

文章编号:1000-8055(2011)07-1543-08

温变环境中测试信号传输的仿真及试验

门秀花¹, 李舜酩², 杨 东¹

- (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)

摘 要: 信号传输理论应用于电路网络中,由基尔霍夫定律推导了离散的温度-时间信号传输模型,给出了一种基于电压和电流的迭代算法,分别实现了导线升温、降温过程的信号传输仿真分析.研究表明:测试信号幅值随温度升高而逐渐衰减,在 300℃时,幅值衰减了 10%左右,而在升、降温并存环境中幅值衰减更加明显.在此基础上,设计了温变环境下的振动测试试验,所得结果与仿真分析结果一致.该研究为提高振动测试信号的精度提供了一种新方法.

关 键 词: 振动测试; 信号传输; 温变环境; 渐变温模型; 信号幅值
中图分类号: TM15; TH113 **文献标志码:** A

Simulation and experimental investigation of test signal transmission on temperature changing environment

MEN Xiu-hua¹, LI Shun-ming², YANG Dong¹

- (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)

Abstract: The signal transmission theory was applied to circuit network to obtain discrete temperature-time signal transmission model derived by Kirchhoff's law. And then, an iterative algorithm based on voltage and current was proposed, realizing the signal transmission with different temperature change processes. It shows that the amplitude of output signal gradually attenuates with the rise of conductor temperature, by 10% at 300℃. And the amplitude attenuation is more evident due to the coexistence of conductor temperature rise and drop. The corresponding experiment has been conducted, and the results can meet that of proposed model. It provides a new method for improving the accuracy of vibration test signal.

Key words: vibration test; signal transmission; temperature changing environment; temperature gradient model; signal amplitude

测试信号的处理与分析是动力机械测试系统的关键组成部分,已成为相关科研机构研发的重点.在前人研究的基础中,提出了许多有效的方法^[1].信号经过滤波、各种变换等技术被用于实际工程.然而,发动机及周围环境温度场是随车速等

因素而发生变化的,温度场直接作用于传输路径^[2],将会影响测试信号传输所具有的波的特性,最终改变终端采集的测试信号的原始特征.因而,研究温变环境下测试信号传输的变化特性,对提高信号分析精度、获取准确的结构特征具有重要

收稿日期:2010-06-03; 修订日期:2010-12-12

基金项目: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,主要从事动态信号特征提取与分析方面的研究.

意义。

目前,在信号传输方面,以往的研究表明,测试信号传输的响应特性主要与信号的激励频率有关,尤其是在高速和微波电路中^[3]。现有的信号传输模型多是基于电报员方程而发展起来的^[4]。考虑到对此方程解析求解的复杂性,多种数值方法从时域和频域角度出发得到了广泛的应用。时域有限差分方法(FDTD)^[5-6]、传输线矩阵法^[7-8]、快速傅里叶变换法^[9]、数值拉氏逆变换^[10]及模态分析法^[11]等方法,分别在时域或频域内特定条件下实现了特定领域的信号传输分析。实际上,信号传输方程表达的就是电路响应的求解,因而等效电路 Spice-like 模型就实现了将传输参数转换成纯电路元件进行瞬态响应分析^[12]。然而,就整体分析方法而言,上述研究的重点在于始、终端的瞬态响应分析及具有高频分布参数的传输网络的研究。然而,动力系统结构的频率中低频居多,参数的频变特性变化较小,暂态响应不明显。

值得注意的是,环境温度的变化对传输参数的影响是显著的,这就使得信号响应的特征识别变得更加重要。作者针对工程实际测试系统,在以往时域信号传输分析的基础上,建立适应于环境温度变化的信号传输模型,对信号响应的特征变化进行深入探讨。

