间响应曲线的分析, 可以得到粘滞分量的比例, 后者的大小与动态损耗有密切的关系。

五、致 谢

本工作是作者于 1980 年作为日本高能物理研究所访问学者时完成的。当时得到了龟井亨及近藤素夫两位教授的大力支持及春日俊夫博士具体帮助, 铁氧体环的样品是由我国华北无线电联合器材厂试制并提供的, 特此对他们表示深切的感谢。

参 考 文 献

- [1] NAL Staff, Operating Results from NAL. IEEE NS-20, No. 3, p. 191.
- [2] A. V. Rauches et al., Commissioning of the ARGONNE Intense Pulsed Neutron Source (IPNS-1) Accelerator. IEEE NS-26, No. 3, p. 3006.
- [3] 秦玖、李建国、赵升初, 质子同步加速器用铁氧体大环特性的动态测试, 第五届全国磁学会议, 1983, 10.
- [4] L. B. Rosenbaum. Magnetic Lag and Dynamic High-frequency, Absorption in Ferrites. Soviet Physics-Solid State, Vol. 9 No. 5(1967), 1013.
- [5] Vodopyanob, et al., Features of Ferrite Applying for Automatic Tuning of the PS Accelerating Cavity. 7th Inter. Conf. on High Energy Acc., p. 418, 1969.
- [6] 严太玄、孙立博, 高能物理与核物理, 7(1983), 346.
- [7] 李荫运, 李国栋, 铁氧体物理学, 科学出版社.

THE TIME RESPONSE OF FERRITES AND IT'S MEASUREMENT

YAN TAI-XUAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Recently, a kind of proton synchrotron with high repetition rate is developed and comes into wide use. But this leads to more severe requirements on the ferrites which are used in the RF system in accelerators. One of them is the time response. In this paper, the characteristic of time response and the measurement method are presented.