

坐席低谷效应的时域有限差分多项模拟

卢义刚[†] 余光正

(华南理工大学物理科学与技术学院 广州 510640)

摘要 介绍了交错网格下,以声压和质点振动速度为声场参量的室内声学时域有限差分递推格式,给出了在建筑边界截断计算区域的边界条件差分格式。在水平地面房间模型下,应用时域有限差分法模拟了坐席低谷效应对于空间和时间的多种特性;此外,模拟了地面起坡时的低谷效应。

关键词 时域有限差分,坐席低谷效应,脉冲响应

Various simulations of the seat dip effect using finite-difference time-domain method

LU Yi-Gang YU Guang-Zheng

(School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract In this paper, the time domain finite-difference recurrence formulas for acoustical pressure and particle velocity are introduced. The boundary conditions on the wall surfaces where the finite-difference calculations are cut off are given. Various specific properties of the seat dip effect are simulated in a room with horizontal floor. After improving the model to a room with sloping floor, the seat dip effect is also simulated successfully.

Key words Finite-difference time-domain, Seat dip effect, Impulse response

1 引言

1964年, Schultz与Watters^[1]、Sesser与West^[2]两个小组独立的研究均发现了坐席低谷现象。坐席低谷现象是一种典型的室内低频声学现象,低谷发生在大约80~200Hz的频率范围,低谷衰减可达20dB左右。低谷效应导致低频声能的损失,对观众听闻引起

较严重的不良影响,因此,坐席低谷现象引起了建筑声学工作者的广泛兴趣,研究者在真实的音乐厅和缩尺模型中测量声的传播特性,总结低谷效应的规律,分析低谷效应的原因,寻求减小低谷效应的方法^[3-6]。

由于室内物体、观众、门窗和一些扩散体的尺寸与声波的波长相当,致使声波在室内的传播表现出复杂的反射和衍射行为,为

2006-12-31 收稿; 2007-04-23 定稿

作者简介: 卢义刚(1962—),男,湖北人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:建筑声学。

余光正(1980—),男,博士生。

[†] 通信联系人 E-mail: phyiglu@scut.edu.cn

了研究复杂的室内声学现象,人们采用了缩尺模型,但缩尺模型往往昂贵和费时。随着计算机科学与技术的发展,计算机仿真技术被应用到室内声学的研究中,传统的计算机仿真技术有声线跟踪法和虚声源法,这两种方法都基于几何声学近似,它们无法考虑声的波动特性,仅适合于高频情形。为了研究室内低频声学问题,基于波动理论的有限元法、边界元法及时域有限差分法被应用到室内声学问题的研究中^[7,8]。

1996 年,Joe LoVetri 等应用时域有限差分法模拟了坐席低谷现象,开创了应用时域有限差分法研究室内声学问题的的先河^[9],他们的模型房间地面是水平的,他们模拟了低谷效应同声源高度、声源到受声点间座椅排数、受声点高度之间的关系。模拟表明:(1)低谷发生在 80 到 200Hz 的范围内,谷的深度达到 20dB;(2)声源与受声点之间座椅的排数越多低谷效应越强,谷点的频率升高;(3)声源升高,低谷效应及谷点的频率降低;(4)受声点升高,低谷效应降低。Joe LoVetri 等的模拟结果与先前在音乐厅和缩尺模型的测量结果相吻合。Joe LoVetri 等人的研究具有开拓性的意义,为时域有限差分法在室内声学中的应用提供了指导。

但是,在 Joe LoVetri 等的工作,还有几

方面问题值得我们进一步研究:一是在他们的论文中只是介绍了常用的 Mur 吸收边界条件,没有具体说明计算截断边界的处理方法。然而,根据计算声学理论^[10],当计算网格从一种介质进入另一种介质,而这两种介质的声阻抗比值大于 5 时,计算无法稳定,Mur 吸收边界条件不能被应用,因此,在室内声学中要寻求新的边界条件;二是他所采用的水平地面的房间模型有必要实际化;此外,坐席低谷效应表现出多种多样的空间和时域特性。全面了解低谷效应的特性和规律,靠在实际厅堂和缩尺模型中的测量很难实现,而房间的计算机模型易于调整,容易实现对低谷效应多方面的研究。为此,本文将首先给出包含截断边界的计算区域内的递推声场参量的差分格式,然后,对低谷效应的多方特性进行模拟。

