

基于时域多普勒修正的运动声全息识别方法^{*}

杨殿阁 罗禹贡 李 兵 李克强 连小珉[†]

(清华大学汽车工程系, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

(2009 年 9 月 29 日收到; 2009 年 11 月 10 日收到修改稿)

由于运动声源测量信号中多普勒效应的存在, 一般声全息方法无法直接使用, 而阵列信号波束成形处理方法无法进行定量分析. 本方法建立了基于测量面、辐射面和全息的运动学几何关系, 提出了声源与测量信号之间的非线性时间映射方法, 基于运动声源的声源特征函数, 构造了消除多普勒效应的全息面时域声压分布. 全息重建得到运动声源表面有效声压分布, 实现了对主要声源处声压幅值的定量估计. 实际运动声源的测量实验结果证明了该方法的有效性.

关键词: 声全息, 运动声源, 多普勒效应, 声源识别

PACC: 4360, 4363, 4385

1. 引言

运动声源声场的定量测量和声源识别一直是声学领域非常关注的一个难题. 有关运动声源正向传播的理论体系目前已经比较完善. 早在 20 世纪中期, 莫尔斯建立了一套经典的运动点声源的理论体系. 利用所测量的声场信号反推声源的相关信息属于声学逆问题的研究. 从 20 世纪 70 年代开始, King III 和 Bechert^[1,2] 开始研究利用阵列信号处理技术进行列车噪声的测量, 随后的 20 多年间 Barsikow, Takano 等^[3,4] 将该方法用于欧洲高速列车和日本新干线的运动噪声的研究. 但由于阵列信号处理方法在声源分辨率以及无法实现声源准确定量分析等问题上的限制, 从 20 世纪 90 年代, 科学家开始研究利用声全息方法来测量运动噪声.

Tanaka 和 Sakamoto 等^[5] 运用基于球面波反向传播原理的声全息方法对运动汽车的轮胎噪声进行了研究和分析, 但由于运动声源的多普勒效应等原因, 还存在重建声源位置随重建频率变化而偏移以及无法对声源幅值进行准确定量分析等问题. Kim 等^[6,7] 基于 Moving-Frame 技术建立了一套运动声源声场的声全息方法, 该方法通过建立运动坐标

系下声压与静止测量坐标系下声压之间的关系, 实现对运动声源声场的重建分析, 该方法适用于单频或窄带离散声源的分析, 不能有效地对运动声源进行定量分析.

近 20 年来, 中国科学家在声全息领域的研究取得了很大的进展. 陈心昭、蒋伟康等^[8-11] 基于波叠加法等建立了比较完善的近场声全息理论, 较好地解决了静止声源声场的准确测量及声场特性的分析, 但目前还没有进一步应用到运动声源声场的测量分析. 连小珉等^[12-14] 研究利用声全息测量运动声源声场, 建立了多普勒效应消除的方法, 实现了运动声源的测量. 该方法在频域进行多普勒效应的消除, 可用于单频声源的分析, 不能进行声源定量分析.

本文针对运动声源声场测量, 建立声场中的运动学几何关系, 建立声源与测量信号之间的非线性时间映射方法, 基于运动声源的声源特征函数, 在时域消除多普勒效应, 利用声全息重建得到运动声源表面声场, 实现了对主要声源处声压幅值的定量估计. 本方法对单频、多频声源均具有较好的定量识别效果, 由于不需要针对不同频率逐个进行多普勒效应的消除, 本方法计算效率较高, 是一种高效的运动声源声场定量测量和声源识别方法.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:50605038)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lianxm@mail.tsinghua.edu.cn

2. 运动声源声全息重建算法

2.1. 声源特征函数

对于单一声源的理想声场,当声源位置已知,则可以从声场中一点的测量声压信号求解声场中任意点的声压.图 1 为点声源球面波产生的声压场示意图.图中 s 为辐射球面波的点声源, $q(t)$ 为其点源强度, A 点为声场中的测量点, $p_A(t)$ 为在 A 处测量到的声压信号.

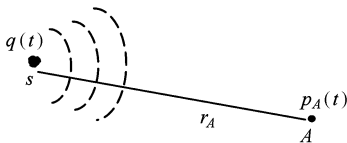


图 1 点声源球面波辐射声场示意图

根据点声源球面波辐射理论,声场中测量点 A 的声压 $p_A(t)$ 可表示为

$$p_A(t) = \frac{1}{4\pi r_A} q' \left(t - \frac{r_A}{c} \right). \tag{1}$$

定义声源特征函数 $\psi(t)$ 为

$$\psi(t) = \frac{q'(t)}{4\pi}, \tag{2}$$

式中 $q'(t)$ 表示对 $q(t)$ 的一次求导,则可得 A 点声压 $p_A(t)$ 的另一表达式为

$$p_A(t) = \frac{1}{r_A} \psi \left(t - \frac{r_A}{c} \right). \tag{3}$$

令

$$\tau = t - \frac{r_A}{c}, \tag{4}$$

得

$$\psi(\tau) = p_A \left(\tau + \frac{r_A}{c} \right) r_A. \tag{5}$$

从(5)式可以看出,由于 $p_A(\tau)$ 是可以测量的,所以声源特征函数可以通过声场中任意点的声压测量信号来获取.

根据以上分析可知,对于单一声源的理想声场,如果获得一点的测量声压后,则可以通过该点的测量声压求出声源特征函数 $\psi(\tau)$,再根据声传播时延和距离倒数衰减原则,便能得到任意点的声压.

2.2. 运动声源声场的时空关系

在运动声源的声全息分析中,可以将声源产生

的声场分为辐射面、测量面和全息面,这几个声场的相互关系是进行声全息分析的基础.