1 信号传输模型理论化

由于实际测试信号传输过程所受外界干扰的复杂性,这里只考虑外界环境温度变化对测试信号传输的影响,图1给出了信号传输网络的示意图。

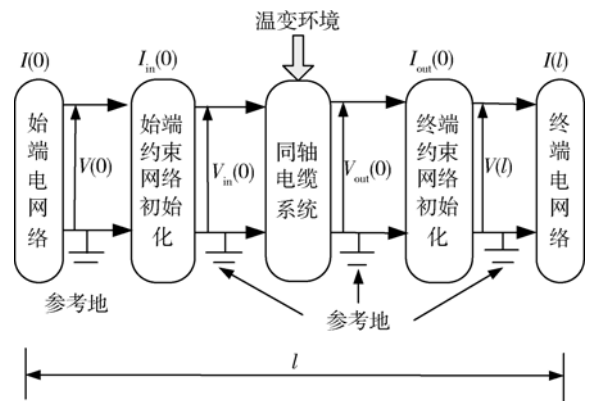


图1 测试信号网络示意图

Fig.1 Chart of test signal network

在图1中, $V(0)$ 和 $I(0)$ 作为传感器采集的输入信号, $V(l)$ 和 $I(l)$ 为终端信号。电报员方程是

解决信号传输问题的基础,电阻 R 、电容 C 和电感 L 、电导 G 为电缆单位长度传输参数,即

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial z} + \left[R + L \frac{\partial}{\partial \tau} \right] I = 0 \\ \frac{\partial I}{\partial z} + \left[G + C \frac{\partial}{\partial \tau} \right] V = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表征为无外界输入源的信号传输方程。对于如图1所示的网络,需将传感器采集到的信号作为输入源,即

$$\frac{\partial V(z, \tau)}{\partial \tau} + L \frac{\partial I(z, \tau)}{\partial z} + RI(z, \tau) = V_f(z, \tau) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial I(z, \tau)}{\partial \tau} + C \frac{\partial V(z, \tau)}{\partial z} + GV(z, \tau) = I_f(z, \tau) \quad (2b)$$

式中 $V(z, \tau)$, $I(z, \tau)$ 表示时间 τ 电缆 z 方向的电压分布和电流分布; $V_f(z, \tau)$, $I_f(z, \tau)$ 为时间 τ 时单位长度外界激励电压源和电流源,对应于图1中的 $V(0)$, $I(0)$ 。建立合理的迭代算法是进行求解方程的关键。而当环境温度 t 变化时, R, L, C, G 均是温度 t 的函数,代入式(2)中可得

$$\frac{\partial V(z, \tau)}{\partial \tau} + L(t) \frac{\partial I(z, \tau)}{\partial z} + R(t) I(z, \tau) = V_f(z, \tau) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial I(z, \tau)}{\partial \tau} + C(t) \frac{\partial V(z, \tau)}{\partial z} + G(t) V(z, \tau) = I_f(z, \tau) \quad (3b)$$

这时,传输方程具有三个参变量: t, z, τ 。因此以往两参变量的信号传输模型求解仍需进行改进。本文根据测试环境的温度变化情况,建立一种合理的变温信号传输模型,提出了一种新的转换方法,实现信号传输方程的迭代求解。

2 渐变温信号传输模型的建立

由于测试系统所处环境温度变化特性的复杂性及多样化,这里仅选取的测试环境温度变化特性满足如图2所示。

在图2中,为确保仪器的正常工作,导线两端温度较低,这里设定为常温的 20°C 。而高温是指导线经由的高温环境,电缆温度从低温到高温或高温到低温的渐变是由与环境热量的交换而产生的。

2.1 理论模型的建立

由图2表征的带温度干扰的信号传输模型,可采用积分方法来对温度的上升或下降进行求解。但由于传输参数在不同温度下具有不同值,给

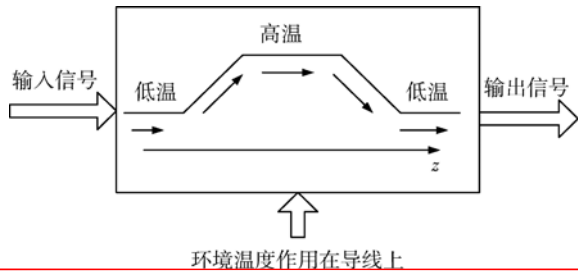


图 2 渐变温模型

Fig. 2 Temperature gradient model

积分求解带来一定的困难. 本文对温度 t 进行小载荷步的离散, 能得到较精确的结果. 选取 Δt 作为离散温度步, 并设在此 Δt 内四个参数表示为 $\Delta R(t), \Delta L(t), \Delta C(t), \Delta G(t)$, 选取中间的 Δt 段进行电路分析, 则具有渐变温特性的传输模型由

图 3 所示.

