

文章编号: 1007-4627(2009)03-0210-05

# 大功率高压电子加速器能量脉动测量<sup>\*</sup>

苏雅龙<sup>1,2</sup>, 曹树春<sup>1,2</sup>, 张子民<sup>1</sup>, 刘 铭<sup>1</sup>, 袁 平<sup>1, #</sup>, 肖荣庆<sup>1</sup>,  
李中平<sup>1</sup>, 王 斌<sup>3</sup>, 杨春明<sup>3</sup>, 万 明<sup>1</sup>, 张应发<sup>1</sup>, 景 漪<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 兰州科近泰基新技术有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 电子加速器能量脉动的大小是影响电子加速器稳定可靠运行的重要因素之一。利用 R-C 串联方法测量能量脉动的结果说明电子加速器的能量脉动测量存在磁场干扰。采用有限元法数值计算了电子加速器中高压发生器结构改动前后的磁场干扰值的大小, 通过对高压发生器结构的改动, 最后测量到较真实的能量脉动系数。说明用这种高压发生器的三相电子加速器所产生的能量脉动系数可以满足电子加速器正常工作的要求, 可以确定能量脉动系数太大不是加速器在强流工作时稳定性变差的主要原因。

**关键词:** 高压电子加速器; 脉动系数; 有限元法; 次级线圈

**中图分类号:** TM832

**文献标识码:** A

## 1 引言

近年来, 用于各种工业辐照的电子加速器得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。高压型电子加速器由高压发生器、加速管、电子枪、束流扫描引出系统、真空系统等组成<sup>[2]</sup>。其中, 高压发生器是电子加速器的重要核心部分。在电子加速器中, 高压发生器的高压脉动直接反映了加速器的能量脉动。高压发生器的高压脉动是指高压发生器输出电压峰峰值的 1/2 与其平均值之比。若高压脉动大, 将直接影响到束流的传输、聚焦、引出和加速器的稳定性, 导致大束流引出很困难。所以测量高压发生器的能量脉动系数对全面分析在加速器调试过程中出现的各种问题有着重要的意义。本文以应用于燃煤电厂脱硫脱硝 1.5 MeV/300 mA 大功率电子加速器<sup>[3]</sup>的高压发生器为对象, 利用 R-C 测量高压脉动的方法在空气中测量了只安装 3 组次级线圈的高压发生器在负载情况下的脉动系数, 通过与理论值的对比, 发现在加速器中杂散磁场是影响脉动系数测量的主要原因。通

过有限元方法计算高压发生器结构改进前后的磁场值, 最后测量到电子加速器运行参数为 600 kV/25 mA 时较合理的能量脉动结果。

## 2 电子加速器高压发生器的结构

三相大功率脱硫脱硝用的电子加速器装置的高压发生器采用变压器原理, 利用调压器供电。高压发生器由一组三相初级线圈(28 匝)和 45 组三相次级线圈(3000 匝)构成。把每组次级线圈上耦合到的高压进行三相全波整流输出后, 和外围两个相应的大均压环连接。再将各级大均压环上整流后的直流高压级联叠加输出至负载。45 组三相次级线圈同心地放在三相绕有初级线圈铁芯的外侧。三相高压发生器采用三相闭合磁路。大均压环既起到均匀电场的作用, 又起到了级联每层直流高压的作用。高压发生器所有的部件都放置在充有 SF<sub>6</sub> 气体的钢筒内。在高压发生器电位的最高处用串有高压分压电阻的小均压环将电位逐渐降低到地电位(钢桶的上

\* 收稿日期: 2009-01-06; 修改日期: 2009-03-05

\* 基金项目: 国家科技攻关计划(2002BA406B01)

作者简介: 苏雅龙(1972-), 男(汉族), 甘肃靖远人, 高级工程师, 博士研究生, 从事大功率电子加速器研制;

