

运动声源识别的动态波叠加方法研究*

杨殿阁[†] 李兵 王子腾 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)

(2011年2月15日收到; 2011年5月16日收到修改稿)

为更好地识别运动声源并解决声源识别中的虚假声源问题, 基于运动声源短时信号的 Doppler 频移特性, 建立运动声场的短时波叠加关系, 利用波束形成方法对声源点进行预估, 基于预估建立起多运动声源动态叠加方程, 进一步通过波叠加方程的求解进行声源的计算, 从而创建一种可以用于运动声源识别的动态波叠加方法. 该方法可以有效识别运动声源, 将波叠加方法扩展到了运动声源测量领域, 并在不增加传声器数量以及改变阵列形式的条件下有效抑制运动声源重建中的旁瓣效应, 解决运动声源识别中的虚假声源问题. 仿真及实际运动声源的测量试验结果证明了该方法的有效性.

关键词: 波叠加, 运动声源, Doppler 效应, 波束形成

PACS: 43.50.Yw, 43.60.Fg, 43.60.Pt

1 引言

运动声源的准确测量和识别是进一步进行噪声控制和治理的依据, 是声学领域一直非常关注的一个难题, 几十年来国内外的科学家一直在探索更好的运动声源识别测量理论及方法.

从 20 世纪 70 年代开始, King^[1] 和 Barsikow 等^[2] 开始研究利用阵列信号处理技术进行列车噪声的测量, 并提出了基于时间延迟的波束形成方法. 随后的几十年间, Takano 等^[3] 和 Kook 等^[4] 在阵列信号的计算方法以及阵列形式上进行了发展, 提出了随机阵列等新的阵列形式, 并将其应用于汽车运动噪声的测量识别. 为了进一步提高波束形成方法的分辨率并提高其识别瞬态声音的能力, Heilmann 和 Dirk^[5], Yang 等^[6] 发明了短时波束形成方法, 并将其用于汽车动态声音的测量和可视化. 波束形成方法计算效率高, 声源识别稳定, 几十年来一直得到应用和发展, 但该方法不能进行定量测量, 同时声源分辨率较低, 旁瓣效应明显, 会导致虚假声源现象.

为实现运动声源的定量分析测量, Williams 和 Maynard 等建立了近场声全息理论并将其推广

到了远场应用^[7,8], 为声全息的发展奠定了基础. 20 世纪 90 年代, Sakamoto 和 Tanaka^[9] 首先将远场声全息应用于运动汽车噪声的测量, 并成功实现了轮胎运动噪声的识别. 为提高声全息识别运动声源的准确性和计算效率, Kim 等^[10,11] 发明了移动框架全息, 有效实现了频域 Doppler 效应的消除, 并实现运动声源的准确识别测量. 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. 上海交通大学的万泉和蒋伟康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^[12], 但目前还没有进一步应用到运动声源声场的测量分析. 清华大学的连小珉等从 21 世纪初开始研究利用声全息测量运动声源声场, 发明了基于时域多普勒效应消除的运动声源声全息方法, 利用计算机视觉实现了声源的可视化, 可以有效实现运动汽车噪声的可视化定量测量^[13-15]. 声全息方法有效解决了运动声源测量中的定量问题, 但声场重建中的旁瓣效应以及虚假声源仍然存在, 特别是 Doppler 效应的存在会进一步增强旁瓣效应.

通过增加测量传声器的数目, 增大阵列孔径或者采用随机阵列等可以抑制声源识别中的旁瓣效

* 国家自然科学基金 (批准号: 50605038) 资助的课题.

[†] E-mail: ydg@mail.tsinghua.edu.cn

[‡] E-mail: lianxm@tsinghua.edu.cn

应^[16], 但这样无疑会增加测量设备的成本和测量工作的难度. 为在不增加测量设备的条件下通过算法本身的改进实现更加准确的声源识别并改善声源识别中的旁瓣效应和虚假声源问题, 探索新的声源重建算法是非常有意义的.

为实现更加准确的声源识别, Bai^[17], Saijyou 和 Uchida^[18] 提出了边界元全息方法, 有效提高了声源识别的准确性, 但边界元法存在难以克服的奇异积分及非唯一解等难题. 为解决这一问题, 在 Koopmann 等^[19] 提出的波叠加方法的基础上, 合肥工业大学的陈剑等提出了基于波叠加法的近场声场全息技术, 可用于任意形状物体的声辐射分析^[20], 上海交通大学的蒋伟康等提出了针对循环平稳声场进行测量分析的波叠加全息技术^[21], 陈进等对波叠加声场重构精度的影响因素进行了分析^[22]. 毕传兴等提出了联合波叠加法, 将其应用于相干声场的全息重建与预测, 并在此基础上进一步发展了基于波叠加法的 Patch 全息方法和研究利用波叠加法实现对全息面声压插值, 提高全息分辨率和声源的识别效果及效率, 在传声器测点数目没有明显增加的情况下, 声场重建中的旁瓣效应和虚拟声源得到了明显的抑制, 取得了较好的声源识别效果^[23]. 但是目前这些波叠加全息方法针对的都是静止声源的声场, 运动声源及其 Doppler 效应的存在使这些针对静态声源的波叠加方法不能直接用于运动声源声场的测量分析.

本文基于运动声源短时信号的线性 Doppler 频移特性, 建立运动声场的短时波叠加关系, 利用波束形成方法对声源面内的声源点进行预估, 基于预估建立起多运动声源的源强与接收点声压的动态叠加方程, 进一步通过波叠加方程的求解进行声源强度的估计, 从而建立一种可以用于运动声源识别的动态波叠加方法, 将波叠加方法从静态声源领域拓展到了运动声源的识别中. 该方法可以在不增加传声器数量以及改变阵列形式的条件下有效抑制运动声源重建中的旁瓣效应, 改善声源的识别效果, 解决运动声源识别中的虚假声源问题, 是一种有效的运动声源声场测量和声源识别方法.