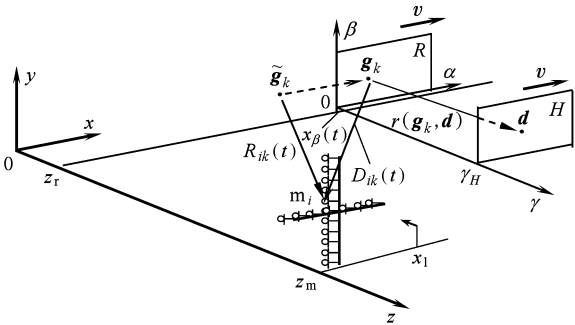


图 2 测量面、辐射面和全息面的关系示意图

在运动噪声源的声全息分析中,测量面、辐射面和全息面的关系如图 2 所示.图中 xyz 为全局定坐标系.声源外表面紧贴 $z = z_r$ 平面沿 x 方向以匀速 v 做直线运动.局部动坐标系 $\alpha\beta\gamma$ 固定在声源上,随声源一起运动.动坐标系上的平面 $R(\gamma = 0)$ 与全局坐标系上 $z = z_r$ 平面重合.

在距 $z = z_r$ 平面距离为 z_0 的 $z = z_m$ 处,布置有 N 个传声器组成的十字传声器阵列和激光定位器.激光定位器向 z 轴的反方向发射激光束,激光束的 x 坐标为 x_1 .传声器阵列的 N 个传声器的位置为已知, m_i 为第 i 个传声器,其空间坐标为 (x_i, y_i, z_i) .

在局部动坐标系中的平面 $R(\gamma = 0)$ 为辐射面,运动声源的噪声可以看成是通过辐射面 R 向外辐射出来的. $\mathbf{g}_k$ 为辐射面 R 上目标点的位置矢量,其局部坐标矢量为 $(\alpha_k, \beta_k, 0)$.局部动坐标系中的平面 $H(\gamma = \gamma_H)$ 为全息面, $\mathbf{d}$ 为全息面 H 上任意点的位置矢量,其局部坐标为 $(\alpha_d, \beta_d, \gamma_H)$,全息面与辐射面之间没有相对运动. $r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})$ 为辐射面 R 上目标点 $\mathbf{g}_k$ 到全息面 H 上任意点 $\mathbf{d}$ 的声传播距离,可表示如下:

$$r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d}) = |\mathbf{d} - \mathbf{g}_k| = \sqrt{(\alpha_d - \alpha_k)^2 + (\beta_d - \beta_k)^2 + \gamma_H^2}. \tag{6}$$

由于运动的存在,辐射面 R 上任意点 $\mathbf{g}_k$ 的全局坐标中, x 方向坐标将随时间变化.因此,设目标点 $\mathbf{g}_k$ 的全局坐标矢量为 $(x_k(t), y_k, z_k)$,则有

$$\begin{aligned} x_k(t) &= x_{\beta}(t) + \alpha_k, \\ y_k &= \beta_k + y_0, \\ z_k &= z_r, \end{aligned} \tag{7}$$

式中 y_0 为局部动坐标系 $\alpha\beta\gamma$ 原点的全局 y 坐标, β 轴位置 $x_\beta(t)$ 可通过由激光定位器测得位置及声源运动速度确定.

在时刻 t , 局部动坐标系 β 轴的位置为 $x_\beta(t)$. 辐射面上目标点 $\mathbf{g}_k$ 在其运动路径的前一位置 $\tilde{\mathbf{g}}_k$ 处辐射出的声波也在时刻 t 到达传声器 $\mathbf{m}_i$, 其声传播距离为 $R_{ik}(t)$. 显然, 辐射面上目标点 $\mathbf{g}_k$ 从 $\tilde{\mathbf{g}}_k$ 处运

动到当前位置的时间应等于声波从 $\tilde{\mathbf{g}}_k$ 处传到传声器 $\mathbf{m}_i$ 处的时间, 设这个时间差为 $\Delta t_{ik}(t)$, 则可表示如下:

$$\Delta t_{ik}(t) = \frac{R_{ik}(t)}{c}, \quad (8)$$

其中 $R_{ik}(t)$ 为声波传播的距离, 可以根据目标点与传声器的空间关系得出

$$R_{ik}(t) = \frac{M[x_i - x_k(t)] + \sqrt{[x_i - x_k(t)]^2 + (1 - M^2) \sqrt{(y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}}}{1 - M^2}. \quad (9)$$

至此, 已建立起运动噪声源分析中的辐射面、测量面、全息面之间的时空关系, 能够确定任意时刻测量空间中任意点间的距离以及声波的传播时间.

2.3. 多普勒效应与非线性时间映射

通过(9)式可得声波从目标点 $\mathbf{g}_k$ 到传声器 $\mathbf{m}_i$ 的传播距离, 根据莫尔斯的声学理论, 就可以得到声源特征函数 $\psi_k(\tau)$ 与该声源在传声器 $\mathbf{m}_i$ 处产生的声压 $p(\tau, i, k)$ 之间的关系为

$$p(\tau, i, k) = \frac{R_{ik}(\tau) \cdot \psi_k[\tau - R_{ik}(\tau)/c]}{\{R_{ik}(\tau)(1 - M^2) - M[x_k - x_i(\tau)]\}^2}. \quad (10)$$

从(10)式可以看到, 传声器所测得的声压是声源的特征函数, 经过时间延迟和幅值的衰减形成, 其时间延迟量和幅值变化系数都是随时间变化的, 表示如下:

$$\Delta t_{ik}(\tau) = R_{ik}(\tau)/c, \quad (11)$$

$$A_{ik}(\tau) = \frac{R_{ik}(\tau)}{\{R_{ik}(\tau)(1 - M^2) - M[x_k - x_i(\tau)]\}^2}. \quad (12)$$

当传声器与声源距离 $R_{ik}(\tau)$ 随时间缩短时, 时间延迟量 $\Delta t_{ik}(\tau)$ 不断减小, 相当于信号在时间轴上被压缩, 则信号频率升高; 反之当声源远离传声器时, 信号在时间轴被拉伸, 信号频率降低, 这就是运动声源测量中多普勒效应产生的原因.