2 声波方程的差分格式

将室内声学问题作为线性声学处理是合理的,因为在人耳能够承受的最大声强下,声压幅值和空气密度变化量也较静态压强和静态密度小 4 个数量级。在此条件下,牛顿方程和连续性方程的差分格式为^[11]:

$$\left\{ \begin{aligned} u_x^{[t+1/2]}(i+1/2, j, k) &= u_x^{[t-1/2]}(i+1/2, j, k) - \delta t / \rho_0 \delta h x [p^{[t]}(i+1, j, k) - p^{[t]}(i, j, k)] \\ u_y^{[t+1/2]}(i, j+1/2, k) &= u_y^{[t-1/2]}(i, j+1/2, k) - \delta t / \rho_0 \delta h x [p^{[t]}(i, j+1, k) - p^{[t]}(i, j, k)] \\ u_z^{[t+1/2]}(i, j, k+1/2) &= u_z^{[t-1/2]}(i, j, k+1/2) - \delta t / \rho_0 \delta h x [p^{[t]}(i, j, k+1) - p^{[t]}(i, j, k)] \\ u^{[t+1]}(i, j, k) &= p^{[t]}(i, j, k) - \rho_0 c^2 \delta t / \delta h x \{ [u_x^{[t+1/2]}(i+1/2, j, k) - u_x^{[t+1/2]}(i-1/2, j, k)] \\ &\quad + [u_y^{[t+1/2]}(i, j+1/2, k) - u_y^{[t+1/2]}(i, j-1/2, k)] \\ &\quad + [u_z^{[t+1/2]}(i, j, k+1/2) - u_z^{[t+1/2]}(i, j, k-1/2)] \} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 ρ_0 为空气静密度, p 是声压, u_x, u_y, u_z 为质点速度的三个分量。 $\delta t, \delta h$ 分别是离散

的时间步长和空间步长。 i, j, k 及 l 取整数, 分别代表分立的空间和时间计算点, 根据有限差分理论, 在立体网格中, 计算所需满足的稳定条件为: $c\delta t/\delta h \leq 1/\sqrt{3}$ 。在交错中, 在空间网格点 $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ 处计算声压, 在空间网格点 $[(i+1/2)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z]$, $[i\Delta x, (j+1/2)\Delta y, k\Delta z]$, $[i\Delta x, j\Delta y, (k+1/2)\Delta z]$ 处计算质点速度的三个分量, 在整数时间网格点 l 处计算声压, 在半个时间网 $(l+1/2)$ 处计算质点速度的三个分量。

由于计算机的容量和计算时间的限制, 必须在一定的空间范围内截断数字网格和在一定的时间内终止计算。在数字网格边界, 递推公式(1)无法被使用, 因为利用递推公式计算边界上的声场参量时要已知边界外的声场参量值, 所以, 在数字网格边界必须有新的计算公式, 用这个公式在计算边界上的声场值时, 只需要已知边界上前面时刻的场值、及计算区域内部前面时刻或当前时刻的场值。

为了解决使用通用吸收边界条件时计

算不收敛的问题, 我们在墙壁表面截断计算区域。在使用的方形网格下, u_x, v_y, w_z 均与网格面垂直, 相当于公式 $z_n = p/v_n$ 中的 v_n , z_n 为法向声阻抗, v_n 为法向速度, 于是得到如下边界条件:

$$\begin{cases} u_x^l(1/2, j, k) = -p(1, j, k)/z_n \\ u_x^l(i_{\max} + 1/2, j, k) = p(i_{\max}, j, k)/z_n \\ u_y^l(i, 1/2, k) = -p(i, 1, k)/z_n \\ u_y^l(i, j_{\max} + 1/2, k) = p(i, j_{\max}, k)/z_n \\ u_z^l(i, j, 1/2) = -p(i, j, 1)/z_n \\ u_z^l(i, j, k_{\max} + 1/2) = p(i, j, k_{\max})/z_n \end{cases} \quad (2)$$