设此段内始端电压和电流分别为 $V(t), I(t)$, 输出端为 $V(t) + \Delta V(t), I(t) + \Delta I(t)$, 整个电路满足基尔霍夫定律, 进行转换可获得具有温度变化特性的传输方程为

$$\frac{\partial V(t, \tau)}{\partial t} + R(t) \cdot I(t) + L(t) \cdot \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} = V_f(t, \tau)$$

$$\frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} + G(t) \cdot V(t) + C(t) \cdot \frac{\partial V(t, \tau)}{\partial \tau} = I_f(t, \tau)$$

(4)

其中 $V(t, \tau), I(t, \tau)$ 表示时间 τ 时导线温度为 t 的电压和电流分布; $V_f(t, \tau), I_f(t, \tau)$ 表示时间 τ 时单位长度外界的激励电压和电流源. 公式(4)仅表达了电压和电流在温度和时间上的分布, 本文称之为温度-时间离散模型.

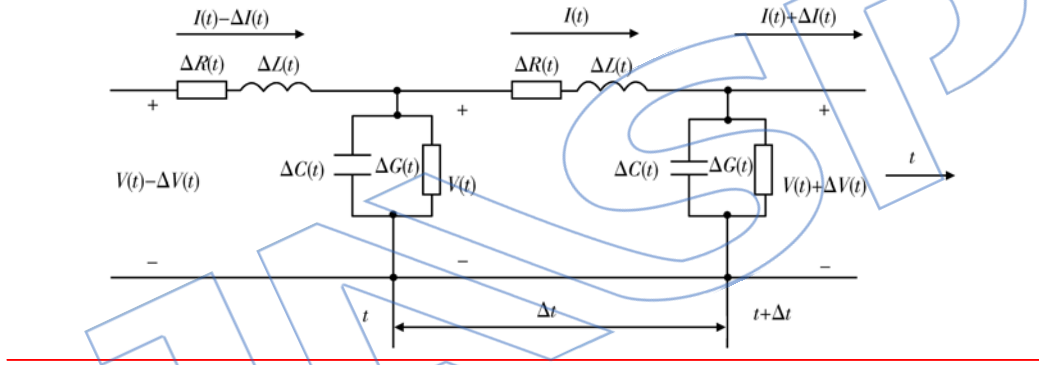


图 3 渐变温模型的等效电路示意图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of temperature gradient model

2.2 迭代求解

将图 3 表达的局部 Δt 段在整个温度场域内延伸, 电压和电流分布随温度而改变, 分别采用节点表示, 且电流节点置于两个电压节点中间, 如图 4 表示为温度-时间域上的离散示意图.

V_{ii}^j, I_{ii}^j 分为表征为不同时刻不同温度的电压

和电流值, 设 V_{ii}^j 和 I_{ii}^j 满足

$$V_{ii}^j = V((ti) \Delta t, j \Delta \tau)$$

$$I_{ii}^j = \left[\left(ti + \frac{1}{2} \right) \Delta t, j \Delta \tau \right] \quad (5)$$

则对公式(4)的离散方程变为

$$\frac{V_{ii+1}^{j+1} - V_{ii}^{j+1}}{\Delta t} + L_{ii} \cdot \frac{I_{ii+\frac{3}{2}}^{j+\frac{3}{2}} - I_{ii+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta \tau} + R_{ii} \cdot \frac{I_{ii+\frac{3}{2}}^{j+\frac{3}{2}} + I_{ii+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}}{2} = \frac{V_{fi}^{j+\frac{3}{2}} + V_{fi}^{j+\frac{1}{2}}}{2}$$

$$\frac{I_{ii+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - I_{ii-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + G_{ii} \cdot \frac{V_{ii}^{j+1} - V_{ii-1}^j}{\Delta \tau} + C_{ii} \cdot \frac{V_{ii}^{j+1} + V_{ii}^j}{2} = \frac{I_{fi}^{j+1} + I_{fi}^j}{2} \quad (6)$$

整理可得

$$\left[L_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + \frac{R_{ii}}{2} \Delta t \right] I_{ii+\frac{3}{2}}^{j+\frac{3}{2}} = \left[L_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - \frac{R_{ii}}{2} \Delta t \right] I_{ii+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - (V_{ii+1}^{j+1} - V_{ii}^{j+1}) + \frac{\Delta t}{2} (V_{fi}^{j+\frac{3}{2}} + V_{fi}^{j+\frac{1}{2}}) \quad (7a)$$

$$\left[C_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + \frac{G_{ii}}{2} \Delta t \right] V_{ii}^{j+1} = \left[C_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - \frac{G_{ii}}{2} \Delta t \right] V_{ii}^j - (I_{ii+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - I_{ii-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}) + \frac{\Delta t}{2} (I_{fi}^{j+1} + I_{fi}^j) \quad (7b)$$