E-mail: suyalong@impcas.ac.cn

# 通讯联系人: 袁平, E-mail: yuangep@impcas.ac.cn

部)。高压发生器结构图见图 1。

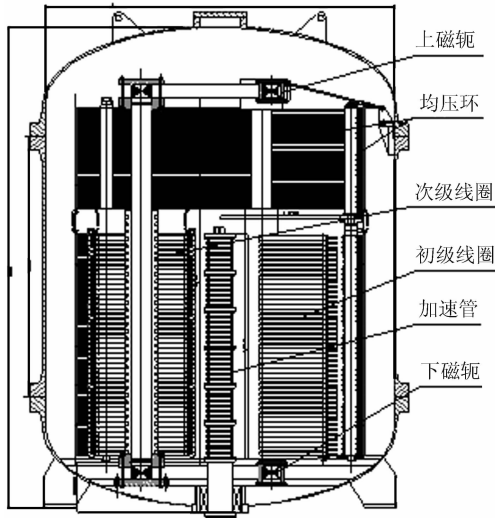


图 1 高压发生器结构示意图

### 3 问题的提出

高压纹波脉动系数定义<sup>[4]</sup>为

$$S = \frac{\delta u}{U_d},$$

式中

$$\delta u = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{2},$$

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt,$$

$\delta u$  表示输出电压的脉动幅值或纹波,  $U_d$  表示直流高压的算术平均值。

在电子加速器内部, 通常用高压电阻分压器的方法测量能量脉动。将能量分压电阻板竖直地放置在 A 相和 B 相次级线圈之间的间隙中。能量分压电阻板由 196 个 300 M $\Omega$  的高压电阻和 240 k $\Omega$  的测量电阻串联构成, 安装在有机玻璃板上。在能量分压板的顶部将高压电极和高压电阻的一端接在一起, 底部将测量电阻和钢筒底部的地接在一起。将示波器接在测量电阻的两端, 以测量能量的波形。电子加速器工作能量为 800 keV 时测量到的能量波形见图 2。4 条曲线分别对应电子束负载为 0, 5,

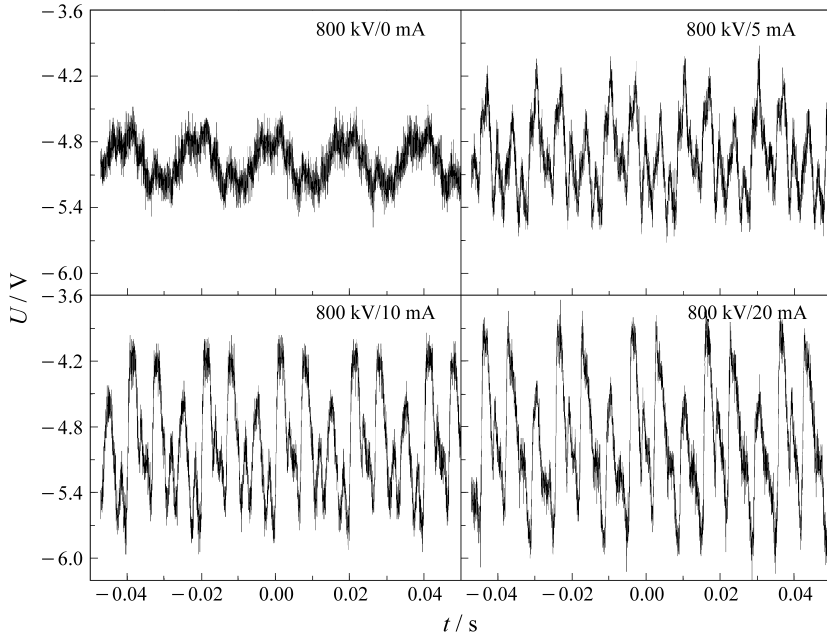


图 2 加速器能量脉动波形随负载的变化

10 和 20 mA 的能量波形。由图可见, 能量在 800 keV 时, 随着束流增大到 20 mA, 能量脉动系数随之增大, 可达 30%。在实验中, 随着束流的继续增大, 脉动系数还在增大。依次推算, 当束流增大到 300 mA 时, 能量脉动系数会增加很大。对这样大

