

6-14-2018

## High Frequency Blend Clips Matching Based Fire Sound Synthesis

Yin Qiang

*1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;;*

Shiguang Liu

*1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;;2. Tianjin Key Laboratory of Cognitive Computing and Application, Tianjin 300350, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## High Frequency Blend Clips Matching Based Fire Sound Synthesis

### Abstract

**Abstract:** Aimed at the problem which generated by fire sound simulation in virtual reality field, a new fire sound synthesis method was proposed. Most of the sound synthesis methods currently separate the fire sound into low and high frequencies for synthesizing. The influence of low frequency fire sound models was considered and *the low frequency signal was synthesized based on the physical visual fire model data. The high frequency sound signal was synthesized based on high frequency blend clips matching method. According to the characteristics of the fire's high frequency, the different frequency bands of high noise signal were generated and separated into the same size windows.* The sub-signals with the low frequency signal were matched with the same window size. Various examples and comparisons are presented to verify the plausible method.

### Keywords

fire, sound, low frequency, high frequency, blend clips

### Recommended Citation

Yin Qiang, Liu Shiguang. High Frequency Blend Clips Matching Based Fire Sound Synthesis[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2066-2075.

## 基于高频混合片段匹配的火焰声音合成

尹强<sup>1</sup>, 刘世光<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300350; 2. 天津市认知计算与应用重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 针对虚拟现实领域火焰声音模拟的问题, 提出了一种新的火焰声音合成方法。考虑低频声音物理模型的影响, 通过基于物理的可视化火焰模型数据合成火焰的低频信号。对于火焰的高频声音细节, 采用基于高频混合片段匹配的方法, 按照火焰高频信号的特性生成特定的不同频段的高频噪声信号, 并分成相同大小的窗口片段, 然后与低频信号进行匹配融合, 得到最终的声音信号。通过一些不同物质燃烧的例子以及对比试验验证了新方法的有效性。

**关键词:** 火焰; 声音; 低频; 高频; 混合片段

中图分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 06-2066-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806009

## High Frequency Blend Clips Matching Based Fire Sound Synthesis

Yin Qiang<sup>1</sup>, Liu Shiguang<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Cognitive Computing and Application, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Aimed at the problem which generated by fire sound simulation in virtual reality field, a new fire sound synthesis method was proposed. Most of the sound synthesis methods currently separate the fire sound into low and high frequencies for synthesizing. The influence of low frequency fire sound models was considered and the low frequency signal was synthesized based on the physical visual fire model data. The high frequency sound signal was synthesized based on high frequency blend clips matching method. According to the characteristics of the fire's high frequency, the different frequency bands of high noise signal were generated and separated into the same size windows. The sub-signals with the low frequency signal were matched with the same window size. Various examples and comparisons are presented to verify the plausible method.

**Keywords:** fire; sound; low frequency; high frequency; blend clips

## 引言

现实生活中, 火焰的燃烧现象多种多样, 如蜡烛的燃烧、火把的燃烧、灭火器的燃烧等。计算机图形学领域中对于火焰等流体动画的视觉模拟方

法已较为成熟, 主要包括基于物理的方法<sup>[1-3]</sup>, 也有依据流体特性模拟的方法<sup>[4-5]</sup>。为保持渲染的实时性, 后续的研究又提出了一些加速计算的方法<sup>[6]</sup>。对于火焰声音合成方法的研究, 主要包括基于非物理的方法、基于物理的方法以及基于物理与非物理相结合的方法。

对于基于非物理的方法, 起源于光谱建模<sup>[7]</sup>的频域声音合成的方法被用于合成诸如壁炉动画的咆哮声、嘘声、爆裂声等噪声。声音纹理建模提



收稿日期: 2016-05-10 修回日期: 2016-08-03;  
基金项目: 国家自然科学基金(61672375, 61170118),  
天津市自然科学基金(14JJCQNJC00100);  
作者简介: 尹强(1992-), 男, 山东泰安, 硕士生, 研  
究方向为流体声音仿真; 刘世光(通讯作者 1980-),  
男, 山东临沂, 博士, 教授, 博导, 研究方向为可视  
化仿真、计算机图形学、虚拟现实等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2066 •

