

基于 FFT 的超低纹波检测系统实验研究

李开湖 郭春龙 李 瑞 李德明
(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201204)

摘要 超低纹波检测是超低纹波电源研制的重要条件, 新型质子医疗加速器装置对其励磁电源的输出电流纹波提出了 $<10^{-6}$ 的性能指标要求。本文以数字化电源控制器为基础, 提出了一种超低纹波电流检测方法, 设计搭建了一个超低纹波检测系统, 并进行了比对验证, 最后利用此系统对典型的加速器磁铁电源进行了实际测试。测试和比对数据表明, 此检测系统能够用于 10^{-6} 数量级纹波电流的检测。

关键词 质子医疗加速器, 超低纹波, 纹波电流检测, 快速傅里叶变换

中图分类号 TL503.5

加速器磁铁电源对输出电流纹波有较高的性能指标要求(10^{-5} – 10^{-3})^[1-3], 而影响磁场性能的纹波成分主要是工频纹波及其倍频。进一步降低电流纹波, 特别是降低弯转磁铁等大功率电源的纹波, 有利于进一步改善加速器的束流性能^[1,4]。我们对正在研制的新型质子医疗加速器^[5]的励磁电源输出电流纹波提出了 $<10^{-6}$ 的性能指标要求, 这一指标的提出给磁铁电源的设计和纹波电流的检测提出了新的挑战。

本文旨在设计并搭建一个针对 1 kHz 以下频率纹波, 能检测到 10^{-6} 数量级纹波电流的检测系统, 以满足电流纹波检测指标要求。纹波检测系统由 DCCT(零磁通直流电流传感器)、高精度数据采集系统、计算机数据分析系统等组成, 通过 FFT 分析方式实现超低纹波电流检测。

1 超低纹波电流检测方法

加速器磁铁电源的输出电流及其纹波通常使用

示波器进行测量和观察, 但要观察 10^{-6} 数量级的电流纹波, 采用示波器难以实现。为了观测 10^{-6} 数量级的电流纹波, 本文介绍一种基于数字化方式的电流纹波检测方法: 待测磁铁电源输出的电流经 UTRASTAB 866-600I 电流型 DCCT 和精密电阻取样变换后接入高精度 ADC 作 A/D 变换, 再经 DSP 处理后, 通过串口将处理过的电流数据传送至计算机分析系统, 采用计算机对数据进行 FFT 频谱分析, 最终获得加速器磁铁电源输出电流的纹波数据。

2 超低纹波电流检测系统

本文设计的超低纹波电流检测系统主要由 UTRASTAB 866-600I 电流型 DCCT 和精密电阻构成的电流测量变换部分、高精度的数据采集与处理系统、计算机数据分析系统和辅助电源等组成(见图 1)。

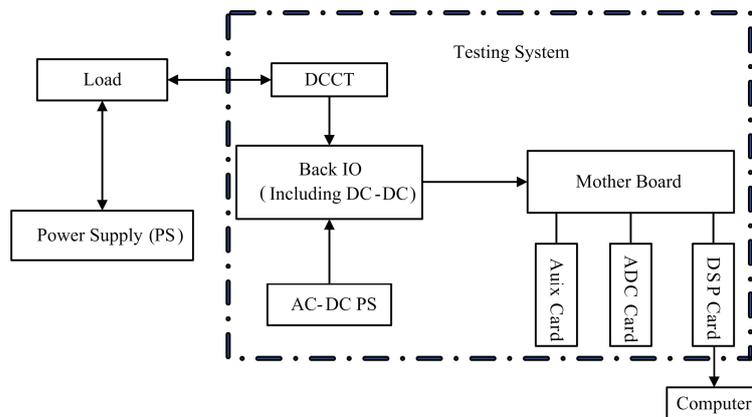


图 1 超低纹波电流检测系统组成框图

Fig.1 Block diagram of the testing system on ultra-low current ripple observation.

