

# 基于稳定双共轭梯度的车内声场靶向重建方法

李 旭, 吴旭东, 张 聪, 罗家兴

(同济大学 汽车学院, 上海, 201804)

**摘要:** 针对驾乘人员对车辆声学环境的智能化管控需求, 基于稳定双共轭梯度(BiCGSTAB)提出一种协同提升声学能量对比度和声场平面性的车内声场靶向重建方法。首先, 通过定义声场重建相关的声学问题, 结合目标区域声压级响应关于声源分布位置的参数化结果, 构建了面向驾乘人员的车内声学模型。其次, 围绕期望声场目标搭建车内声场靶向重建框架, 基于BiCGSTAB对车载声源驱动信号进行了迭代求解, 并聚焦声学能量对比度、平面性等指标分析了车内声场重建性能。结果表明, 该方法有效避免了声学复线性方程组求解的收敛异常问题, 能够在车内目标区域实现声学幅值与相位信息的高聚焦重建。

**关键词:** 车内声场; 声场重建; 声学传递函数; 稳定双共轭梯度

中图分类号: U462.1

文献标志码: A

## Targeted Reproduction Method of Interior Sound Field Based on Stabilized Biconjugate Gradient

LI Xu, WU Xudong, ZHANG Cong, LUO Jiaxing

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aiming at requirements of intelligent modulation in vehicle acoustic environment for drivers and passengers, a targeted sound field reproduction method is proposed based on stabilized biconjugate gradient (BiCGSTAB) to collectively improve the acoustic energy contrast and sound field planarity. Considering parametric results of the contribution weight on the in-vehicle sound acoustic arrays to the acoustic environment, and combining the automotive scenario to divide the target acoustic regions, the cabin acoustics model for the drivers and passengers are first constructed. By defining the acoustics problems related to sound field reproduction and combining with the parametric results that the sound pressure response of target regions with

respect to sound source distribution positions, the interior acoustics model for drivers and passengers is constructed. Furthermore, the targeted reproduction framework of interior sound field is constructed embracing the given expected sound field, and the driving signals of sound sources are iteratively obtained based on BiCGSTAB. Focusing on acoustics energy contrast, sound field planarity and other indicators, the interior sound field reproduction performance is analyzed in detail. The results show that the proposed method can effectively avoid the abnormal convergence in solving the acoustics complex linear equations, and can achieve the high-quality reproduction about the acoustics amplitude and phase information in vehicle target regions

**Keywords:** interior sound field; sound field reproduction; acoustics transfer function; stabilized biconjugate gradient

智能座舱作为汽车行业众多新兴技术的综合应用高地, 逐渐成为智能网联车辆市场化的关键突破点和提升消费者体验的核心驱动力。伴随对汽车的认知由“交通出行工具”向“第三生活空间”的概念转变, 驾乘人员对车辆声学环境的多元化需求日益攀升, 以智能控制为代表的声学管控技术成为车辆产业的重要发展方向<sup>[1, 2]</sup>。

传统声场构建方法可划分为基于扬声器的空间声场控制和基于耳机的双耳声场控制, 但均无法兼顾解决个人声学隐私与耳部生理疲劳的冲突问题。基础车内声场重建<sup>[3, 4]</sup>, 即指驾乘人员在无需耳机佩戴的前提下拥有彼此独立的声学环境, 在保证驾驶者拥有良好驾驶环境的同时, 为其它车辆乘员营造个性化的乘车体验。

声场重建技术<sup>[5]</sup>突破车辆内部声学信息共享化的传统限制, 使车辆乘员拥有多元化的声学环境。

收稿日期: 2023-12-19

第一作者: 李旭(1996—), 李旭, 博士研究生, 主要研究方向为车内声场重建及调控。Email: lixu3238@tongji.edu.cn

通讯作者: 吴旭东(1983—), 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车噪声与振动控制。Email: wuxudong@tongji.edu.cn

清华大学研究者<sup>[6,7]</sup>考虑到扬声器驱动功率限制与声学传递函数测量误差,提出一种调控明区声场重建性能与暗区声学能量平衡的鲁棒性控制方法。南安普顿大学研究者<sup>[8]</sup>基于最小二乘法在车内设计了一套私人音频系统,该系统基于扬声器阵列分别在汽车前、后排区域产生了两个独立听区。上述研究面向车内声学环境能够实现较好的声场重建效果,但对于重建声场性能的关注多停滞在声学能量对比度、扬声器驱动功率等声学指标上,较少考虑车载声源驱动信号的稳健性求解问题。

