文章编号：1006-1355(2018)04-0086-05+115

温度对高速列车层合板振动声辐射的影响

开 建，韩 健，钟庭生，何远鹏，肖新标，周立群

（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031）

摘 要：我国高速铁路线路分布十分广阔，季节更替明显，温度变化显著，而温度变化将对高速列车层合板的振动声辐射产生影响。针对这一问题，基于混合有限元-边界元方法，建立温度场下的高速列车层合板振动声辐射预测模型，分析温度变化对高速列车层合板振动声辐射的影响规律。结果表明：随着温度升高，层合板各阶固有频率逐渐降低。在不考虑温度对阻尼特性影响的情况下，温度对230 Hz～340 Hz范围内的振动和声功率级影响显著，随着温度升高，振动位移和声功率级逐渐增大。当温度从−50 °C升高到50 °C时，该频率范围内的声功率级峰值增大11 dB，即每增加10 °C，该显著峰值声功率级增大约1.1 dB。该温度范围内的层合板声功率级总值随着温度的增大呈非线性增长，从−50 °C升高到50 °C时，声功率级总值增大约4 dB。相关结论可为在考虑温度影响条件下的车体低噪声设计提供参考。

关键词：振动与波；高速列车；层合板；温度场；振动声辐射；有限元-边界元

中图分类号：U270.1+.6；O42 2.6 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.04.017

Influences of Temperature on Vibration and Sound Radiation of Sandwich Plates of High-speed Trains

KAI Jian, *HAN Jian*, *ZHONG Tingsheng*,
HE Yuanpeng, *XIAO Xinbiao*, *ZHOU Liqun*

（State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China）

Abstract: The high-speed railway lines are widely distributed in our country and suffer obvious seasonal changes and significant temperature changes. The temperature changes will have a great impact on the vibration and sound radiation of the sandwich plates of high-speed trains. In this paper, the prediction model of vibration and sound radiation of the sandwich plates of high speed trains in the temperature field is developed by means of the hybrid finite element method and boundary element method (FEM-BEM). The influence of temperature on the vibration and sound radiation of the sandwich plates is analyzed. The results show that the natural frequencies of the sandwich plates decrease gradually with the increase of the temperature. When the effect of temperature on the damping characteristics is ignored, the effect of temperature on the vibration and sound power level in the frequency range of 250 Hz-330 Hz is significant. As the temperature increases, the displacement and the sound power level increase gradually. When the temperature rises from −50°C to 50°C, the peak value of sound power level in the frequency range of 230 Hz-340 Hz increases by 11 dB. The significant peak of sound power level increases about 1.1 dB for every 10°C. And the total value of the sound power level of the sandwich plate increases non-linearly by about 4 dB as the temperature rises from −50°C to 50°C. The related results can provide reference for low noise design of high-speed trains.

Keywords: vibration and wave; high-speed train; sandwich plate; temperature field; vibration and acoustic radiation; FEM-BEM

收稿日期：2017-11-09

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2016YFB1200503-02/2016YFB1200506-08）；国家自然科学基金资助项目（51475390/U1434201）；国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项资助项目（2016YFE0205200）

作者简介：开建（1990−），男，安徽省桐城县人，硕士研究生，主要研究方向为高速列车的振动噪声控制。
E-mail: kai_jian@139.com

通信作者：肖新标，男，副研究员，硕士研究生导师。
E-mail: xiao@home.swjtu.edu.cn

近年来我国高速铁路产业迅猛发展，给人们的生活出行带来了极大的便利。随着运营车速的不断提升，车内的噪声问题也日益突出，其中结构振动声辐射是车内噪声的主要来源之一[1]。层合板结构是由两块相对较薄且刚度较大的面板和相对较软的芯层粘接而成，面板层通常为铝合金、钢、纤维复合材料等，芯层一般为固态泡沫、多孔材料、蜂窝结构等。层合板结构具有轻质、高比刚度、隔声、隔热性能良