第一作者: 李开湖, 男, 1986 年出生, 2009 年毕业于黄山学院, 现为中国科学院上海应用物理研究所硕士研究生, 专业: 信号与信息处理
收稿日期: 2012-08-27, 修回日期: 2013-01-09

与负载相连的待测电源输出电流通过电流型 DCCT 测量变换后到达高精度数据采集与处理系统(含辅助电源卡、模数转换卡、控制卡)。待测电流经过采样处理后通过串口通讯线上传至计算机, 然后利用计算机对输入的数字信号进行 FFT 分析, 最终得到待测电流的纹波频谱图。

为有效抑制空间干扰, 图 1 中点画线内部的部件用一个 3U 机箱封装完整, 与外部器件的连接线通过机箱上的接口引出, 与计算机相连的串口通讯线采用屏蔽电缆线。

依照图 1 所示的硬件组成搭建了一套纹波电流

检测系统, 电流检测范围为 0–300 A, 即被测试的电源最大直流输出电流为 300 A。本文所指纹波幅度测试性能均以 300 A 为参照。

3 超低纹波电流检测系统的噪声本底

检测系统上电后, 在没有接通电源的情况下, 测量此电流纹波检测系统的噪声本底。得到此检测系统的本底数据后, 再运用 MATLAB 软件对这些数据作 FFT 分析, 得到检测系统的本底电流纹波的典型频谱图(如图 2)。

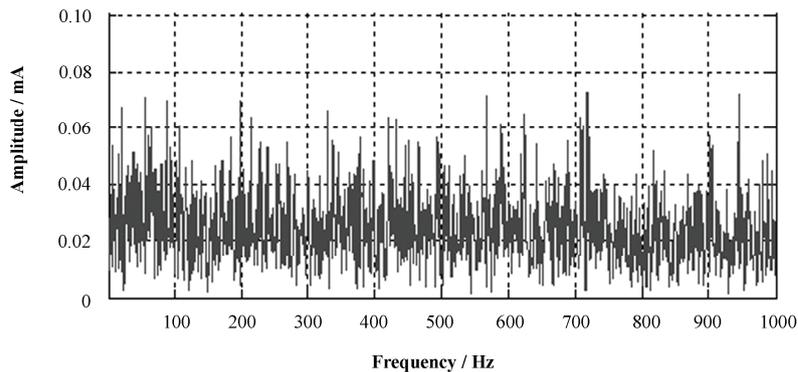


图 2 超低纹波电流检测系统的本底噪声频谱图(采样间隔 140 μ s)
Fig.2 Self testing spectrum of the ripple current observation system(step size 140 μ s).

由图 2 可以看出, 在 1000 Hz 以下频段范围内的本底电流纹波幅值均在 0.1 mA 以下, 故此检测系统本底噪声的幅度分辨率为:

$$V_{\text{res}} = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{300} \times 100\% = 0.33 \times 10^{-6} \quad (1)$$

系统可观测的最小纹波幅度为 0.1 mA, 相对于 300 A 的测量范围为 0.33×10^{-6} 。

系统本底纹波测试是在室温环境下完成的, FFT 采样点数 $N=8192$, 采样步长 Size 可调, 为 20 μ s 的整数倍。计算得到不同采样间隔对应的 FFT 变换的基波频率为:

$$F_{\text{res}} = 1/(n \times 20 \times 10^{-6} \times 8192) = 6.10 / n (\text{Hz}) \quad (2)$$

当采样间隔为 20 μ s, 基波频率为 6.10 Hz; 采样间隔为 140 μ s, 基波频率为 0.87 Hz; 纹波测量系统的基波频率决定了系统的频率分辨率。

4 电流纹波检测系统示波器比对验证

为验证测试系统的可信性, 首先将测量结果和输出电压纹波的 FFT 观测结果进行对比。测量对象

为一台 50 V/280 A 的高精度稳流电源, 电源接纯电阻负载, 电源输出电流为 280 A, 负载标称值为 0.1 Ω , 通电后负载实际测试的阻值约为 0.124 Ω 。