本文围绕车载声源分布与车辆乘员位置的声压级响应关系,提出一种协同提升声学能量对比度和声场平面性的靶向重建方法。首先,通过对横向声源位置的参数化分析搭建了车内声学传递模型;然后,针对传统声场重建方法求解的局限性,基于稳定双共轭梯度(stabilized biconjugate gradient, BiCGSTAB)构建车内声学环境的靶向声场重建框架;最后,从声学能量对比度、声场平面性等指标将其与传统声场重建算法进行了对比分析。

## 1 车内声学传递模型

面向车辆声学环境的工程场景中,声场重建性能取决于声源阵列、目标区域和控制算法三者的协同关系,即良好的车内声学传递模型是实现高性能声场重建的先决条件。

### 1.1 声场重建问题定义

声场靶向重建,其可定义为在目标区域(定义为明区)内构建期望声场,并使另一目标区域(定义为暗区)的声学属性不受该声场影响。用于声场重建的声源阵列通常由若干扬声器组成,不考虑扬声器指向性可将其视为单极子声源,任一扬声器辐射在自由声场中的声压分布可表达如式(1)所示。

$$p_s(x, f) = p_0(f) \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-i \frac{2\pi f}{c} |x - x_0|}}{|x - x_0|} \quad (1)$$

对于目标区域内的声压分布,其可表示为声源驱动信号和声学传递函数的数学乘积,该声学传递函数取决于目标区域和声源分布的空间位置。目标区域通常被划分为包络人体头部的纵横向平面,其声压可表示如式(2)所示。

$$p(x, f)_{m \times 1} = G(x, f)_{m \times n} u(x, f)_{n \times 1} \quad (2)$$

式中:  $G$  为声源阵列中  $n$  个扬声器到目标区域内  $m$  个控制点的声学传递函数矩阵;  $u$  为扬声器的驱动信号矩阵;  $f$  为空间频率。

一般来说,目标区域间互不影响程度和明区声学性能是衡量声场靶向重建效果的基础指标,为此引入如下声学能量对比度与声场平面性两项声学定义。

声学能量对比度,定义为明区与暗区间的平均声能密度之比。越高的声学能量对比度代表不同目标区域间的声压级差异越明显,其表达如下:

$$A_c = \frac{m_d p_b^H p_b}{m_b p_d^H p_d} = \frac{m_d u_b^H G_b^H G_b u_b}{m_b u_d^H G_d^H G_d u_d} \quad (3)$$

声场平面性,定义为目标区域中来自单一方向的最大声强与总声强之比。声场平面性在 0~1 间浮动,越接近 1 代表目标区域的声场波形越近似平面波,其表达如下:

$$\eta = \frac{\sum_i w_i n_i \cdot n_{\max}}{\sum_i w_i} \quad (4)$$

式中:  $w_i$  为沿不同方向的声强分布,且  $0 \leq \theta_i \leq 2\pi$ ;  $n_i$  为单位矢量;  $n_{\max}$  为最大声强方向的单位矢量。

### 1.2 声学传递函数建模

声学传递函数作为承载声源阵列与目标区域的系统响应模型,主要取决于二者的空间位置。面向车辆内部的声场重建中,目标区域一般被定义为车辆乘坐区域,故车载声源分布位置直接影响声场重建性能。

本文考虑一种安装于车辆顶棚的纵/横向声源分布方案,对于如图 1 所示的车辆声腔模型,其纵向声源分布较好确定,放置在车辆顶棚两侧且尽可能涵括乘坐区域即可。对于横向声源分布,既要记及其关于乘坐区域的声学响应结果,又需考虑车辆天窗等因素造成的安装限制。

因此,对于复杂的车辆内部声学环境,以单一横向声源分布为待确定参数,通过分析其在不同位置处对乘坐区域的声压级响应结果,从而选定横向声源分布位置。通过在车辆内部划分 4 处乘坐区域并给定单位激励至车载纵/横向声源,得到不同乘坐区域的声压级响应如图 2 所示。车辆乘车区域的声压级响应结果随分布位置和空间频率非线性变化,尤其是较低频率范围的响应更为显著。

综上,为规避声源阵列驱动信号与车辆声腔发生机械共振,即在车辆乘坐位置产生较小的声压级响应结果,将横向声源分布位置安装在 0.2~0.4 m 处的车辆顶棚位置。进一步,考虑车辆天窗造成的安装限制,将最终的横向声源位置确定在 0.4 m 处。此位置位于前排驾驶员座椅头枕上方,既能够兼顾乘坐区域关于声源阵列的声压级响应结果,又可以