好和设计性强等特点，被广泛应用于高速列车的顶板、侧墙以及地板上[2]。

国内外有不少关于温度对板件声振特性影响的研究。杨雄伟等采用有限元-统计能量混合法对超声速飞行器在高温环境中的声振响应进行了数值研究[3]。耿谦等运用数值分析方法研究了热应力对结构声振特性的影响[4]。Geng等从理论建模方面研究了四边简支各向同性薄板在均匀热环境下的振动和声辐射特性[5]。Xin等建立了各向同性长方形板的理论模型，研究了其在热环境中的传声损失[6]。Librescu等研究了各向同性平板和波纹板在温度和机械载荷作用下的振动响应[7]。Jeyaraj等基于能量有限元法研究了各向同性薄板在热环境下的高频振动特性[8]。Wang等利用能量有限元方法研究了板件在温度影响下的振动特性[9]。以上大多文献都是对热环境下简单结构的振动和声辐射的研究，但研究温度对层合板振动声辐射的影响还比较少。

我国地域辽阔，铁路线路四通八达。南起海南三亚，北至齐齐哈尔，跨越热带、亚热带、寒带，最高温度可达50℃，最低温度可至−50℃[10]，这对列车各板件性能的温度稳定性提出了更高的要求。而且，目前我国正为俄罗斯设计最高运营时速360公里、试验时速400公里、适应零下50℃高寒运用环境的动车组。研究温度对高速列车层合板振动声辐射的影响很有必要。

本文基于混合有限元-边界元方法，建立温度场中的高速列车层合板振动声辐射预测模型，分析温度变化对层合板振动声辐射的影响规律。

1　温度场中层合板振动声辐射模型

首先利用有限元方法建立层合板的温度场振动预测模型，依次进行温度载荷作用下层合板的热应力分析、模态分析和振动响应分析。然后利用边界元方法建立层合板的声辐射预测模型，基于温度场振动预测模型计算获得的层合板的振动响应，将其作为层合板声辐射预测模型的输入，计算层合板的声辐射。

1.1　温度场振动预测模型

图1给出了高速列车泡沫铝层合板的结构示意图，上下面板材料均为铝合金，芯层材料为聚亚安酯泡沫。

面板和芯层材料参数如表1所示，阻尼损耗因子η=0.02。

选取的层合板尺寸分别为$a=b=1\,000$ mm，$h_1=2$ mm，$h_2=16$ mm，在三维软件中建立高速列车层合板的上下面板和芯层模型。由于面板和芯层之间的胶合近似于固定连接，在层合板不开裂的情况下面板和芯层的变形保持一致，故建模时面板和芯层之间采用共节点连接。划分夹层板有限元网格，如图2所示，面网格大小为10 mm×10 mm，划分网格数为7 500。

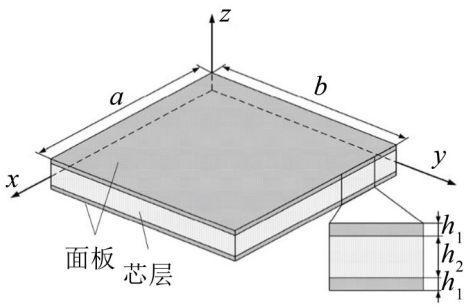


图1 层合板结构示意图

表1 层合板的材料参数

材料参数	面板	芯层
弹性模量E/GPa	72	1
泊松比u	0.338	0.15
密度ρ/(kg/m^3)	2 700	100
热膨胀系数α/℃	2.35×10^{-5}	3.75×10^{-4}
热传导系数K/(W/(m^2·K))	156	0.024

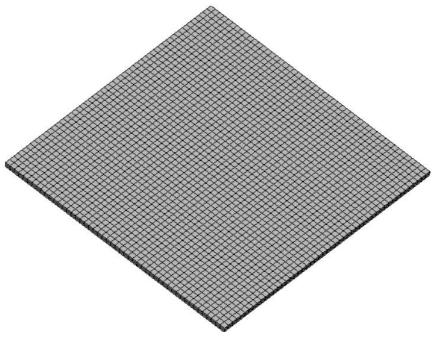


图2 层合板有限元网格

对于温度场中的层合板模态及振动特性分析，需要首先获得温度场中板件的热应力分布。定义层合板的边界约束条件为四边固支，假设层合板在参考温度T_0（本文中$T_0=25$ ℃）时无热应力，那么对于温度T(本文取温度分别为−50℃、−25℃、0℃、25℃、50℃)下的热应力[11]为

$$\delta_x=\delta_y=-\frac{E_i}{1-v_i}\alpha_i\Delta T,\delta_{xy}=0 \tag{1}$$

式中δ_x、δ_y、δ_{xy}分别表示温度影响下图1中x方向、y方向的正应力以及切应力，$\Delta T=T-T_0$，i=1代表面板，i=2代表芯层。

在热应力作用下层合板的模态振型分别表示为$W_{mn}^{(p)}$、$\psi_{xmn}^{(p)}$、$\psi_{ymn}^{(p)}$，在层合板上表面中心施加一单位白噪声激励，进而利用模态叠加法得到层合板下表面