设置电流纹波检测系统采样步长 Size=140 μ s, 图 3 是利用检测系统的电流纹波频谱分析结果。结果显示, 利用上述检测系统测试的待测稳流电源的电流纹波频率为 300 Hz、幅值为 103.8 mA。

用 TDS3034 型号示波器观测这台四极磁铁高精度稳流电源的输出电压纹波。输出电压交流耦合, 市电触发, 32 次平均, 时基 10 ms/div, 输出电压交流耦合 FFT 运算频谱见图 4。

从图 4 中可以看出, 示波器观测此稳流电源的输出电压纹波均方根值为 9.12 mV, 频率为 300 Hz。将示波器测试的电压纹波均方根值换算成电流纹波幅值为:

$$i_{\text{op}} = \frac{\sqrt{2}v_{\text{rms}}}{R} = \frac{1.414 \times 9.12 \text{ mV}}{0.124 \Omega} = 104.0 (\text{mA}) \quad (3)$$

这里负载电阻为通电后热态电阻, 计算结果与利用上述电流纹波检测系统的观测结果(103.8 mA)相吻合, 测试结果符合预期。

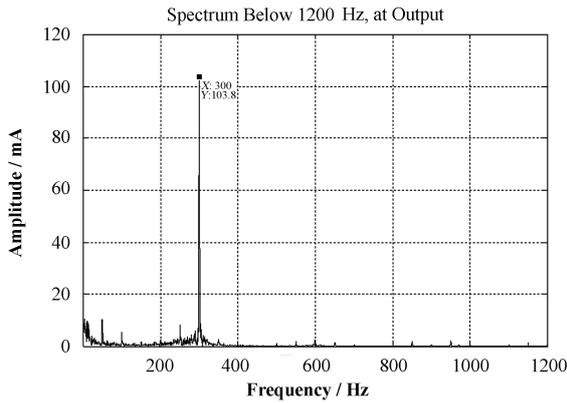


图 3 电阻负载下 280 A 输出电流纹波频谱图
Fig.3 Ripple current spectrum with 280 A output on resistive load.

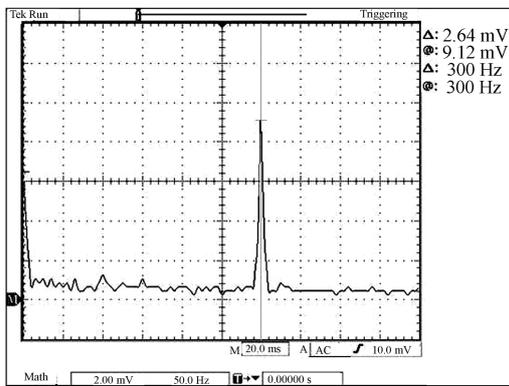


图 4 示波器观测的电压纹波频谱图
Fig.4 Voltage ripple spectrum with oscilloscope.

5 函数发生器电流纹波验证

用函数发生器产生一个特定频率的电压纹波，将该电压纹波加在一个精密电阻上可以得到一个精密纹波电流源，此电流源为独立电流源，可以和基础电流组合成被测电流，从而检验上述电流纹波检测系统的纹波检测能力。实验采用 Agilent 33220A 型信号发生器和 50 Ω 精密电阻构成纹波电流源，通过向精密电阻施加正弦波电压信号获得所需电流纹波信号。

首先打开前述待测的高精度稳流电源，让它满量程 280 A 输出，作为基础电流。再用 Agilent 33220A 型信号发生器向 50 Ω 精密电阻施加一个峰值为 3 V、频率为 150 Hz 正弦波电压纹波，对应电流纹波应为 30 mA。FFT 采样点数 $N=8192$ ，采样步长 $Size=140 \mu s$ ，利用上述纹波检测系统测量的结果 FFT 频谱图如图 5。因为此电源 300 Hz 频率点纹波幅值太大，为便于观察 150 Hz 点处纹波幅值，将