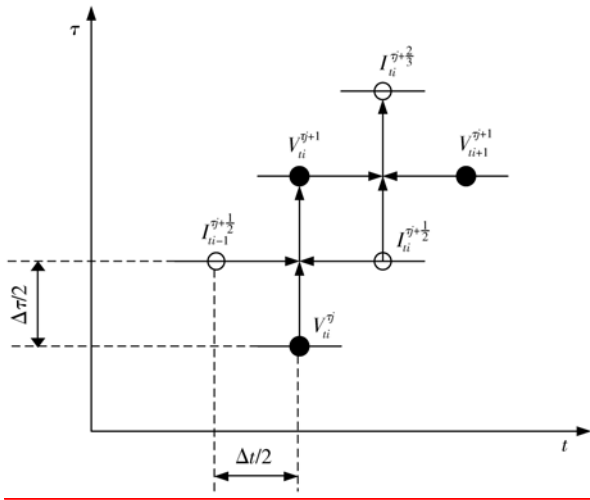


图 4 电压和电流分布在温度和时间上的离散示意图

Fig. 4 Discrete chart of voltage and current on temperature and time

2.3 初始和边界条件

由图 3 可知,信号传输的初始条件满足 $t_1 = t_0$, 且存在源匹配电阻 R_s ,故满足

$$G_0 = \frac{1}{R_s} \quad (8a)$$

$$\frac{C_0}{2} \Delta t = C_i \Delta t \quad (8b)$$

$$I_f = \frac{V_s}{R_s \Delta t} \quad (8c)$$

将边界条件式(8)带入离散方程(7a)中,则在 t_1 时的电压和电流为

$$\left[C_0 R_s \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + 1 \right] V_{i1}^{j+1} = \left[C_0 R_s \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - 1 \right] V_{i1}^j - 2 R_s I_{i1}^{j+1/2} + (V_s^{j+1} + V_s^j) \quad (9)$$

在 t_{N+1} 时有匹配电阻 R_l ,边界条件满足

$$I_{iN+1} = 0 \quad (10a)$$

$$G_{iN+1} \Delta t = \frac{1}{R_l} \quad (10b)$$

$$I_f \Delta t = \frac{V_l}{R_l} \quad (10c)$$

$$\frac{C_l}{2} \Delta t = C_i \Delta t \quad (10d)$$

则 t_{N+1} 的求解方程可由离散公式(7b)和边界条件(10)获得

$$\left[C_{iN} R_l \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + 1 \right] V_{iN+1}^{j+1} = \left[C_{iN} R_l \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - 1 \right] V_{iN+1}^j + 2 R_l I_{iN}^{j+1/2} + (V_l^{j+1} + V_l^j) \quad (11)$$

2.4 基于温度-时间的迭代算法

在温度 t_2 到 t_N 段,设无外界激励,即 $V_f = 0$ 和 $I_f = 0$,在满足初始条件式(8)和边界条件式(9)时,信号传输的离散迭代方程为

$$V_{i1}^{j+1} = \left[C_0 R_s \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + 1 \right]^{-1} \cdot \left[\left[C_0 R_s \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - 1 \right] V_{i1}^j - 2 R_s I_{i1}^{j+1/2} + (V_s^{j+1} + V_s^j) \right] \quad (12a)$$

$$V_{iN+1}^{j+1} = \left[C_{iN} R_l \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + 1 \right]^{-1} \cdot \left[\left[C_{iN} R_l \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - 1 \right] V_{iN+1}^j + 2 R_l I_{iN}^{j+1/2} + (V_l^{j+1} + V_l^j) \right] \quad (12b)$$

$$V_{ii}^{j+1} = \left[C_{ii-1} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + \frac{G_{ii-1}}{2} \Delta t \right]^{-1} \cdot \left[\left[C_{ii-1} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - \frac{G_{ii-1}}{2} \Delta t \right] V_{ii}^j - (I_{ii}^{j+1/2} - I_{ii-1}^{j+1/2}) \right] \quad (12c)$$

$$I_{ii}^{j+1/2} = \left[L_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} + \frac{R_{ii}}{2} \Delta t \right]^{-1} \cdot \left[\left[L_{ii} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} - \frac{R_{ii}}{2} \Delta t \right] I_{ii}^{j-1/2} - (V_{ii+1}^j - V_{ii}^j) \right] \quad (12d)$$

为保证迭代求解的收敛性, Δt 和 $\Delta \tau$ 要保证足够小,确保求解的精度.公式(12)中的每个参数与温度的变化保持一致,也使电压和电流随温度而改变,这样的求解增加了迭代求解的难度.