的能量脉动系数, 电子加速器无法工作。为此有必要做模拟测量实验, 以验证能量脉动系数的大小。

### 4 用 R-C 法测量假负载时的能量脉动

为降低高压发生器的输出电压, 将 45 层次级

线圈减少到 3 层次级线圈，磁路仍然闭合。在空气中可以输出 10 和 30 kV 的高压，接电阻负载模拟电子加速器的电子束负载，利用高压电容器和高压电阻串联(R-C)的方法测量能量脉动。串联在测量电路中的高压电容器可以把脉动电压  $\delta U$  和直流电压  $U$  隔开，示波器测量到的是经过分压后的  $\delta U$ 。由于隔离了直流分量，实际信号与测量信号的分压比可以选得小些，测量结果的准确性可以进一步提高。实际测量见图 3。

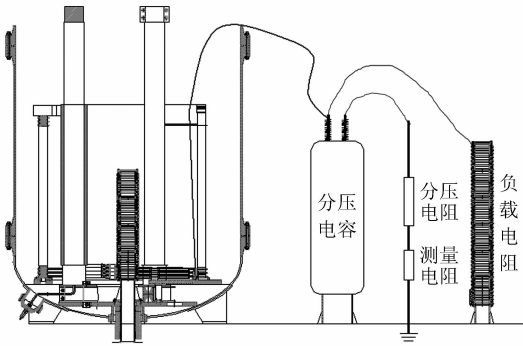


图 3 R-C 串联测量高压脉动图

分压比为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} = \frac{(R + Z_c)}{R} = \frac{(1 + R\omega C)}{R\omega C} \quad (1)$$

如果分压电容  $C$  上无脉动压降，则

$$\tilde{u}_2 = u_1(t) - \bar{u} = \tilde{u}_1, \quad (2)$$

$$\frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_2} = 1, \quad (3)$$

即

$$\frac{(1 + R\omega C)}{R\omega C} = 1. \quad (4)$$

要使(4)式成立，必须满足

$$R\omega C \gg 1, \quad (5)$$

取  $R=10 \text{ M}\Omega$ ,  $C=0.02 \text{ }\mu\text{F}$ , 三相电子加速器在假负载情况下分别工作在 10 和 30 kV 时，测量的结果显示能量脉动系数随着负载电流的增大几乎保持不变，且工作参数为 30 kV/140 mA 时电压的脉动系数约为 15%。从 R-C 方法测量和能量分压板测量的结果来看，实际能量脉动系数并没有随束流的增大而增大，而是因为电子加速器工作时，用能

量分压板测量脉动系数存在一定的干扰所致。由于在电子加速器中存在带铁心的初级线圈和次级线圈，能量测量分压板受到杂散磁场的干扰很大，所以造成加速器能量脉动的测量有很大的干扰误差。

## 5 有限元计算磁场分布及加速器能量脉动测量结果

大功率电子加速器的结构基本已经定型，不可能做大的改动。要减小杂散磁场对能量测量的干扰，就要使能量测量回路尽可能地远离初级线圈和次级线圈。较可能的方案是将原次级线圈和小均压环调换位置。也就是每相的次级线圈放置在小均压环的上面，就减小了次级线圈对能量分压板及测量电阻的影响。改变后的高压发生器结构图见图 4。

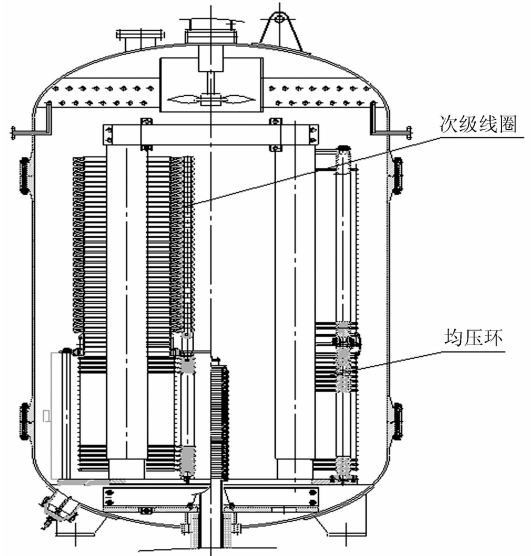


图 4 改动后的高压发生器结构示意图

在对高压发生器的结构实施改动之前，先用 ANSYS 软件对改动前后的两种方案进行磁场计算，用数值模拟的结果进一步验证改造方案的可行性。由于这种类型的高压发生器是三相变压器类型，所以只取其中一相铁心、初级线圈和次级线圈作为模型对象。图 5 给出了高压发生器改动前用有限元分析软件模拟计算的电子加速器能量分压板及测量电阻附近的磁场分布图。在电子束为 100 mA 时，能量分压板附近磁场值的计算结果约为 0.0524 T。图 6 给出了电子加速器结构改变后有限元分析的结果。电子束为 100 mA 时，能量分压板附近磁场值的计算结果为 0.0306 T。

