

文章编号: 1000-8055(2009)08-1731-05

高温环境对振动测试信号传输参数的影响

门秀花¹, 李舜酩¹, 胡 瑞², 鲍庆勇¹
(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 电子工程学院, 合肥 230037)

摘 要: 为了研究发动机试车运行时高温环境对振动特性测试信号传输参数的影响, 利用电磁场-热耦合理论, 探讨了温度场对电磁场各场量的影响. 结合实际测试传输网络, 提出了一种能有效提取多导体传输参数的传输电路法. 该方法用经典的能量法进行了验证, 取得了很好的一致性. 电阻和电感参数均随环境温度的升高而增加, 且电阻受温度影响的变化幅度尤为明显. 多输出响应时多导体的邻近耦合响应随温度升高而加剧, 互电参数受温度和导体间距的影响明显.

关 键 词: 发动机; 振动特性测试; 电参数; 高温; 多导体传输; 传输电路

中图分类号: TM15; TH113 **文献标识码:** A

Effects on transmission parameters of vibration measurement for high temperature environment

MEN Xiur-hua¹, LI Shun-ming¹, HU Rui², BAO Qing-yong¹
(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Temperature rise leads to signal transmission change of vibration measurement during test run of engines. Based on electromagnetic-thermal theory, the effects of thermal field on electromagnetic field variables were studied. A new approach was proposed to extract multi-conductor transmission parameters by combining test transmission network. The parameters values obtained by proposed approach were in good agreement with classical energy method. The results show that resistance and inductance of transmission conductor increase with the rising temperature, and conductor resistance has obvious change range compared to inductance. Proximate effects of conductors aggravate along with temperature rise, and mutual electrical parameters have important changes due to temperature and distance.

Key words: engine; vibration measurement; electrical parameters; high temperature; multi-conductor transmission; transmission circuit

在对发动机进行振动特性的测试时, 高温的存在不仅影响部件本身(如转子、叶片)的振动特性^[1-2], 也影响了特征信号的准确传输. 传输线或传输电缆是特征信号的载体. 测试环境温度的变化, 引起传输导体内温度的变化, 使其自身的电参数不再处于恒定值, 这势必影响测试的精度. 因此, 分析高温环境下传输导体的参数变化, 对于提高发动机的振动测试精度, 是极其重要的.

目前,对于测试信号传输参数的研究,广泛集中于微波信号或高速信号电路的多导体耦合参数的提取^[3-4]、高频信号在互连线终端响应^[5-7]以及频变传输参数的提取等方面^[7-9],而对于瞬态或稳态温度对传输参数的影响的研究较少。发动机振动特性的测试信号与微波和高速信号不同,信号频率多集中于中低频段,应用以往的方法对瞬态变化的参数进行提取具有一定的局限性。当获取多输出响应时,相互导体间的电磁感应与导体所受到的热环境相互融合,求解模型变得复杂。因此,有必要采用有效的计算方法求取传输参数的瞬态温度变化特性。

本研究在经典数值求解方法的基础上,实现电磁求解方法与发动机的高温测试环境相互结合,依据测试信号传输电路建立一种有效的方法实现对传输导体参数的提取以及详细的特征分析。

1 电磁-热耦合求解

1.1 传输导体的电磁场理论

完整的测试系统涉及到电磁能量的产生、传输和接收。而在信号产生和接收固定的情况下,测试信号的传输经由与之相连的电缆则是以电磁场量遵循麦克斯韦方程沿空间分布

$$\Delta \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \tau} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\Delta \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \tau} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{H}$ 为磁场密度向量; $\mathbf{J}$ 为总电流密度向量; $\mathbf{J}_s$ 为源电流密度向量; $\mathbf{J}_e$ 为感应涡流电流密度向量; $\mathbf{D}$ 为电位移向量; $\mathbf{E}$ 为电场密度向量; $\mathbf{B}$ 为磁通密度向量。设传输导体内电流沿 z 方向,有 $\mathbf{E} = \hat{z} E_z$ 。引入麦克斯韦的控制方程,可得 Helmholtz 方程为

$$\Delta^2 \mathbf{E}_z - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial t} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

式中 μ 为磁导率; ϵ 为介电常数; σ 为电导率。将式(3)进行时谐变换,利用 $\mathbf{J}_s = \mathbf{J}_z$ 和 $\mathbf{J}_z = \sigma \mathbf{E}_z$,可得到

$$\Delta^2 \mathbf{J}_z + (\mu\sigma\omega^2 \epsilon - j\omega\mu\sigma^2) \mathbf{J}_z = 0 \quad (4)$$

