

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313816

大量程霍尔电流传感器带宽检测方法研究^{*}

韦采亿 陈文光 王重洁 刘之骥 王首涛

(南华大学电气工程学院 衡阳 421001)

摘要:针对检测设备的限制导致不能使用不同频率的大电流对大量程霍尔电流传感器的带宽进行测试的问题,设计一种带宽检测电路并探究大量程霍尔电流传感器的带宽与测试电流大小的关系。通过带宽检测电路将直流大电流斩波可以得到不同频率的大量程脉冲测试电流,该测试电流流经霍尔电流传感器和康铜丝阵列。根据-3 dB原则比较霍尔电流传感器输出信号幅值相对康铜丝阵列的失真程度,确定霍尔电流传感器的带宽。使用30~100 A不同大小测试电流对霍尔电流传感器的带宽进行测试,结果表明测试电流大小不同,大量程霍尔电流传感器的带宽不同,且随着测试电流的增大,带宽逐渐减小。

关键词:霍尔电流传感器;带宽测试;脉冲电流;FFT变换;-3 dB原则

中图分类号: TM933 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Research on bandwidth detection methods for large range hall current sensors

Wei Caiyi Chen Wenguang Wang Chongjie Liu Zhijian Wang Shoutao

(College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the bandwidth of large-range hall current sensors cannot be tested with high currents of different frequencies due to the limitation of detection equipment, a bandwidth detection circuit is designed and the relationship between the bandwidth of large-range hall current sensors and the test current is explored. A large range pulse test current of different frequencies can be obtained by chopping the DC high current through the bandwidth detection circuit, which flows through the hall current sensor and the constantan wire array. According to the -3 dB principle, the distortion degree of the output signal amplitude of the hall current sensor relative to the constantan wire array is compared, and the bandwidth of the hall current sensor is determined. The bandwidth of the hall current sensor was tested by using 30~100 A test current of different sizes, and the results showed that the test current was different, the bandwidth of the large-range hall current sensor was different, and the bandwidth gradually decreased with the increase of the test current.

Keywords: hall current sensor; bandwidth test; pulse current; FFT transform; -3 dB principle

0 引言

电流是电气设备检测最重要的参数之一。在冶金、化工和轨道交通等领域有许多高达数百安的大电流电气设备,若对这些大电流电气设备不能进行精确和快速的电流检测,则会导致电气事故发生^[1]。因此对大电流电气设备进行快速、精确可靠的电流检测非常必要。

霍尔电流传感器因其电流测量范围大、精度高、非接触式检测、工作频带宽和动态性能好等优点,被广泛应用于电气系统的电流信号采集和反馈控制^[2]。如在开关电源应用

场合中,利用霍尔电流传感器实现捕获快速电流瞬态变化、过载或短路检测功能,通常需要上兆赫兹的带宽^[3]。若选用的霍尔电流传感器的带宽不符合需求,则霍尔电流传感器检测到的波形畸变严重,导致系统控制器和保护设备产生误动作,发生电气事故。

人们重点关注系统与电信号传输的带宽,默认所使用的霍尔电流传感器处于正确工作状态,很少研究霍尔电流传感器的带宽与其测试电流大小的关系。对于霍尔电流传感器带宽的测试,国内外没有公认的带宽检测方法,未给出电流传感器带宽测试的标准^[4]。通过比较电流传感器输出

收稿日期:2023-06-05

^{*} 基金项目:科技部 ITER 专项(2018 YFE0303103)资助

信号相对输入信号的失真程度确定传感器带宽。或者测量电流传感器输出的上升时间近似估算带宽。第二种方法对输入上升时间要求较高,因此,综合考虑本文的带宽检测系统使用第一种带宽测试方法。

目前使用宽频带扫频设备测试电流传感器的带宽,受制于测试设备频率与输出电流大小相互制约的局限性,较难实现使用的几十安、上百安甚至更大量程的电流去检定霍尔电流传感器带宽。因此,对于大量程霍尔电流传感器往往采用理论建模仿真的方法估算其带宽。如 LEM 公司以额定电流的 1% 或 0.5% 作为测试电流,并只对量程小于 50 A 的霍尔电流传感器进行带宽测试,对于量程大于 50 A 的霍尔电流传感器使用理论模型仿真推算其带宽性能^[5]。因霍尔电流传感器内部放大电路的电流放大系数是频率的函数,对传感器带宽设计带来一定的难度。理论模型仿真不能较为全面考虑各种因素,因此,经过理论计算设计的电流传感器还需使用相关的测试设备验证其性能指标后再投入使用。