2 运动声源声场的短时波叠加方程

2.1 短时信号的线性多普勒频移

在运动声源的声场测量中, 由于传声器与声源具有相对运动, 测量得到的声压信号中存在 Doppler 频移效应. 如图 1 所示, s 为声源, 以

速度 u 作匀速直线运动, m 为传声器, 当前时刻距声源距离为 $r(t)$, 声源运动方向与声波到传声器的传播方向夹角为 $\theta(t)$, 距离与角度均随时间变化.

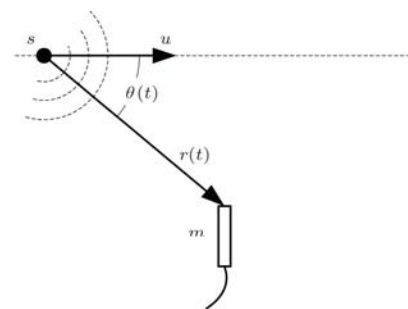


图 1 固定传声器接收运动声源声音示意图

设声源的频率为 f , 设声源频域强度为 $Q(f)$ 当声源速度 $u = 0$, 声源静止时, 则传声器测得的声压可按下式计算:

$$P(f) = Q(f) \cdot g_r(f), \quad (1)$$

式中 $g_r(f)$ 为自由声场中的 Green 函数:

$$g_r(f) = \frac{\exp(-jk_f r)}{4\pi r}, \quad (2)$$

其中 j 为虚数单位, $k_f = 2\pi f/c$ 为波数.

当 u 不为零时, 说明声源与传声器之间存在相对运动, 则所测得的信号中有 Doppler 频移, Doppler 频移可以表示为

$$f' = f + \Delta f = f \cdot [1 + M_a \cos \theta(t)], \quad (3)$$

式中, f' 为 t 时刻所测得信号的频率, M_a 为 Mach 数, $M_a = u/c$, c 为声速. 由于传声器的传播方向夹角随时间发生变化, 所以对 $[t_1, t_2]$ 时间段内的信号, 所测信号的频率变化范围为 $f \cdot [1 + M_a \cos \theta(t_1)]$ 到 $f \cdot [1 + M_a \cos \theta(t_2)]$. 对于一般运动声源分析信号段而言, 声源运动所带来的 Doppler 效应不仅表现为频率的偏移, 更表现出了频率的扩散, 信号的频谱是以一个带宽的信号形式存在. 为解决频率扩散, 进行信号的分析, 将信号截断为短时信号, 进行频率的分析可以发现这样的短时信号的频率扩散不明显, 频率表现为线性平移特性, 频率有峰值存在. 设信号的分析时段为 $[t'_1, t'_2]$, 则该段信号的峰值偏移频率 \bar{f} 可按下式计算:

$$\bar{f} = f \cdot [1 + M_a \cos \bar{\theta}(t'_1, t'_2)], \quad (4)$$

式中, $\bar{\theta}(t'_1, t'_2)$ 为时段 $[t'_1, t'_2]$ 过程的均值. 因此针对短时 Doppler 信号, 根据 (1) 式, 在存在相对运动的条件下传声器测得的声压可以表示为

$$P(\bar{f}) = P\left[f(1 + M_a \cos \bar{\theta}(t'_1, t'_2))\right]$$

$$= Q \left[f(1 + M_a \cos \bar{\theta}(t'_1, t'_2)) \right] \times g_{\bar{r}} \left[f(1 + M_a \cos \bar{\theta}(t'_1, t'_2)) \right]. \quad (5)$$

(5) 式以积分形式表达:

$$P(\bar{f}) = \int_f Q(f) \cdot g_{\bar{r}}(f) \cdot T_{\bar{\theta}}(f, \bar{f}) df, \quad (6)$$

式中 $T_{\bar{\theta}}(f, \bar{f})$ 为频移函数.

$$T_{\bar{\theta}}(f, \bar{f}) = \delta \left[\bar{f} - f(1 + M_a \cos \bar{\theta}(t)) \right], \quad (7)$$

$\delta(\bullet)$ 为 Dirac 函数. 通过 (6) 和 (7) 式就可以得到短时信号的线性 Doppler 频移. 根据频移分析, 进一步建立起多个运动点声源的频域声源强度到接收点声压频谱的叠加关系, 就可以建立短时运动波叠加方程.

2.2 短时运动波叠加方程

当空间存在 n 个声源时, 对于静止声源可以直接通过波叠加得到接收点的声压:

$$P(f) = \sum_{i=1}^n Q_i(f) \cdot g_{r_i}(f). \quad (8)$$

因此, 对于 n 个运动声源, 对 (6) 式得到的各个声源产生的声压分量进行矢量叠加, 就得到接收点的声压:

$$P(\bar{f}) = \int_f \sum_{i=1}^n Q_i(f) \cdot g_{\bar{r}_i}(f) \cdot T_{\bar{\theta}_i}(f, \bar{f}) df, \quad (9)$$

(9) 式中, 除了需要进行 Doppler 频移外, 由于不同声源的角度 $\bar{\theta}_n$ 值不同, 其频移量也不同, 结果仅对单一频率点 \bar{f} 的计算中, 各声源的不同频率都可能产生影响, 也就是说不同频率成分间发生了耦合.

(9) 式为理想状态下的连续频谱的短时波叠加关系, 为了实现数值计算, 还需要对此进行离散化. 首先, 需将源强频谱与接收点声压频谱离散化, 对于声源频率 f 与接收点 Doppler 频率 \bar{f} 的离散化, 可以分别离散, 为了计算和说明的方

便, 取统一的离散化范围与间隔, 则二者都离散化为 $(f_1, f_2, \dots, f_K)^T$, 则第 n 个声源的源强谱向量为

$$Q_n = [Q_n(f_1), Q_n(f_2), \dots, Q_n(f_K)]^T; \quad (10)$$

第 m 个传声器的声压谱向量为

$$P_m = [P_m(f_1), P_m(f_2), \dots, P_m(f_K)]^T. \quad (11)$$

频移积分项 $T_{\bar{\theta}_n}(f, \bar{f}) df$ 则离散化近似为频移矩阵 T_{mn} , 其第 k_1 行 k_2 列的元素取值为

$$T_{mn}(k_1, k_2) = \begin{cases} 1 & -\Delta f/2 < f_{k_2} - f_{k_1} \\ & \times (1 + M_a \cos \theta_{mn}) \leq \Delta f/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