供了另外一种从录音中合成火焰声音的方法<sup>[8]</sup>。粒子合成<sup>[9]</sup>是一种古典的再合成微声音细节的技术,但由于它很难排列粒子以至于难以用于合成中尺度的时间结构。小波树学习的方法<sup>[10]</sup>能够有效地再合成随机的并且准周期的纹理,但是却需要为火焰声音合成提供非自动地输入控制。基于运动驱动的声音合成<sup>[11]</sup>提供了一个完全自动的控制技术,然而它仅适用于二维运动。非物理的火焰声音的生成方法很难将真实火焰声音与火焰动画同步,声音与动画存在割裂感。

基于物理的火焰声音合成方法一般采用火焰物理模型<sup>[12]</sup>进行求解。Dobashi 等<sup>[13]</sup>提出了生成空气动力学噪声的方法,虽然该方法证明了空气动力学声音模型的多样性,但燃烧声音并不是主要基于体素的噪声。实验证明<sup>[14]</sup>,另外一种声音源(即直接燃烧的声音)是燃烧噪声的主要贡献者,空气动力学的噪声只是起到了相对小的作用。

对于基于物理与非物理相结合的方法: Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>提出了一种噪声带宽扩张以及声音纹理合成相结合的火焰声音生成方法。该方法将声音分为低频与高频,低频部分采用物理模型模拟,高频部分采用带宽扩张的方法模拟。虽然 Chadwick 和 James<sup>[9]</sup>的方法可以生成同步的火焰声音,但是生成的声音却具有很大的相似性,因为他们采用了固定的频率噪声值模拟各种火焰声音。Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>在该方法的基础上采用傅里叶变换以及逆变换对低频信号进行处理,同时采用小波噪声合成了高频信息。虽然降低了原方法的时间消耗,但声音的相似性还是比较明显,不同物体燃烧的火焰声音没有明显的区分性。

本文提出了一种新的基于高频混合片段匹配的火焰声音合成方法。该方法同样将火焰声音信号分为低频与高频部分,并分别对其进行求解。对于前者,从火焰动画模型中可以获得火焰的燃烧数据,并按照直接燃烧噪声的物理原理求解得到;对于后者,根据火焰模型的速度场产生的火焰湍流旋涡效果合成得到。然后将这两部分合成得到火焰的

低频声音信号。对于高频火焰声音信号,采用混合频率片段匹配的方法进行合成。由于火焰的高频信息呈现固定的幂律关系。因此本文模拟出符合该幂律关系的噪声信号,然后将这些噪声信号分成固定大小的窗口片段,同样将低频信号分为相同大小的窗口片段,并与噪声信号窗口进行匹配,选用匹配度最高的噪声信号与低频声音信号进行合成得到最终的信号。

## 1 算法综述

本文算法流程图如图 1 所示。首先,采用火焰解算器计算火焰的物理燃烧模型(图 1(a)),从模型中导出所需要的火焰的速度分量以及燃烧率。并由此分别求解两类不同的火焰低频声音信号。一类为直接燃烧噪声(图 1(b)),另一类为湍流旋涡噪声(图 1(c))。再将这两类声音信号进行融合,得到火焰声音的低频信号,如图 1(d)所示。然后对高频火焰声音细节进行匹配添加。按照火焰高频符合的幂律模拟出不同频率段的噪声(图 1(e)),并通过傅里叶逆变换得到时域上的噪声,如图 1(f)所示。然后将不同频率段的噪声按相同大小窗口进行分帧,并混合在一起,得到高频混合片段组。同时将低频信号按相同大小进行分窗,并按窗口间隔与高频混合片段组匹配,将匹配度最高的高频混合频率片段融合到对应的低频信号窗口中,得到最后的火焰声音信号,如图 1(g)所示。

## 2 火焰低频声音合成

在低频部分包含两类声音信号,一类为直接燃烧噪声,另一类为湍流旋涡噪声。但大多数研究普遍采用直接燃烧噪声合成低频声音而忽视了湍流旋涡噪声的影响,因为直接燃烧噪声是主要的火焰声音源。本文采用湍流非预混火焰模型,需同时考虑上述两类低频声音物理模型的影响,通过基于物理的可视化火焰模型数据合成火焰的低频信号。分为火焰模型、火焰低频声音建模以及低频声音求解 3 部分。

