

基于数字功率控制的红外锁相激励技术

陶胜杰, 杨正伟, 田 干, 张 炜

(第二炮兵工程大学 602 教研室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为改进红外锁相热成像检测中的热调制激励效果, 提高系统集成和使用性能, 引入了数字功率控制技术。以可控硅为功率元件, 推导控制角与功率的关系。以正弦调制激励为例, 通过数值计算求解控制角随时间的变化规律, 基于数字电路设计导通角控制算法和实现方法建立了实验平台并进行了实验验证和对比。结果表明: 该方法的功率控制精度高, 热成像波形的保真度明显优于常规激励技术, 体积和结构也得到改善, 电磁安全性满足要求, 可以更好地应用于红外锁相热成像检测中。

关键词: 数字功率控制; 可控硅; 控制角; 红外热成像; 锁相激励

中图分类号: TN722.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2057-07

Infrared lock-in excitation technology based on digital power control

Tao Shengjie, Yang Zhengwei, Tian Gan, Zhang Wei

(602 Teaching Office of the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To improve the integration level and performance of modulated heat excitation source, a new digital power control technology was developed for application of lock-in thermography in NDT. Silicon controlled rectifier(SiCR) was used as a power output controlling unit, and a relationship between SiCR's control angle and output power was also obtained. Taking the sinusoidal signal as the excitation source, the changing rule of control angle over time was achieved by using numerical calculation while the control algorithm and implementation method of the conduction angle were designed based on digital micro processing circuit. The experimental platform was thus built up and the comparison experiments were carried out. The results show that the present approach can gain higher precision of power control, better fidelity of thermal waveform and preferable equipment in structure and size. Moreover, its electromagnetic safety can meet the relevant requirement. Therefore, better results can be expected by using this method in the infrared lock-in thermography.

Key words: digital power control; silicon controlled rectifier; control angle; infrared thermography; lock-in excitation

收稿日期: 2014-11-30; 修订日期: 2014-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(51275518, 51305447)

作者简介: 陶胜杰(1982-), 男, 博士生, 主要从事红外热波无损检测方面的研究。Email: taoshengjie@126.com

导师简介: 张炜(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事设备监测与故障诊断方面的研究。Email: zhangweihuaiyu@163.com

0 引言

红外锁相热成像技术作为一种新兴的无损检测技术具有检测速度快、观测面积大、检测结果直观、非接触等优势,在国内外得到广泛的发展和运用^[1-4]。该技术利用锁相热激励驱动器驱动石英灯或卤素灯^[5]周期性地对物件表面进行加热^[6-9],热像仪实时记录表面温度,通过后续处理计算出温度相位,利用相位的不同来判定缺陷的参数^[10-11]。作为该技术的主要环节之一,调制热激励的性能直接影响石英灯或卤素灯的功率波形,进而影响到温度序列的相位提取误差,决定着最终的定量检测结果。因此,提高调制热激励的精度能够减小相位提取误差,为发展后续基于相位的缺陷定量识别算法提供有利条件。目前在红外锁相热成像应用中,普遍使用的调制激励大部分采用信号发生器和功率放大器组合的方法。由于信号发生器按照设定的信号输出相应的电压,对于红外加热装置之类的纯电阻负载,可以认为其功率近似与电压的平方成正比,所以实际的负载功率函数与信号发生器输出信号函数的平方成正比,导致实际功率与期望功率存在较大的偏差^[12-13]。此外,信号发生器和功率放大器是分离的通用设备,在功能和结构集成度方面有待进一步提高,还存在体积庞大和造价昂贵的不足,从一定程度上影响红外锁相热成像技术的发展和推广应用。

文中以红外锁相热成像技术为应用对象,应用数字功率控制技术研究高精度的功率调制激励方法,达到提高热激励功率的准确性和温度波形保真度的目的,有利于对材料缺陷进行更准确的检测评估,同时还可以简化结构,提高系统易用性。