计算时, 让墙壁边界落在速度的计算格点上, 用靠近墙壁的整数格点上的声压值近似代替墙壁处速度的计算格点上的声压值, 如果对边界作刚性处理, 则将(2)式的右边置0。上式中的声阻抗 z_n 与墙壁的吸声系数的关系为 $Z_n = \rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n})$, α_n 为墙壁的垂直吸声系数。所以, 边界条件还可以写为:

$$\begin{cases} u_x^l(1/2, j, k) = -p(1, j, k)/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \\ u_x^l(i_{\max} + 1/2, j, k) = p(i_{\max}, j, k)/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \\ u_y^l(i, 1/2, k) = -p(i, 1, k)/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \\ u_y^l(i, j_{\max} + 1/2, k) = p(i, j_{\max}, k)/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \\ u_z^l(i, j, 1/2) = -p(i, j, 1)/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \\ u_z^l(i, j, k_{\max} + 1/2) = p(i, j, k_{\max})/\rho_0 c_0 (1 + \sqrt{1 - \alpha_n}) / (1 - \sqrt{1 - \alpha_n}) \end{cases} \quad (3)$$

基本公式(1)和边界条件(2)或(3)式构成了我们模拟室内声场的基本数学框架。利用上面差分格式, 结合声场初始条件, 可以递推以后各时刻的声场参量 p 及 u_x, u_y, u_z 。这种递推特别适合计算房间的脉冲响应, 而房间的脉冲响应几乎包含了房间的全部声学特性。

模拟方法、计算程序的可靠性曾通过在实际房间的测量与计算的对比得到验证^[12]。

3 低谷效应的多方模拟

房间尺寸为 $12\text{m} \times 5\text{m} \times 4\text{m}$, 房间中设有 10 排座椅, 房间模型及声源与受声点的位置分布如图 1 所示。为了使研究更符合实际, 我们假设墙壁的吸声系数为 0.15, 空间网格尺寸取 $\delta h = 0.1\text{m}$, 时间步长取 $\delta t = 0.167\text{ms}$, 满足稳定条件。将墙壁与座椅表面安排在质点速度计算格点上, 声压在两速度计算格点中心位置计算。

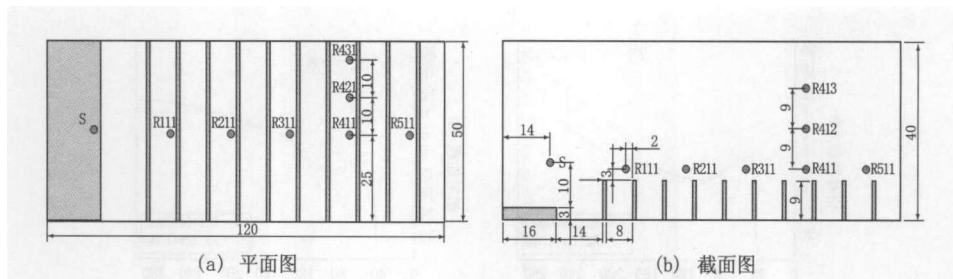


图 1 房间模型

用计算机产生的一个 MLS 信号,即为房间声场的初始条件,利用(1)式(2)式计算房间各点的声场参量,在一个时间步计算得到各个空间网格点参量值。如此一个个时间步递推下去,得到各时刻各个空间位置的声场参量值,保存某些点在各个时间步的声压值,就得到该点的脉冲响应。计算程序是用 Matlab 编写的。得到受声点的脉冲响应后,通过 Fourier 变换得到传输函数。

坐席低谷效应在不同的空间位置表现出不同的特点,在 Joe LoVetri 等人的研究中就成功模拟了低谷效应与声源位置、受声点位置及声源到受声点空间距离的关系。

关于低谷效应同声源高度、声源到受声点间坐椅排数、受声点高度之间的关系,我们得到了与 Joe LoVetri 类似的结果。但下面将对低谷效应关于空间和时间的其它方面特性作更为全面的模拟。

3.1 低谷效应与声源高度及声源到受声点间坐椅排数的关系

在研究坐席低谷效应同声源到受声点间坐椅排数的关系时,声源高 1.4m,受声点分别设置在第二、四、六、八排。在研究坐席低谷效应同受声点高度的关系时,受声点位于第八排,高度分别设置为 1.2m,2.1m 和 3m。两组比较曲线分别如图 2(a)(b)所示。