即对于 k_1 行, 取频率最接近 $f_{k_1}(1 + M_a \cos \theta_{mn})$ 的元素值为 1, 其他为零. Green 函数项 $g_{mn}(f)$ 离散化为 Green 函数阵:

$$G_{mn} = \text{diag}[g_{mn}(f_1), g_{mn}(f_2), \dots, g_{mn}(f_K)], \quad (13)$$

式中 $\text{diag}(\bullet)$ 为由各对角线元素表示的对角阵, 第 k 个对角线元素为

$$g_{mn}(f_k) = \frac{\exp(-j2\pi f_k r_{mn}/c)}{4\pi r_{mn}}. \quad (14)$$

综合上述各式, 就可以得到第 m 个传声器的声压为

$$P_m = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Q_n \cdot G_{mn} \cdot T_{mn}. \quad (15)$$

将所有 M 个传声器的声压谱计算式合并, 并改写为矩阵形式, 就最终得到了离散化的运动波叠加方程:

$$P = H \cdot Q, \quad (16)$$

其中 P 为各传声器各频率的短时声压值向量, 长度为 $M \times K$:

$$P = \begin{bmatrix} P_1(f_1), P_1(f_2), \dots, P_1(f_K), P_2(f_1), P_2(f_2), \dots, P_2(f_K), \dots, \\ P_M(f_1), P_M(f_2), \dots, P_M(f_K). \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

Q 为各点声源各频率的短时源强值向量, 长度为 $N \times K$:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1(f_1), Q_1(f_2), \dots, Q_1(f_K), Q_2(f_1), Q_2(f_2), \dots, Q_2(f_K), \dots, \\ Q_N(f_1), Q_N(f_2), \dots, Q_N(f_K). \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

H 为有 $M \times K$ 行 $N \times K$ 列的传递函数矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} G_{11}T_{11} & G_{12}T_{12} & \cdots \\ G_{21}T_{21} & G_{22}T_{22} & \\ & & \ddots \\ \cdots & & G_{MN}T_{MN} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

从 (10) 到 (19) 式中看到 Green 函数阵 G_{mn} 为对角阵, 即各频率是独立的, 但由于频移矩阵 T_{mn} 的作用, 使得相乘后的传递函数为频率耦合的. 若关心频段为 $[f_L, f_H]$ 的声压分布情况, 则频率在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内的声源都会对其发生影响.

$$f_{\min} = \min\{f_L(1 + M_a \cos \theta_{mn}) | m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\}, \quad (20)$$

$$f_{\max} = \max\{f_H(1 + M_a \cos \theta_{mn}) | m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\}, \quad (21)$$

则据此可以取定计算频带范围, 可以看到应用短时运动波叠加方法进行分析时, 取定的分析频宽要大于信号原始频带的宽度.

根据 (16) 式建立的离散频谱的短时波叠加关系, 在已知声源位置和强度时, 就可以计算出任意位置的频域声压. 若已知声源位置和接收点声压时, 则在传声器的数目大于独立声源数量的情况下就可以通过解波叠加方程组反求声源的强度.

3 基于波叠加方程的运动声源声场重建

3.1 基于波束形成的声源预估

首先对声源面中主要声源点的可能位置基于波束形成方法进行预估. 将声源面中各点都假定为声源, 通过对各点的声源强度的预估, 从中选取强度较大的一些位置作为主要声源, 为进一步通过波叠加方程组反解这些声源提供依据. 声源预估的结果会直接影响动态波叠加的最后识别结果, 预识别的位置越准, 动态波叠加的最终识别结果也越好.

首先要对声源面进行离散化, 将声源面的平面离散化为一系列网格点, 这些网格点即是声源点的备选位置. 如图 2 所示, 传声器所在空间为静止的大地坐标系, 随声源运动的是运动坐标系, 声源面 Θ 在运动坐标系内, 离散化为 $M_\Gamma \times N_\Gamma$ 个网格点声源 $\tilde{\Gamma}$:

$$\tilde{\Gamma} = \{\tilde{\Gamma}_{mn} | m = 1, 2, \dots, M_\Gamma, n = 1, 2, \dots, N_\Gamma\}, \quad (22)$$

其中第 m 行第 n 列的声源点 $\tilde{\Gamma}_{mn}$ 在运动坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{mn} \\ y_{mn} \\ z_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\Delta x \\ 0 \\ n\Delta z \end{bmatrix}, \quad (23)$$

Δx 与 Δz 分别为离散化和横向和纵向网格间距, 在任意时刻 t , (x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}) 所对应的大地坐标为 $[X_{mn}(t), Y_{mn}(t), Z_{mn}(t)]$, 因而其到传声器 m_i 的实时距离为

$$r_{imn}(t) = \sqrt{[X_{mn}(t) - \hat{X}_i]^2 + [Y_{mn}(t) - \hat{Y}_i]^2 + [Z_{mn}(t) - \hat{Z}_i]^2}, \quad (24)$$

其中, $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ 为传声器 m_i 的大地坐标.

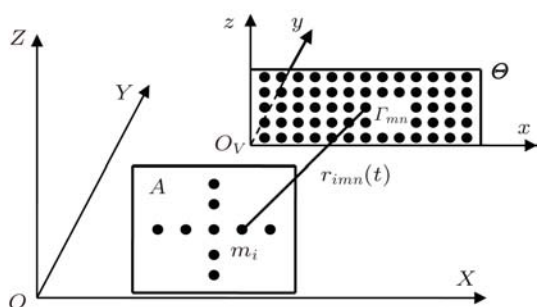


图 2 声源强度预估示意图

针对声源面中的任意点, 根据波束形成方法中的“延时-叠加”原理, 利用计算点到传声器的距离

和传声器采集的声压信号对该点的强度进行估计:

$$\tilde{q}_{mn}(t) = \sum_{i=1}^{N_M} w_i \cdot p_i \left[t + \frac{r_{imn}(t)}{c} \right] \cdot r_{imn}(t), \quad (25)$$