1 锁相热激励驱动系统的基本组成

典型的红外锁相热成像系统如图 1 所示^[12],由锁相激励系统按照需要的功率波形输出电能,供数个卤素加热灯发光,对检测物体进行加热,根据检测物体的大小和距离,卤素加热灯的数量一般为 2~5 个,型号为 PAR64 系列投光灯,每个功率 1 kW,加热频率为 0.002~0.2 Hz。从这些基本情况可以得知,如果系统使用 220 V 市电,锁相激励系统的最大输出电流应在 25 A 以上,输出信号频率能覆盖 0.002~0.2 Hz

的范围。

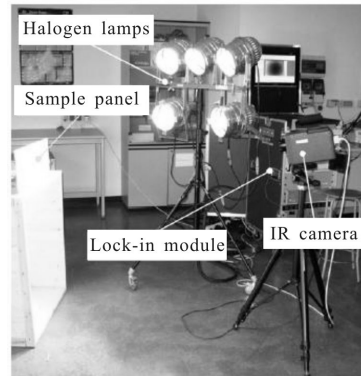


图 1 红外锁相热成像系统

Fig.1 Typical infrared lock-in thermography system

目前常用的功率放大电路有甲类、乙类、甲乙类、D 类以及其他类型。由于该系统的功率比较大,如果采用前三者的设计会导致电能利用率低,发热量大,需要增加复杂的散热结构。D 类功放利用效率较高,体积小,文中以此类功放原理为基础进行研究,同时考虑到功率频率较低,使用可控硅作为开关元件即可满足频率要求。以交流市电的频率来调制功率,可以免去基频脉冲发生器和结构复杂庞大的稳压滤波电路。锁相激励原理图如图 2 所示。

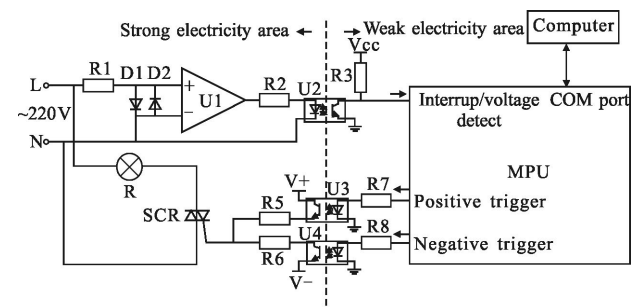


图 2 高精度锁相激励电路原理图

Fig.2 Schematic for high precision lock-in excitation

图中 R1、D1、D2 和比较器 U1 组成电压过零检测电路,将正弦交流市电转化为同频率的方波信号,再驱动光耦 U2,将过零信号传输到微处理器的中断/电平检测端,微处理器接收到过零中断后按照控制角的大小延迟相应的时间,之后发出正向触发或者反向触发信号,经过光耦触发双向可控硅 SCR 导通,卤素灯 R 开始工作。一般的可控硅触发极在 I、III 象限时最容易触发,因此当市电的电压处于正半

周期时,微处理器的中断/电平检测端电压为低,控制角时间溢出后处理器应发出正向触发信号,反之,当市电处于负半周期时应发出反向触发信号。微处理器每次接收到中断信号后实时检测方波周期,将周期值通过 COM 口传输到计算机供频率监测和修正用,计算机的同步信号和停止信号也通过 COM 口传输到微处理器,实时控制电路的启停。为了操作和结构安全,使用三支光耦将电路隔离为强电区和弱电区。

2 功率控制数值计算

锁相激励通过控制双向可控硅的控制角 α 来精确控制输出功率大小。如图 3 所示, V 为交流电压, V_g 为触发极控制电压,在每半个周期内,阴影区域表示可控硅导通,向负载输出功率。显然,控制角 α 越小,输出功率越大,当 $\alpha=0$ 时输出功率最大。