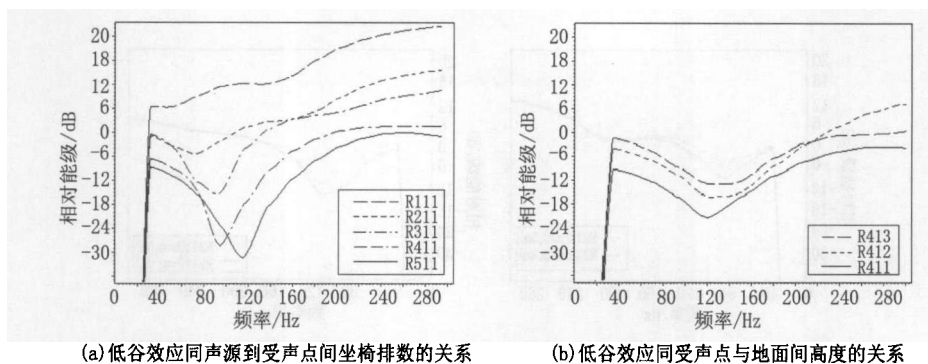


图 2 低谷效应与声源高度及声源到受声点间坐椅排数的关系

模拟发现,低谷效应随着声源到受声点间坐椅排数的增加而增强,最大的低谷深度达到 20dB 以上,随着受声点离地面高度的增加低谷效应减弱。模拟结果与 Joe LoVetri 的有限差分模拟、Davies 的边界元法模拟的结果^[7]及在实际音乐厅和缩尺模型中的测量结果^[1,2,4]相吻合。

3.2 低谷效应与坐椅行间距的关系

Schultz 和 Watters^[1]在 1:10 的缩尺模

型中进行测量,研究了坐椅行间距对于低谷效应的影响,在他们的模型中,椅背间距分别为 5cm 和 10.2cm,相当的实际尺寸为 0.5m 和 1.02m,他们的测量结果表明坐椅行间距对于低谷效应的影响不大。本文对此也进行了模拟,将坐椅行间距分别设置为 0.8m 和 1.7m,得到 R211、R311、R411 和 R511 四个受声点的低谷效应曲线,如图 3 所示。

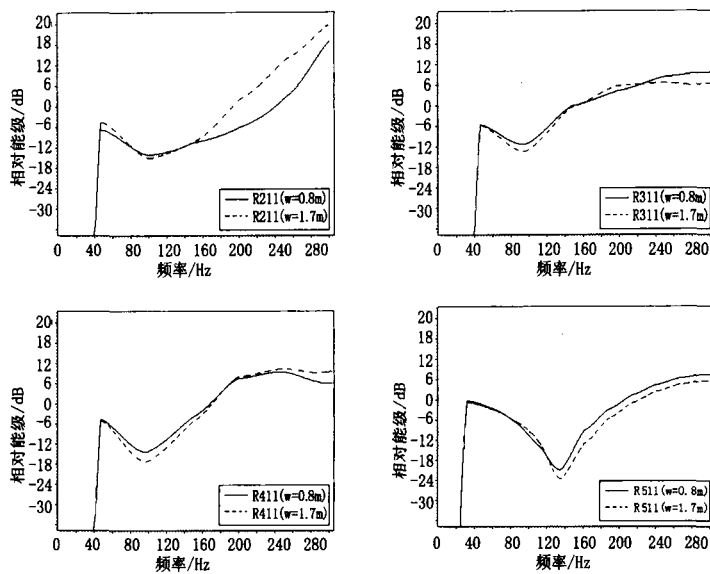


图3 低谷效应与坐椅行间距的关系

可以看出,行间距增加一倍多,低谷的深度,谷点的频率均无明显改变,模拟结果与 Schultz 和 Watters^[1] 以及 Sessler 和 West^[2] 在缩尺模型中的测量结果一致。

3.3 低谷效应与坐椅高度的关系

Sessler 和 West 在研究低谷效应时,让

坐椅高度减半,认为坐椅高度对低谷效应有较大影响^[2]。本文分别假定坐椅高度为 0.5m 和 0.9m,研究了各点低谷效应的变化,图 4 给出的是 R211、R311、R411 和 R511 几个受声点低谷效应的对比曲线。