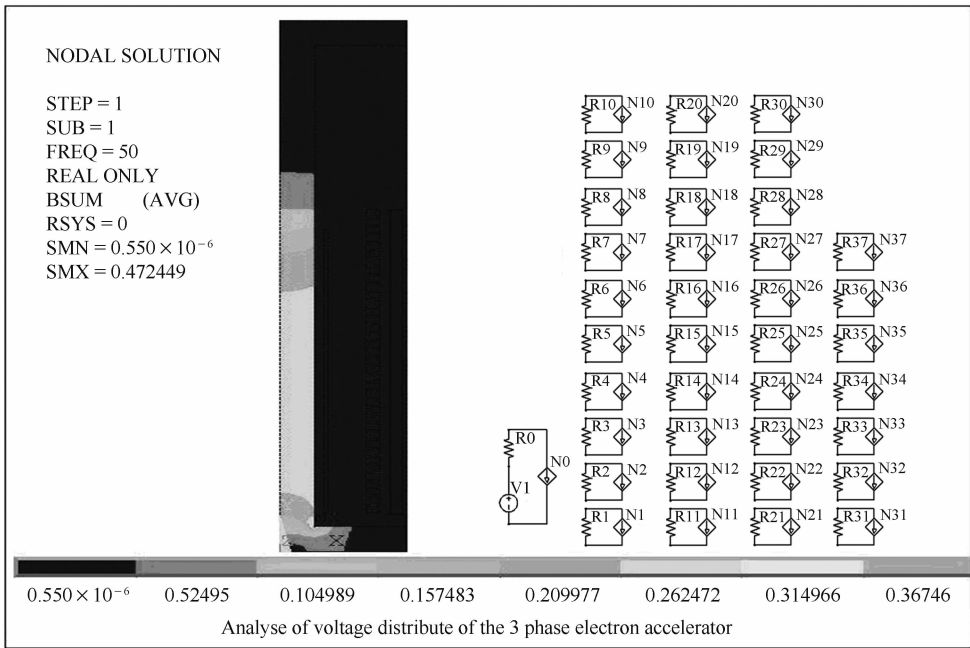


图 5 高压发生器改动前磁场值的数值计算

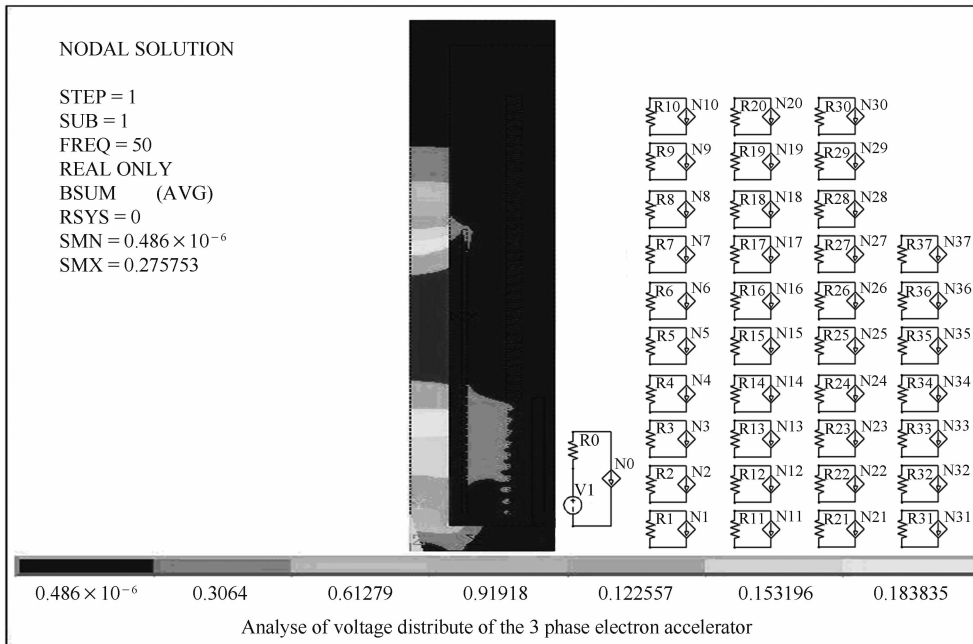


图 6 高压发生器改动后磁场值的数值计算

按照改造方案，对高压发生器的结构改变后电子加速器工作在 600 keV 时，能量分压板测量到的能量脉动系数随束流负载的增大基本保持不变。600 keV/25 mA 能量脉动系数的测量结果约为 9%。基本符合三相全波整流电路的电压脉动系数理论值 7.5%。这样的能量脉动系数在电子加速器正常工作可接受的范围以内。

## 6 结论

高压发生器在空气中分别工作在 10 和 30 kV 时，利用 R-C 方法测量假负载能量脉动的实验和用有限元法分析能量分压板附近的磁场干扰的结果，确定次级线圈的杂散磁场干扰是造成用能量分压板测量能量脉动系数过大的主要因素。通过对电子加速器结构的改进，测量到较精确的能量脉动系数，

确定能量脉动系数太大不是电子加速器在强流时稳定性差的主要原因。为进一步分析大功率电子加速器在大束流工作状态不稳定的原因奠定基础。

### 参考文献 (References):

- [1] Abramyan E A. Application of Industrial Electron Accelerator and Radiation Processing. Beijing: Atomic Energy Press, 1996, 2: 122—142.
- [2] Xu Jianming. Principle of Accelerator. Beijing: Science Press, 1981, 2: 15—82(in Chinese).  
(徐建铭. 加速器原理. 北京: 科学出版社, 1981, 2: 1—82.)
- [3] Yin Xuejun. The Design of High Power Electron Accelerator

and Investigation of Beam Transport in Accelerating Tube (Doctoral Thesis). Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004, 12—35(in Chinese).

(殷学军. 大功率电子加速器的预研与束流传输的研究(博士学位论文). 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2004, 12—35.)

- [4] Shi Wei, Qiu Yuchang, Zhang Qiaogeng. High Voltage Engineering. Beijing: China Mechine Press, 2006, 1:106—110(in Chinese).  
(施围, 邱毓昌, 张乔根编著. 高电压工程基础. 北京: 机械工业出版社, 2006, 1: 106—110.)
- [5] Li Xiaojian. Yunnan Electric Power, 2006, 34(12): 21(in Chinese).  
(李小建. 云南电力技术, 2006, 34(12): 21.)