300 Hz 频率点纹波幅值作了隐藏处理。

图 5 显示，采用上述纹波检测系统测试的 150 Hz 频率点处实际测试幅值为 30.05 mA，与通过信号发生器注入的纹波电流频率和幅度相一致。

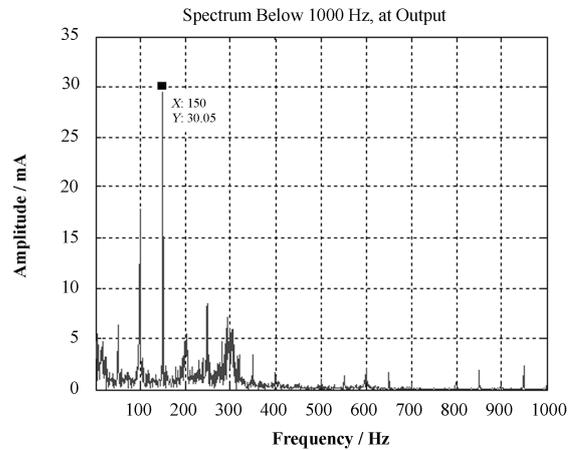


图 5 用函数发生器注入一个 30 mA@150 Hz 正弦波的纹波电流频谱

Fig.5 Ripple current spectrum with a 30 mA@150 Hz sine wave added on the load current.

此检测系统能够测试的纹波电流最小可达 0.1 mA，为进一步验证该检测系统的纹波检测能力，不加基础电流，用 Agilent 33220A 型信号发生器向 50 Ω 精密电阻施加一个峰值为 100 mV、频率为 150 Hz 正弦波电压纹波，对应电流纹波为 1 mA。FFT 采样点数 $N=8192$ ，采样步长 $Size=140 \mu s$ ，利用上述检测系统测量的结果 FFT 频谱图如图 6。

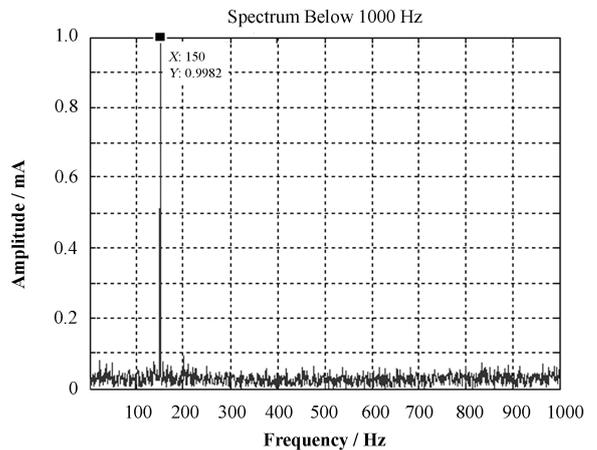


图 6 零偏置 1 mA @150 Hz 正弦波的纹波电流频谱
Fig.6 Current spectrum of a pure 1 mA @150 Hz sine wave.

图 6 结果显示：采用上述纹波检测系统测试的 150 Hz 频率点处实际测试幅值为 0.9982 mA，与通过函数发生器注入的纹波电流频率和幅度相一致。

6 超低电流纹波测试

利用此检测系统对上海光源备用的 30 V/10 A 的储存环快校正磁铁电源进行测量, 采用纯电阻负载, 负载电阻标称值为 20 Ω 。设定电流 1.2 A, 测量电源的输出电流纹波。图 7 是实测得到的输出电流 FFT 频谱图, 其中 FFT 采样点数 $N=8192$, 采样步长 $Size=100 \mu s$ 。