定义函数映射 $\mathcal{T}_{ik}$,

$$f(\tau) \xrightarrow{\mathcal{T}_{ik}} A_{ik}(\tau) \cdot f[\tau - \Delta t_{ik}(\tau)], \quad (13)$$

则(10)式可以表示为

$$\psi_k(\tau) \xrightarrow{\mathcal{T}_{ik}} p(\tau, i, k). \quad (14)$$

由上式可知, 运动声源测量中产生的多普勒效应实际上是由非线性时间的函数映射 $\mathcal{T}_{ik}$ 产生的. 通过运动声源各声场的时空关系分析, 传播距离 $R_{ik}(\tau)$ 可以计算出来, 从而时间延迟量 $\Delta t_{ik}(\tau)$ 和幅值变化系数 $A_{ik}(\tau)$ 为已知, 通过声压信号 $p(\tau, i, k)$ 的逆映射 $\mathcal{T}_{ik}^{-1}$ 就可以还原出不含多普勒效应的声源特征函数 $\psi_k(\tau)$, 即

$$p(\tau, i, k) \xrightarrow{\mathcal{T}_{ik}^{-1}} \psi_k(\tau), \quad (15)$$

其中逆映射定义如下:

$$g(\tau) \xrightarrow{\mathcal{T}_{ik}^{-1}} g[\tau + \Delta t_{ik}(\tau)]/A_{ik}(\tau). \quad (16)$$

2.4. 运动声源辐射点位置预估

运动声源的辐射面上可以看成具有众多的辐射点, 设共有 J 个辐射点. 为了获得主要声源的辐射面有效值声压定量计算, 首先需要预估主要声源辐射点的位置矢量 $\mathbf{g}_k (k = 1, 2, \dots, K)$. 基于声源特征函数来确定主要声源的辐射点位置. 将辐射面离散为由 J_0 个点组成的点阵列, 将任一点 $\mathbf{g}_n$ 作为目标点, 计算其声源特征函数估计 $\bar{\psi}_n(\tau)$ 如下:

$$\bar{\psi}_n(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i[\tau + \Delta t_{in}(\tau)]/A_{in}(\tau). \quad (17)$$

上式实际上为将各个传声器信号经逆映射去除多普勒效应得到的声源特征函数的估计. (15)式在单一声源的情况下可以准确地得到声源特征函数, 而在多声源情况下其中存在其他声源产生的信号成分, 利用(17)式进行加权平均叠加后, 其他声源信号成分由于其时间变换各不相同因而互相抵消而减弱, 从而实现目标点不包含多普勒效应的声源特征函数的估计.

计算声源特征函数的均方值

$$\bar{\psi}_n = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{\psi}_n^2(\tau) d\tau, \quad (18)$$

式中, $\bar{\psi}_n$ 表示目标点 $\mathbf{g}_n$ 处的声源特征函数均方值估计. 遍历辐射面 R 上所有 J_0 个离散点, 进行相同的计算就能获得辐射面声源特征函数均方值分布估计 $\bar{\psi}_n (n = 1, 2, \dots, J_0)$. 根据这个分布便可确定主要噪声源在辐射面的辐射点位置.

2.5. 运动声源全息面声压分布估计

将辐射面目标点 $\mathbf{g}_k$ 看成是具有声辐射的辐射点, 其对应的声源特征函数为 $\psi_k(t)$. 因此, 针对目标点 $\mathbf{g}_k$, 传声器 m_i 声压可以表示为

$$p_i(t) = \frac{\psi_k[t - \Delta t_{ik}(t)]}{r_{ik}(t)} + \sum_{j=1, j \neq k}^N \frac{\psi_j[t - \Delta t_{ij}(t)]}{r_{ij}(t)} \quad (i = 1, 2, \dots, K). \quad (19)$$

从(19)式可解得

$$\psi_k[t - \Delta t_{ik}(t)] = p_i(t)r_{ik}(t) - a_{ik}(t), \quad (20)$$

其中, $a_{ik}(t)$ 为干扰项, 如下式所示:

$$a_{ik}(t) = r_{ik}(t) \sum_{j=1, j \neq k}^N \frac{\psi_j[t - \Delta t_{ij}(t)]}{r_{ij}(t)}. \quad (21)$$

令

$$\tau = t - \Delta t_{ik}(t), \quad (22)$$

$$\hat{p}_i(\tau) = p_i[\tau + \Delta t_{ik}(t)], \quad (23)$$

$$\hat{r}_{ig}(\tau) = r_{ig}[\tau + \Delta t_{ig}(t)], \quad (24)$$

$$\hat{a}_{ik}(\tau) = a_{ik}[\tau + \Delta t_{ik}(t)], \quad (25)$$

得

$$\psi_k(\tau) = \hat{p}_i(\tau)\hat{r}_{ig}(\tau) - \hat{a}_{ik}(\tau) \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (26)$$

根据声源特征函数 $\psi_k(\tau)$ 的定义, 全息面 H 任意位置矢量 $\mathbf{d}$ 处的时域声压分布可表示为

$$p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) = \frac{\psi_k(\tau - \Delta\tau)}{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})}, \quad (27)$$

式中, $p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 为单目标点全息面时域声压分布, 它与辐射面目标点 $\mathbf{g}_k$ 有关. $r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})$ 为点 $\mathbf{g}_k$ 与 $\mathbf{d}$ 之间的距离. $\Delta\tau$ 定义为全息面声传播时延, 表示为

$$\Delta\tau = \frac{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})}{c}. \quad (28)$$

利用(26), (27)式可得

$$p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) = \frac{\hat{p}_i(\tau - \Delta\tau)\hat{r}_{ig}(\tau - \Delta\tau)}{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})} - \frac{\hat{a}_{ik}(\tau - \Delta\tau)}{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})} \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (29)$$

定义单传声器单目标点全息面时域声压分布估计 $\bar{p}_{Hi}(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 为

$$\bar{p}_{Hi}(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) = p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) + \frac{\hat{a}_{ik}(\tau - \Delta\tau)}{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (30)$$

式中 $\bar{p}_{Hi}(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 为第 i 个传声器的单目标点全息面时域声压分布估计, 是由理论单目标点全息面时域声压分布 $p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 附加一个与传声器位置和目标点位置都有关系的干扰项 $\frac{\hat{a}_{ik}(\tau - \Delta\tau)}{r(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})}$ 组成.