现有检测设备仅能输出不同频率的小电流对霍尔电流传感器的带宽进行测试,没有考虑大量程霍尔电流传感器的带宽性能与测试电流大小的关系,因此本文提出一种大量程霍尔传感器带宽测试方法,解决现有检测设备存在的问题,将检测标准源输出的直流大电流经过带宽检测电路斩波得到不同频率的大量程脉冲电流作为测试电流。该测试电流流经霍尔电流传感器和康铜丝阵列,对两者的输出信号进行比较,以康铜丝阵列输出信号幅值为基准,根据 -3 dB 原则比较霍尔电流传感器的输出信号相对康铜丝阵列的输出信号衰减失真程度,即可确定霍尔电流传感器的带宽。为大量程霍尔传感器带宽检测提供一种新方案,并通过实验验证分析大量程测试电流与霍尔电流传感器带宽的关系。

1 霍尔电流传感器工作原理

霍尔效应原理表明:对载导体施加磁场与电流时,载导体内部的电荷因受到洛伦磁力发生偏转,在电流通路成直角的位置产生感应电压。霍尔电流传感器以霍尔效应为工作基础,采用霍尔元件作为传感单元,通过被测电流产生的磁场的大小来实现对电流的测量^[6-7]。

如图 1 为霍尔效应传感器工作原理图。对霍尔效应传感器内部的霍尔元件施加连续电流,把霍尔效应传感器放置在磁场中,磁通量线对霍尔元件施加一个力,使载流子、电子和空穴偏转到霍尔元件的任一侧。当电子和空穴向侧面移动时,由于电荷载流子的积累,在霍尔元件的两侧之间会产生电位差^[8],即为霍尔电压 V_H ,可由式(1)表示为:

$$V_H = \frac{BI}{qn d} = K_H BI \quad (1)$$

式中: B 为施加于霍尔元件的磁场强度, I 为流经霍尔元件的电流, q 为电荷, n 为单位体积内电荷载流子的数目、 d 为

霍尔元件在磁场方向上的厚度及 K_H 为霍尔元件的灵敏度系数。

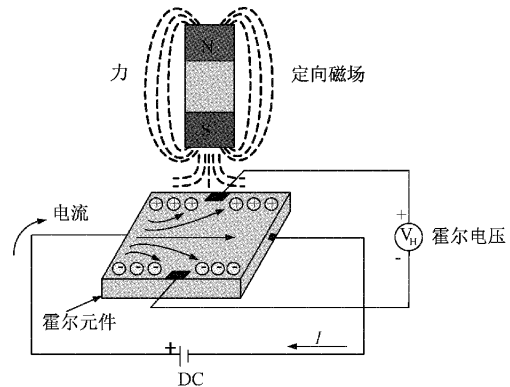


图 1 霍尔效应传感器工作原理图

2 带宽检测系统设计

图 2 为带宽检测电路系统框图,由检测标准源 S、带宽检测主电路、信号检测处理电路、驱动电路和 DSP28335 数字控制器组成。检测标准源 S 为霍尔电流传感器提供稳定的大量程直流测试电流。信号检测处理电路则对带宽检测主电路的康铜丝阵列和霍尔电流传感器的输出信号进行放大调理,然后反馈至 DSP28335 数字控制器进行模数转换(analog-to-digital converter, ADC)和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),提取两者对应的基波和高次谐波分量下的幅值和频率信息。驱动电路将控制器输出的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号进行电压抬升提高驱动能力。

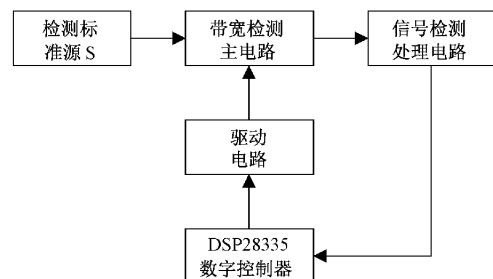


图 2 带宽检测电路系统框图

2.1 带宽检测主电路设计

图 3 为带宽检测主电路图,由检测标准源 S、康铜丝阵列、霍尔电流传感器和开关管 Q_1 、 Q_2 组成。检测标准源 S 输出稳定直流大电流分别流经回路 1 和回路 2。回路 1 由标准源 S、开关管 Q_1 及康铜丝阵列 R_1 构成,标准源 S、开关管 Q_2 、待测试大量程霍尔电流传感器 H 和康铜丝阵列 R_2 构成回路 2。为了保证电路的对称结构,回路 1 与回路 2 使用相同型号的开关管与阻值相同的康铜丝阵列。考虑带宽检测电路通过的电流较大,将 6 个康铜丝电阻并联提高其过载能力,并联后的总阻抗约为 3.3 mΩ。