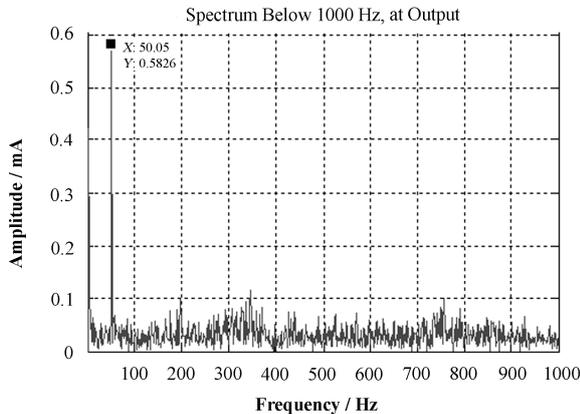


图 7 10 A/30 V 待测电源的输出电流纹波频谱图
Fig.7 Ripple current spectrum of a 10 A/30 V power supply.

图 7 结果表明: 在 1000 Hz 以下, 上述被测电源的电流纹波幅值为 0.58 mA, 频率为 50.05 Hz, 其它频率成分的纹波很小或接近测量本底。

7 结语

本文采用数字化方式检测磁铁电源输出电流的超低纹波电流, 采用 FFT 分析方法克服了模拟观测方式精度不足的限制。FFT 分析具有确定的频率分辨率, 通过调整采样间隔, 使 FFT 离散频率点靠近被测频率, 可减小测量误差。测试系统具有固有的本底噪声, 而噪声的幅度决定了测试系统可观测的

最小纹波幅度, 当被测电源存在较大纹波时, 测量本底会有所增加, 但不影响对被测系统纹波指标的评定。

当被测磁铁电源输出电流为 0–300 A 时, 系统能观测到 0.2 mA 的纹波电流, 和测量范围相比好于 10^{-6} 。通过示波器电压纹波观测对比和函数发生器注入纹波验证, 表明此系统观测纹波数据真实可信, 可用于超低电流纹波的观测和评估。

参考文献

- 郭春龙, 李瑞, 李开湖. 用并联旁路吸收电路滤除超低电流纹波[C]. 第三届全国加速器磁铁电源会议文集, 2012
GUO Chunlong, LI Rui, LI Kaihu. Filtering out low-level current ripple with bypass absorbing circuit[C]. The third national symposium on accelerator magnet and power supply, 2012
- 徐建铭. 加速器原理(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 304–309
XU Jianming. Principles of accelerator (Revision)[M]. Beijing: Science Press, 1981: 304–309
- 徐中雄, 王放安, 齐欣. 加速器磁铁电源低次纹波抑制实验研究[J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(7): 637–640
XU Zhongxiong, WANG Fangan, QI Xin. Experimental studies on sub-harmonic suppression of magnet power supply[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003, 27(7): 637–640
- 肖国春, 裴元庆, 姜桂宾, 等. 大功率低纹波稳定电源用直流有源滤波器[J]. 电力电子技术, 2001, 35(4): 12–15
XIAO Guochun, PEI Yuanqing, JIANG Guibin, et al. DC active filter for large power and low ripple stable supply[J]. Power Electronics, 2001, 35(4): 12–15
- Accelerator complex study group. Proton-ion medical machine study (PIMMS) part one[R]. Geneva, Switzerland, 1999

Experimental research on an FFT based ultra-low current ripple observation system

LI Kaihu GUO Chunlong LI Rui LI Deming

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract Background: The magnets exciting current ripple is required to be less than 10^{-6} for the proton medical accelerator under construction. **Purpose:** In order to observe the ultra-low current ripple, we design and set up a testing platform based on the ADC card used for digitalized power supplies. **Methods:** The system performance is analyzed, tested, and the observation is compared with the oscilloscope measurement. **Results:** Using this platform, the ultra-low current ripples are observed on several magnet power supplies. **Conclusions:** The method is experimentally proved suitable for the observation of current ripples of 10^{-6} versus hundreds DC current.

Key words Proton medical accelerator, Current ripple, Current ripple observation, FFT

CLC TL503.5