的振动响应[12]

$$\begin{cases}\omega(x,y,t)=\sum_m\sum_n\sum_p W_{mn}^{(p)}(x,y)T_{mn}^{(p)}(t)\\ \beta_x(x,y,t)=\sum_m\sum_n\sum_p \psi_{xmn}^{(p)}(x,y)T_{mn}^{(p)}(t)\\ \beta_y(x,y,t)=\sum_m\sum_n\sum_p \psi_{ymn}^{(p)}(x,y)T_{mn}^{(p)}(t)\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\omega(x,y,t)$为层合板的垂向位移，$\beta_x(x,y,t)$、$\beta_y(x,y,t)$为层合板的角位移，$T_{mn}^{(p)}(t)$为时间的函数[11]。

1.2 声辐射预测模型

基于1.1中温度场振动预测模型计算获得的层合板的振动响应，将其作为层合板声辐射计算的输入，采用直接边界元法计算层合板的声辐射，进而获得温度影响下的层合板声辐射特性。模型中考虑层合板下表面的声辐射特性。计算中空气密度为1.225 kg/m^3，声速为340 m/s，计算频率范围为10～1 500 Hz，步长为10 Hz。

声功率$\bar{P}$的计算可参考下式[12]

$$\bar{P}(\omega)=\frac{1}{2}\iint \mathrm{Re}\{v(x,y,\omega)\times p(x,y,\omega)\}\mathrm{d}A \tag{3}$$

式中ω为层合板的固有频率，v为速度，p为声压，A为层合板下表面的面积。

2 结果分析与讨论

2.1 不同温度下层合板的模态分析

通过对温度载荷作用下的层合板进行模态分析，得到不同温度下层合板的各阶固有频率和模态振型。10 Hz～1 500 Hz频域范围内层合板的各阶固有频率如图3所示。

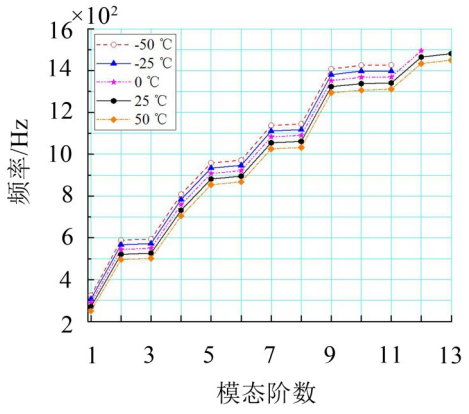


图3 不同温度下层合板的各阶固有频率

由图3可知，在10 Hz～1 500 Hz频域范围内，层合板的各阶固有频率随温度的升高而降低。这是因为温度升高，层合板的弹性模量减小[13]，即层合板的刚度减小，由固有频率的表达式$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$（式中$K$表示刚度，$M$表示质量）可知，当刚度减小，质量不变，层合板的固有频率降低，这是温度升高，固有频率降低的主要原因。

温度从−50℃升高到50℃，前5阶固有频率分别降低了74 Hz、91 Hz、92 Hz、103 Hz、104 Hz，随着模态阶数的增加，温度对层合板固有频率的影响增大。

以50℃时层合板的模态振型为例，图4给了该温度下层合板的前10阶模态振型。

由图4可知，固支条件下层合板的模态振型与单层板的模态振型基本一致，仅在频率和振型幅值上存在差异，不再赘述，值得注意的是，温度改变，模态振型基本一致，但振型幅值有所不同，通过计算可知，对于本文建立的层合板结构，温度对第1阶模态振型的幅值影响最为显著。