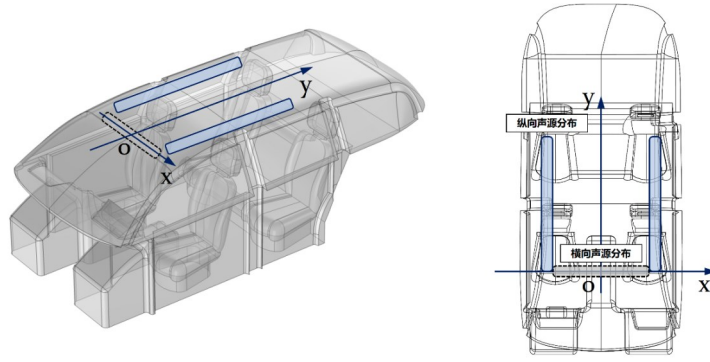


图1 包含声源分布的车辆声腔模型

Fig.1 Vehicle sound cavity model including sound source distribution

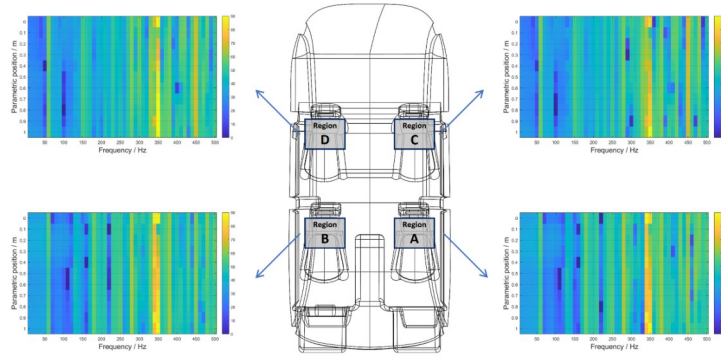


图2 目标区域声压级响应参数化结果

Fig. 2 Parametric results of sound pressure level response in target regions

规避声源阵列布置对车辆顶棚空间的大面积占用。

## 2 车内声场靶向重建方法

本部分以声压匹配(pressure matching, PM)方法为参照,提出基于BiCGSTAB的车内靶向重建方法并验证其有效性。

### 2.1 基于BiCGSTAB的声场重建

传统声场重建常通过某一声学指标的最值求解以获取声源阵列驱动信号,如PM方法定义重建声场与期望声场的最小差值为求解目标,其成本函数可表达如下:

$$J = (p_b - d_b)^H (p_b - d_b) + (p_d - d_d)^H (p_d - d_d) + \lambda (u^H u - E) \quad (5)$$

式中:  $d$  为期望声场;  $\lambda$  为正则化参数;  $E$  为扬声器驱动功率限制。

对式(5)进行矩阵求导并令导数为零,求解得到声源阵列驱动信号,如式(6)所示。

$$u = [G_b^H G_b + G_d^H G_d + \lambda I]^{-1} [G_b^H G_b + G_d^H G_d] \quad (6)$$

引入归一化声场重建误差衡量声场重建性能,

其定义为声场重建误差均方和与期望声场均方和的比值。

$$R_E = \frac{\|G_b u - d_b\|_2^2}{\|d_b\|_2^2} \quad (7)$$

传统声场重建方法多存在两类求解问题,一是待求解声场的系数矩阵多为大规模复线性矩阵,求解过程中的矩阵病态性问题难以避免;二是成本函数中的正则化参数无法直接给定,其最优值与声场重建频率非线性相关。鉴于BiCGSTAB在求解大规模非对称线性方程组中的良好适用性,故以此为基础提出一种基于系数矩阵多次预处理的声场靶向重建方法。

基于前述构建的车内声学传递模型,定义车辆声学明区(区域A)声场70 dB与暗区(区域D)静寂声场为期望声场,其数学模型可表达如下:

$$(G_A + G_D)u = d_{A/70\text{dB}} + d_D \quad (8)$$

为解决声场重建中的求解问题,首先,通过引入Cholesky预处理能够降低矩阵条件数以改善系数矩阵病态性问题。如对于  $Ax=b$  的复线性方程组,取一非奇异矩阵  $M$  使  $M^H A$  的条件数小于系数矩阵  $A$ ,



其中  $M$  由对  $A$  进行 Cholesky 分解得到。其次,基于对数坐标系的声压级响应难以实现线性方程组的精确求解,故引入修正系数  $h_0$  对系数矩阵进行二次预处理以提升方程求解精度,则式(8)可进一步改写如下:

$$M^{-1}(G_A^H G_A + h_0 G_D^H G_D) u = M^{-1}(G_A^H d_{A/70\text{dB}} + G_D^H d_D) \quad (9)$$

