

基于时域有限差分的渐变温信号传输模型

门秀花¹, 李舜酩², 宋方臻¹, 徐佳³

(1. 济南大学 机械工程学院, 济南 250022;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

3. 中国航空工业集团公司 西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

摘 要: 建立了一种基于时域有限差分(FDTD)的渐变温信号传输模型,利用迭代求解实现了传输导线在不同时间受不同温度影响的仿真分析.结果表明:测试信号的时域平均电压幅值随温度的升高而逐渐衰减,在 573 K 时,电压幅值仅为 303 K 时的 90%左右,衰减幅度近 10%.设计了一种渐变温环境下的振动测试试验,所得的输出信号的自功率谱峰值和时域平均电压幅值均随温度升高而减少,试验结果与仿真分析结果一致.此研究结果有助于提高振动测试的准确性.

关 键 词: 振动测试; 信号传输; 渐变温模型; 时域有限差分; 信号幅值

中图分类号: V215; TH113

文献标志码: A

Signal transmission model with gradient temperature based on finite difference time domain

MEN Xiu-hua¹, LI Shun-ming², SONG Fang-zhen¹, XU Jia³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: A signal transmission model with gradient temperature was established on the basis of finite difference time domain (FDTD) method. And then, an iterative solution was applied to realize the signal transmission with different temperatures at different times. It shows that the time domain average voltage amplitude of output signal gradually attenuates with temperature rise, and at 573 K the voltage amplitude is only about 90% of that of 303 K, with the attenuation rate nearly 10%. The corresponding vibration test with gradient temperature was conducted. The power spectrum peak and time domain average voltage amplitude of output signal gradually reduce with temperature rise, which is consistent with the results of proposed model. The results of study will help to improve the accuracy of vibration test.

Key words: vibration test; signal transmission; gradient temperature model;
finite difference time domain; signal amplitude

对航空发动机的涡轮转子叶片系统进行振动测试,实际高温或者环境温度变化对其产生的影

响是非常明显的.环境温度的变化会直接影响叶片本身的特性(如动频特性^[1]、疲劳断裂等),也使

收稿日期:2013-01-23

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2011ZZ001);济南大学校博士基金(XBS1003)

作者简介:门秀花(1980—),女,山东潍坊人,讲师,博士,主要从事动态信号特征提取与分析方面的研究.

测试结果具有一定的不确定性. 测试系统的传输电缆自身的传输参数具有温度变化特性^[2], 当环境温度变化时, 会改变信号在传输载体内的传输特性, 直接影响终端采集信号响应. 因此, 如何在变化的温度环境下对振动测试信号的特征进行识别与分析, 是极其重要的.

目前, 单纯通过试验实现原始信号和受温度影响下信号的识别和分离是比较困难的. 因此, 在信号传输理论基础上, 利用仿真分析模拟信号传输特性成为一种重要途径. 至今, 研究学者提出了多种有效的数值方法, 如时域有限差分法^[3-4]、特征法^[5]、时域有限元^[6]传输线矩阵法^[7]、数值拉氏逆变换^[8-9]及模态分析^[10]等, 从时域和频域角度出发解决测试信号的传输响应稳定性问题. 将整个振动测试系统看作是一个完整的电路系统, 而信号传输方程表达的是电路响应的求解. 可以采用等效电路的 Spice-Like 模型^[11]对传输参数进行转换, 以纯电路元件形式进行瞬态响应分析. 上述分析方法广泛应用于高频或者纯电路形式的信号传输系统, 当用于分析环境温度变化下的测试信号特征时, 具有明显不足. 实际动力结构测试过程中, 整体的测试环境存在的诸多类型的外在热源, 导致传输导线温度的升高, 直接影响信号响应特性^[12]. 为建立适用于机械测试频率范围内考虑温度影响的信号传输模型, 文献^[13]提出了一种新的信号传输模型, 实现了对渐变温模型的初步研究, 得出了在此种温度变化环境下信号响应的温度变化特性.