3 仿真与分析

依据图 2 所示的测试系统导线温度变化情况,建立图 5 所示的信号传输电路示意图.

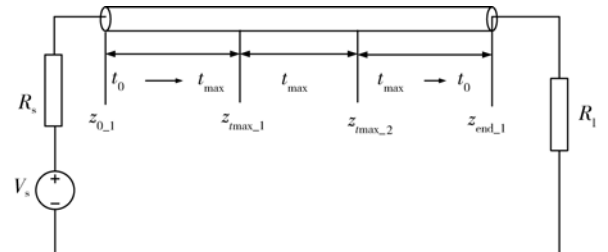


图 5 随温度而变化的信号传输模型

Fig. 5 Signal transmission model changing with temperature

图 5 中, V_s 为信号输入源; R_s 和 R_l 分别为源和终端电阻, z_{0-1} 对应于温度上升时的起点 t_0 ;

$z_{\max_1}$ 和 $z_{\max_2}$ 分别为导线温度为 $t_{\max}$ 的初始和结束位置; z_{end_1} 为导线温度下降为 t_0 时的位置. 分析采用的导线为耐高温的同轴电缆, 单位长度电阻、电感、电容、电导 (R, L, C, G) 的变化特性采用参考文献[13]. 从图中可以看出, 测试信号传输网络分为三个部分: 导线沿 z 方向升温、保持高温及降温过程, 这里分别对升温、降温和整体三个过程进行离散求解, 获取相应的信号响应.

3.1 信号幅值的变化

为避免导线过长而造成信号延迟, 本文设传输导线的长度为 10 m. 在 z_{0_1} 处的输入信号是幅度为 1 V、频率为 1000 Hz 的正弦信号, 在 z_{end_1} 处得到采集信号. 源和终端的电阻 $R_s = R_l = 50 \Omega$, 形成阻抗完全匹配, 满足输出信号为输入信号的一半.

设导线的初始温度为 20 °C, 最高环境温度为 300 °C, 采用 Matlab 编程实现了对公式(12)的迭代求解. 图 6 给出了常温 20 °C 和渐变温到 300 °C 的信号响应的比较.

图 6 突显出不同温度对信号输出响应 V_o 的重要影响. 实线和虚线分别表示常温 20 °C 和渐变温 300 °C 的输出响应. 相比常温信号响应来说, 300 °C 的渐变温作用使信号输出响应的幅值明显下降, 幅值仅为原来的 95.036%. 这主要是因为在整个变温过程中, R, L, C, G 参数随 Δt 迭代变化造成的. 值得注意的是, 传输信号的相位偏移并不明显. 因此, 温度变化对信号响应的影响以对信号幅值为主.

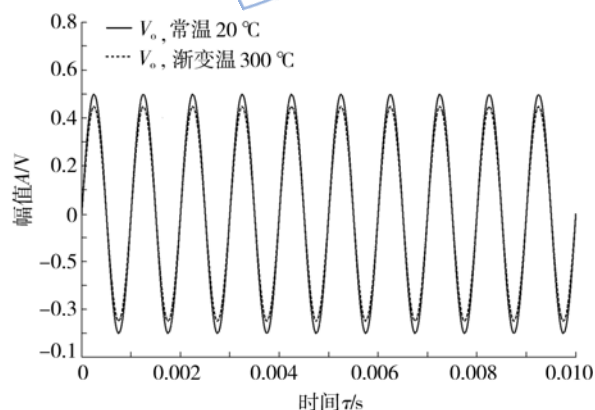


图 6 1000 Hz 时 20 °C 和 300 °C 的信号响应图

Fig. 6 Signal response of 1000 Hz at 20 °C and 300 °C

3.2 不同温度幅值变化

实际上, 在这种测试环境中, 导线的温度变化

经历了三个过程, 信号响应的变化特性也是依次得到的. 下面对此分别进行分析.