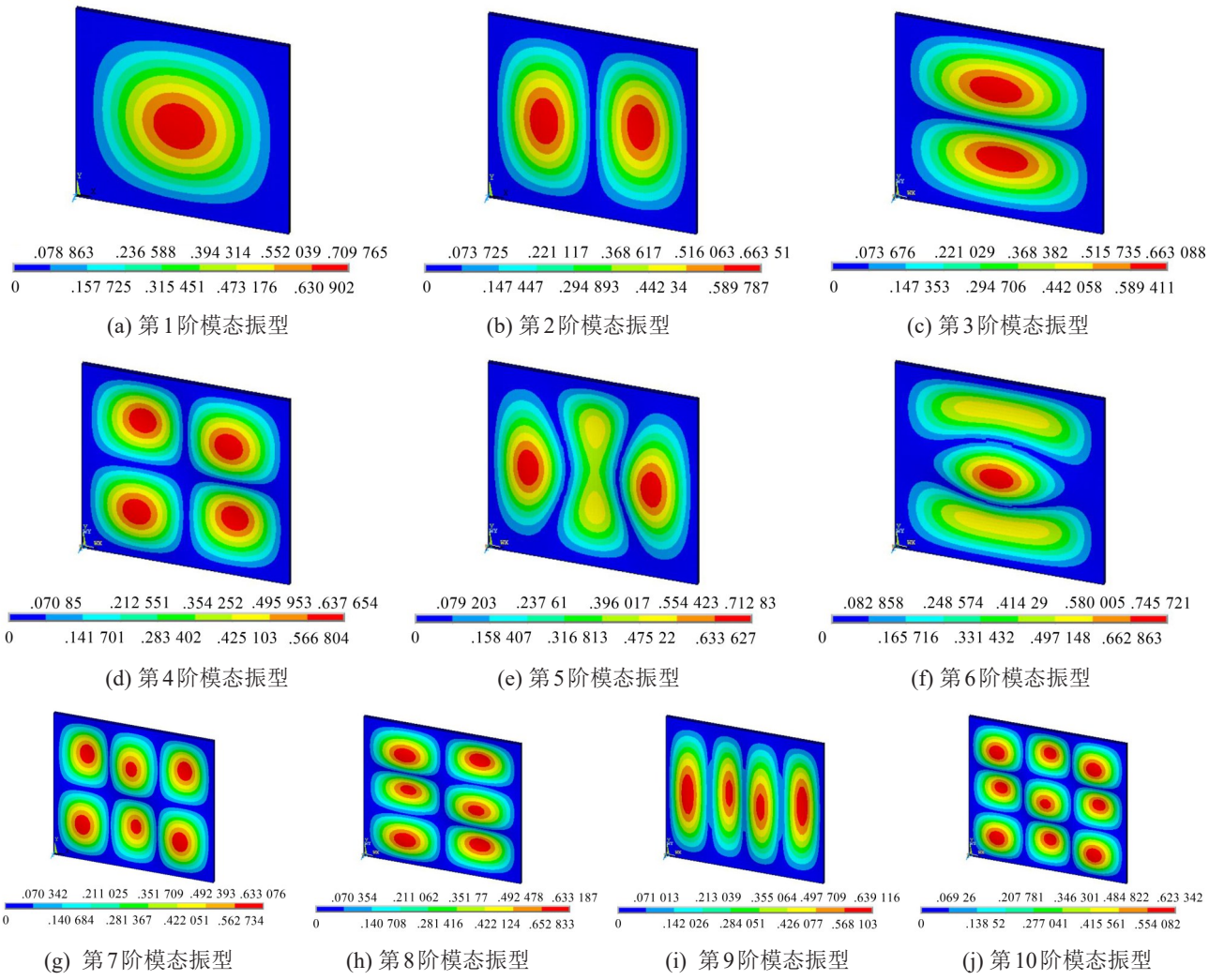
2.2 不同温度下层合板的振动特性分析

在2.1小节模态分析的基础上，进一步对温度场作用下的振动特性展开分析。由于温度对振动影响因素复杂，可以通过影响结构的模态和阻尼两方面对结构振动产生影响，由文献[10]可知，温度由−50℃升高到50℃，阻尼经过了玻璃态、黏流态和高弹态，阻尼特性表现为先增大后减小的特性。而本文主要目的在于探究温度场通过对模态的影响进而对振动产生的影响，因此本文中暂不考虑温度对阻尼特性影响。图5给出了不同温度下层合板下表面中心点处的振动位移响应。

由图5可知，在0～1 500 Hz频率范围内，在调查温度范围内，各温度下层合板的振动位移响应在230 Hz～340 Hz、820 Hz～1 000 Hz和1 270 Hz～1 460 Hz三个频段内均存在显著峰值，但具体的固有频率和振动幅值存在差异。其中温度对固有频率的影响与2.1小节模态分析一致，而温度对振动位移幅值的影响表现为对第1个峰值影响最为显著，对第2个和第3个峰值影响较小。对于第1个振动峰值的影响表现为随着温度的升高，幅值逐渐增大，其主要原因为第1个峰值对应的模态幅值随着温度的升高而增大，在相同激励条件下，根据模态叠加法，振动幅值增大。