针对测试环境温度变化渐变性和多样性的特点, 本文在 FDTD 的理论基础上, 建立一种渐变温信号传输模型, 对信号响应特征的变化进行深入探讨.

1 渐变温信号传输模型的建立

信号的传播速度接近于光速, 可忽略短导线长度对信号传输带来的延迟. 设传输导线处于同一温度环境时, 导线各处的温度相同, 且外界环境温度的逐渐升高或者降低. 设导线信号沿 z 轴传播, 导线温度与时间具有阶梯关系, 如图 1 所示.

设整体传输路径均匀受热, 初始输入信号相同. 导线温度随采集时间而变化, 输出信号是不同温度影响下的输出信号的叠加, 具体的传输模型如图 2 所示.

图 2 中, $V_{i-T_0}, V_{i-T_1}, \dots, V_{i-T_n}$ 和 $V_{o-T_0}, V_{o-T_1}, \dots, V_{o-T_n}$ 为温度 $T_0, T_1, \dots, T_n$ 对应的输

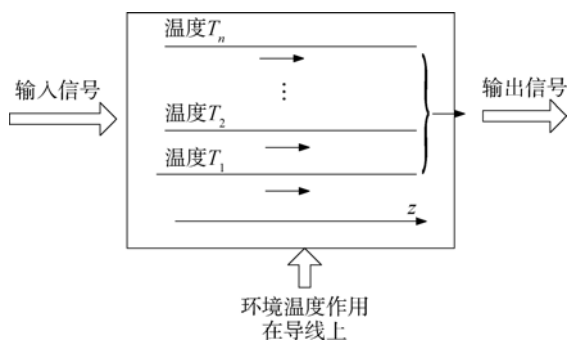


图 1 渐变温信号传输模型中温度随时间变化

Fig. 1 Temperature of gradient temperature of signal transmission model changing with time

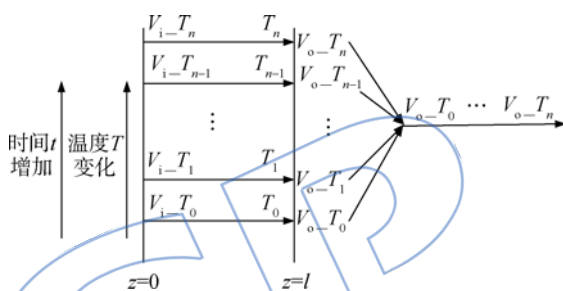


图 2 温度-时间离散示意图

Fig. 2 Discrete diagram of temperature-time

入和输出信号.

2 信号传输的有限差分时空离散求解

2.1 信号传输方程

电报员方程是解决信号传输问题的理论基础^[14]. 在振动测试系统中, 电缆承载信号沿 z 轴方向进行传输

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} + L \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} + RI(z, t) = V_i(z, t)$$

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} + C \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} + GV(z, t) = I_i(z, t)$$

(1)

式中 $V(z, t), I(z, t)$ 分别表示时间 t 时 z 方向的电压和电流分布; $V_i(z, t), I_i(z, t)$ 为时间 t 时单位长度外界激励电压源和电流源; R, L, C, G 为电缆单位长度的电阻、电感、电容和电导. 引入温度参量 T , 建立新的时间-空间离散方程, 即

$$\frac{\partial V(z, t, T)}{\partial z} + L(T) \frac{\partial I(z, t, T)}{\partial t} +$$

$$RI(T)(z, t, T) = V_i(z, t, T)$$

(2)

$$\frac{\partial I(z, t, T)}{\partial z} + C(T) \frac{\partial V(z, t, T)}{\partial t} +$$

$$G(T)V(z, t, T) = I_i(z, t, T)$$

式(2)中, 温度 T 相对于 z 和 t 为非变量, 故可忽

略对温度的离散. 图3利用节点表示了在整个局部 Δz 电压和电流的有限差分离散.