由于测量面共有 N 个传声器在测量, 所以取 N 个传声器单目标点的全息面时域声压分布估计的平均值作为单目标点全息面时域声压分布估计, 有

$$\bar{p}_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{p}_{Hi}(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k). \quad (31)$$

上式的声压估计误差可表示为

$$e(t, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k) = \frac{1}{Nr(\mathbf{g}_k, \mathbf{d})} \sum_{i=1}^N \hat{a}_{ik}(\tau - \Delta\tau), \quad (32)$$

式中 $e(t, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 表示除目标点 $\mathbf{g}_k$ 之外, 辐射面 R 上其他部位辐射出的声波进行错相延时和幅值衰减后叠加平均的结果. 由于各个辐射点的声源特征函数 $\psi_j(t)$ 描述的是一个确定性的声波, 当进行了若干次 ($N \times J$) 的错相延时叠加后, 必然会使得 $\psi_j(t) (j = 1, 2, \dots, J; j \neq k)$ 之间的一部分或大部分被相互抵消, 这就使得估计值 $\bar{p}_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 趋向于它的真实值 $p_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$.

设辐射面上 J 个噪声辐射点中有 $K (K \in J)$ 个主要噪声源辐射点, 其位置矢量分别为 $\mathbf{g}_k (k = 1, 2, \dots, K)$. 实际上, 主要噪声源全息面是一个多目标点全息面. 也就是说, 全息面声压分布是由 K 个主要噪声源辐射点的声辐射共同作用的结果. 因此主要噪声源全息面应是 K 个单目标点全息面时域声压分布估计的叠加, 即

$$\bar{p}_{HM}(\tau, \mathbf{d}) = \sum_{k=1}^K \bar{p}_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k), \quad (33)$$

式中, $\bar{p}_H(\tau, \mathbf{d}, \mathbf{g}_k)$ 为目标点 $\mathbf{g}_k$ 的单目标点全息面时域声压分布估计, $\bar{p}_{HM}(\tau, \mathbf{d})$ 为主要噪声源辐射点群 $\mathbf{g}_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 的多目标点全息面时域声压分布估计.

2.6. 运动声源辐射面声压分布计算

运动声源声全息分析的最终目的就是要得到被测物体表面声场即主要声源形成的辐射面声压分布. 辐射面的声压分布分析需要用全息面频域声压分布, 这可以通过对全息面时域声压分布估计取傅里叶变换来得到

$$\bar{P}_H(f,\boldsymbol{d}) = 2F[\bar{p}_{HM}(\tau,\boldsymbol{d})], \quad (34)$$

式中, F 表示傅里叶变换, $\bar{P}_H(f,\boldsymbol{d})$ 为全息面频域声压分布估计, 通过它可以获得主要噪声源的辐射面声压分布估计.

所获得的多目标点全息面时域声压分布估计, 进一步结合平面声全息原理^[15] 的远场条件 $(\gamma_H - \gamma_r > \frac{\lambda}{5}, \lambda$ 为声波波长), 便可全息重建出辐射面 R 上的频域声压分布 $P_R(f,\boldsymbol{g})$, 即

$$P_R(f,\boldsymbol{g}) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{|\boldsymbol{\Omega}| \leq \lambda^{-1}} \bar{P}_H(f,\boldsymbol{\Omega}) \times e^{-j2\pi L_\gamma \sqrt{\lambda^{-1}-|\boldsymbol{\Omega}|^2}} e^{j\boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{g}} d\boldsymbol{\Omega}_\alpha d\boldsymbol{\Omega}_\beta, \quad (35)$$

$$\bar{P}_H(f,\boldsymbol{\Omega}) = \iint_H P_H(f,\boldsymbol{d}) e^{-j\boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{d}} d\alpha_d d\beta_d, \quad (36)$$

式中, $\bar{P}_H(f,\boldsymbol{\Omega})$ 为测量面 H 上的频域声压分布 $P_H(f,\boldsymbol{d})$ 的二维空间谱, 它由空间二维傅里叶变换计算获得. f 为声波频率, c 为声速, $\boldsymbol{\Omega}_\alpha, \boldsymbol{\Omega}_\beta$ 分别为 α, β 方向上的空间频率, $\boldsymbol{\Omega}$ 为空间频率向量, $\boldsymbol{\Omega} = (\boldsymbol{\Omega}_\alpha, \boldsymbol{\Omega}_\beta, 0)$.

对频率 f 上的声压在频域内进行能量叠加, 即

$$\bar{P}_e(\boldsymbol{g}) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_u} |\bar{P}_R(f,\boldsymbol{g})|^2 df}, \quad (37)$$

式中, $\bar{P}_e(\boldsymbol{g})$ 为辐射面有效值声压分布估计. f_u, f_1 分别为分析频带的上、下限. 对指定频带 f_u, f_1 内的声场进行频程能量叠加, 就可以获得所需分析频带内的有效声压值的分布.

3. 模拟实验验证

为对算法的有效性进行验证, 设计模拟实验如下: 设计虚拟传声器 17 个, 沿 x 和 y 方向各布置 8 个传声器, 在十字中心布置一个传声器, 传声器均布, 间距 0.25 m. 声源在距离传声器阵列平面 2.1 m 的平面内以 $v = 30$ m/s (108 km/h) 的速度沿 x 方向作匀速直线运动. 重建声源面前 0.1 m 位置处的空间声场.

首先设计单频单声源验证实验, 设一个 1000 Hz 的单频声, 声源特征函数 $\psi(t) = 0.1 \cos 2\pi ft$ (N/m), 在 t 时刻, 设计声源在 xy 方向的空间位置为 (1, 1). 图 3(a), (b) 所示为该声源在指定重建位置处没有多普勒效应的真实声场分布, 声源中心幅值为 1.0 Pa.