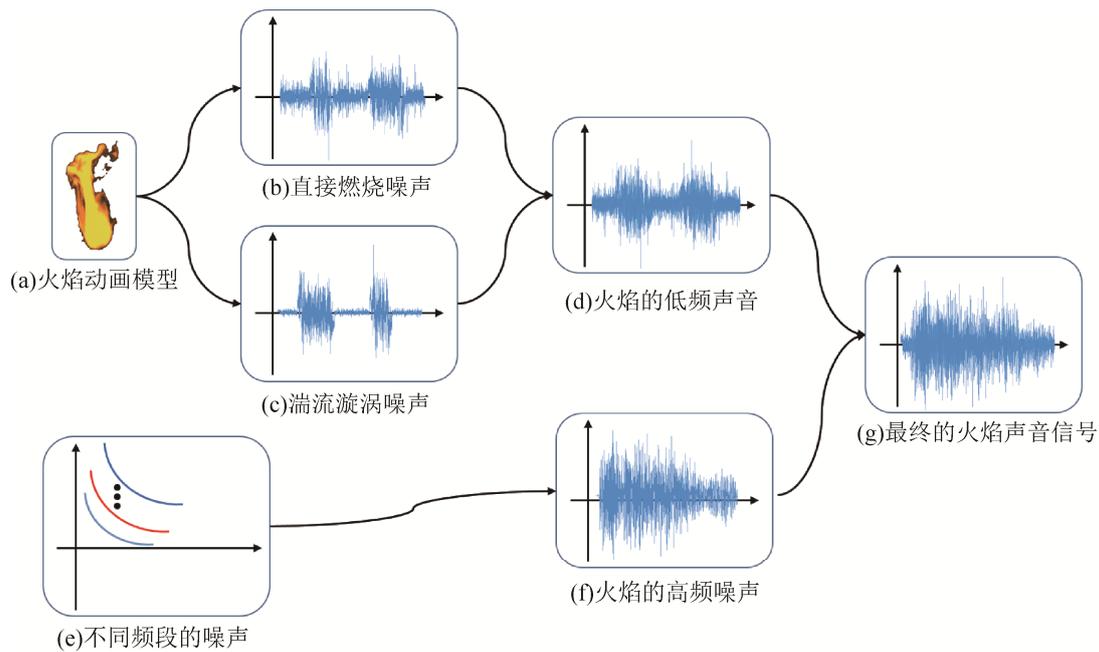


图1 算法流程图

Fig. 1 The flow chart of our method

## 2.1 火焰模型

本文采用蓝核火焰模型<sup>[17]</sup>, 属于湍流非预混火焰类型。对气体燃料和燃烧产物分别使用 Navier-Stokes 方程组进行建模, 如式(1)(2)所示。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{\nabla p}{\rho} + f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = \phi \quad (2)$$

式(1)为动量方程, 式中:  $u$  代表速度;  $t$  表示时间;  $p$  是压强;  $\rho$  为密度;  $f$  代表外力; 式(2)是质量方程,  $\phi$  是一个可选的散度源, 可以通过事先指定或者模拟得到的实时数据来计算  $\phi$  的值。当  $\phi > 0$  时, 速度场在该点向外扩散; 当  $\phi < 0$  时, 速度场在该点向里收缩。本文火焰模型由 Houdini FX 软件 Pyro FX 模块模拟。

在蓝核火焰模型中, 未燃烧的气体通过火焰前端的时候将会快速的燃烧并且释放热量。我们基于 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup> 的假设, 火焰前端在点  $x$  表面邻域  $\delta S$  的速度波动导致的热量释放与流经该块的速度流量成正比:

$$\delta q(x) = \bar{u}(x) \cdot \bar{n}(x) \delta S \quad (3)$$

式中:  $q(x)$  是每单位体积气体释放的热量速率;

$\bar{u}(x)$  表示速度;  $\bar{n}(x)$  是点  $x$  处表面块  $\delta S$  的法线。通过该方法, 可以将热量释放的体积分转化为速度通量的曲面积分, 并可得到:

$$\int q(x) d^3 \bar{x} = \int_S \bar{u}(x) \cdot \bar{n}(x) ds \quad (4)$$

式中:  $S$  为火焰前端, 为了避免计算曲面积分, 采用高斯散度定理将曲面积分转化为体积分。

$$\int_S \bar{u}(x) \cdot \bar{n}(x) ds = \int_V \nabla \cdot \bar{u} dv \quad (5)$$