1) 传输路径升温. $0 \sim z_{0_1}$ 为部分导线处于常温 20 °C 环境中, $z_{0_1} \sim z_{\max_1}$ 为导线受外界环境而逐渐升温的过程.

2) 传输路径降温. $z_{\max_2} \sim z_{\text{end}_1}$ 为导线受外界环境渐变降温作用, $z_{\text{end}_1} \sim z_{\text{end}}$ 为部分导线处于常温环境 20 °C 中. 输入信号与升温过程一致.

3) 传输路径升温-恒温-降温. 此模型融合了上述的渐变升温 and 降温过程, 并考虑了中间高温环节的作用. 此时, 渐变升温过程首先造成了传递信号的衰减. 在高温区内, 由于传输参数在某一温度保持不变, 可设信号从高温区的一端到另一端认为是无衰减的传递, 在渐变降温的初始输入信号则是经过渐变升温作用而已经衰减后的信号.

考虑不同 $t_{\max}$ 的响应情况, 选取 $t_{\max}$ 为一从低到高的温度变化过程. 设各个温度下的信号响应幅值为 V_{o_t} , 20 °C 时的输出响应为 $V_{o_{20}}$, 则设幅值比较百分比为 δ_t , 即

$$\delta_t = \frac{V_{o_t}}{V_{o_{20}}} \times 100\% \quad (13)$$

那么, 信号响应的衰减可用 $1 - \delta_t$ 表示, 三个过程在不同温度下的衰减值如表 1 所示.

表 1 渐变升温 and 降温过程信号响应衰减比较
Table 1 Comparison of signal response attenuation at temperature rise and decrease process

$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	升温 百分比/%	降温 百分比/%	总过程 百分比/%
25	0.13	0.09	0.26
50	0.59	0.56	1.17
100	1.45	1.41	2.84
150	2.32	2.28	4.55
200	3.16	3.12	6.18
250	4.00	3.96	7.8
300	4.96	4.92	9.65

从表 1 中可以看出, 升温 and 降温过程的信号响应衰减程度基本相同, 在 50 °C 内衰减很小, 可忽略. 而超过 100 °C 后, 衰减幅度逐渐增大, 在 300 °C 时信号的输出幅值较常温时已衰减了 5% 左右. 而在整体过程中, 由于传输参数在恒温阶段无变化, 故可设此阶段为信号的无衰减传输. 由于升温过程的输出值即是降温过程的输入值, 这就造

成了信号响应更大幅度的衰减. 信号的衰减与温度的升高成正比, 温度越高, 衰减也越大. 在 300 °C 时, 信号幅值衰减了 10% 左右. 因此, 当环境温度超过 100 °C 时, 信号幅值的衰减应引起足够的重视. 这也说明, 以这样的信号对结构特征进行判定, 结果无疑是不确定的.

4 温变环境下测试信号传输试验

环境温度对测试信号的影响归根到底是通过温度对导线的作用而实现的. 本试验是基于振动测试的试验台进行的. 通过测量结构件的振动, 对导线进行局部加热, 来分析温度对信号的影响.

4.1 试验系统

试验系统由三部分构成: 振动测试系统、温变环境实现系统及数据采集和处理系统. 振动测试系统选用钢板作为试验构件, 由信号发生器、功率放大器、激振器激励构件产生振动、加速度传感器测试输出两路信号, 如图 7(a) 所示. 温变环境实现系统采用铁桶内放置导线, 利用可调节电炉对铁桶加热, 通过空气与导线的热量交换来实现其自身的温度变化, 具体的试验方案如图 7(b) 所示. 由图 7(b) 可以发现, 水平线的导线温度处于最高温度. 而由于桶内热量的散发, 周围的导线温度由高到低逐渐降低, 这样的变温过程与上述理论分析建模一致.

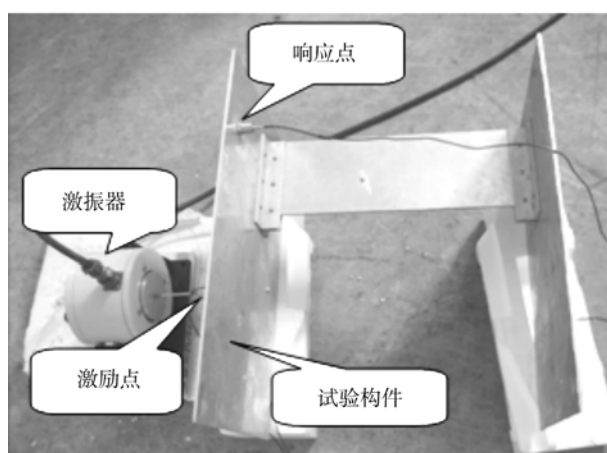
4.2 试验数据分析

打开可调节电炉, 当固定于某一功率时, 不断测试环境温度, 直到温度计指数恒定. 启动振动测试系统, 保持信号功率放大恒定, 输出两路信号: 无温度影响的原始信号 1, 经过温变环境的测试信号 2. 由计算机记录采集数据.