进行特征方程简化,有

$$\Delta^2 \mathbf{J}_z + k^2 \mathbf{J}_z = 0 \quad (5)$$

其中 $k = \sqrt{\mu\sigma\omega^2 \epsilon - j\omega\mu\sigma^2}$ 是满足式(5)的特征值, E_z , J_z 分别为导体的电场强度和电流密度。

1.2 温度参数方程的建立

测试环境温度对导体电阻率 ρ 产生明显的影

响, ρ 随温度的升高而线性增加,其倒数电导率 σ 则随温度 t 升高而减小

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha t} \quad (6)$$

式中 σ_0 是温度为 0°C 时的电导率; α 为电阻率温度系数。当传输导体为铜时, α 为 0.0043 。因而,式(5)中的特征值 k 变为温度的参量

$$k(t) = \sqrt{\mu\sigma^2 \epsilon \sigma(t) - j\omega\mu\sigma^2(t)} = \frac{\sqrt{\sigma_0 \mu \omega}}{1 + \alpha t} \sqrt{\omega \epsilon (1 + \alpha t) - j\sigma_0} \quad (7)$$

可以看出特征值 k 随温度增加而减小。将式(7)带入式(3), (4)中,此时的电流密度和电场强度变成温度 t 的函数。设传输导体为各向同性的导电媒质, $V(z)$ 为导体 z 点的电势,温度 t 影响下 $V(z)$ 可表示为 $V(z, t)$, 如图1所示。由 $\mathbf{J}_z = \sigma \mathbf{E}_z$ 及

Laplace's 方程 $\frac{d}{dz} \sigma \frac{d}{dz} V(z, t) = 0$ 得

$$\mathbf{J}_z(t) = \sigma(t) \mathbf{E}_z(t) = \sigma(t) [-\text{grad } V(z, t)] = \sigma(t) \left[-\frac{dV(z, t)}{dz} \right] \quad (8)$$

获取多输出响应时,需建立多导体模型,并考虑导体间的耦合效应,式(8)以矩阵形式出现

$$\begin{bmatrix} J_{zj,1} \\ J_{zj,2} \\ \vdots \\ J_{zj,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{zj,11} & J_{zj,12} & \cdots & J_{zj,1N} \\ J_{zj,21} & J_{zj,22} & \cdots & J_{zj,2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{zj,N1} & J_{zj,N2} & \cdots & J_{zj,NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_j \\ \sigma_j \\ \vdots \\ \sigma_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{zj,1} \\ E_{zj,2} \\ \vdots \\ E_{zj,N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 j 对应于不同的温度; $i = 1, 2, \dots, N$, 为 N 根传输导体。

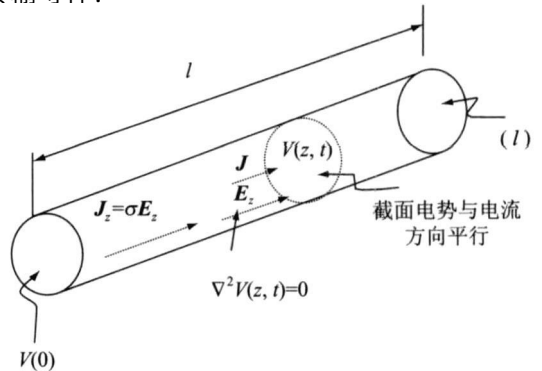


图1 传输导体电磁场分布示意图

Fig. 1 Electromagnetic field of transmission conductor

2 传输电路法

航空发动机部件的振动频率多集中于中低频段. 此时, 作为信号传输的连接线尺寸远远小于电磁波的波长, 因而测试信号传输路径易由电路模型实现. 本文结合准静态电磁场理论, 设测试信号以横电磁波(TEM)传播模式在传输线内沿 z 轴传播, 如式(3)和特征值式(7)所示.

航空发动机振动特性测试多采用同轴信号屏蔽电缆. 内导体和屏蔽层形成信号回路, 如图 2 所示为单导体或多导体屏蔽电缆的信号传输模型.