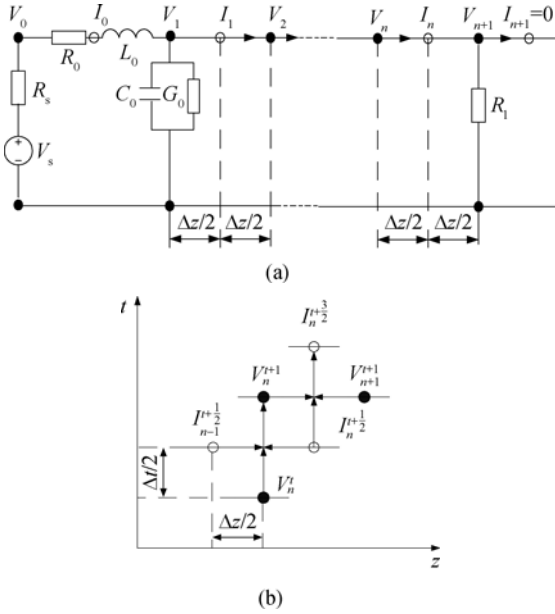


图3 传输方程的时空离散

Fig. 3 Time and space discrete of transfer equation

图3(a)所示的传输模型是在 T 时输出信号由 $z=0$ 到 $z=l$ 进行传输的过程, R, L, C, G 参数因 T 的不同而不同. 这里, R_s 和 R_l 分别为输入端、输出端匹配电阻, V_{n+1} 为输出端的电压分布. 设导线内的电压离散节点为 $n+1$ 个, 电流离散节点为 n 个, 电压、电流离散节点交错放置, 间隔为 $\Delta z/2$. 间隔 Δz 的电压离散节点依次为 $V_2, V_3, \dots, V_{n+1}$, 电流离散节点依次为 $I_2, I_3, \dots, I_n$. 以相同的方法对 Δt 进行离散, 如图3(b)所示. 采用有限差分的中心差分方法对电压和电流进行温度变量的离散, 设 V_i^j, I_i^j 表征不同时刻的电压和电流值, 满足

$$\begin{aligned} V_i^j &= V[(i-1)\Delta z, j\Delta t] \\ I_i^j &= I\left[\left(i-\frac{1}{2}\right)\Delta z, j\Delta t\right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中上标代表时间 t 的变化, 下标代表空间 z 的演化. 结合式(3), 采用1阶中心差分对式(1)对进行离散, 则有

$$\begin{aligned} \frac{V_{n+1}^{t+1} - V_n^{t+1}}{\Delta z} + L(T) \frac{I_n^{t+\frac{3}{2}} - I_n^{t+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \\ R(T) \frac{I_n^{t+\frac{3}{2}} + I_n^{t+\frac{1}{2}}}{2} &= \frac{V_i^{t+\frac{3}{2}} + V_i^{t+\frac{1}{2}}}{2} \\ \frac{I_n^{t+\frac{1}{2}} - I_{n-1}^{t+\frac{1}{2}}}{\Delta z} + C(T) \frac{V_n^{t+1} - V_n^t}{\Delta t} + \\ G(T) \frac{V_n^{t+1} + V_n^t}{2} &= \frac{I_i^{t+1} + I_i^t}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

整理可得

$$\begin{aligned} \left[L(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{R(T)}{2} \Delta z \right] I_n^{t+\frac{3}{2}} = \\ \left[L(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{R(T)}{2} \Delta z \right] I_n^{t+\frac{1}{2}} - \\ (V_{n+1}^{t+1} - V_n^{t+1}) + \frac{\Delta z}{2} (V_i^{t+\frac{3}{2}} + V_i^{t+\frac{1}{2}}) \\ \left[C(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{G(T)}{2} \Delta z \right] V_n^{t+1} = \\ \left[C(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{G(T)}{2} \Delta z \right] V_n^t - \\ (I_n^{t+\frac{1}{2}} - I_{n-1}^{t+\frac{1}{2}}) + \frac{\Delta z}{2} (I_i^{t+1} + I_i^t) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 初始和边界条件