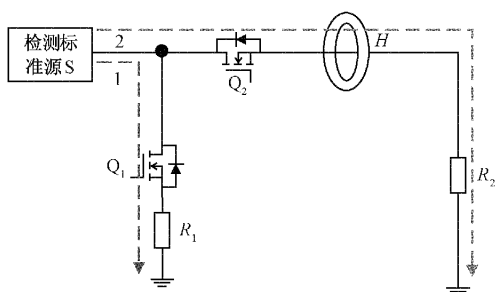


图 3 带宽检测主电路图

带宽检测系统的难点技术是如何得到不同频率的大电流及如何解决前级检测源的输出响应时间对霍尔电流传感器带宽测试的影响。

在带宽检测主电路中开关管 Q_1 恒导通,开关管 Q_2 的导通与关断由占空比为 50%,频率可任意设置的 PWM 驱动信号控制。待检测标准源输出稳定的直流大电流后,保持开关管 Q_1 的恒导通状态不变,利用 DSP28335 控制器控制开关管 Q_2 导通,此时流经开关管 Q_1 和 Q_2 回路电流大小相等,均为检测标准源 S 输出电流 I 的一半,即 $I_{Q1} = I_{Q2} = I/2$ 。当开关管 Q_2 关断时, $I_{Q1} = I, I_{Q2} = 0$ 。按照上述导通方式,既可通过改变开关管 Q_2 驱动信号频率得到不同频率的脉冲大电流,又能保证检测标准源 S 始终有导通闭合回路,避免检测标准源 S 的输出响应时间对霍尔电流传感器带宽测试影响。

开关管 Q_2 输出的脉冲电流信号流经霍尔电流传感器和康铜丝阵列后,分别转换为对应的电压信号 V_H 和 V_P 输出。控制器的 ADC 单元同时采样二者的输出电压信号,经过 FFT 变换后分别提取出二者对应基波及高次谐波分量下的幅值和频率信息^[9]。因康铜丝具有较低的电阻温度系数,精度可以做得很高,所以将康铜丝的输出信号幅值作为基准。比较霍尔电流传感器的输出电压信号幅值相对康铜丝阵列的失真程度,当前者幅值相对后者下降 -3 dB,此时对应的频率即为待测霍尔电流传感器的带宽。

2.2 信号检测处理电路设计

信号检测处理电路如图 4 所示。第 1 部分是对霍尔电流传感器的输出电压信号 V_H 进行检测处理。选用仪用运放 INA217 进行放大,该放大器具有差分输入和低失真特性,可将霍尔电流传感器的输出信号接近无失真的放大。其压摆率为 $15 \text{ V}/\mu\text{s}$,同时内部采用电流反馈回路,可在宽增益范围实现高带宽,使得 INA217 处理信号频率较宽能够满足大量程霍尔电流传感器带宽测试的要求^[10]。

仪用运放 INA217 的电压增益 G 的计算公式如式(2)所示。

$$G = 1 + \frac{10\,000}{R} \quad (2)$$

其中, R 为 INA217 引脚 1 与引脚 8 之间的增益电阻。

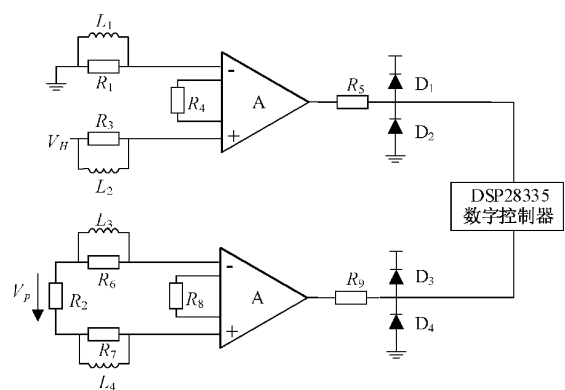


图 4 信号检测处理电路图

考虑控制器的 ADC 采样安全电压为 $0 \sim 3 \text{ V}$,则实际电路中 $G=5$ 。

第 2 部分是对康铜丝阵列 R_2 的输出信号 V_P 进行检测处理。电流流过康铜丝阵列 R_2 转换为极微小的电压信号 V_P 。待测试霍尔电流传感器的量程 $0 \sim 100 \text{ A}$,则 V_P 最大值约为 0.33 V 。根据式(2)且考虑 ADC 采样安全电压为 $0 \sim 3 \text{ V}$,则实际电路中 $G=9$ 。

因小于 10Ω 的源阻抗可能会引起 INA217 振荡,所以在输入端增加了一个由电感 ($1.2 \mu\text{H}$) 和电阻 (47Ω) 并联组成的输入缓冲网络,可以降低信号振荡趋势,提高信号放大精度。同时为保护控制器的 ADC 转换模块,在 INA217 的输出端设计一个二极管限幅电路。当输出电压超过 ADC 采样安全电压 3 V 时,将进行限幅至 ADC 安全采样电压范围内^[11-12]。