式中 $\tilde{q}_{mn}(t)$ 为声源点 $\tilde{\Gamma}_{mn}$ 的估计时域源强, $p_i(t)$ 为传声器 m_i 采集的时域声压信号, N_M 为阵列中的传声器个数, w_i 为叠加权重系数, 取 $w_i = 1/N_M$. 得到时域估计源强后, 可以通过快速 Fourier 变换得出在分析时段 $[t_S, t_E]$ 内的频域源强估计值:

$$\tilde{Q}_{mn}(f) = \text{FFT}_{t \in [t_S, t_E]} [\tilde{q}_{mn}(t)], \quad (26)$$

进而可以得到在指定分析频段内的源强有效值:

$$|\tilde{Q}_{mn}| = \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} |\tilde{Q}_{mn}(f)|^2 df}. \quad (27)$$

至此就得到了指定分析时段和频段内的声源面的预估源强分布情况,图3所示为声源面预估声源强度三维声貌图.

如图3黑色标记点所示,将声源面预估声源强度分布中的较大极值点选取出来,作为预估声源点.预估声源点的识别条件为该点估计源强幅值在相邻点中最大,如下式所示:

$$|\tilde{Q}_{\bar{m}\bar{n}}| = \max\{|\tilde{Q}_{mn}| | \bar{m} - 1 \leq m \leq \bar{m} + 1, \bar{n} - 1 \leq n \leq \bar{n} + 1\}. \quad (28)$$

为保证(28)式在声源面边缘处有意义,在 $m = 0$ 或 $M_{\Gamma} + 1$, 或 $n = 0$ 或 $N_{\Gamma} + 1$ 时,令(28)式中 $|\tilde{Q}_{mn}|$ 的值取零.将满足上述条件的峰值点序号按估计源强幅值从大到小排列为: $(m_1, n_1), (m_2, n_2), \dots, (m_{\hat{N}}, n_{\hat{N}})$, 共 \hat{N} 个峰值点,取最大声源点数限值为 N_L 个,则令

$$N = \min\{\hat{N}, N_L\}, \quad (29)$$

式中最大声源点数限值 N_L 为事先设定的声源数限制,为保证在后续的波叠加计算中方程组有唯一解,要求 $N \leq M$, M 为传声器阵列中传声器的数目. N 个声源点位置对应的声源由 Γ 表示:

$$\Gamma = \{\Gamma_i | i = 1, 2, \dots, N\}. \quad (30)$$

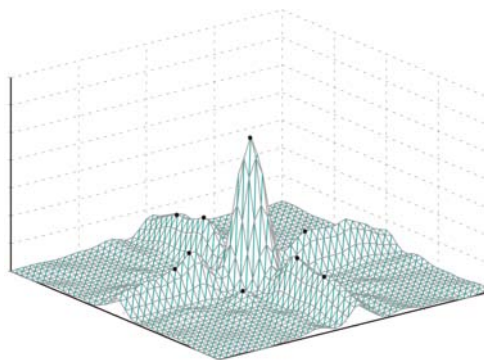


图3 声源面预估声源强度分布

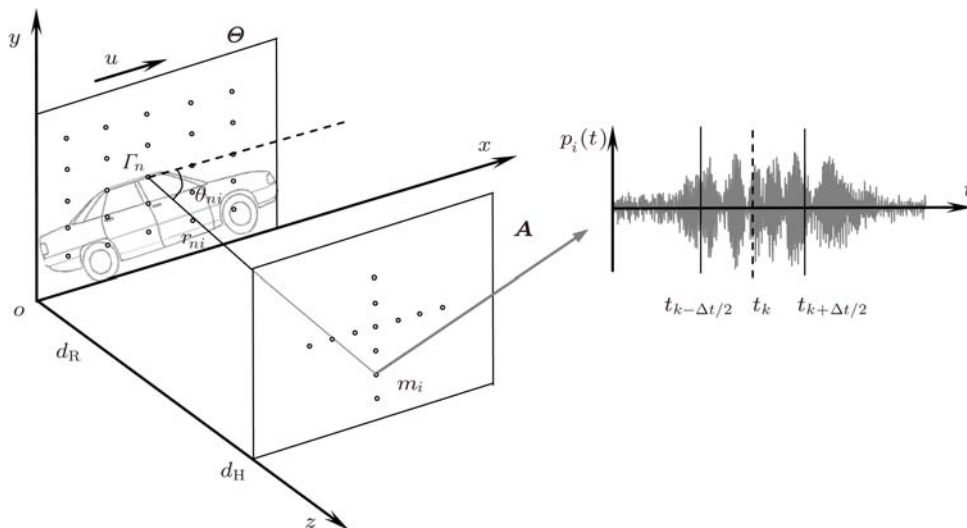


图4 运动声源声场重建分析示意图

3.2 基于波叠加方程的运动声源声场重建

基于声源预估结果和短时波叠加方程,就可以通过波叠加方程的求解进行声源强度的计算,重建运动声源声场.图4所示为运动声源声场重建分析示意图.声源面 Θ 位于平面 $z = 0$ 内,测量面 A 与其平行位于平面 $z = d$ 处, $z > 0$ 所确定的半空间

内为无声源自由声场,声源面 Θ 以速度 u 沿 x 轴匀速运动.

基于声源预估获得了 N 个预估声源点,测量面 A 内布置 M 个传声器测量声压,且保证 $M > N$.设 r_{ni} 为 t_k 时刻点预估声源 Γ_n 到传声器 m_i 间传播距离, θ_{ni} 为传播方向与运动方向夹角,则有:

$$r_{ni} = \frac{M_a(x_i - x_n) + \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (1 - M_a^2)((y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2)}}{1 - M_a^2}, \quad (31)$$

$$\cos \theta_{ni} = (x_i - x_n) / r_{ni}, \quad (32)$$

式中 (x_i, y_i, z_i) 为传声器 m_i 位置坐标, (x_n, y_n, z_n) 为声源 Γ_n 在 t_k 时刻的位置坐标, M_a 为 Mach 数.