进行信号传输时, 输入端匹配电阻为 R_s , 输入电压为 V_s , 可得初始条件

$$G(T) = \frac{1}{R_s} \quad (6a)$$

$$\frac{C(T)}{2} \Delta z = C(T) \Delta z \quad (6b)$$

$$I_i = \frac{V_s}{R_s \Delta z} \quad (6c)$$

将初始条件式(6)代入离散方程式(5)中,

可得

$$\begin{aligned} \left[C(T) R_s \frac{\Delta z}{\Delta t} + 1 \right] V_1^{t+1} = \\ \left[C(T) R_s \frac{\Delta z}{\Delta t} - 1 \right] V_1^t - 2 R_s I_i^{t+\frac{1}{2}} + (V_s^{t+1} + V_s^t) \end{aligned} \quad (7)$$

在输出端时有匹配电阻 R_l , 边界条件满足

$$I_{n+1} = 0 \quad (8a)$$

$$G(T) \Delta z = \frac{1}{R_l} \quad (8b)$$

$$I_i \Delta z = \frac{V_l}{R_l} \quad (8c)$$

$$\frac{C_l}{2} \Delta z = C(T) \Delta z \quad (8d)$$

将式(8)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} \left[C(T) R_l \frac{\Delta z}{\Delta t} + 1 \right] V_{n+1}^{t+1} = \\ \left[C(T) R_l \frac{\Delta z}{\Delta t} - 1 \right] V_{n+1}^t + 2 R_l I_n^{t+\frac{1}{2}} + (V_l^{t+1} + V_l^t) \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 迭代方程求解

当不考虑传输导线所受的中间激励源作用时, V_i 和 I_i 均为等于零, 可得到有限差分的时空离散信号传输方程为

$$V_1^{t+1}(T) = \left[C(T)R_s \frac{\Delta z}{\Delta t} + 1 \right]^{-1} \cdot \left\{ \left[C(T)R_s \frac{\Delta z}{\Delta t} - 1 \right] V_1^t(T) - 2R_s I_1^{t+\frac{1}{2}}(T) + (V_s^{t+1} + V_s^t) \right\} \quad (10a)$$

$$V_{n+1}^{t+1}(T) = \left[C(T)R_l \frac{\Delta z}{\Delta t} + 1 \right]^{-1} \cdot \left\{ \left[C(T)R_l \frac{\Delta z}{\Delta t} - 1 \right] V_{n+1}^t(T) + 2R_l I_n^{t+\frac{1}{2}}(T) + (V_l^{t+1} + V_l^t) \right\} \quad (10b)$$

$$V_n^{t+1}(T) = \left[C(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{G(T)}{2} \Delta z \right]^{-1} \cdot \left\{ \left[C(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{G(T)}{2} \Delta z \right] V_n^t(T) - \left[I_n^{t+\frac{1}{2}}(T) - I_{n-1}^{t+\frac{1}{2}}(T) \right] \right\} \quad (10c)$$

$$I_n^{t+\frac{1}{2}}(T) = \left[L(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{R(T)}{2} \Delta z \right]^{-1} \cdot \left\{ \left[L(T) \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{R(T)}{2} \Delta z \right] I_n^{t-\frac{1}{2}}(T) - \left[V_{n+1}^t(T) - V_n^t(T) \right] \right\} \quad (10d)$$

为保证迭代求解的收敛性,选取合适的 Δz 和 Δt ,对式(10)进行时间和空间的迭代计算,获取终端信号响应。

3 仿真与分析

由图 2 可知,所建立的传输模型具有两个重要特点:一是导线整体承受相同的温度,即传输参数 R, L, C, G 仅与温度有关^[12],与导线所处的位置无关;二是初始输入信号相同,但不同时间导线温度不同,传输参数也不同,进而引起信号响应发生改变。设温度的初始值为 $T_0 = 303 \text{ K}$ (约为 30°C),终点值为 $T_N = 573 \text{ K}$ (约为 300°C),其中的 $T_1, T_2, \dots, T_{N-1}$ 为由低到高排列的温度值。