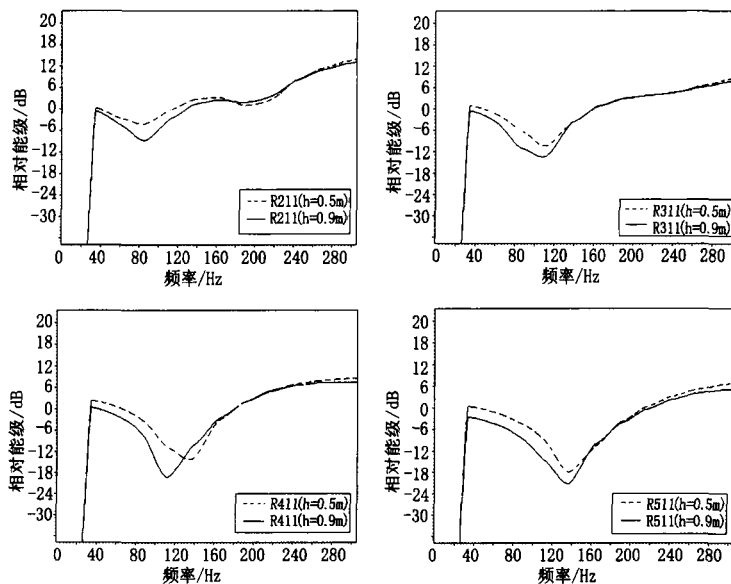


图4 低谷效应与坐椅高度的关系

研究发现,在各受声点,坐椅的高度越高,低谷越深,低谷的深度差别在 6~10dB 的范围内,除 R411 点外,谷点频率无明显变化。

3.4 低谷效应与同一排中受声点水平位置的关系

实际测量和模拟计算都证实低谷效应随着受声点位置与声源之间坐椅排数的增

加而明显增加,这很容易使我们得出低谷效应随着受声点与声源间距增加而增加的结论。为了查证这是否为普遍规律,本文模拟了同一排中低谷效应与受声点水平位置的关系,图 5 给出的是房间模型第 8 排 3 个受声点 R411、R421、R431 的低谷曲线,R421 和 R431 分别偏离中心 1m 和 2m。

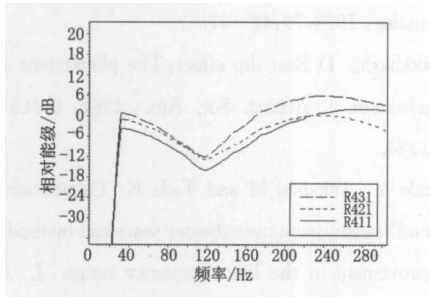


图 5 低谷效应与水平位置的关系

可以看出,在同一排中的三个不同的受声位置,低谷效应随受声点偏离中心距离的增加反而减弱,不过这种变化并不明显,谷点频率也无明显改变。

3.5 低谷效应与时间窗宽度的关系

坐席低谷效应不仅有多多种多样的空间特性,也有时域上的特点,低谷效应随测量时间的不同而不同。Takahashi 对此有相关研究,他得到了不同截止时间窗下的低谷效应曲线图^[5]。本文将时间窗截止时间分别

假定为 5ms、10ms、15ms 和 20ms,得到不同截止时间窗下的低谷效应如图 6 所示。

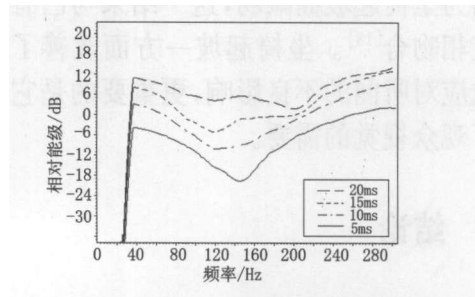


图 6 低谷效应与时间窗宽度的关系

可以看出,窗的截止时间越短,低谷效应越明显,低谷越深,谷点的频率也较高,这一结果与 Takahashi 的研究取得一致^[5]。

3.6 坐席起坡时的低谷效应

在 Joe LoVetri 等的房间模型中,地面是水平的,显然,这与实际有偏差。作为进一步的研究,我们模拟了坐席起坡情况下的低谷现象。房间模型的截面图见图 7 所示,起坡总高度为 1m,各受声点的位置在原水平地面模型下均相应提高。