2.3 驱动电路设计

驱动电路如图 5 所示。驱动电路采用直接栅极驱动电路的方式进行设计。开关管的 PWM 驱动脉冲采用 DSP28335 控制器输出,但控制器输出的驱动电流较小,不能直接驱动 MOSFET 导通与关断,因此选择德州仪器的高速、低侧栅极驱动器 UCC27517 来提高 PWM 驱动脉冲的驱动能力。UCC27517 具有 4 A 的峰值拉/灌电流驱动能力,可有效驱动 MOSFET,满足设计需求。同时为了保护控制器,在 DSP28335 与栅极驱动器之间使用光耦 6N137 实现隔离保护。

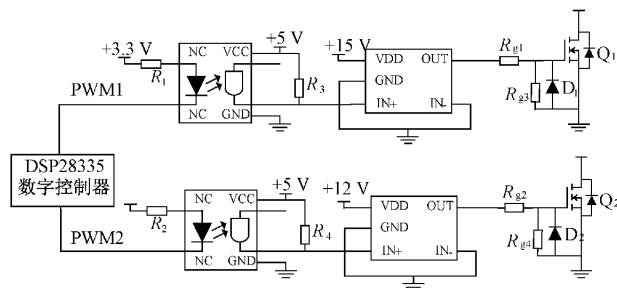


图 5 驱动电路图

3 测试结果与分析

本文使用某公司的霍尔电流传感器(量程 0~100 A, 线性度<1%、带宽为 DC~20 kHz 及响应时间小于 5 μ s), 检测其线性度、带宽和响应时间等指标。检测标准源使用某公司的宽范围可编程直流电源, 输出电流可达 240 A, 输出电流精度 \leq 0.1%。

3.1 线性度测试

线性度决定了霍尔电流传感器的输出信号和输入信号在测量范围内成正比的程度。其通常以相对误差表示, 如式(3):

$$\delta_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, ΔL_{\max} 为同一校准点上测量的霍尔电流传感器实际输出电压值与拟合直线上相应点的最大误差值的绝对值。 Y_{FS} 为霍尔电流传感器的理论满量程输出值^[13]。

测试方法为: 使用检测标准源产生不同大小的检测电流信号, 记录霍尔电流传感器的输出电压幅值。使用 MATLAB 的最小二乘法拟合函数对霍尔电流传感器的输入电流和输出电压曲线进行拟合。根据输入-输出曲线与拟合直线之间的偏离程度计算出线性度。

图 6 为线性度测试图, 图 7 为线性度测试误差图, 可知在 0~150 A 电流范围内输入量与输出量呈线性关系, 在 150 A 之后霍尔电流传感器输出电压出现拐点, 输出电压达到饱和, 随着电流增加, 输出基本保持不变。在 0~150 A 电流范围内输出电压最大误差值为 0.153 5 V, 由式(3)计算得该霍尔电流传感器线性度约为 0.102 3%, 小于 1%, 该霍尔电流传感器数据手册中线性度也是小于 1%, 测试结果与数据手册一致。

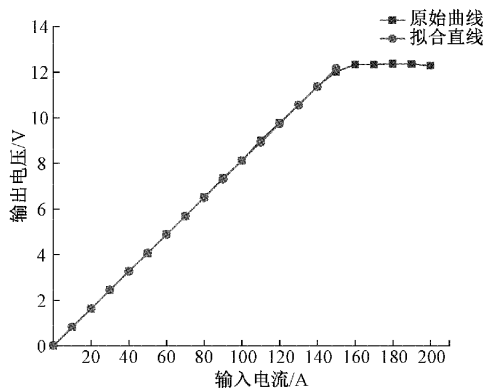


图 6 线性度测试图

3.2 带宽测试

本文使用不同大小的电流对霍尔电流传感器的带宽进行测试, 探究待测试霍尔电流传感器的带宽与测试电流大小的关系。设置初始电流为 30 A, 初始频率 100 Hz 及步进电流为 10 A。

测试方法为: 以 30 A 测试电流为例。通过上位机输入

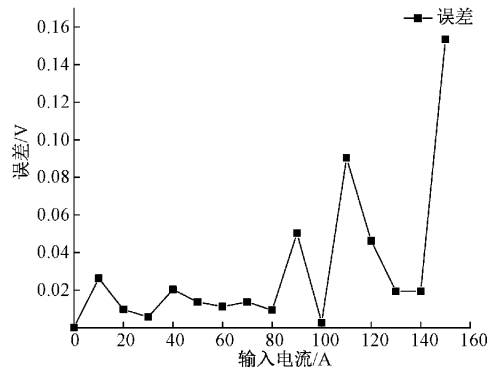


图 7 线性度测试误差图

所需的测试电流频率(如 100 Hz), 得到如图 8 所示 100 Hz 时康铜丝阵列和霍尔电流传感器的输出波形。康铜丝因其无源和精度高特性可在开关管 Q_2 关断瞬间立即对电流跳变过程做出响应, 产生如图所示的尖峰。霍尔电流传感器由于有源器件带宽限制影响, 无法量化高频脉冲尖峰, 输出波形较为平滑。