3.1 温度对信号电压幅值的影响

设传输导线长度为 10 m 。在 $z=0$ 处,输入信号是电压幅值(以下简称幅值)为 1 V 、频率为 1000 Hz 的正弦信号,在 $z=l$ 处得到采集信号。 $R_s = R_l = 50 \Omega$,形成阻抗的完全匹配,此时理想的输出信号为输入信号的一半,即 0.5 V 。设初始状态环境温度即导线的初始温度为 303 K 。经过一定时间后,最高环境温度为 573 K 。由文献[2]获取传输参数 R, L, C, G 的温变特性,采用 Matlab 编程实现对式(10)的迭代求解。图 4 给出了整体

导线分别在 573 K 时与环境温度 303 K 时的输出信号响应。

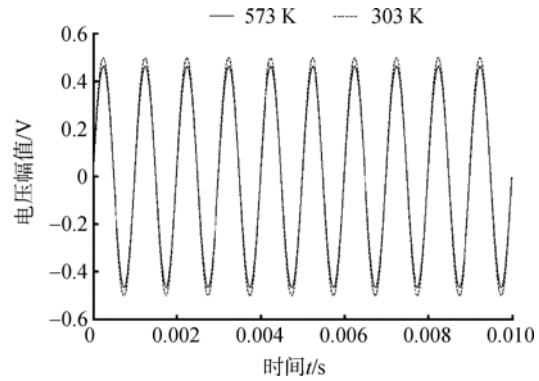


图 4 573 K 和 303 K 时信号响应图

Fig. 4 Signal response of 573 K and 303 K

常温 303 K 时为无失真传输,输出信号的幅值为 0.5 V 。图 4 中的实线和虚线分别表示为 573 K 和 303 K 的输出信号响应。研究表明,温度升高会直接影响到信号幅值。相比 303 K 的信号响应, 573 K 时信号的平均幅值为 0.4674 V ,为原来 0.5 V 的 92.9% ,即近 7% 的幅值已经衰减。由迭代式(10)和信号传输方程可知, R, L, C, G 的变化必然引起信号响应特性的变化。相比而言,温度变化对传输信号的相位偏移产生的影响并不明显,主要以影响信号幅值为主。

3.2 温度对信号幅值变化幅度的影响

由图 2 可知,整体导线承受的温度是一个逐渐变化的过程。本文着重研究的是,当整体环境温度从 T_0 变化至 T_N 时,终端采集的信号响应的变化情况。当环境温度在一定时间段内逐渐上升时,可设导线温度 T 与采集时间 t 成正比,表达为一个连续的函数。定义信号响应幅度为 δ_T ,表征在不同温度下输出信号的幅值相比于 303 K 时的幅值的大小程度

$$\delta_T = \frac{V_o}{V_{o,303\text{K}}} \times 100\% \quad (11)$$

由传热学理论计算可知^[15],在完全热传导、饱和水蒸气强制对流环境中,导线温度从 273 K (约为 0°C) 上升到 573 K 所需时间小于 200 s ,因而可以假设每 0.5 s 导线温度将变化 1 K 。就 1000 Hz 的信号来说, 0.5 s 内已经传递 5 个周期。与此同时,导线温度每变化 1 K ,传输参数 R, L, C, G 就随之发生变化,信号响应也相应改变。图 5 给出了 303 K 及 $303 \text{ K} \rightarrow 573 \text{ K}$ 时的输出信号响应幅度 δ_T 的变化情况。