式中:  $V$  表示由火焰前端包围的几何体。通过式(5)的简化, 算法的运行效率得以大幅度提高。

## 2.2 火焰低频声音建模

火焰的类型有很多种, 但直接燃烧噪声是大部分火焰类型燃烧的主要声音, 因此大多数火焰声音合成算法只考虑了该部分的声音效果。对于非预混湍流火焰来说, 火焰声音的生成主要分为两个部分, 一部分为直接燃烧噪声, 即火焰燃烧产生的热量释放后导致空气波动, 由于热量释放不均匀会产生不同的声压, 进而产生声音; 另一部分为湍流旋涡噪声, 即火焰湍流旋涡运动产生的声音。由于本文采用的物理模型为湍流火焰模型, 因此考虑了两种噪声对低频信号的影响。

对于直接燃烧噪声, 可以用一个波动方程来描述声源和声音的传播<sup>[18]</sup>。

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla \cdot \left( \nabla \frac{1}{\rho} p \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\gamma - 1}{c_0^2} q \right) \quad (6)$$

式中:  $c$  表示空气声速;  $\rho$  为空气密度;  $\gamma$  代表比热比;  $c_0$  和  $\rho_0$  分别表示环境声速和密度。式(6)的左边代表热量释放对声源的导数表现为声源。使用格林函数求解式(6)可以得到:

$$p(\bar{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\gamma - 1}{c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{q(\bar{y}, t - \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{c_0})}{|\bar{x} - \bar{y}|} d^3 \bar{y} \quad (7)$$

式中:  $\bar{x}$  为听者位置;  $\bar{y}$  为声源位置中一点位置;  $t$  表示时间。我们忽略掉参数项的影响, 并将式(5)的速度散度积分带入式(7), 可得到声压公式:

$$p(t) = \frac{d}{dt} \int_V \nabla \cdot \bar{u}(\bar{x}, t) dv(\bar{x}) \quad (8)$$

对于湍流旋涡噪声, 本文采用 Howe 理论<sup>[19]</sup>, 该理论基于 Lighthill 空气动力学理论<sup>[20]</sup>, 将流体的运动与产生的声音相关联, 并且将波动方程与 Navier-Stokes 联系起来解释流体中声源的产生。Howe 和 Powell<sup>[19,21]</sup>证明了声源可以近似的表达成项  $p_0 \text{div}(\bar{w} \times \bar{v})$ ,  $p_0$  是标准声压,  $\bar{w}$  为涡度向量,  $\bar{v}$  表示速度向量。通过使用这个近似值, Howe 推导了声压的表达式:

$$p(t) = \frac{p_0 c_0^2}{12\pi r^3} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \int_{\Omega} f(\bar{x}(t), \bar{y}) d\bar{y} \quad (9)$$

$$f(\bar{x}(t), \bar{y}) = (\bar{x}(t) \cdot \bar{y}) \left( (\bar{y} \times \bar{w}(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0})) \cdot \bar{x}(t) \right) \quad (10)$$

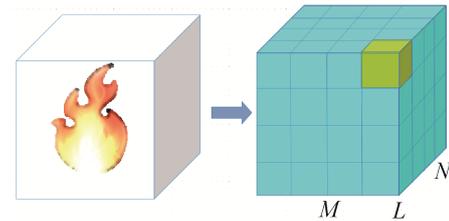
式中:  $\Omega$  为湍流场;  $r$  是  $\bar{y}$  点和接收者的距离。式(9)和式(10)可以看出, 旋涡的分布可以从速度的分布中计算得到。因此, 我们可以利用火焰模型的速度场来计算涡度的分布。

### 2.3 火焰低频声音求解

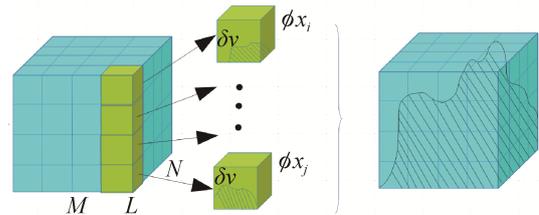
要得到低频的声压, 便要求解直接燃烧噪声与湍流旋涡噪声。然而, 这两部分声压信号均和火焰模型的速度场分布相关。我们基于 Liu 和 Yu 的方法<sup>[16]</sup>, 在类 Marching-cube 方法的基础上先求解直接燃烧噪声的声压信号, 再由火焰的速度分布求解