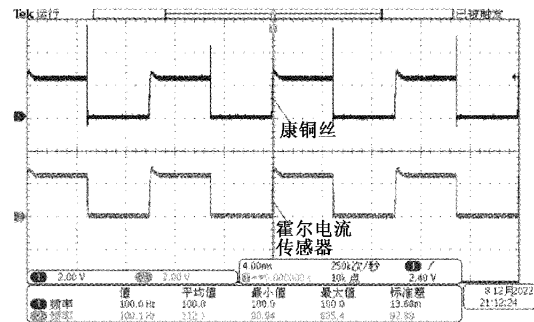


图 8 100 Hz 康铜丝阵列和霍尔电流传感器输出波形图

DSP28335 控制器以间歇扫频的方式工作, 从低频段开始, 在每个频率点对康铜丝阵列和霍尔电流传感器的输出信号进行 ADC 采样和 FFT 变换, 如图 9 和 10 分别为康铜丝阵列和霍尔电流传感器在 100 Hz 处输出信号的 FFT 变换波形。经过 FFT 变换后得到两者对应的基波和高次谐波的幅值和频率结果, 并进行 -3 dB 原则判断^[14]。若未满足霍尔电流传感器的输出信号幅值相对康铜丝阵列的输出信号幅值衰减 -3 dB 要求, 说明未完成霍尔电流传感器的带宽检测, 当前测试电流频率较小, 应增大测试电流频率。如增大电流频率为 1 kHz, 可得到图 11 的 1 kHz 时康铜丝和霍尔电流传感器的输出波形, 图 12 和 13 分别为康铜丝阵列和霍尔电流传感器在 1 kHz 处输出信号的 FFT 变换波形。重复控制器对康铜丝阵列和霍尔电流传感器的输出信号进行 ADC 采样、FFT 变换和 -3 dB 原则判断操作, 直至得到 30 A 测试电流条件下霍尔电流传感器的带宽数据。30 A 测试电流对应的霍尔电流传感器带宽测试完毕, 再按照步进电流改变前级直流大电流检测标准源的输出电流大小, 重复上述操作即可实现不同测试电流的霍尔电流传感器带宽测试。