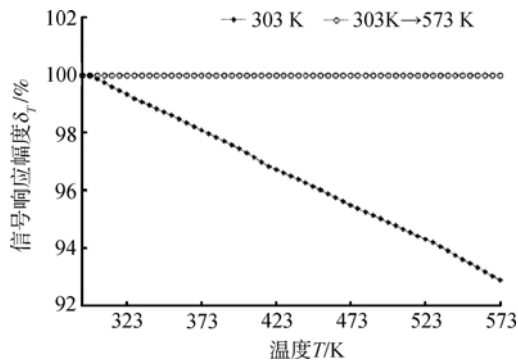


图5 随温度变化的输出信号响应幅度

Fig. 5 Response amplitude of output signal changing with temperature

从图5可以看出,在303 K时, δ_T 为100%,当环境温度由303 K逐渐升高至573 K时,信号响应幅度 δ_T 变为92.6%,信号响应幅度呈现逐渐减小的特点.可见,与原始传感器采集到的信号相比,环境温度越高,对信号幅值衰减的贡献越大.分析其原因,主要是导线温度的升高,导致了传输参数 R, L, C, G 的变化,改变了信号传输方程得到的电压和电流,由此造成了较大的信号幅值衰减.信号幅值的衰减必然会影响到信号特征的识别与分析,因此测试环境温度的升高给信号分析带来了一定的不确定性.

4 试验

4.1 试验系统

在结构振动测试试验基础上,设计的测试环境温度具有瞬态逐渐升高或逐渐降低的特点.结构测试部分选用钢板作为试验构件,由激振器对结构构件产生振动,经加速度传感器测试输出两路信号(一路为常温环境,另一路为渐变温环境).具体温变环境的实现方案如图6所示.

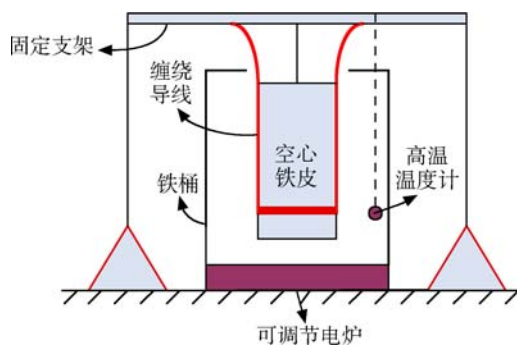


图6 温变环境试验模型

Fig. 6 Test model of temperature changing environment

由图6可知,铁桶内放置导线和可调节电炉,水平线的导线温度与高温温度计处于同一水平线.调节电炉功率,使桶内温度升高.由于桶内热量的散发,桶内温度随桶的高度逐渐降低,但同一水平线的温度基本相同.桶内热量与导线进行热交换,实现导线温度的升高.

设计两种试验工况.一为升温工况,启动振动测试系统,保持所有系统参数恒定;输出两路信号:无温度影响的原始信号1,渐变温变化的测试信号2;打开可调节电炉,当固定于某一功率时,测量桶内环境温度,由计算机记录采集数据;当温度计指数达到最大值保持恒定时关闭电炉,该瞬态升温所能达到的最高温度值为533 K(约为260℃).二是降温工况,重新建立数据库,继续采集信号,直到桶内热量散发,温度计指数变为环境温度303 K,这是一个瞬态降温的过程.

4.2 数据分析

试验中,瞬态升、降温过程的测试采集时间超过100 s,设采样频率为12.8 kHz,正弦信号输入频率为1000 Hz,采集数据量较大.对信号进行滤波等一系列数据处理,采用分段截取特征点的方法获取自功率谱峰值和时域平均幅值进行研究.表1给出了不同温度所对应的自功率谱峰值, δ_T 是以303 K为基准计算所得.

由表1可以看出,在瞬态变温环境中,信号的自功率谱峰值随温度的升高而降低,升温(303 K→533 K)和降温(533 K→303 K)的最小值分别为303 K时的92.6%和93.6%.在相同温度下,两个过程的自功率谱峰值近似相等.摒弃试验误差,这两个模型的差值保持在1%左右,具有很好的一致性.

为更加直观地获取温度对信号的影响,对采集信号进行处理,获取两种模型的时域平均幅值变化情况,如图7所示.