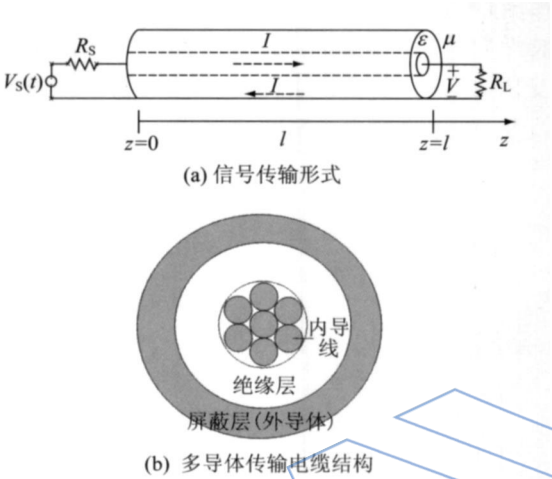


图 2 测试信号传输

Fig. 2 Signal transmission using transmission cable

时域求解的测试信号传输方程为^[9]

$$E = R + L \frac{dI}{dt} \tag{10}$$

多导体传输电缆的电参数分别呈 $N \times N$ 矩阵分布, 将式(10)转换成频域, 结合式(8)可得

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dz} &= -ZI = -(R + j\omega L)I \\ \frac{dI}{dz} &= -YV \end{aligned} \tag{11}$$

式中 V 为导体与参考导体间的电压降列向量; I 为流经导体的电流列向量; Z 为阻抗矩阵; Y 为导纳矩阵. 结合式(7), (11)可得

$$J_z = -\sigma \frac{dV}{dz} = \sigma ZI = \sigma (R + j\omega L)I \tag{12}$$

多导体模型时, 邻近各导体彼此都以对方的涡流源作用, 导体内部的电场和磁场相互耦合. 中低频时, 位移电流较小可忽略为零, 认为仅存在传导电流, 即 z 轴流向的源电流密度. 本文首先建立了理想参考地回路, 即以导体 j 作为零电势参考

地, 仅在导体 i 上通入为幅值为 I 的正弦电流, 满足

$$I_i = I, \quad I_j = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, N, \quad j \neq i)$$

可有

$$Z_{ij} = \frac{J_{ij}}{I_i \sigma} \rightarrow \begin{cases} R_{ij} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{J_{ij}}{I_i \sigma} \right\} \\ L_{ij} = \frac{\operatorname{Im} \left\{ \frac{J_{ij}}{I_i \sigma} \right\}}{\omega} \end{cases} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, N \\ j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \tag{13}$$

利用式(13)计算 N 次可以获取传输电阻和电感参数. 在实际测试中, 信号传输模型是以内导体与屏蔽层导体组成的回路, 如图 2(a)所示. 因而式(13)的求解结果在此具有一定的局限性, 需做进一步的修正. 将屏蔽层导体设为第 $N+1$ 个导体, 作为其他 N 个导体的回路导体, 即 $\sum_{i=1}^N I_i = I_{N+1}$, 此时加载条件满足

$$I_i = I, \quad I_j = 0, \quad I_{N+1} = -I \quad (i, j = 1, 2, \dots, N, \quad j \neq i)$$

设屏蔽层外导体沿 z 轴的源电流密度为 $J_z(N+1)$, 电导率为 σ_{N+1} , 则有

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= \frac{1}{I_i} \left(\frac{J_{ij}}{\sigma} - \frac{J_z(N+1)}{\sigma_{N+1}} \right) \Rightarrow \\ \begin{cases} R_{ij} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{J_{ij}}{I_i \sigma} - \frac{J_z(N+1)}{\sigma_{N+1}} \right\} \\ L_{ij} = \frac{\operatorname{Im} \left\{ \frac{J_{ij}}{I_i \sigma} - \frac{J_z(N+1)}{\sigma_{N+1}} \right\}}{\omega} \end{cases} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, N \\ j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

由于电流密度、电导率均是温度的函数, 故式(11)~(14)所求解的电参数均随温度而变化. 式(13), (14)的求解避免了复杂积分的求解, 易于采用有限元仿真实现.

3 仿真计算与讨论

本文采用内导体半径为 0.4 mm, 外有屏蔽层保护的同轴电缆建立测试信号传输网络. 进行多输出响应时, 7 根导线相互平行, 具体模型如图 2 所示. 信号电缆的内外导体材料为铜, 在 0℃时, 电导率 σ 为 5.8×10^7 S/m, 且呈现如式(6)的温度变化特性. 采用有限元理论, 建立传输模型, 对传输导体进行网格划分, 提取模型的电流密度, 利用公式(13), (14)获取电阻和电感参数.