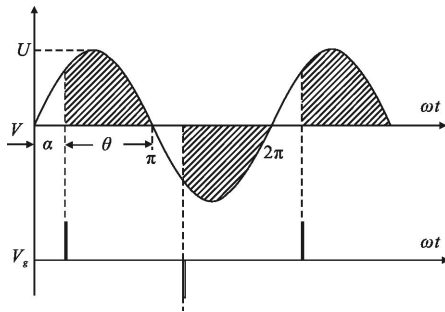


图 3 电压控制波形

Fig.3 Waveform of voltage control

为便于计算,采用归一化功率来分析控制角与功率的关系,即

$$p = \frac{P}{P_{\max}} \tag{1}$$

式中: P 表示实时功率; P_{\max} 表示最大功率。采用归一化功率 p 后,电压的频率、幅度和负载大小就可以在计算过程中消去。假设输入电压的表达式为:

$$u = \sin t \tag{2}$$

则归一化功率为:

$$p = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2(t) dt}{\int_0^{\pi} \sin^2(t) dt} = 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \tag{3}$$

热激励系统驱动卤素灯发热,其功率是单向的,即只能对待检物体加热而不能从物体吸热,因此在实际中期望在物体表面施加正负对称的正弦加热功

率难以做到,一般都是在期望的正弦信号上加上一恒定的常数,使任何时刻的加热功率值非负,设这一常数为 1 即可满足要求。另外还需要考虑两个方面:功率函数采用归一化功率之后,最大值不能大于 1;由于加热灯具有一定的热惯性,初始时刻处于冷态且灯丝温度不能突变,因此在 0 时刻功率函数的值为 0。从以上 3 个因素考虑,最合适的加热功率函数为:

$$p = \frac{1 - \cos t}{2} \tag{4}$$

将公式(4)代入公式(3)可得:

$$\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi[1 + \cos t] = 0 \tag{5}$$

对于每一确定的时刻 t , 上式只含有未知数 α , 显然该方程为超越方程,无法求解析解,只能计算数值解。由于功率函数在一个周期内前后对称,只需要计算半个周期内的导通角,即在 $[0, \pi]$ 内求解。设归一化控制角为 α/π , 利用 Matlab 计算软件的 fzero 命令求数值解,则归一化控制角、归一化功率随时间的关系如图 4 所示。

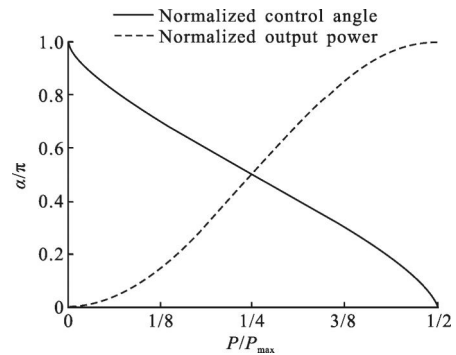


图 4 归一化控制角和归一化功率与时间的关系

Fig.4 Relationships of normalized control angle and output power with time

从图中可以看出,在从 0~1/2 周期的过程中,功率从 0 增长到最大,导通角则从最大减小到 0,变化关系呈非线性;从 0~1/4 周期和从 1/4 周期到 1/2 周期的导通角呈互补关系。

锁相热激励系统在市电正弦电压的过零点对功率进行控制,因此调制频率是市电的 2 倍,即 100 Hz。欲输出频率为 f 的加热能量,首先计算单个周期内的过零次数 N :

$$N = \frac{100 \text{ Hz}}{f} \tag{6}$$

为了便于计算和程序控制,一般应微调频率 f ,使 N 为偶数。由于加热能量在单个周期内前后对称,

只需要计算前半个周期内的 $N/2$ 个点:

$$t(n) = \frac{2\pi}{N}n \quad n=0, 1, 2, \dots, \frac{2}{N} \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(5)中的 t , 可求解出 $N/2$ 个过零点处的控制角 $\alpha=(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N/2})$, 则每个过零点后触发可控硅需要延迟的时间为:

$$\Delta t(n) = \frac{\alpha_n}{\pi} \times 10 \text{ ms} \quad n=0, 1, 2, \dots, \frac{2}{N} \quad (8)$$