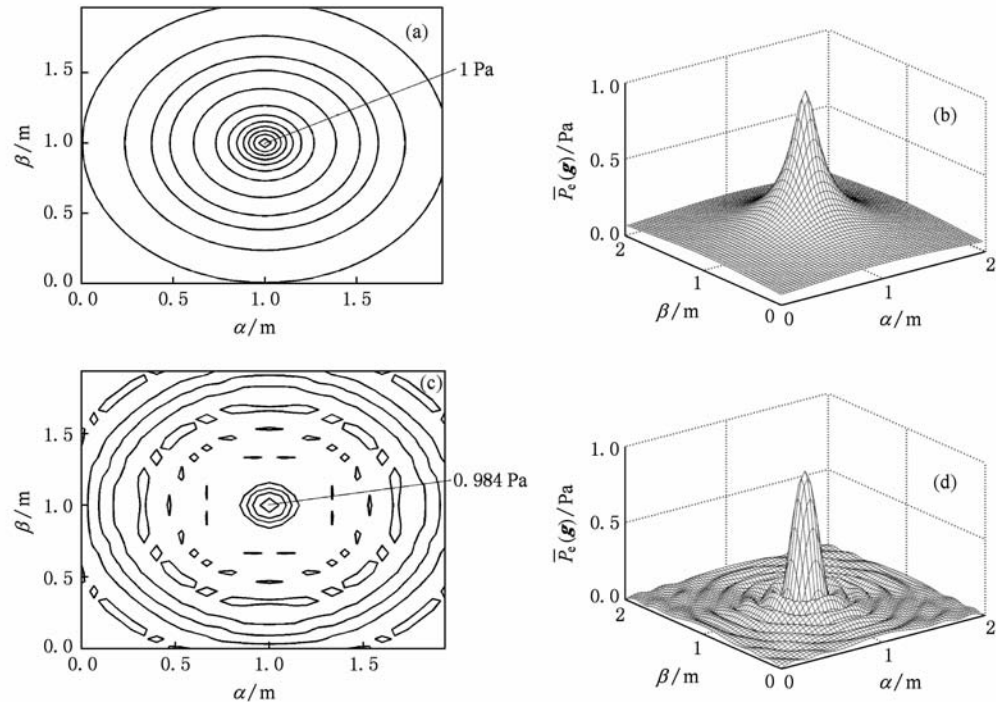


图 3 单频单声源情况模拟计算结果 (a) 真实值等值线图, (b) 真实值三维声貌, (c) 估计值等值线图, (d) 估计值三维声貌

利用运动声全息方法所重建的辐射面的有效值声压分布估计的模拟计算结果如图 3(c), (d) 所示. 从图中可以看出, 重建结果与真实值有非常相似的声压分布规律, 辐射面有效值声压分布估计的峰值仍然位于(1,1)处, 其峰值声压为 0.984 Pa, 与声源在该处产生的真实值 1 Pa 相比, 误差为 1.6%.

模拟实验说明, 本方法在分析单频运动声源时是有效的. 为进一步对本方法在分析多频运动声源

的有效性进行验证, 设计一个由 3 个不同频率的简谐声叠加的运动声源 (其中 $f_1 = 1000\text{ Hz}$, $f_2 = 950\text{ Hz}$, $f_3 = 1050\text{ Hz}$), 设计其声源特征函数为 $\psi(t) = 0.1\cos2\pi f_1 t + 0.1\cos2\pi f_2 t + 0.1\cos2\pi f_3 t$, 单位为 N/m , 在 t 时刻, 设计声源在 xy 方向的空间位置为 (1, 1). 图 4(a), (b) 所示为该声源在指定重建位置处没有多普勒效应的真实声场分布, 声源中心幅值为 1.75 Pa.

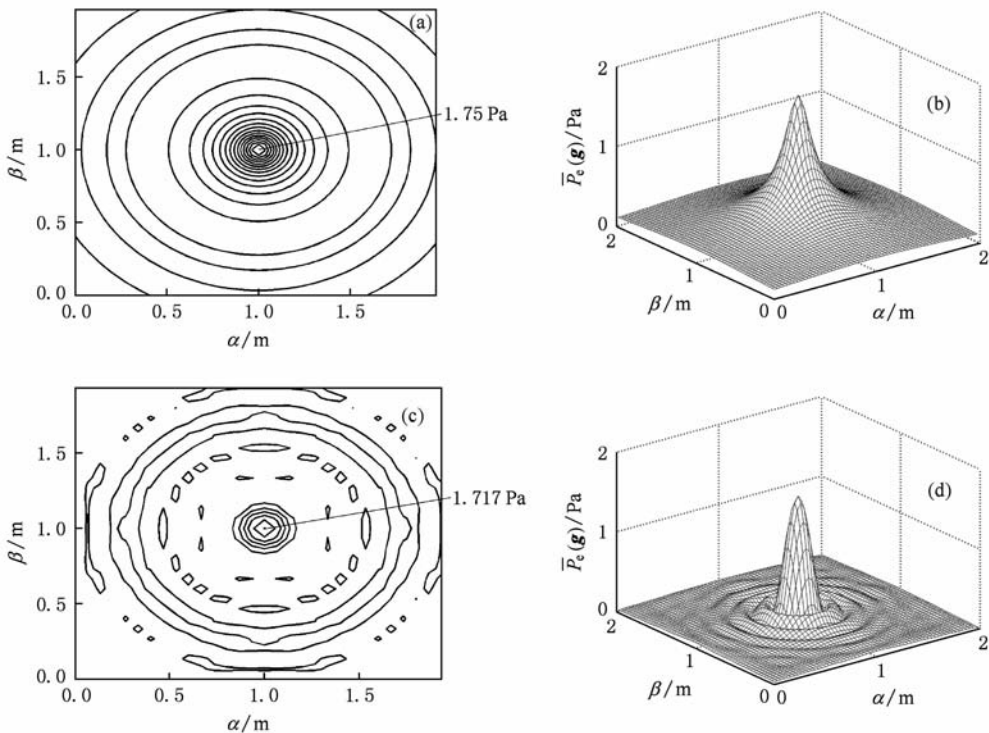


图 4 多频叠加声源情况模拟计算结果 (a) 真实值等值线图, (b) 真实值三维声貌, (c) 估计值等值线图, (d) 估计值三维声貌

利用运动声全息方法对该声源 930—1070 Hz 频段的辐射声场进行重建, 模拟计算结果如图 4(c), (d) 所示. 从图中可以看出, 重建结果与真实值有非常相似的声压分布规律, 辐射面有效值声压分布估计的峰值仍然位于(1,1)处, 其峰值声压为 1.717 Pa, 与声源在该处产生的真实声压值 1.75 Pa 相比, 误差为 1.9%.