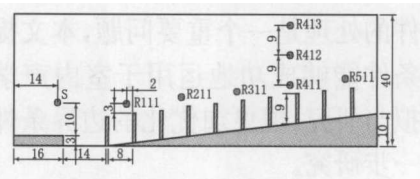


图 7 坐席起坡房间模型的截面图

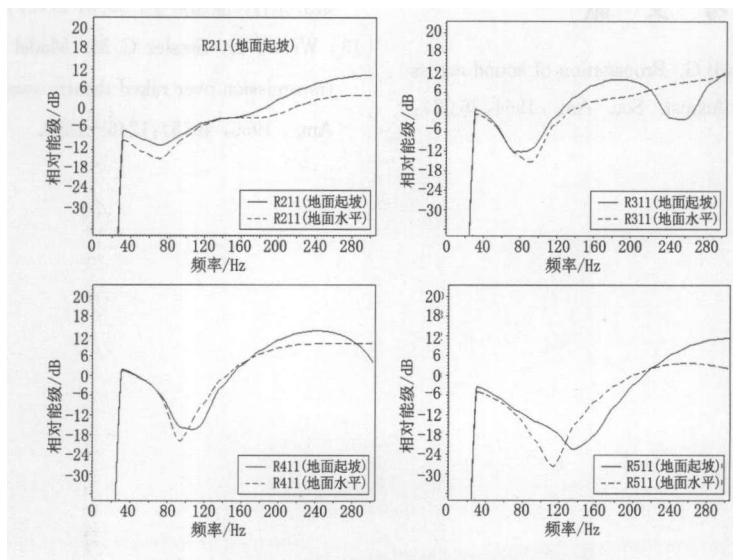


图 8 坐椅起坡前后各受声点低谷效应的对比

图8是坐椅起坡前后,几个受声点低谷效应的对比图,由图8可知,各点的低谷都因为坐椅起坡而减弱,这一结果与已有的研究相吻合^[13]。坐椅起坡一方面改善了低谷效应对听闻的不良影响,更重要的是它顺应了观众视觉的需要。

4 结论

文章对于低谷效应的多方面模拟包括了低谷效应与坐椅行间距、坐椅高度、时间窗宽度的关系和坐席起坡时的低谷效应,模拟结果与在实际音乐厅和缩尺模型中的测量结果,或者其它方法的计算结果相吻合。

文章还模拟了同一排坐席中不同受声点位置的低谷效应,发现低谷效应随受声点偏离中心距离的增加反而减弱,但这时低谷效应的变化并不明显。

时域有限差分法是进行室内声学模拟,特别是低频声学问题模拟的有效方法。应用时域有限差分法研究室内声学问题时,边界条件的处理是一个重要问题,本文提出的边界条件能够成功地运用于室内声学问题的模拟与研究,但更加优化的边界条件还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Schultz T J, Watters B G. Propagation of sound across audience seating. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, 36(2): 885-896.
- [2] Sessler G M, West J E. Sound transmission over theatre seats. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, 36(9): 1725-1732.
- [3] David Greenberg, Courtney Burroughs. Seat-dip phenomenon. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, 96(5): 3267-2372.
- [4] Mommertz E. Some measurements of the propagation of acoustic waves skimming over the public and seats. *Acustica*, 1993, 79: 42-47.
- [5] Takahashi. D. Seat dip effect: The phenomena and the mechanism. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, 102(3): 1326-1334.
- [6] Ando Y, Takaishi M and Tada K. Calculation of the sound transmission over theater seats and methods for its improvement in the low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, 72(2): 443-448.
- [7] Davies W J, Cox T J. Reducing seat dip attenuation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, 108(5): 2211-2218.
- [8] 赵越喆, 吴硕贤. 有限元素法模拟坐席吸声低谷效应. *应用声学*, 2000, 19(3): 35-37.
- [9] Joe LoVetri, Doru Mardare, Gilbert Soulodre. Modeling of the seat dip effect using finite-difference time-domain method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, 100(4): 2204-2212.
- [10] 李太宝. 计算声学. 北京: 科学出版社, 2005, 45.
- [11] 卢义刚, 杨启洪. 时域有限差分法在建筑声学中的应用及前景. *应用声学*, 2006, 25(3): 193-197.
- [12] 卢义刚, 黄坤朋, 余光正. 室内声学有限差分模拟中的边界条件. *应用声学*, 2008, 27(2): 131-139.
- [13] West J E, Sessler G M. Model study of the sound transmission over raked theatre seats. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1966, 40(5): 1246-1252.