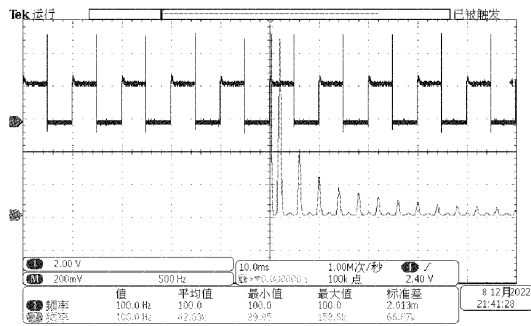


图 9 康铜丝阵列在 100 Hz 处输出信号的 FFT 变换波形图

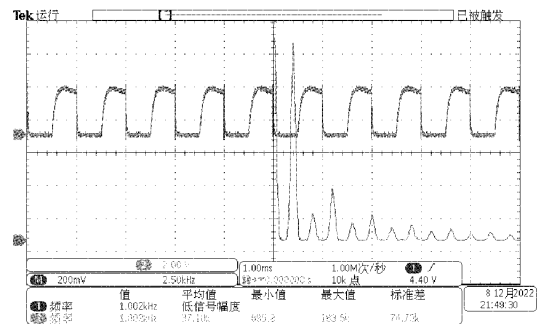


图 13 霍尔电流传感器在 1 kHz 处输出信号的 FFT 变换波形图

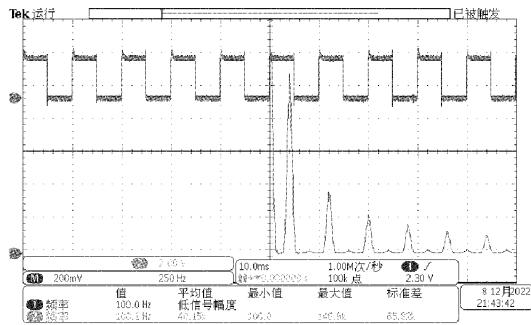


图 10 霍尔电流传感器在 100 Hz 处输出信号的 FFT 变换波形图

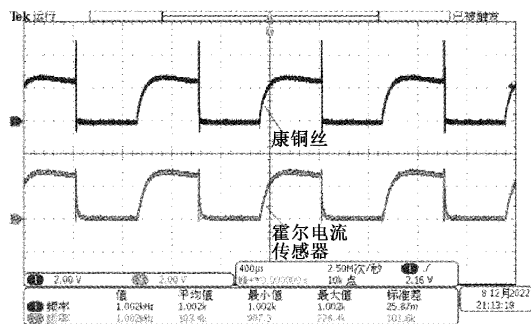


图 11 1 kHz 康铜丝阵列和霍尔电流传感器输出波形图

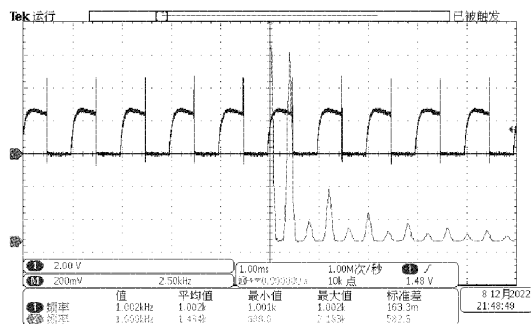
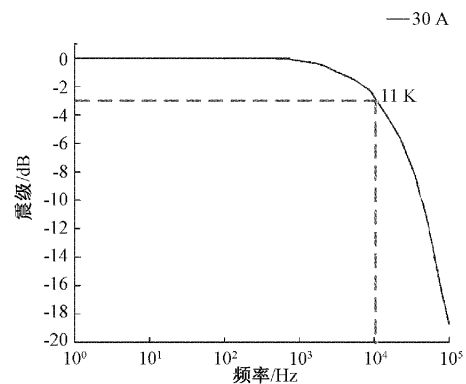
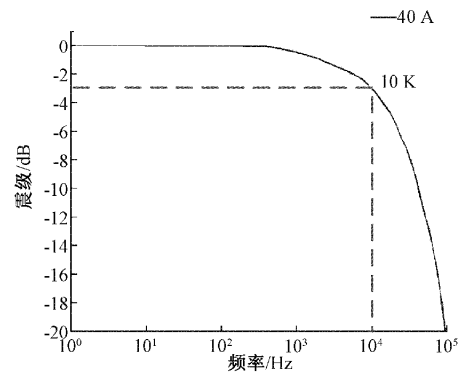


图 12 康铜丝阵列在 1 kHz 处输出信号的 FFT 变换波形图

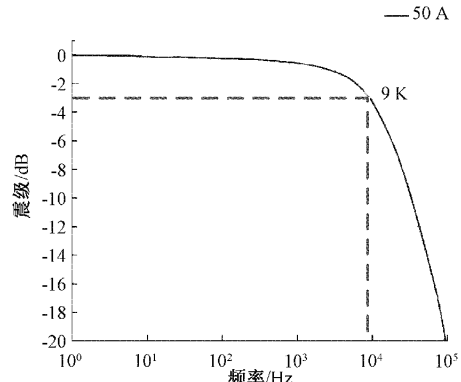
使用不同大小测试电流对霍尔电流传感器的带宽进行测试,图 14 为大小不同测试电流霍尔电流传感器带宽测试图。表 1 列出了大小不同的测试电流条件下霍尔电流传感器带宽测试结果。图 15 为测试电流大小与带宽变化关系图。