传声器 m_i 测得的时域声压信号为 $p_i(t)$, 取一短长度 Δt , 将以 t_k 为中心时刻时长为 Δt 的一段声压信号进行 Fourier 变换, 得到短时接收频域声压:

$$P_i(\bar{f}) = \text{FFT}[p_i(t)|_{t_k} \\ -\Delta t/2 \leq t \leq t_k + \Delta t/2]. \quad (33)$$

针对目标频段 $[f_L, f_H]$, 按 (20) 和 (21) 式计算得出分析频段 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 并离散化, 从 (33) 式得到的声压频谱中取相应的离散化频率点就得到了 (16) 式中的 \mathbf{P} 值, 将 r_{ni} 与 θ_{ni} 代入 (12) 到 (19) 式得到 \mathbf{H} 值, 则得到了用于求解源强 \mathbf{Q} 的超定方程组. 为解决该超定方程组求解过程中的不稳定性问题, 进行正则化处理, 正则化处理通过 SVD 分解滤除小奇异值的扰动影响, 提高求解的适应性, 正则化参数使用 GCV 方法进行选择, 计算公式如下:

$$V(\alpha) = \frac{\|(\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{P}\|}{\text{tr}[(\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha\mathbf{I})^{-1}]}, \quad (34)$$

式中 \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{H}^H 为传递函数矩阵 \mathbf{H} 的共轭转置矩阵, α 为正则化参数, $V(\alpha)$ 为其 GCV 值. 令

$$V(\tilde{\alpha}) = \min V(\alpha), \quad (35)$$

则得到最优正则化参数 $\tilde{\alpha}$, (16) 式的正则化解为

$$\tilde{\mathbf{Q}} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \tilde{\alpha}\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}. \quad (36)$$

重建面声压分布问题是通过声源面中各点声源的位置和强度, 计算重建面中各点的声压, 由于声源面与重建面保持相对静止关系, 通过正则化求解得到各声源点的强度后, 就可以按波叠加原理得到重建面内任意一点的声压值:

$$\tilde{P}(f) = \sum_n^N \frac{\exp(-jk_f r_n)}{4\pi r_n} \tilde{Q}_n(f), \quad (37)$$

式中 $\tilde{Q}_n(f)$ 为 Γ_n 的频域源强. 得到声压频谱, 就可以进一步得到有效声压值:

$$p_e = \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} |\tilde{P}(f)|^2 df}. \quad (38)$$

对于重建面内各点重复上述计算过程, 就得到了重建面的声压分布. 当所设置的重建面与声源面的距离很近时, 则可以将重建面的声压分布近似为运动物体的表面声场分布, 辅助判断运动物体上主要声源的位置.

表 1 三种不同重建方法重建结果的定量对比、旁瓣抑制比对比结果

算法	重建声压值精度		旁瓣抑制比/dB
	声源 1	声源 2	
波束形成	—	—	0.5
声全息	0.2%	0.4%	0.4
动态波叠加	1.7%	0.8%	6.8

4 模拟实验验证

为对算法的有效性及其对旁瓣和虚假声源的抑制效果进行验证, 设计仿真实验如下: 设计虚拟传声器 16 个, 沿 X 和 Y 方向各布置 8 个传声器, 传声器位置均布, 其在测量面内的位置如图 5(b) 所示, 在十字中心布置一个参考传声器, 用于后续分析比较. 声源在距离传声器阵列平面 2.0 m 的平面内以 $v = 30.0 \text{ m/s}$ (108.0 km/h) 的速度沿 X 方向做匀速直线运动. 设置两个 1000 Hz 的相干声

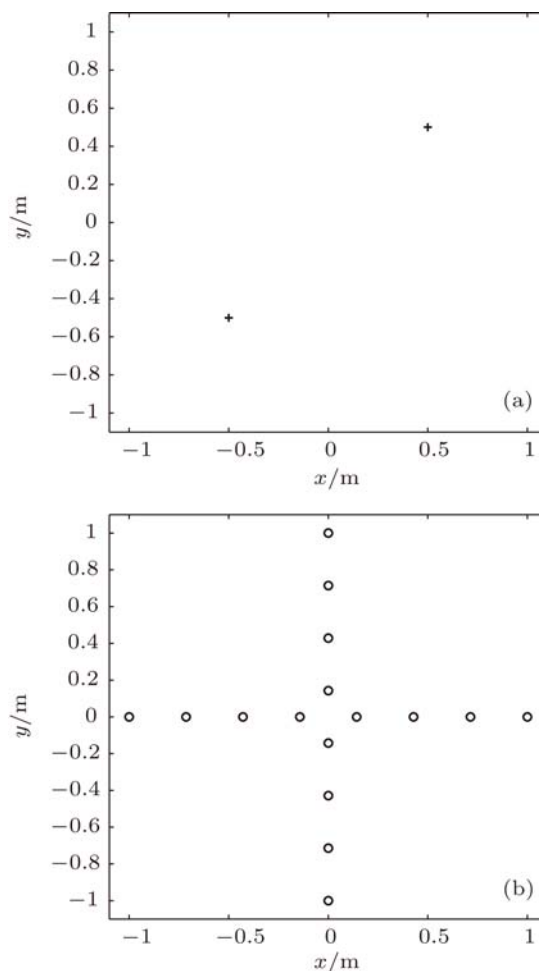


图 5 仿真计算条件 (a) 声源位置; (b) 传声器位置

源, 如图 5(a) 所示, 其在声源面上的位置坐标分别为 $(-0.5 \text{ m}, -0.5 \text{ m})$ 与 $(0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$. 重建声源

面前 0.1 m 距离空间的声场, 重建面高度和长度均取 4.0 m.

基于运动声源动态波叠加法的计算结果如图 6(c) 所示, 可以看到本方法可以有效识别出高速运动的声源, 声源识别位置比较准确. 图 6(a), 6(b) 所示为利用波束形成算法和全息算法得到的同一

位置的重建面声压, 可以看到这些方法所重建的声场在真实声源处确实分别得到两个声压峰值点, 但在重建结果中由于旁瓣效应出现了明显的虚假声源, 会影响真实声源的识别. 利用三种方法所重建的声源结果对比如表 1 所示.