从模拟实验结果可以看出, 本方法在分析多频叠加的运动声源时, 所重建的声源位置和大小比较准确, 与单频声源的仿真结果精度相当. 说明本方法可以用于多频声源的定量分析.

为更好地仿真实际汽车的噪声状态, 还设计了多声源模拟实验. 设计三声源 g_1, g_2 和 g_3 在 t 时刻

的局部坐标分别为 (0.5, 0.5), (1, 1.6) 和 (1.6, 1). 声源 g_1 的声源特征函数为 $\psi_1(t) = 0.07\cos2\pi ft$ (N/m), 其中 $f = 1000\text{ Hz}$. 声源 g_2 和 g_3 的声源特征函数相同且为 $\psi_0(t) = 0.1\cos2\pi ft$ (N/m). 辐射面有效值声压分布估计的模拟计算结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 利用本方法所重建的有效值声场分布估计的三个主峰值分别位于 (0.5, 0.5), (1, 1.6) 和 (1.6, 1) 处, 声源分布与真实声场比较相似, 三个峰值声压分别为 0.68, 1.005 和 1.005 Pa, 与真实值 0.697, 1.029 和 1.029 Pa 比较, 其误差分别为 2.4%, 2.3% 和 2.3%.

从模拟仿真计算结果可以看出, 运动声源声全息重建方法可以比较准确地重建出高速运动状态

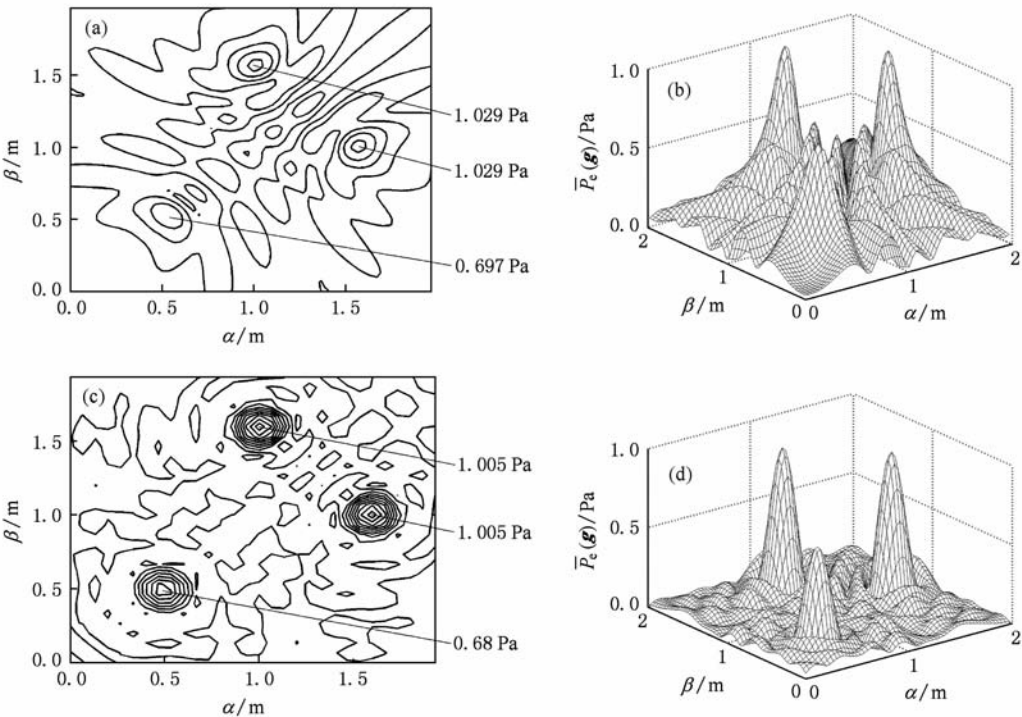


图5 多声源情况模拟计算结果 (a)真实值等值线图,(b)真实值三维声貌,(c)估计值等值线图,(d)估计值三维声貌

声源具有不同频率成分时的声场,所重建的声源位置以及声源大小均比较准确,证明了本方法在理论上的正确性.

4. 实车实验验证

为对基于声源特征函数的运动声源声场全息

重建方法进行实际验证,在汽车专用实验场高速跑道上进行了验证实验,设计了一套实验系统如图6所示.实验时,汽车以匀速从16路十字传声器阵列和激光测速定位仪前通过,测试系统测量并记录下汽车通过时的噪声信号与激光测速定位信号.测量传声器沿水平方向(x 方向)布置了9个,沿垂直方向(y 方向)布置了8个(中央位置1个与 x 方向共

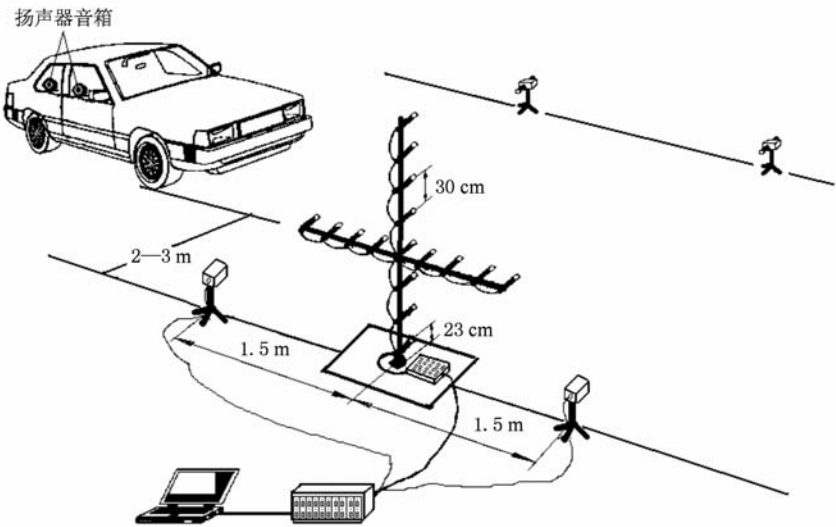


图6 实验测试过程示意图

用),传声器间隔为 0.3 m,垂直方向最低端的传声器距地面 0.23 m,激光测速定位装置距离传声器中心 1.5 m.