此外,考虑声场平面性会受到既定平面波入射方向影响,故在求解中以入射方向为待定变量,通过迭代求解确定声波在目标区域内的最优入射方向。综上,基于 BiCGSTAB 的车内声场靶向重建方法的求解框架如图 3 所示。

## 2.2 声场靶向重建结果分析

为验证基于 BiCGSTAB 的车内声场靶向重建方法有效性,以 PM 方法( $\lambda=1$ )为参照探究车内声场靶向重建性能,其声学能量对比度和归一化声场重建误差如图 4 所示。

与 PM 方法相比,所提出方法能够在求解频段内实现较大的声学能量对比度,特别在 20~600 Hz 的频率范围内能够接近 40 dB。声学能量对比度在大于 900 Hz 后将下降至 20 dB 以下,这是由明区声

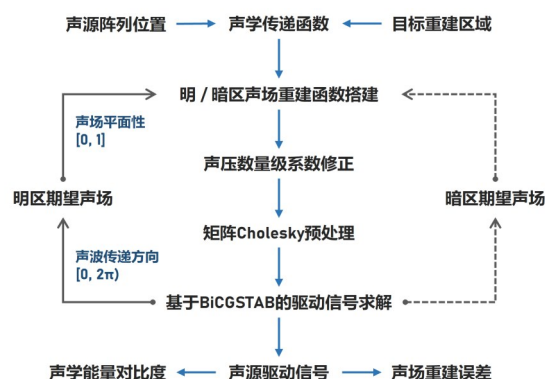


图 3 车内声场靶向重建求解框架

Fig. 3 Solving framework of targeted sound field reproduction

学能量在稍高频范围内向暗区辐射造成的,但明区声学声压级响应能够稳定维持在 70 dB。如图 5 所示的车内声压级分布(2 kHz)中,明区声压级响应维持在既定水平而暗区升高至 30 dB。此外,基于 BiCGSTAB 的车内声场靶向重建方法在 1k Hz 内相比 PM 方法有更低的归一化声场重建误差,超过该频率区间后该值会逐渐增大但仍能维持较好的重建效果。