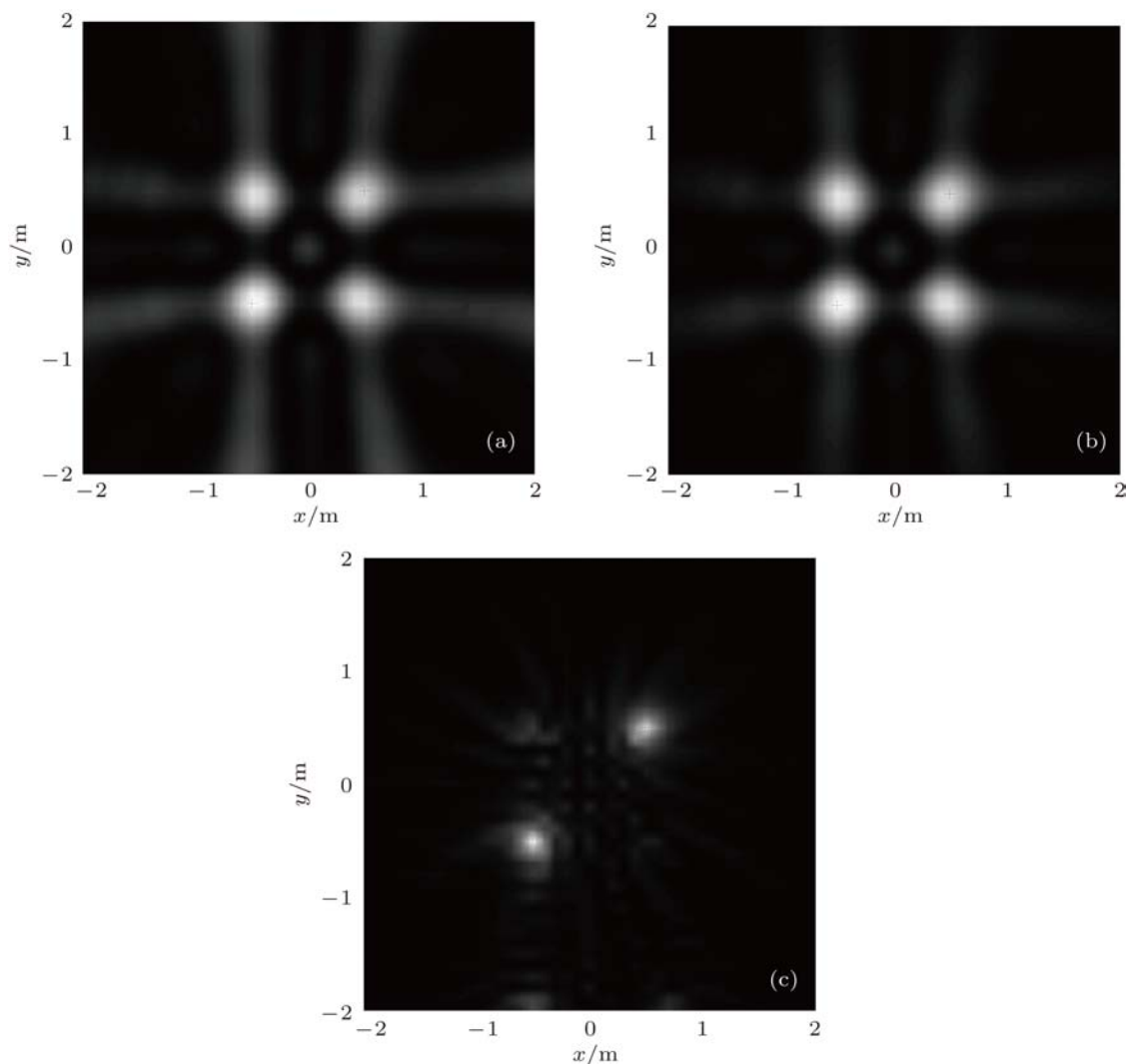


图 6 重建面声压计算结果 (a) 波束形成法; (b) 声全息法; (c) 动态波叠加法

从模拟仿真计算结果可以看出, 三种方法均能准确实现运动声源的定位, 其中全息和动态波叠加方法可以有效实现运动声源的定量测量, 而且重建的声源精度较高, 误差在 2% 之内. 但全息方法与波束形成方法的旁瓣效应比较明显, 旁瓣抑制比只有 0.5 和 0.4 dB, 有明显的虚假声源效应出现, 而动态波叠加方法中旁瓣抑制比达到了 6.8 dB, 旁瓣得到了明显的抑制, 虚假声源现象消失了. 实验结果表明在传声器阵列的形式及传声器数目均没有增加的情况下, 与波束形成方法和全息方法相比, 动

态波叠加方法在识别运动声源时的旁瓣效应和虚假声源现象得到了明显的改善.

5 实车实验验证

为对运动声源动态波叠加方法进行实际验证, 设计了实车试验. 实验中声源面、测量面及重建面的位置如示意图 7 所示. 其中声源面为汽车侧表面所在平面, 与水平地面垂直; 测量面为传声器所在平面, 固定于地面, 距声源面距离 $d_1 = 3.7$ m; 重建

面与声源面平行并随之运动,二者距离 $d_3 = 0.1\text{ m}$,重建面高度 $h = 3.1\text{ m}$,长度 $l = 3.9\text{ m}$. 试验时,汽车以 20 km/h 车速从 32 路十字传声器阵列前通过,传声器间隔从 $8\text{ cm}—16\text{ cm}$,利用两个高速摄像机组成双目视觉测量系统实现运动汽车的自动定位并实现与视频信号的匹配和融合.在车窗处安置两个已知的音箱发出 1000 Hz 的单频声,实验测量系统及音箱的安装图如图 8 和图 9 所示.