由图7可知,在瞬态升温 and 降温的过程中,信号的时域平均幅值相差较小,变化趋势均与温度成反比,这与自功率谱峰值的变化规律一致.在同一温度下,升温状态下的信号时域平均幅值略大于降温状态时的信号时域平均幅值.将仿真结果与试验结果进行比较,建立以环境温度303 K为基准的信号响应幅度 δ_T .图8给出了两种工况下,不同温度的信号时域平均幅值相对于303 K时信号时域平均幅值的 δ_T 变化曲线.

从图8可以看出,仿真结果的 δ_T 随温度的升

表 1 不同温度下的自功率谱峰值

Table 1 Power spectrum peak at different temperatures

温度/K	瞬态升温 (303 K→533 K)		瞬态降温 (533 K→303 K)	
	自功率谱峰值/ $10^6 (\text{m}^2/(\text{s}^3 \cdot \text{rad}))$	信号响应幅度 $\delta_T/\%$	自功率谱峰值/ $10^6 (\text{m}^2/(\text{s}^3 \cdot \text{rad}))$	信号响应幅度 $\delta_T/\%$
303	8.01		7.91	
353	7.87	98.2	7.83	99.0
373	7.85	98.0	7.81	98.8
413	7.73	96.5	7.72	97.7
453	7.66	95.6	7.63	96.5
493	7.53	94.0	7.50	95.3
533	7.42	92.6	7.41	93.6

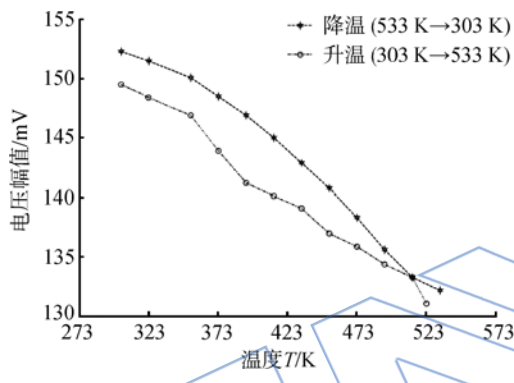


图 7 渐变温过程信号时域平均幅值
Fig. 7 Time domain average amplitude of signal at gradient temperature processes

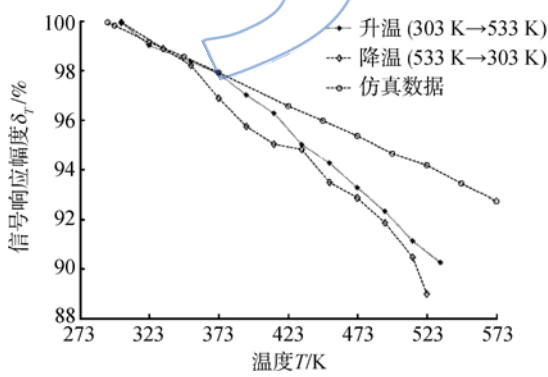


图 8 试验与仿真结果的信号响应幅度
Fig. 8 Response amplitude of signal of experiment and simulation results

高线性降低,而试验结果在一定范围内有波动.其原因是,仿真分析仅对单一信号进行传输,不考虑干扰信号带来的影响.实际测试中,采用一定科学手段对现场的干扰信号进行完全摒除是比较困难的.从信号幅值的变化规律来看,仿真结果在 533

K 时的幅值为 303 K 时的 94%左右,试验中两种工况的信号幅值随温度升高的最大衰减至 90%左右,幅值降低程度要比仿真结果更加明显.摒除试验测试存在的误差,试验与仿真结果基本吻合,这也验证了本文所建理论模型的合理性.