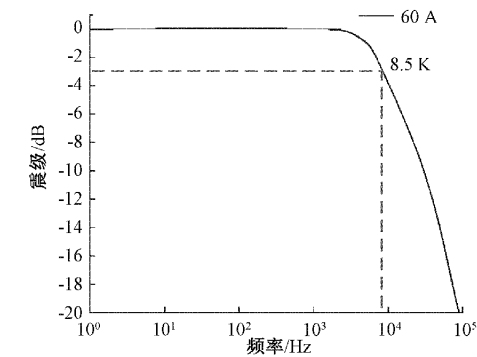
(a) 30A霍尔电流传感器带宽图



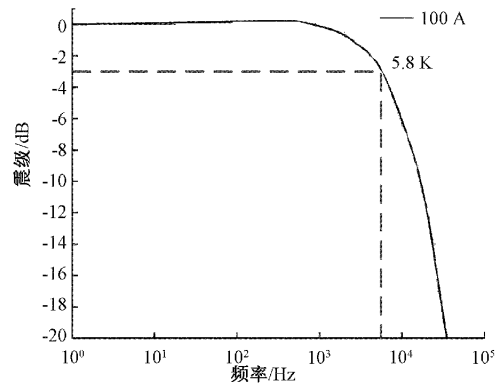
(b) 40A霍尔电流传感器带宽图



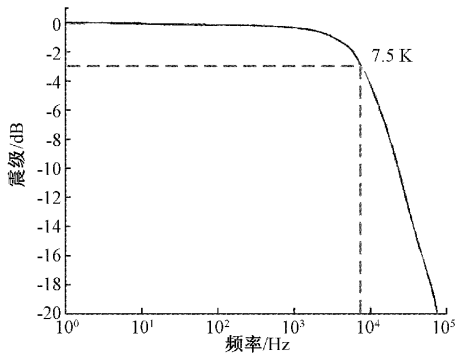
(c) 50A霍尔电流传感器带宽图



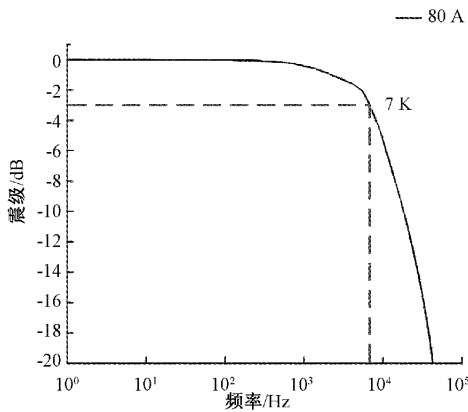
(d) 60 A霍尔电流传感器带宽图



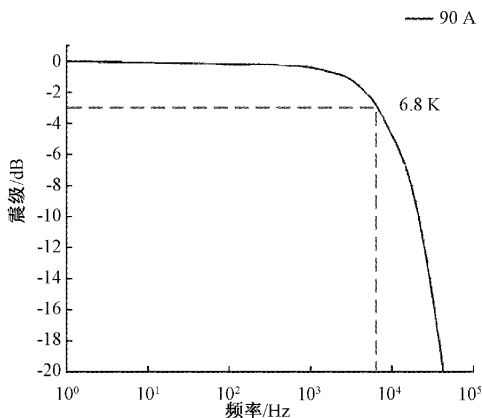
(h) 100 A霍尔电流传感器带宽图



(e) 70 A霍尔电流传感器带宽图



(f) 80 A霍尔电流传感器带宽图



(g) 90 A霍尔电流传感器带宽图

图 14 不同测试电流霍尔电流传感器带宽测试图

表 1 不同测试电流带宽测试结果

电流/A	带宽/kHz	电流/A	带宽/kHz
30	11.0	70	7.8
40	10.0	80	7.0
50	9.0	90	6.8
60	8.5	100	5.8

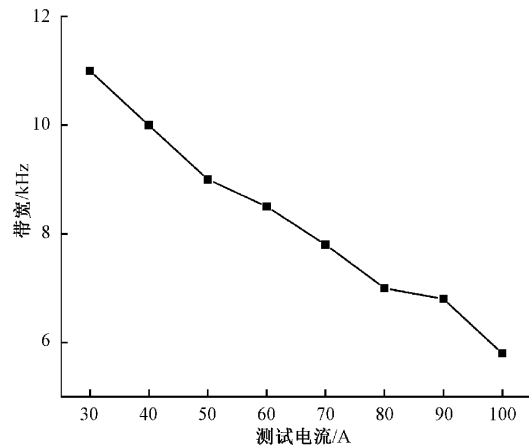


图 15 不同测试电流带宽测试结果图

测试发现,霍尔电流传感器频率响应对电流大小的衰减表现为测试电流信号大小幅值不同,霍尔电流传感器的带宽也不同,且测试电流幅值越大,带宽逐渐减小。这是因为:霍尔电流传感器内部的放大电路包含耦合电容、旁路电容和分布电感等电抗性元件,是决定霍尔电流传感器带宽指标的关键。且放大器件的电流放大系数是频率的函数,即测试电流信号的大小和频率同时作用,当测试电流幅值越大,霍尔电流传感器的工作带宽越小。

3.3 响应时间测试

响应时间是指康铜丝检测到电流的时刻 t_1 与待测霍尔电流传感器检测到电流的时刻 t_2 的时间差 $|t_1 - t_2|$ [15]。因此测试霍尔电流传感器的响应时间时,用示波器分别捕获康铜丝和霍尔电流传感器的输出波形,以康铜丝的响应

时间为基准,比较 t_1 和 t_2 , 得到时间差即为霍尔电流传感器响应时间。

如图 16 为霍尔电流传感器的响应时间测试图。康铜丝是无源器件可对输入信号立即响应。当康铜丝对输入信号做出响应时,霍尔电流传感器未响应,经过 $4\ \mu\text{s}$ 时间霍尔电流传感器做出响应。该霍尔电流传感器数据手册显示的响应时间计量指标小于 $5\ \mu\text{s}$, 说明待测霍尔电流传感器的响应时间指标符合生产标准。