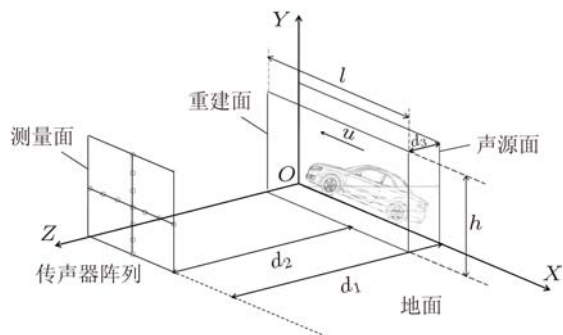


图 7 实车实验位置关系图



图 8 实车测量试验设备



图 9 试验车辆及音箱固定位置

利用测量系统对已知的运动音箱进行定位识别,分析目标频率取 $980—1020\text{ Hz}$. 图 10 所示为生

成的运动声源声场动态视频中的一帧图像.

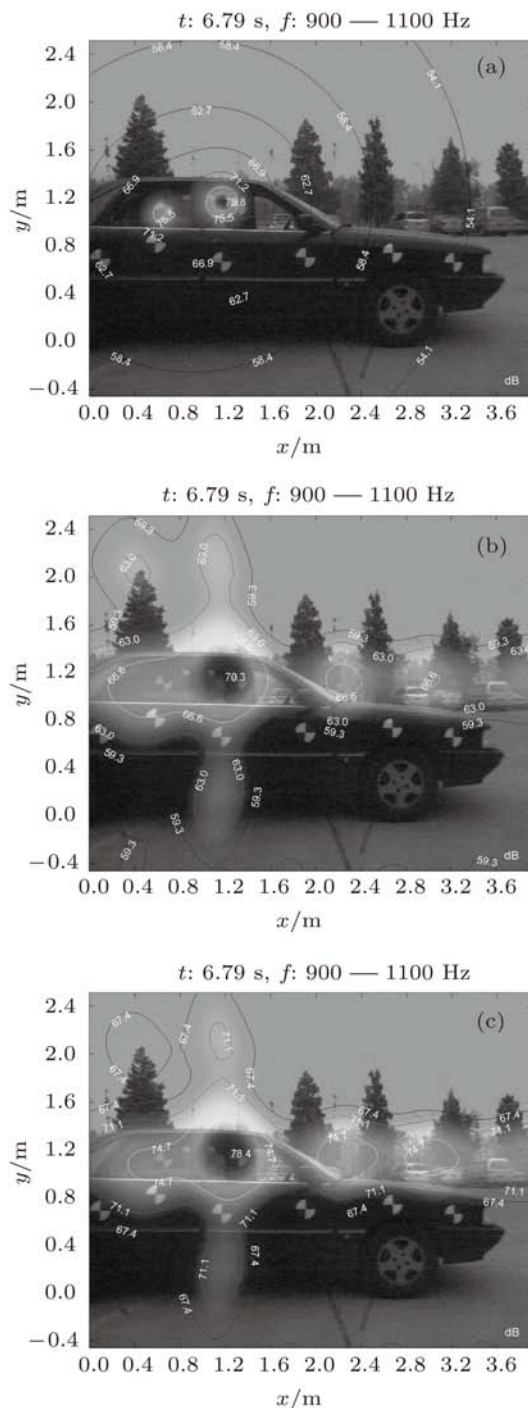


图 10 运动音箱识别结果图 (a) 动态波叠加法识别结果; (b) 波束形成法识别结果; (c) 声全息法识别结果

图 10(a) 为利用动态波叠加识别音箱的结果,图 10(b) 和 (c) 分别为波束形成和声全息的识别结果.从图中可以看出利用动态波叠加方法所识别的两个运动声源位置比较准确,而且可以看到与波束形成方法和声全息方法的识别结果相比,重建结果中的旁瓣效应得到了明显的抑制,声源的分辨

率更高, 声源识别效果较好. 说明利用动态波叠加方法进行运动声源识别时可以获得较好的声场识别效果.

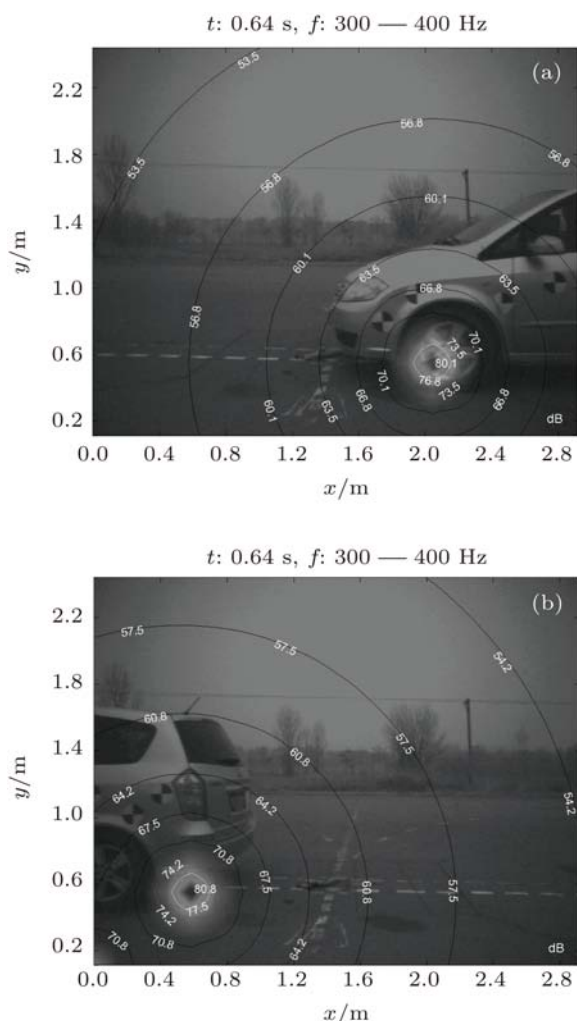


图 11 运动汽车车外噪声识别结果图 (a) 发动机噪声识别结果; (b) 排气噪声识别结果

在实验场利用由 30 个传声器组成的阵列系统对一辆运动汽车的辐射噪声进行测量, 实验中测量面与声源面距离 $d_1 = 3.3$ m; 重建面与声源面距离 $d_3 = 0.1$ m, 重建面高度 $h = 2.3$ m, 长度 $l = 2.9$ m. 图 11 所示为利用本系统所测量一辆以 65 km/h 速度运动的汽车的车外噪声辐射可视化结果.