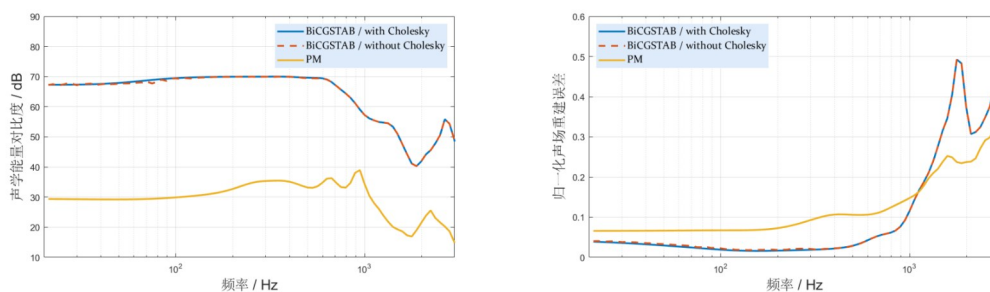


图 4 目标频段内的声场把靶向重建性能

Fig. 4 sound field reproduction performance within target frequency band

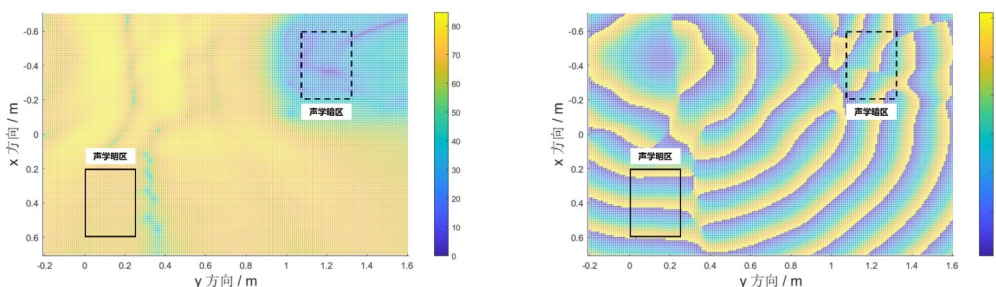


图 5 声波横向入射的车内声场分布

Fig. 5 Interior sound field distribution given transverse sound wave incidence

声波纵向入射下的车内声场分布如图 6 所示,相比横 向入射,声波纵向入射破坏了车内声场平面

性,在声场重建中应充分考虑声波入射方向对重建效果的影响。

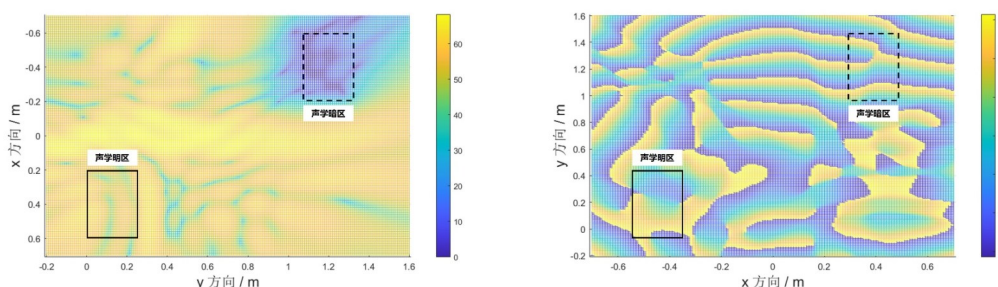


图6 声波纵向入射的车内声场分布

Fig.6 Interior sound field distribution given longitudinal sound wave incidence

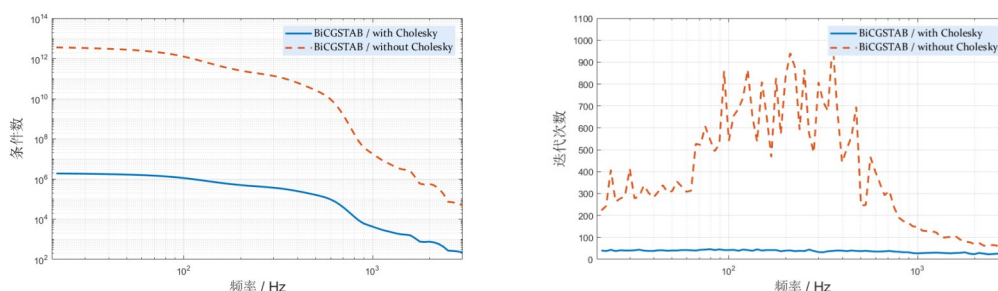


图7 Cholesky 预处理对矩阵求解的影响

Fig 7 Influence of Cholesky preprocessing on matrix solving

进一步,基于Cholesky预处理的系数矩阵条件数与求解迭代次数如图7所示。Cholesky预处理能够使系数矩阵条件数下降8个数量级,显著改善了声源驱动信号的稳健性求解问题并降低了求解中出现病态矩阵的概率。同时,对系数矩阵的Cholesky预处理使矩阵求解迭代次数明显下降从而实现了计算成本的有效降低。

### 3 结论

为契合驾乘人员对车内声场的智能化管控需求,本文从车载声源分布与车辆乘员位置的声压响应关系出发,提出一种基于BiCGSTAB的车内声场靶向重建方法,旨在协同提升目标区域的声学能量对比度和声场平面性。与PM方法相比,该方法通过对待解系数矩阵进行Cholesky预处理,有效降低了矩阵条件数和求解迭代次数。通过对既定声波入射方向的迭代寻,能够在目标频段内实现较好的声学能量对比度和归一化声场重建误差。

#### 参考文献:

- [1] YANG J, WU M, HAN L. A review of sound field control [J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7319.
- [2] GALLIAN W, FAZI F M, TRIPODI C, *et al.* Optimisation of the target sound fields for the generation of independent listening zones in a reverberant environment [C]//2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA). Bologna, Italy: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/I3DA48870.2021.9610888>.
- [3] CHOI J, KIM Y. Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1695.
- [4] COLEMAN P, JACKSON P J B, OLIK M, *et al.* Personal audio with a planar bright zone [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(4): 1725.
- [5] ELLIOTT S J, CHEER J, CHOI J, *et al.* Robustness and regularization of personal audio systems [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(7): 2123.
- [6] LIAO X, CHEER J, ELLIOTT S J, *et al.* Design of a loudspeaker array for personal audio in a car cabin [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2017, 65(3): 226.
- [7] 廖祥凝,郑四发,王宇,等. 调控明区声场重建性能和暗区声能量的综合控制方法 [J]. 声学学报, 2018, 43(5): 835.  
LIAO X N, ZHENG S F, WANG Y, *et al.* A control method for balancing the reproductive performance and the acoustic contrast performance in a personal audio system [J]. ACTA ACUSTICA, 2018, 43(5): 835.
- [8] CHEER J, ELLIOTT S J, GÁLVEZ M F S. Design and implementation of a car cabin personal audio system [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2013, 61(6): 412.