从第 $N/2+1$ 个点到第 N 个点的延迟时间与公式(8)的反向序列相同。

延迟时间由微处理器控制, 一般微处理器的时钟信号由高稳定性的石英晶振提供, 因此延迟时间可以控制的很精确, 而每个控制周期的时间则由市电频率决定, 在 50 Hz 的理想频率下, 控制周期为 10 ms, 而实际中由于市电频率的变动和微处理器测量误差, 控制周期也会有偏差, 导致公式(8)中的 10 ms 与实际周期不会完全同步, 从而影响控制功率的精度。如图 5 所示, 图中阴影部分为输出功率需求的可控硅理论导通区间, (a)为理想状态下调制周期为 10 ms, 微处理器输出的控制角与功率需求的控制角重合, 两者同步; (b)为调制周期偏大时处理器输出的控制角与功率需求控制角的时序关系, 由于周期变大, 功率需求的控制角相应地滞后, 即图中阴影部分左侧时刻滞后, 而处理器输出的控制角仍然按照公式(8)的计算值, 导致可控硅提前导通, 输出功率比计算值偏大, 同理当调制周期偏小时可控硅滞后导通, 输出功率比计算值偏小。

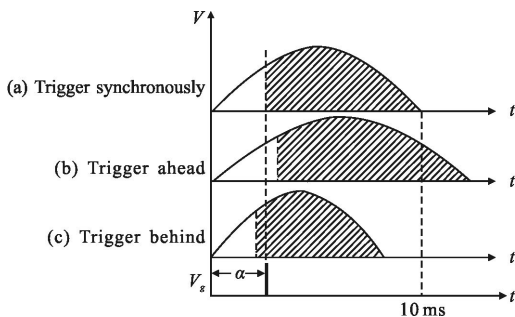


图 5 频率异步对功率的影响
Fig.5 Effect of frequency asynchronism on power

由以上分析可知, 控制角与实际调制周期的异步对输出功率的影响本质是由于控制角存在误差, 两者的关系可由公式(3)推导。对公式(3)求导可得:

$$dp = [\cos(2\alpha) - 1] \frac{d\alpha}{\pi} \quad (9)$$

式中: dp 为功率的误差; $d\alpha/\pi$ 为控制角的误差, 在 $[0, \pi]$ 内 $[\cos(2\alpha) - 1]$ 的取值范围为 $[-2, 0]$, 可见功率的误差最大为控制角误差的 2 倍。

3 实验

按照图 2 所示的原理图组建实物, 选用的微处理器型号为 ATmega8A, 时钟频率 12 MHz; 可控硅为两支 BTA20 并联, 最大工作电流可达 40 A; 负载为两个各 1 kW 的 PAR64 卤素投光灯, 整个实验系统如图 6 所示。图中左下方的驱动器即为文中研究的实物形式, 其外形尺寸为 16 cm×12 cm×5 cm, 与图 1 中目前常用的锁相激励系统相比体积大大缩小。驱动器设置 1 个市电输入接口、1 个 COM 口和 4 个输出接口, 最多可以连接 8 支卤素灯。

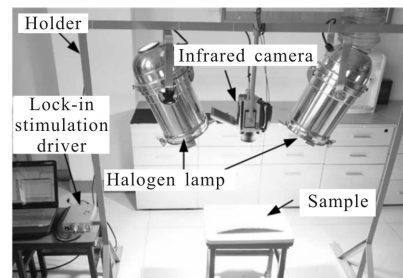


图 6 实验系统
Fig.6 Experiment system

3.1 频率稳定性

锁相热激励驱动器在每个市电交流电压的半个周期内对输出功率进行波形调制, 因此调制频率为市电的频率的 2 倍, 即 100 Hz。市电频率直接影响到输出波形的频率, 运行过程中, 驱动器内部的处理器监测每 0.5 s 内的 25 个完整正弦周期取均值, 并经此值实时传输到计算机, 经过数值换算即可得到每个时刻的调制频率。图 7 为调制频率随时间的关系。从图中可以看出, 在 2 000 s 的时间内, 调制频率大致以 100 Hz 为均值在 99.9~100.1 Hz 之间浮动, 频率变化小于 0.1%, 不会给输出功率波形的频率造成明显的误差。