首先进行了已知声源的实车验证实验.实验车辆载着两个已知声源以不同车速从十字传声器阵列和激光测速定位装置前匀速通过,通过测试分析系统处理,识别出已知声源在车上的位置和声压级大小,并与已知声源在车上的真实位置和表面声压级大小进行对比.

实验车辆为一轿车,车载已知声源为两音箱,分别固定在车前后车窗位置,如图 7 所示,音箱动坐标位置为(2.1,1.25)和(2.85,1.15).实验时通过信号发生器同时给两音箱提供频率为 1200 Hz 的单

频信号,贴近前音箱表面声压为 107 dB,贴近后音箱表面声压为 109 dB.实验时汽车分别以 64,124 km/h 两种车速通过,车辆通过传声器阵列时距离阵列的距离分别是 2.57,2.96 m.

如图 8 所示为车表面的重建声场.从结果可知,汽车表面存在两个明显的声源部位,分别位于前后车窗附近,当车速为 64 km/h 时,重建声源的峰值分别位于(2.15,1.2)和(2.8,1.1),所重建出的车前部声源表面声压值为 106.2 dB,偏后位置声源表面声压值为 108.5 dB,其大小与真实的音箱表面声压大小 107 和 109 dB 相比,误差分别为 0.8 和 0.5 dB.

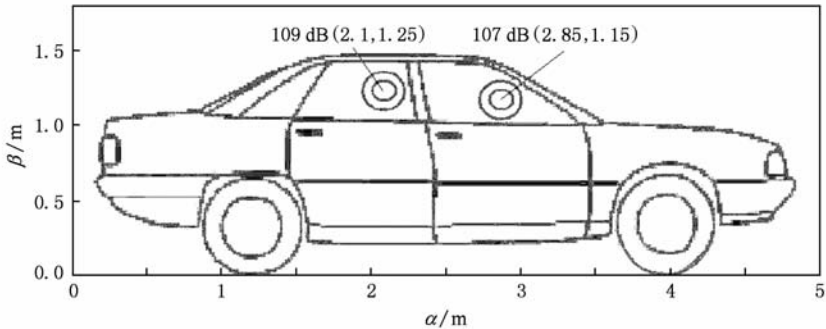


图 7 音箱在汽车上的位置

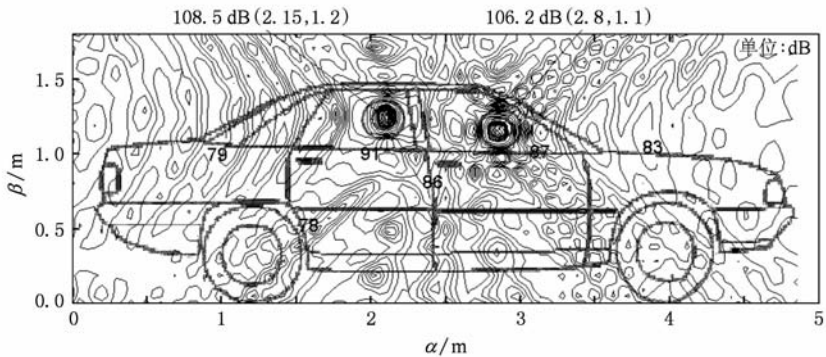


图 8 汽车表面声压分布实验结果 车速为 64 km/h,分析带宽为 1180—1220 Hz

图 9 为车速为 124 km/h 的实验重建结果,重建的声源位置分别位于(2.1,1.2)和(2.8,1.1),与实际音箱位置仍然符合很好.计算结果也表明,前声源表面声压值为 106.5 dB,后声源表面声压值为 110 dB,误差分别为 0.5 和 1 dB,与音箱声压真实值相比其误差仍不超过 1 dB.

综合不同车速的实验结果可以看到,在不同速度下,实验分析声源中心与真实声源中心的最大误

差在 15 cm 之内.在不同速度下,声压幅值误差没有超过 1%.说明本算法能够比较准确地对实际的运动声源进行识别并进行表面声压幅值定量分析.

利用本实验系统对一辆实验车的实际车外噪声进行了测量,图 10 所示为该车以五档(117 km/h)的速度匀速行驶时,传声器测量声压信号的典型频谱.从频谱发现,该车噪声频率在 2 kHz 以内分布较宽,其中在 110—130 Hz,270—310 Hz,480—520

Hz, 900—950 Hz 和 990—1050 Hz 等频带内存在明显峰值, 能量比较集中.