3.1 方法比较

建立两种不同测试信号回路模型: ①以屏蔽

层外导体作为理想参考地,采用式(13)提取参数;
②以屏蔽层外导体作为测试信号回路,用式(14)来求解参数.两种方法均采用文献[3]中的能量法进行验证.图3给出了三种不同的求解结果.

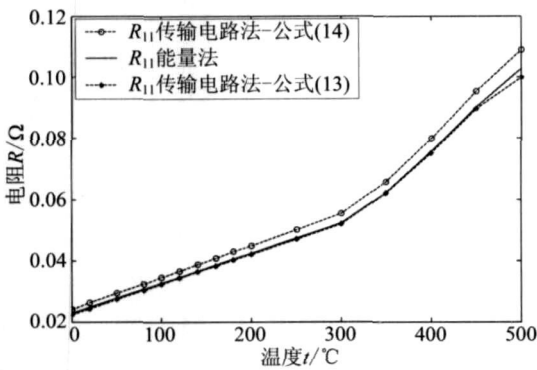


图3 两种方法下的电阻参数比较

Fig. 3 Resistance comparison using two methods

由图3分析可得,能量法与式(13)得到的数据基本一致,只有在温度超过400℃以后出现稍微大的偏移,由此验证了本文方法的有效性.在整个温度范围0~500℃内,以屏蔽层外导体作为信号回路时获取的电阻参数大于能量法求得的数值,相对差值可达5.4%以上.温度的升高增加了两种方法求解结果的差值.

虽然经典的能量法验证了本文提出方法的有效性,但以屏蔽层作为回路导体时,能量法在求解测试传输参数上仍然存在一定的局限性.因而本文根据模型对其进行了修正,考虑屏蔽层外导体回路的影响,导体功耗的计算公式变为

$$P_d = [I_i \quad I_{N+1}] \begin{bmatrix} R_{ii} & R_{i(N+1)} \\ R_{(N+1)i} & R_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} [I_i \quad I_{N+1}]^T \quad (15)$$

由结构对称性可知

$$R_{(N+1)i} = R_{i(N+1)} \quad (16)$$

且满足

$$I_i = -I_{N+1} \quad (17)$$

利用式(15), (17)可求解出屏蔽层外导体为回路的自电阻参数 R_{ii} ,相应地利用电磁储能求解出自电感参数 L_{ii} .将式(15)~(17)结合文献[3]的求解公式,得到的求解结果与式(14)求解结果一致.

3.2 电参数受温度的影响

由式(13), (14)可得,传输电路参数随温度的

改变而发生变化.由于发动机的高温环境可达300℃以上,故本文采用提出的方法求取了0~500℃之间,多导体模型的电阻和电感参数温度变化特性,如图4、图5所示.

由图4所示,随着温度的升高,自电阻和互电阻参数值增加,基本呈线性变化.其中,温度的升高对自电阻的影响比较明显.在0℃到500℃之间,电阻的增加幅度可达300%.导体间邻近效应造成的互电阻可达自电阻的12%以上,充分显示出这种多导体输出响应时的耦合效应是不容忽略的.由式(6)可知,温度变化主要影响电阻率,随温度线性增加的电阻率对电阻呈现的这种温度变化特性起了决定性的作用.这种随温度升高而剧烈变化的电阻,必然带来测试信号沿波传播特性的改变,成为影响测试精度的重要方面.