5 结 论

将 FDTD 方法应用于渐变温环境的信号传输分析中,能够获取信号响应受温度影响的变化规律.在此基础上建立的测试试验,验证了仿真分析的正确性,更加明确了信号响应的温变特性,得到了以下结论:

- 1) 利用 FDTD 方法建立了不同温度、初始输入信号相同的渐变温模型,给出了相应的迭代求解方程,更加直观地表征测试试验系统受环境温度影响的特性.
- 2) 导线 R, L, C, G 传输参数的温变特性最终导致了信号传输响应的变化.仿真结果表明,温度升高主要影响信号幅值.输出信号幅值随温度的升高逐渐减小,当温度由 303 K 升高至 573 K 时,信号响应幅度 δ_T 变为 303 K 时的 92%左右,具有明显的衰减.这一变化特性对于进行高精度测试产生的影响是极其重要的.
- 3) 利用热传导原理设计了渐变温测试环境,实现了传输导线温度的升温 and 降温.当导线处于高温环境中时,自功率谱峰值减少,信号的时域平均幅值随温度升高也逐渐减少,在 533 K 时减少至 303 K 时的 90%左右,试验结果和仿真结果基本吻合.
- 4) 应用 FDTD 方法建立仿真模型,确定温度

变化对信号响应的影响是可行的. 研究结果最终有利于提高信号的分析精度, 增加所得结构特征的准确性.

参考文献:

- [1] 孙强, 张忠平, 柴桥, 等. 航空发动机压气机叶片振动频率与温度的关系[J]. 应用力学学报, 2004, 21(4): 137-139. SUN Qiang, ZHANG Zhongping, CHAI Qiao, et al. Temperature effect on vibration frequency of aero-engine compressor blade[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(4): 137-139. (in Chinese)
- [2] 门秀花, 李舜酩, 胡瑞, 等. 高温环境对振动测试信号传输参数的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(8): 1731-1735. MEN Xiuhua, LI Shunming, HU Rui, et al. Effects on transmission parameters of vibration measurement for high temperature environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(8): 1731-1735. (in Chinese)
- [3] Kambiz A, Abdolali A, Ahad T, et al. Time-domain analysis of lossy active transmission method[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2009, 63(3): 168-178.
- [4] Roden A J, Paul C R, Smith W T, et al. Finite-difference, time-domain analysis of lossy transmission lines[J]. Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(1): 15-24.
- [5] Xu Q W, Li Z F, Wang J, et al. Transient analysis of lossy interconnects by modified method of characteristics[J]. Circuits and Systems: Foundational Theory and Application, 2000, 47(3): 363-375.
- [6] Lee S Y, Konrad A. Lossy transmission line transient analysis by the finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 1730-1732.
- [7] Hoefer J R. The transmission-line matrix method: theory and applications[J]. Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(10): 882-893.
- [8] Chang E C, Kang S M. Computationally efficient simulation of a lossy transmission line with skin effect by using numerical inversion of Laplace transforms[J]. Circuits and Systems: Foundational Theory and Application, 1992, 39(11): 861-868.
- [9] 郭裕顺. 用 NILT 导出的传输线瞬态分析模型[J]. 电子学报, 2002, 30(3): 381-385. GUO Yushun. Transmission line model of transient simulation derived using the NLIT techniques [J]. Acta Electronic Sinica, 2002, 30(3): 381-385. (in Chinese)
- [10] Gomes S J, Martins N, Varicchio S L, et al. Modal analysis of electromagnetic transients in AC networks having long transmission lines [J]. Power Delivery, 2005, 20(4): 2623-2630.
- [11] Caniggia S, Maradei F. Spice-like models for the analysis of the conducted and radiated immunity of shields cables[J]. Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 606-616.
- [12] 门秀花, 李舜酩. 温度变化对振动信号传输的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(1): 16-20. MEN Xiuhua, LI Shunming. Simulating analysis of vibrated signal transmission in changing temperature environment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(1): 16-20. (in Chinese)
- [13] 门秀花, 李舜酩, 杨东. 温变环境中测试信号传输的仿真及试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1543-1550. MEN Xiuhua, LI Shunming, YANG Dong. Simulation and experimental investigation of test signal transmission on temperature changing environment [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1543-1550. (in Chinese)
- [14] 黄至洵, 王晓金. 微波传输线理论与实用技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.