该实验中, 实验车辆的发动机为四缸四冲程, 前置布置, 实验时发动机转速约 3000 r/min, 在该转速工作时, 发动机及排气在 300—400 Hz 频段有明显噪声存在. 在不考虑地面反射影响的条件下, 图 11 所示为利用动态波叠加方法所重建的车表面噪声, 从图中可以看到在前轮罩附近以及排气管出口附近存在明显的噪声, 考虑一般运动状态下轮胎噪声的频率多为 800 Hz 以上的频段, 结合噪声源的位置和频段综合判断分析认为, 图 11(a) 中的噪声源为发动机噪声, 图 11(b) 为排气噪声. 实验结果表明本方法可以有效地用于实际汽车在运动状态下的车外噪声测量识别. 综合实车车载声源测量实验以及车外实际行驶噪声的识别实验, 证明本方法在实际工况下能够比较准确地对运动声源进行识别. 实验结果证明了该方法的实用性、有效性和正确性.

6 结论

为改善运动声源识别中的声源旁瓣效应及虚假声源问题, 本文建立了一种可以用于运动声源识别的动态波叠加方法, 将波叠加方法从静态声源测量领域拓展到了运动声源的识别中. 模拟仿真实验以及车载声源试验表明, 基于本方法可以比较准确地重建出运动声源, 与传统的波束形成方法和全息方法相比, 本方法在识别运动声源时的旁瓣效应和虚假声源现象得到了明显的改善. 实车车外噪声测量试验表明, 基于本方法所开发的测量系统可以有效识别出汽车的发动机噪声以及排气噪声, 声源识别的位置比较准确, 识别效果较好, 旁瓣效应得到了明显的抑制. 实验结果证明了本方法的实用性、有效性, 表明本方法可以有效地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. 本文提出的动态波叠加方法将波叠加方法的适用范围扩展到运动声源, 后续还需要进一步对算法中重建结果与声源预估效果的鲁棒性与稳定性以及地面反射的影响等问题进行深入研究, 以进一步提高该算法的性能和适用范围.

- [1] King III W F 1977 *J. Sound. Vib.* **54** 361
 [2] Barsikow B, King III W F, Peizenmaier E 1987 *J. Sound. Vib.* **118** 99
 [3] Takano Y, Terada K, Aizawa F, Iida A, Fujita H 1995 *Proceedings of Inter-Noise* **1995** 1175

- [4] Kook H, Mobes G B, Davies P, Bolton J S 2000 *J. Sound. Vib.* **233** 137
 [5] Heilmann G, Dirk D 2008 *2nd Berlin Beamforming Conference* 2008
 [6] Yang D G, Li B, Wang Z T, Zheng S F, Lian X M 2010 *Noise*

- Control Eng. J.* **58** 382
- [7] Williams E, Maynard J D 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 554
- [8] Maynard J D, Williams E G, Lee Y 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **75** 1395
- [9] Sakamoto I, Tanaka T 1993 *Proceedings of SAE* No 930199
- [10] Kwon H S, Kim Y H 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 1734
- [11] Park S H, Kim Y H 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 2326
- [12] Wan Q, Jiang W K 2005 *Acta Acustica* **30** 379 (in Chinese) [万泉, 蒋伟康 2005 声学学报 **30** 379]
- [13] Yang D G, Wang Z T, Li B, Luo Y G, Lian X M 2011 *J. Sound. Vib.* **330** 1352
- [14] Yang D G, Wang Z T, Li B, Lian X M 2011 *J. Sound. Vib.* **330** 2457
- [15] Yang D G, Luo Y G, Li B, Li K Q, Lian X M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4738 (in Chinese) [杨殿阁, 罗禹贡, 李兵, 李克强, 连小珉 2010 物理学报 **59** 4738]
- [16] Zheng S F, Xu F, Lian X M, Luo Y G, Yang D G, Li K Q 2006 *Noise Control Eng. J.* **56** 130
- [17] Bai M R 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **92** 533
- [18] Saijyou K, Uchida H 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 785
- [19] Koopmann G H, Song L, Fahnlne J 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 2433
- [20] Yu F, Chen X Z, Li W B, Chen J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2607 (in Chinese) [于飞, 陈心昭, 李卫兵, 陈剑 2004 物理学报 **53** 2607]
- [21] Zhang H B, Jiang W K, Wan Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 313 (in Chinese) [张海滨, 蒋伟康, 万泉 2008 物理学报 **57** 313]
- [22] Li J Q, Chen J, Yang C, Jia W Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4258 (in Chinese) [李加庆, 陈进, 杨超, 贾文强 2008 物理学报 **57** 4258]
- [23] Li W B, Chen J, Bi C X, Chen X Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1264 (in Chinese) [李卫兵, 陈剑, 毕传兴, 陈心昭 2006 物理学报 **55** 1264]

Dynamic wave superposition method for moving sound sources*

Yang Dian-Ge[†] Li Bing Wang Zi-Teng Lian Xiao-Min[‡]

(Department of Automotive Engineering, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 15 February 2011; revised manuscript received 16 May 2011)

Abstract

In order to improve the identification of moving sound sources and solve the ghost source problem, the short-time wave superposition relation for moving sound source is established according to the Doppler frequency shift in short time, the equivalent sound source is pre-estimated by beam-forming, based on the pre-estimation result, the wave superposition equation is developed and the sound source is calculated by solving the equation. Then the dynamic wave superposition method for moving sound source is obtained. This method extends the wave superposition method to the case of the moving sound sources and solves the ghost source problem in moving sound source identification without adding extra microphones or changing the layout of microphone array. This method is used in the experiment to measure the moving sound sources, and satisfactory results prove the effectiveness of the method.

Keywords: wave superposition, moving sound source, Doppler effect, beam-forming

PACS: 43.50.Yw, 43.60.Fg, 43.60.Pt

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50605038).

[†] E-mail: ydg@mail.tsinghua.edu.cn

[‡] E-mail: lianxm@tsinghua.edu.cn