图中每个点表示 0.5 s 内的平均调制频率, 实际中一般输出功率波形的周期在 4~500 s, 取均值的调制周期数会更多, 频率误差会更小。图 8 为输出功率

最大频率误差与输出功率周期的关系。从图中可以看出,最大频率误差在功率周期较小时接近 0.11%,并随着功率周期的增加逐渐减小,当功率周期为 500 s 时减小到 0.063%左右,这种量级的误差在实际应用中可以忽略不计。

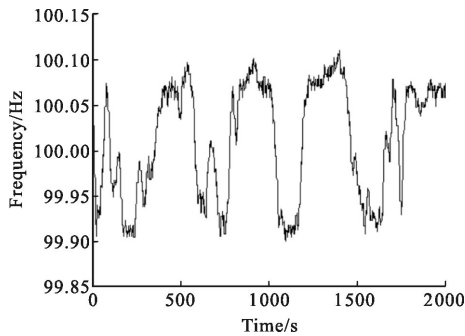


图 7 调制频率与时间的关系
Fig.7 Relationship between frequency and time

频率的偏差也会影响输出功率的大小。由公式(9)可得,功率的偏差小于调制频率偏差的 2 倍,即小于 0.22%,同样可以忽略不计。

通过上述分析可得,锁相激励驱动器以市电频率的 2 倍对输出功率进行数字调制,市电频率的偏差对输出功率的偏差和频率有一定的影响。从长时间的实验监测数据来看,由于市电频率偏差很小,在实际应用中可以不考虑其对输出的影响,而且驱动器中的微处理器可以实时监测频率,即使市电频率出现不可接受的偏差,也可以通过软件方法快速、方便地进行修正。

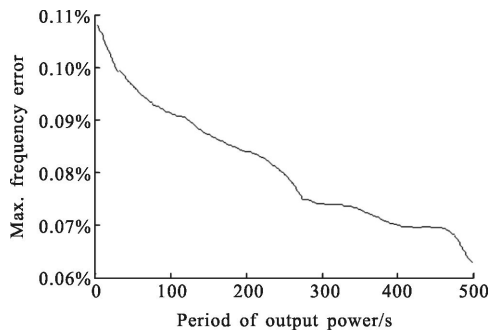


图 8 最大频率误差与功率调制周期的关系
Fig.8 Relationship between maximal frequency error and power period

3.2 热激励波形保真度

目前国内外普遍使用的锁相热激励驱动系统大部分采用信号发生器和功率放大器组合的方案,除

了体积大、集成度低外,其输出的功率波形与理论值也相差比较大,图 9 为目前常用的锁相激励系统在物体表面激励的温度变化关系^[3]。在开始的 3 s 内,实验温度与仿真温度相差甚远;之后的几个周期内两者的变化规律基本一致,但波形差异比较明显且一直存在,实验温度的波形更接近于三角波而非期望的正弦波。以两者显著的偏差作为定性判别依据,在上述对文中设计的驱动器性能分析中,忽略频率稳定性对输出功率波形小于 0.11% 的频率误差和小于 0.22% 的功率误差是合理的。

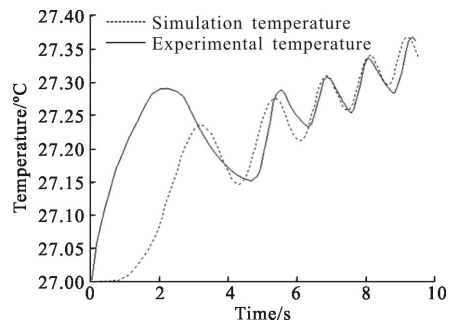


图 9 常规锁相激励技术温度波形
Fig.9 Thermal waveform of typical lock-in excitation

利用文中研究的锁相热激励驱动器对 T300 碳纤维板进行加热试验,加热频率为 0.5 Hz,加热时间 8 s,利用热像仪实时测量碳纤维板表面的温度,其随时间的关系如图 10 所示。