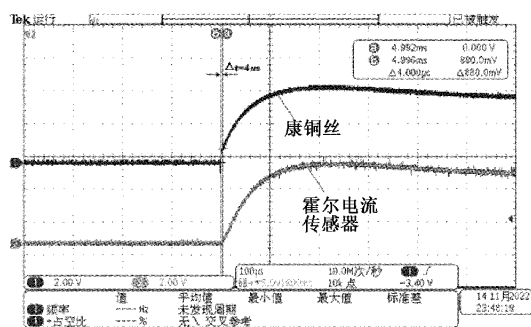


图 16 霍尔电流传感器响应时间图

4 结 论

针对现有检测设备的不足,文章提出了一种大量程霍尔电流传感器带宽测试方法,即利用设计的带宽检测电路将直流大电流斩波得到不同频率的大量程脉冲电流,以康铜丝阵列为基准,根据 $-3\ \text{dB}$ 原则比较待测试大量程霍尔电流传感器的输出信号相对康铜丝阵列的失真程度,探究大量程霍尔电流传感器的带宽与测试电流大小的关系,验证在大电流测试条件下,大量程霍尔电流传感器的实际工作带宽。对某公司生产的霍尔电流传感器进行了线性度、带宽和响应时间测试,线性度和响应时间的测试结果与厂商数据手册基本一致。对其带宽进行测试得知测试电流大小不同,大量程霍尔电流传感器的带宽不同,且随着测试电流信号幅值的增大,带宽逐渐减小。因此,建议在宽频大电流测量时,选择大量程霍尔电流传感器必须综合考虑被测电流的大小和频率,根据实际条件参考频率与电流的衰减曲线进行选择,避免选型错误,导致严重的安全隐患和财产损失。对于带宽检测系统,本文后续可以从多通道电流传感器自动测试系统展开,应用于电流传感器的校验、功能测试、性能及稳定性测试等,实现能够自动测试电流传感器的各项基本参数,保存数据,生成图表和报告等功能,提高测试效率。

参考文献

- [1] 张长富, 陈为. 电流检测技术:原理、特点与应用[J]. 磁性材料及器件, 2022, 53(1): 95-105.
- [2] 郭军, 刘和平, 刘平. 基于大电流检测的霍尔传感器应用[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(5): 96-105.

- [3] JIANG J F G, KOFI A, MAKINWA A. Multipath wide-bandwidth CMOS magnetic sensors [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(1): 198-209.
- [4] 徐丹辉, 李鸿儒, 郑楠, 等. 高稳定宽量程电流传感器测试方法研究[J]. 电子世界, 2021, 48(4): 98-99.
- [5] 孙鹰, 王飞. 电流/电压传感器的带宽测试方法研究[J]. 现代测量与实验室管理, 2015, 23(1): 3-5.
- [6] 严嵘, 林佳伟, 季业, 等. 基于磁感原理的非接触多通道电流测试仪的设计与验证[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 68-73.
- [7] 李雪洋, 李岩松, 刘君. 对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 69-76.
- [8] 张涵竹, 李岩松, 刘君. 校验用开合式霍尔电流传感器聚磁环设计[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 171-175.
- [9] 郑楠, 徐丹辉, 梁永胜, 等. 电流传感器的带宽测试装置的设计[J]. 电子世界, 2021, 5(3): 170-171.
- [10] 武旭, 王林森, 居鹏. 闭环霍尔电流传感器的硬件电路设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11): 73-83.
- [11] 项琼, 岳长喜, 胡琛, 等. 基于霍尔传感器阵列的电流测量系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(23): 105-110.
- [12] 李捷, 罗红娥, 顾金良, 等. 脉冲功率源控制及在线电流检测技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 73-77.
- [13] 谢君, 李德才, 朱锐棋. 霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 27-34.
- [14] 张军齐, 陈少华, 焦海妮, 等. 霍尔大电流传感器频率特性分析[J]. 计量学报, 2019, 40(6): 103-106.
- [15] 程兴国, 但强, 孙珍军, 等. 一种新型闭环式双铁芯霍尔电流传感器的建模与实现[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(11): 68-70.

作者简介

韦采亿, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术及传感器技术。

E-mail: weicy366@163.com

陈文光(通信作者), 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为电力电子技术及特种电源技术。

E-mail: chenwg@usc.edu.cn

王重洁, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术及嵌入式技术。

E-mail: gowangchongjie@163.com

刘之骥, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术与高压电源。

E-mail: liu_zhijian_usc@163.com

王首涛, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术及脉冲电源。

E-mail: wstzyzd@163.com