## Ripple Measurement for High Power Electron Accelerator<sup>\*</sup>

SU Ya-long<sup>1, 2</sup>, CAO Shu-chun<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zi-min<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, YUAN Ping<sup>1, #</sup>, XIAO Rong-qing<sup>1</sup>,

LI Zhong-ping<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>, YANG Chong-min<sup>3</sup>, WAN Min<sup>1</sup>, ZHANG Yin-fa<sup>1</sup>, JIN Yi<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3 *Lanzhou Kejin Taiji Corporation, LTD, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** The Ripple coefficient is one of the important factor for the stability of industrial high voltage electron accelerator. Accelerator can't work well when the ripple coefficient is high. The increment of the measured ripple values becomes very large with the increase of the accelerator load current. From the simulation with finite element method of high voltage generator, we found that the leakage magnetic field was the most important reason for the results of ripple measurement. The ripple was measured after changing the frame of the high voltage generator to suppress the leakage magnetic field. It can be concluded that the actual value is acceptable to the accelerator and the measured high ripple coefficient is not the reason of malfunction of this high power electron accelerator.

**Key words:** high voltage electron accelerator; ripple coefficient; finite element method; secondary coil

\* **Received date:** 6 Jan. 2009; **Revised date:** 5 Mar. 2009

\* **Foundation item:** National Science-tech Tackle Key Project of China(2002BA406B01)

# **Corresponding author:** Yuan Ping, E-mail: yuanp@impcas.ac.cn