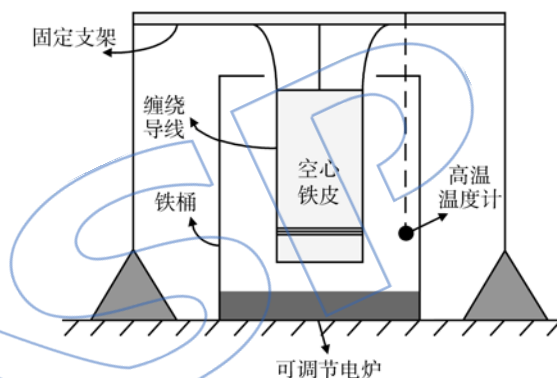
值得注意的是, 调节电炉功率, 可引起桶内温度的变化, 也就使导线的最高温度发生变化. 而调节信号发生器产生不同频率的信号, 这样就可以直接进行信号响应的比较.

设计带通和带阻滤波器对采集信号进行滤波, 得到的 100 Hz 下信号输出响应的平均幅值如图 8 所示.

试验时, 环境温度为 30 °C. 图 8 中的曲线表明, 信号响应的平均幅值由 30 °C 的 596 mV 降低为 260 °C 的 523 mV, 信号平均幅值减少了 12.25%. 这说明了信号的平均幅值是随温度的升高而逐渐减少的.



(a) 振动测试系统



(b) 温变环境试验方案

图 7 温变环境试验模型

Fig. 7 Test model on temperature changing environment

为了便于更直观地看出温度对信号的影响, 调节电炉, 保持稳定后获取了多个温度下的信号响应. 以环境温度为 30 °C 作为基准, 仍然采用幅值比较百分比为 δ_i 来表示幅值变化程度. 将上述的仿真分析结果与试验结果进行比较, 1 000 Hz 时的变化情况如图 9 所示.

从图 9 中可以看出, 仿真得到的幅值变化近似呈线性分布, 随温度的升高而逐渐减小. 相对而言, 试验测试得到的结果在一定范围内波动. 这是因为, 在仿真分析时, 仅考虑单一信号传输, 忽略了其他干扰信号, 这是一种理想情况下的分析. 实际上, 要通过滤波等技术来完全消除试验测试过程中出现的干扰信号是比较困难的. 但从图中仍然可以得到信号与温度的变化关系. 在 100 °C 和 260 °C 时, 仿真结果和试验结果得到的平均幅值变化分别为原来的 91.99% 和 87.75%. 此图还说明, 试验所得的信号幅值的降低程度要比仿真结

果更加明显,这也主要是测试过程存在的不可避免的误差所致.最终显示出仿真与试验结果是一致的,也验证了上述所建理论模型的正确性.