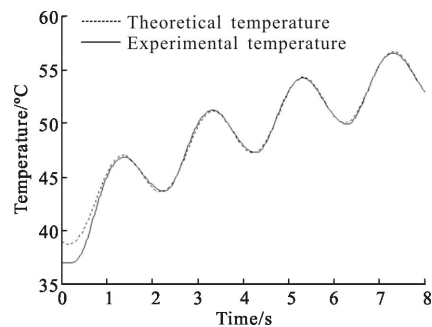


图 10 文中激励技术温度波形
Fig.10 Thermal waveform by technology designed in this paper

根据公式(4)的加热功率函数,可以认为加热能量由恒定常量和正弦量两个分量组成。在简化模型下一般认为物体温度在恒定热流激励时近似呈指数关系上升,在正弦调制热激励下按照相位有偏移的正弦规律变化,因此整体上物体表面温度变化关系由指数函数和正弦函数组成。图 10 中实线为实验的

温度变化规律,虚线为指数函数加正弦函数对实验温度拟合的理论曲线,从两者的对比可以发现,在加热开始的大约 1 s 内,理论温度与实验温度差异比较明显,这是由于卤素灯丝存在热惯性,需要短暂的预热时间,在 1 s 之后的几个周期内实验温度与理论温度变化规律吻合较好,相比当前设备的激励波形有了很大的改善。

3.3 电磁干扰与辐射分析

锁相热激励驱动器采用了数字功率放大技术,相对于其它功率放大技术,该技术会在一定程度上带来电路高次谐波和电磁干扰方面等不利影响,因此在研究过程中需要进行分析处理。由图 3 可知,假设负载在一个周期内的电压波形函数为:

$$u(t)=\begin{cases} 0, & t \in [0, \alpha] \\ \sin t, & t \in [\alpha, \pi] \end{cases} \quad (10)$$

对其进行傅里叶级数展开可表示为:

$$u(t)=c_0+\sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(2nt+\varphi_n)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2nx+b_n \sin 2nx) \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} |a_n|=\left|\frac{\pi}{2} \int_{\alpha}^{\pi} u(t) \cos 2nxdx\right| \leq \frac{4}{\pi(4n^2-1)} \\ |b_n|=\left|\frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u(t) \sin 2nxdx\right| \leq \frac{2}{\pi(4n^2-1)} \end{cases} \quad (12)$$

则

$$|c_n|=\left|\sqrt{a_n^2+b_n^2}\right|<\frac{2\sqrt{5}}{\pi(4n^2-1)} \quad (13)$$

可见,电路中的高次谐波大小近似与谐波次数的 2 次方成反比关系快速衰减,从 3 次谐波开始,幅值就衰减为基波的 1/10 以下。由于基波频率只有 100 Hz,幅值较大的高次谐波频率也只有几百赫兹,属于中低频范围,频率和幅值对电网的干扰都很小。此外,整个热激励系统还存在一定电磁辐射。由于电磁辐射不作为锁相激励技术的性能指标,只作为安全性和兼容性的判别,而且计算过程比较复杂,这里主要定性对驱动器的电磁辐射进行测定和评价。用辐射测试仪在高频段(30 MHz~3 GHz)和低频段(5 Hz~400 kHz)对锁相激励驱动器、电缆和卤素加热灯辐射最强的部位进行检测。在高频段时,上述部件的任何距离上辐射强度均为 $0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,表明设备基本不存

在高频辐射;在低频段不同距离上的辐射值如图 11 所示。按照相关规定^[14],公众环境照射的电磁辐射值不大于 $0.4 \mu\text{T}$,即图中虚线以下。在 0 距离上,三个部位的辐射值在 $10 \sim 30 \mu\text{T}$ 之间,明显超标,随着距离的增加,辐射值迅速衰减,电缆和加热灯衰减最快,分别在约 7 cm 和 12 cm 的距离时衰减到安全界限以下,驱动器的辐射在约 23 cm 处达到安全值,在 35 cm 处已经减弱到 $0.01 \mu\text{T}$,几乎接近环境本底辐射值。因此在操作和使用过程中,保持与锁相激励驱动器 25 cm 以上的距离即能可靠地满足电磁辐射安全要求。