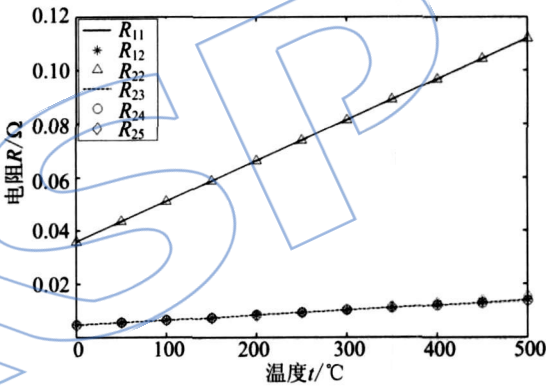


图4 电阻参数温变特性

Fig. 4 Temperature characteristic of resistance

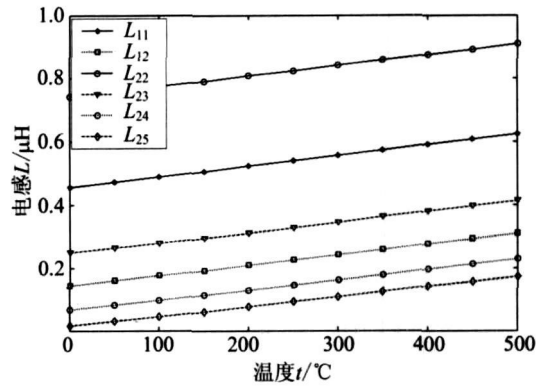


图5 电感参数温变特性

Fig. 5 Temperature characteristic of inductance

由图5可以看出,导线的自电感和互电感在随温度升高而线性增加的同时,导体间的耦合效应也因间距的减小变得更加明显.从上而下逐次为自电感和互电感的变化曲线.相对电阻而言,电感受温度影响的变化幅度较小,但在500℃时的

电感值比 0℃ 时仍增加了 150% 左右. 分析公式 (1)~(3) 可得, 单个电阻率的变化可导致整个电磁场的强度和储能发生变化, 这也使得电感不能在温度变化时保持恒定值.

由上述分析可知, 航空发动机内的高温环境对测试传输参数值产生的影响是极其明显的. 振动特性测试过程中, 忽略高温带来的变化幅度为 1 倍以上的自电参数值以及互电参数值, 仅以常温下的电参数替代高温时参数, 将使得终端测试信号难以完全体现始端测试信号. 而对这样的测试信号进行分析, 确定的部件振动特性, 也将受到质疑.

4 结 论

发动机内的高温环境对测试信号传输的影响归根到底是通过传输参数的影响实现的. 本文建立了一种有效提取测试信号传输参数的方法, 详细分析了温度场对传输参数特性的影响. 从本文的研究中, 得到以下几点结论:

1) 在高温测试环境下, 提出的传输电路法摒弃了复杂积分, 易于实现振动测试信号传输网络, 得到的传输电参数与经典的能量法获取的结果保持一致.

2) 以屏蔽层为回路得到的电阻参数明显大于以参考地为回路时的传输网络, 且温度的增加使得两种情况之间的差值增大.

3) 电阻率随温度的变化导致了电阻和电感参数均随温度升高线性增加, 其中对电阻的影响尤为明显. 环境温度为 500℃ 时, 电阻的变化幅度高达 300%, 而电感也增加为初始温度的 150%.

4) 进行多输出响应时, 传输导体间距越小, 邻近耦合效应越明显, 特别是互电感对间距和温度的影响非常敏感.

5) 进行发动机内振动特性测试时, 信号传输参数随着温度的变化而剧烈变化, 这将影响测试信号的准确性. 获取有效的传输参数温度变化特性, 有助于提高振动特性测试的有效性和精度.

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 aerorengine compressor blade [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(4): 137-139 (in Chinese)
- [2] 朱向哲, 袁惠群, 贺威. 稳态热场对转子系统临界转速的影响[J]. 振动与冲击, 2007, 26(12): 113-116
ZHU Xiangzhe, YUAN Huiqun, HE Wei. Effect of steady thermal field on critical speeds of a rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(12): 113-116 (in Chinese)
- [3] Tsuk M J, Kong J A. A hybrid method for the calculation of the resistance and inductance of transmission lines with arbitrary cross sections[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(8): 1338-1347
- [4] Enrique E M. Impedances for the calculation of electromagnetic transients within transformers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2): 479-488
- [5] Clayton R P. Incorporation of terminal constraints in the FDTD analysis of transmission lines [J]. IEEE Trans. on Electromagn. Compat., 1994, 36(2): 85-91
- [6] Ramahi O M, Subramanian V, Archambeault B. A simple finite difference frequency-domain (FDFD) algorithm for analysis of switching noise in printed circuit boards and packages [J]. IEEE Trans. on Advanced Packaging, 2003, 26(2): 191-198
- [7] 赵进, 李征帆. 一种提取多导体互连线等效电路频变分布参数的时域全波方法[J]. 电子学报, 1997, 25(4): 33-38
ZHAO Jin, LI Zhengfan. A time domain full wave method for extraction of frequency dependent equivalent circuit parameters of multiconductor [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(4): 33-38 (in Chinese)
- [8] Yin Y, Dommel H W. Calculation of frequency-dependent impedances of underground power cables with finite element method [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1989, 25(4): 3025-3027
- [9] Coperich K M, Morsey J, Okhmatovski V I, et al. Systematic development of transmission line models for interconnects with frequency-dependent losses [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1677-1685