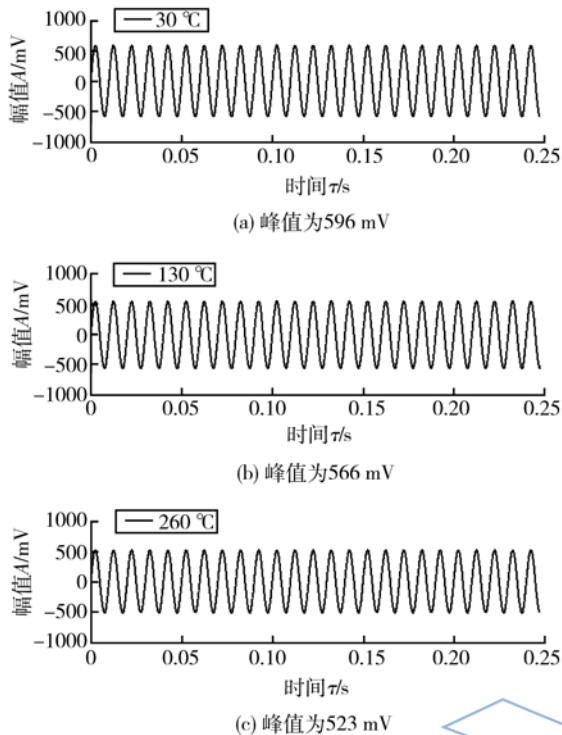


图8 不同温度时,滤波后的信号响应时域波形

Fig. 8 Signal response after filter at different temperatures

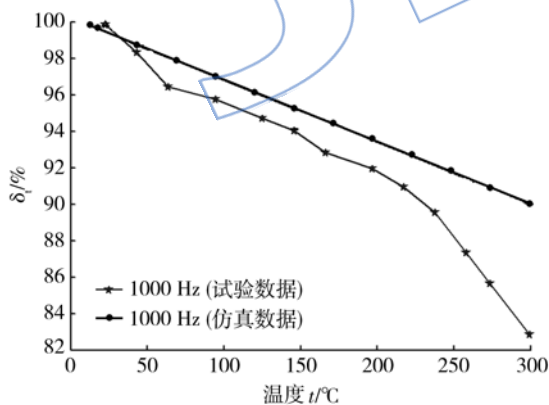


图9 试验和仿真结果的比较

Fig. 9 Experiment and simulation results

5 结 论

一般的振动测试系统,往往忽略外界环境对测试信号的影响.并且,仅采用常规的信号处理方法很难得到温度变化对信号的具体影响.

本文通过分析测试环境的特点,成功地实现

了温变环境下的信号传输的仿真分析和试验测试,发现和验证了信号响应受温度影响的特征,得到了如下结论.

1) 建立的传输电路网络,更加直观地表征了振动测试系统的信号传输部分.

2) 利用导线 R, L, C, G 参数随温度变化的特性,建立迭代求解方程,实现了具有升温、降温及两者结合特点的信号传输模型.

3) 导线的升温 and 降温过程都使传输信号的幅值逐渐衰减,且两个过程的结合具有了更大的衰减. R, L, C, G 参数的温度特性是导致信号衰减的主要原因.

4) 设计的振动测试试验,仅利用热量相互间的传递实现导线温度的变化,简单、安全易行.

5) 导线温度变化对测试信号传输的影响主要体现在时域平均幅值的变化上.温度越高,信号的平均幅值衰减越大.接近 300°C 时,信号平均幅值约为常温信号幅值的 90% .从能量角度出发,研究表明原有的信号特征已经发生改变.

6) 测试得到的信号最终应用于判定所检测的结构特征.考虑环境温度对信号的影响,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] 廖庆斌,李舜酩,覃小攀.车辆振动信号的特征提取方法比较[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(4):910-914.
LIAO Qingbin, LI Shunming, QIN Xiaopan. Comparison of feature extraction methods of vehicle vibration signal[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(4): 910-914. (in Chinese)
- [2] 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 Zhongpin, 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)
- [3] Djordjevic A R, Sarkar T K, Harrington R F. Time-domain resonance of multiconductor transmission lines[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(6): 743-764.
- [4] Antonini G, Orlandi A, Paul C R. An improved method of modeling lossy transmission lines finite-difference time-domain analysis[J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999, 1: 435-439.
- [5] Ruehli A E, Cangellaris A C. Progress in the methodologies for the electrical modeling of interconnects and electronic packages[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(5): 740-771.
- [6] Paul C R. Incorporation of terminal constraints in the

- FDTD analysis of transmission lines[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1994, 36(2): 85-91.
- [7] Hoefer W J R. The transmission-line matrix method: theory and applications[J]. IEEE Trans. on MTT, 1985, 33(10): 882-893.
- [8] Lau F C M. Waveform relaxation analysis of lossy coupled transmission line sets in cascade[J]. IEE Proc-Circuits Devices Syst., 1995, 142(6): 373-378.
- [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 NILT technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(3): 381-385. (in Chinese)
- [10] Gomes S, Jr., Martins N, Varricchio S L, et al. Modal analysis of electromagnetic transients in ac networks having long transmission lines[J]. IEEE Trans. Power Del., 2005, 20(4): 2623-2630.
- [11] Caniggia S, Maradei F. Spice-like models for the analysis of the conducted and radiated immunity of shielded cables[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2004, 46(4): 606-616.
- [12] 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(9): 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(9): 1731-1735. (in Chinese)