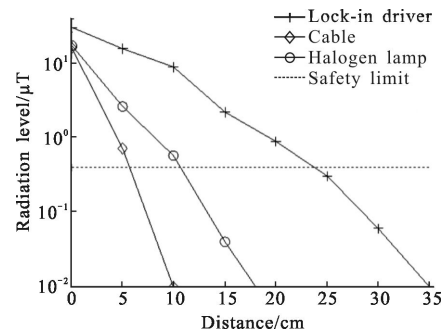


图 11 锁相激励源不同距离上的低频辐射值

Fig.11 Low frequency radiation level of excitation system at different distance

4 结论

文中研究了高精度的红外锁相热激励方法,该方法同时具有信号发生功能和功率放大功能,系统集成度大大提高;以正弦功率输出为例,通过理论计算和数值求解得到了控制角随时间的变化规律,分析了调制频率的误差对输出功率的影响。

搭建实验平台进行了实验,结果表明锁相激励技术的调制频率稳定性较好,变动值小于 0.11%,对输出功率的影响和频率影响可以忽略不计;将文中激励技术的温度波形与常规激励技术进行对比,温度波形保真度得到显著改善;通过理论分析和测量,驱动器的电磁干扰和辐射满足安全使用要求。

文中研究的锁相热激励技术在实现形式上具有结构紧凑、体积小、便于操作使用的优点;热激励波形保真度的提高有利于减小温度序列相位提取误差并提高对比度,为红外锁相热成像技术的推广和应用提供有力的支持。

参考文献:

- [1] Montanini R, Freni F. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography[J]. *Composites: Part A*, 2012, 43: 2075–2082.
- [2] Yang Zhengwei, Zhang Wei, Wu Cuiqin, et al. Infrared thermography applied to evaluate adhesive quality of missile motor shell [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31: 2781–2787. (in Chinese)
杨正伟, 张炜, 吴翠琴, 等. 导弹发动机壳体粘接质量红外热波检测[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31: 2781–2787.
- [3] Feng Licun, Tao Ning, Xu Chuan. Lock-in thermography and its application in nondestructive evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1120–1123. (in Chinese)
冯立春, 陶宁, 徐川. 锁相热像技术及其在无损检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1120–1123.
- [4] Yu Jiajie, Wu Naiming, Zeng Zhi, et al. FRP depth measurement based on pulsed phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1893–1898. (in Chinese)
俞嘉捷, 伍耐明, 曾智, 等. 基于红外脉冲相位热成像技术的玻璃钢深度测量[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1893–1898.
- [5] Wallbrink C, Wade S A, Jones R. The effect of size on the quantitative estimation of defect depth in steel structures using lock-in thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 104907–104908.
- [6] Meola C, Carlomagno G M, Squillace A, et al. Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography [J]. *Meas Sci Technol*, 2002, 13: 1583–1590.
- [7] Meola C, Carlomagno G M. Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography [J]. *Composites: Part A*, 2010, 41: 1839–1847.
- [8] Meola C. Nondestructive evaluation of materials with rear heating lock-in thermography[J]. *IEEE Sensors J*, 2007, 10: 1388–1389.
- [9] Montanini R, Freni F. Nondestructive inspection of luxury yacht glass reinforced composites by means of transient thermography [C]// Proc of 10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT10), 2010.
- [10] Liu Junyan, Wang Yang, Dai Jingmin. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequence for NDT [J]. *Infrared Phys Technol*, 2010, 53: 348–357.
- [11] Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 346–351. (in Chinese)
刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 346–351.
- [12] Montanini R, Freni F. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography [J]. *Composites: Part A*, 2012, 43: 2075–2082.
- [13] Liu Junyan, Liu Xun, Wang Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1416–1422. (in Chinese)
刘俊岩, 刘勋, 王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1416–1422.
- [14] GB 8702–2014. Controlling limits for electromagnetic environment [S]. China: Environment protection department of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
GB 8702–2014. 电磁环境控制限值[S]. 中国: 中华人民共和国环境保护部, 2014.