为了更为清晰量化分析温度对图5中三个显著振动峰值的影响，图6给出了各温度下每个峰值对应最大值。

由图6可知，不同温度下层合板中心点的振动位移响应峰值大小分别为0.388 m×10^{-5} m、0.671 m×10^{-5} m、1.400 m×10^{-5} m、1.455 m×10^{-5} m和1.941 m×10^{-5} m，温度升高100 ℃，峰值增大1.533 m×10^{-5} m，层合板的振动位移响应幅值随温度变化的灵敏度约为1.533 m/℃×10^{-7} m/℃。而第2个和第3个峰值随着温度的升高变化较小。



(a) 第1阶模态振型　(b) 第2阶模态振型　(c) 第3阶模态振型

(d) 第4阶模态振型　(e) 第5阶模态振型　(f) 第6阶模态振型

(g) 第7阶模态振型　(h) 第8阶模态振型　(i) 第9阶模态振型　(j) 第10阶模态振型

图4　50 ℃温度下层合板的模态振型

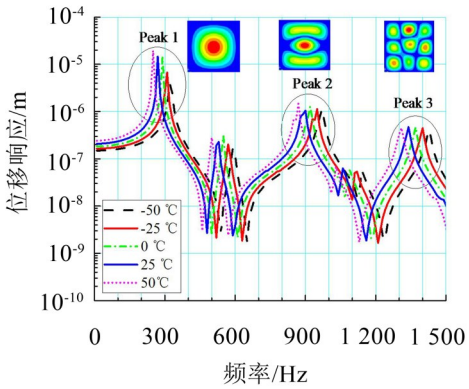


图5　不同温度下节点的响应位移

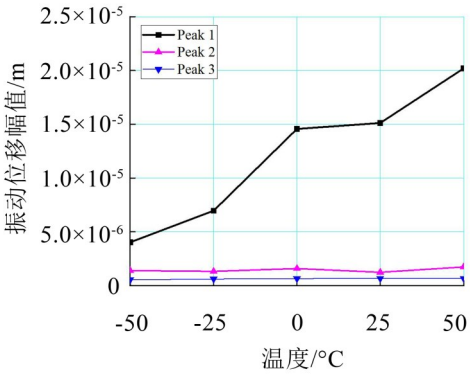


图6　不同温度下层合板的位移响应幅值

2.3　不同温度下层合板的声辐射特性分析

在2.2小节明确不同温度对振动特性影响的基础上，本小节进一步分析不同温度下层合板在单位白噪声激励作用下的下表面辐射声功率特性。图7给出了不同温度下层合板的声功率级窄带频谱特性。

由图7可知，各温度下层合板的声功率特性也存在3个主要峰值，主要受振动特性影响，温度对3个峰值的影响规律表现为：温度升高，固有频率降低，温度对第1个峰值影响最为明显，表现为随着温度的升高第1个峰值的声功率逐渐增大。为了量化对比温度对第一个显著峰值声功率级的影响，将各温度下第1个峰值进行汇总，如图8所示。