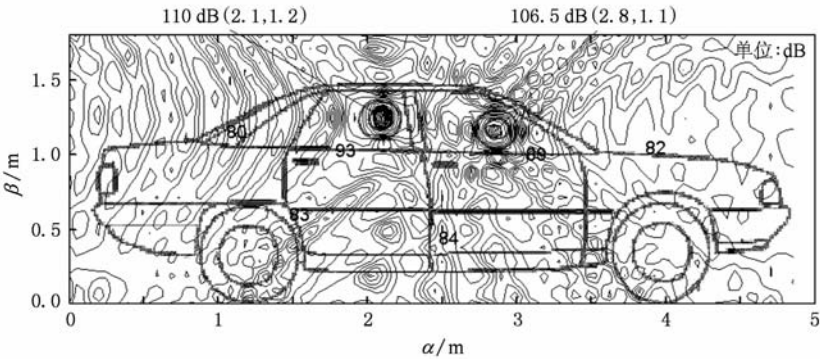


图 9 汽车表面声压分布实验结果 车速为 124 km/h, 分析带宽为 1180—1220 Hz

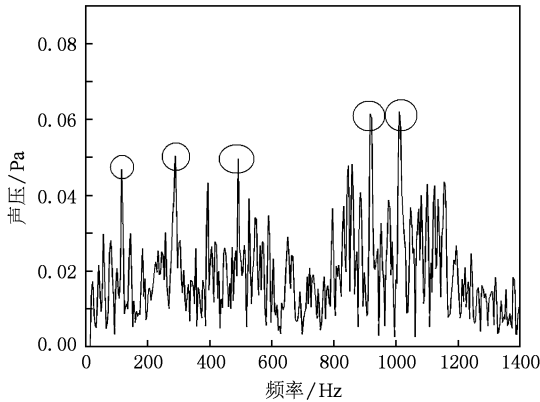


图 10 汽车行驶噪声测量信号频谱 车速为 117 km/h

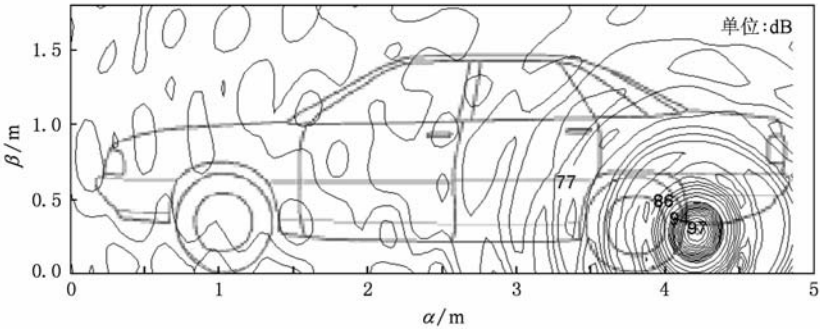


图 11 汽车表面声压分布实验结果 车速为 117 km/h, 分析带宽为 270—310 Hz

5. 结 论

针对运动声源声场快速定量测量问题, 基于运动声源的测量面、辐射面和全息面的运动学几何关系, 基于运动声源的声源特征函数, 建立了声源与测量信号之间的非线性时间映射, 构造了消除多普勒效应的全息面时域声压分布, 全息重建得到了运

动声源表面有效声压分布, 从而实现了主要声源处声压幅值的定量估计. 模拟仿真实验以及车载声源实验表明本方法可以比较准确地重建出高速运动声源的位置和声压大小, 同时证明了在不同运动速度下, 针对具有不同频率成分的单、多声源均具有较好的识别效果, 证明了本方法的正确性和有效性. 进一步的实际车辆噪声测量实验表明本方法可以有效应用于汽车等复杂运动机械的车外噪声测

量识别,为该方法的实际工程应用提供了依据.

[1] King III W F 1977 *J. Sound Vib.* **54** 361

[2] King III W F, Bechert D 1979 *J. Sound . Vib.* **66** 311

[3] Barsikow B 1996 *J. Sound. Vib.* **193** 283

[4] Torii A, Takano Y 1992 *Proceedings of Inter-Noise* 1992 1171

[5] Sakamoto I, Tanaka T 1993 *Proceedings of SAE* No. 930199

[6] Kwon H S, Kim Y H 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 1734

[7] Park S H, Kim Y H 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 2326

[8] Bi C X, Chen J, Chen X Z, Li W B, Yu F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1253 (in Chinese) [毕传兴、陈 剑、陈心昭、李卫兵、于 飞 2005 物理学报 **54** 1253]

[9] Bi C X, Chen J, Chen X Z, Li W B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1264 (in Chinese) [毕传兴、陈 剑、陈心昭、李卫兵 2006 物理学报 **55** 1264]

[10] Jiang W K, Wan Q, Zhang H B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 313 (in Chinese) [蒋伟康、万 泉、张海滨 2008 物理学报 **57** 313]

[11] Zhang H B, Wan Q, Jiang W K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 333 (in Chinese) [张海滨、万 泉、蒋伟康 2009 物理学报 **58** 333]

[12] Yang D G, Zheng S F, Li Y K, Lian X M, Jiang X Y 2001 *Acta Acustica* **26** 56 (in Chinese) [杨殿阁、郑四发、李俞康、连小珉、蒋孝煜 2001 声学学报 **26** 56]

[13] Yang D G, Zheng S F, Luo Y G, Lian X M, Jiang X Y 2002 *Acta Acustica* **27** 357 (in Chinese) [杨殿阁、郑四发、罗禹贡、连小珉、蒋孝煜 2002 声学学报 **27** 357]

[14] Yang D G, Liu F, Zheng S F, Lian X M, Jiang X Y 2001 *Automotive. Eng.* **23** 329 (in Chinese) [杨殿阁、刘 峰、郑四发、连小珉、蒋孝煜 2001 汽车工程 **23** 329]

[15] Maynard J D, Williams E G, Lee Y 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **75** 1395

Acoustic holography method for measuring moving sound source with correction for Doppler effect in time-domain^{*}

Yang Dian-Ge Luo Yu-Gong Li Bing Li Ke-Qiang Lian Xiao-Min[†]
(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Department of Automotive Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(Received 29 September 2009; revised manuscript received 10 November 2009)

Abstract

The conventional acoustic holography method is not suitable for the measurement of the moving sound source, because the Doppler effect exists in the sound signal, and the beam-forming approach is unable to make quantitative analysis. The approach proposed in this paper establishes the time-space relation between the measurement field, the radiating field and the acoustic holography field, and puts forward a method of nonlinear time-mapping between the sound source and the measured signal. Based on the acoustic source eigen-function, the acoustic pressure distribution of the acoustic holography field in the time domain is obtained, in which the Doppler effect is eliminated. The sound field of the surface of the moving sound source is reconstructed by acoustic holography method, and the quantitative analysis of the major sound source is realized. This method has been used in the experiment of measuring the moving sound sources, and satisfactory results proved the effectiveness of the method.

Keywords: acoustic holography, moving sound source, Doppler effect, identification of sound source
PACC: 4360, 4363, 4385

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50605038).
[†] Corresponding author. E-mail: lianxm@mail. tsinghua. edu. cn