由图8可知，当温度从−50℃升高到50℃，第一个峰值增大11 dB，即每增加10℃，该显著峰值声功率级增大约1.1 dB。

为了进一步分析温度对层合板声功率级总值的

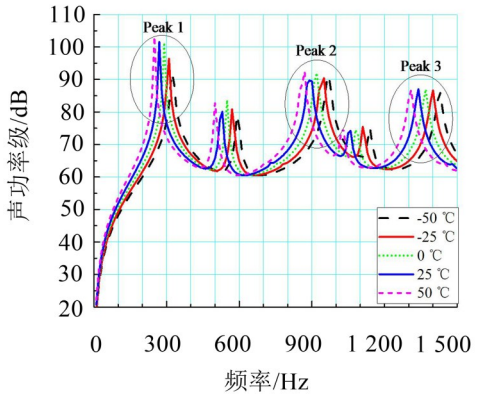


图 7 不同温度下层合板的声功率级

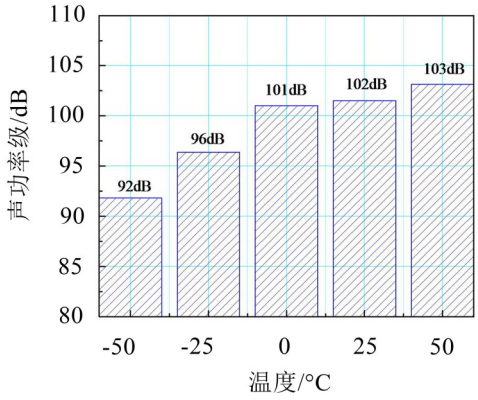


图 8 温度对声功率级第一个峰值的影响

影响，将图 7 中每个温度下的声功率频谱特性叠加为总声功率级，如图 9 所示。

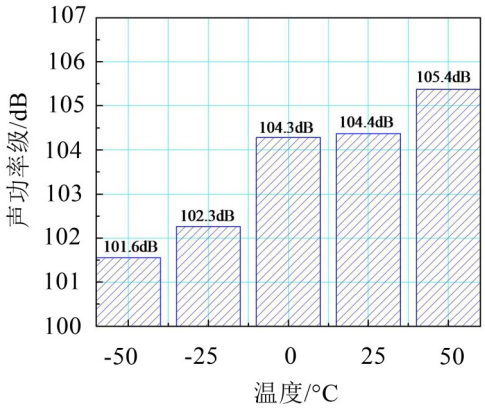


图 9 温度对声功率级总值的影响

由图 9 可知，温度从 −50℃升高到 50℃，声功率级总值增大约 4 dB，表现为随着温度的增大呈非线性增长。

3 结 语

本文运用温度场下的混合有限元-边界元方法建立了温度场下高速列车层合板振动声辐射预测模型，研究了温度变化对层合板振动声辐射特性的影响，得到如下结论：

（1）随着温度的升高，层合板的各阶固有频率降低。温度从 −50℃升高到 50℃，层合板的前 5 阶固有频率分别降低了 74 Hz、91 Hz、92 Hz、103 Hz 和 104 Hz。随着模态阶数的增加，温度对层合板的固有频率影响增大。

（2）温度对 230 Hz～340 Hz 范围内的显著振动峰值影响最为明显，温度升高，该频率范围内的振动幅值逐渐增大，层合板的振动位移响应幅值随温度变化的灵敏度约为 1.533 m/℃×10^{-7} m/℃。

（3）温度对层合板声辐射功率级的影响主要由其振动特性决定。温度对 230 Hz～340 Hz 范围内的声功率级显著峰值影响最为显著，当温度从 −50℃升高到 50℃，该频率范围内的声功率级峰值增大 11 dB，即每增加 10℃，该显著峰值声功率级增大约 1.1 dB。

该温度范围内的层合板声功率级总值随着温度的增大呈非线性增长，从 −50℃升高到 50℃，声功率级总值增大约 4 dB。

参考文献：

[1] 姚丹，伏蓉，肖新标. 基于MATV的高速列车车体铝型材振动声辐射预测[J]. **噪声与振动控制**，2015，35(3)：37-40.

[2] 韩敬永. 复合材料夹层板结构热环境下声振特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.

[3] 杨雄伟，李跃明，耿谦. 基于混合FE-SEA法的高温环境飞行器宽频声振特性分析[J]. **航空学报**，2011(10)：1851-1859.

[4] 耿谦，李跃明，杨雄伟. 热应力作用下结构声-振耦合响应数值分析[J]. **计算力学学报**，2012，29(1)：99-104.

[5] GENG Q, LI Y. Analysis of dynamic and acoustic radiation characters for a flat plate under thermal environments[J]. **International Journal of Applied Mechanics,** 2012, 4(3): 1250028(1-16).

[6] XIN F X, GONG J Q, REN S W, et al. Thermoacoustic response of a simply supported isotropic rectangular plate in graded thermal environments[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2017, 44: 456-469.

[7] LIBRESCU L, LIN W, NEMETH M P, et al. Vibration of geometrically imperfect panels subjected to thermal and mechanical loads[J]. **Journal of Spacecraft and Rockets**, 1996, 33(2): 285-291.

[8] JEYARAJ P, PADMANABHAN C, GANESAN N. Vibration and acoustic response of an isotropic plate in a thermal environment[J]. **Journal of Vibration and Acoustics,** 2008, 130(5): 051005 (1-6).

[9] WANG D, XIE M AND LI Y. High-frequency vibration analysis of a plate in thermal environment based on energy finite element method[C]. The 21st International Congress on Sound and Vibration. Beijing, 2014.

（下转第 115 页）