湍流旋涡噪声的声压信号。最后将这两个声压信号进行叠加, 得到最后的火焰低频声音。

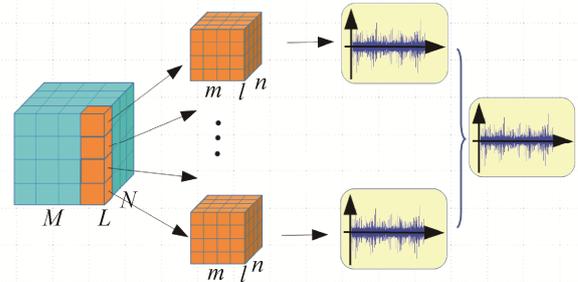
在求解直接燃烧噪声的过程中, 首先采用等值面提取算法提取出火焰的等值面, 即将整个火焰空间均匀的离散成  $M \times N \times L$  个体素, 如图 2(a)所示。然后在每一个立方体的顶点求取其在相应数据场中的值  $\phi_x$ , 如图 2(b)所示。这里的数据场采用燃料的燃烧率数值。



(a) 火焰模型体素化



(b) 热量释放产生的声压信号求解



(c) 涡度产生的声音信号求解

图2 火焰低频声音求解示意图

Fig. 2 Illustration of solving the low-frequency sound of fire

在求得数据场的值  $\phi_x$  后, 再遍历每一个小立方体体素。由于已经将对速度通量的曲面积分转化成了对速度散度的体积积分, 就无需再计算等值面的逼近表示, 只需要确定每一个立方体是否在等值面内。假设使用  $c$  值来生成等值面: 当某个顶点的  $\phi_x > c$  时, 就认为该顶点落在了等值面的外侧, 反

之, 则在内侧。当某个立方体存在顶点落在等值面的内侧时, 就认为该立方体有部分或全部落在了等值面内。需要计算这部分的体积  $\delta v$ , 如图 2(b)所示, 使用下面的公式进行计算:

$$\delta v = \frac{1}{8} h^3 \sum_{i=0}^7 f(\phi_{x_i}) \quad (11)$$

其中  $f(\phi_{x_i}) = \begin{cases} 1, \phi_{x_i} \leq c \\ 0, \phi_{x_i} > c \end{cases}$ ;  $h$  为立方体边长。

求出体积  $\delta v$  之后, 如果  $\delta v > 0$ , 在立方体中心求取速度散度  $\nabla \cdot \bar{u}$ , 反之, 则将散度值直接置 0。遍历完所有的立方体后, 将所有立方体上  $\nabla \cdot \bar{u}$  和  $\delta v$  的乘积累加起来, 得到最终的速度散度积分。

$$\int_V \nabla \cdot \bar{u} dv = \sum \nabla \cdot \bar{u} \delta v \quad (12)$$

在求解湍流旋涡噪声的过程中, 也需要进行图 2(a)的操作, 即先对火焰模型体素化, 将其分为  $M \times N \times L$  个体素网格, 分别对每个网格运用式(9)计算声压, 为了采用式(9), 湍流场的大小相对于声音的波长来说必须足够小<sup>[7]</sup>。受到文献[7]中方法启发, 我们将每个体素单元再进行细分, 分为  $m \times n \times l$  个更小的体素单元。针对每个体素单元采用式(9)计算涡度的声压值, 再将小体素单元的声压值进行叠加, 得到每个体素单元的声压值。分别对  $M \times N \times L$  个体素网格进行以上操作, 得到整个

火焰模型的湍流旋涡噪声声压信号值。

得到了两部分声压信号以后, 将两部分的声压信号进行叠加得到最终的每帧的声压信号值, 由于该值是离散值, 采用 Mitchell-Netravali<sup>[22]</sup>立方体插值算法对声压信号进行插值, 得到火焰低频声音信号。

### 3 火焰高频混合片段匹配

有关湍流火焰的研究表明, 超出一定的峰值频率后, 声功率谱近似的遵守  $P(f) \propto f^{-\alpha}$  关系, 为了满足这个幂律关系, 大量实验表明<sup>[23]</sup>  $\alpha$  的取值范围最好是满足  $2.1 < \alpha < 3.4$ 。Chadwick 和 James<sup>[15]</sup> 在试验过程中采用  $\alpha = 2.5$  的取值, 但是不同的物体燃烧产生的声音会有所差别, 采用相同的噪声频率合成的噪声是相同的, 无法表达不同的火焰声音效果。因此, 本文设计了一种高频混合频率片段匹配的方法来合成高频的声音。该方法在 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup> 的基础上考虑了不同频段对声音的影响, 并且在匹配过程中采用欧式距离求解频率相似度, 以相似度最高的片段进行融合, 保持了声音信号与动画的同步性。整个高频混合片段匹配过程的流程图如图 3 所示。

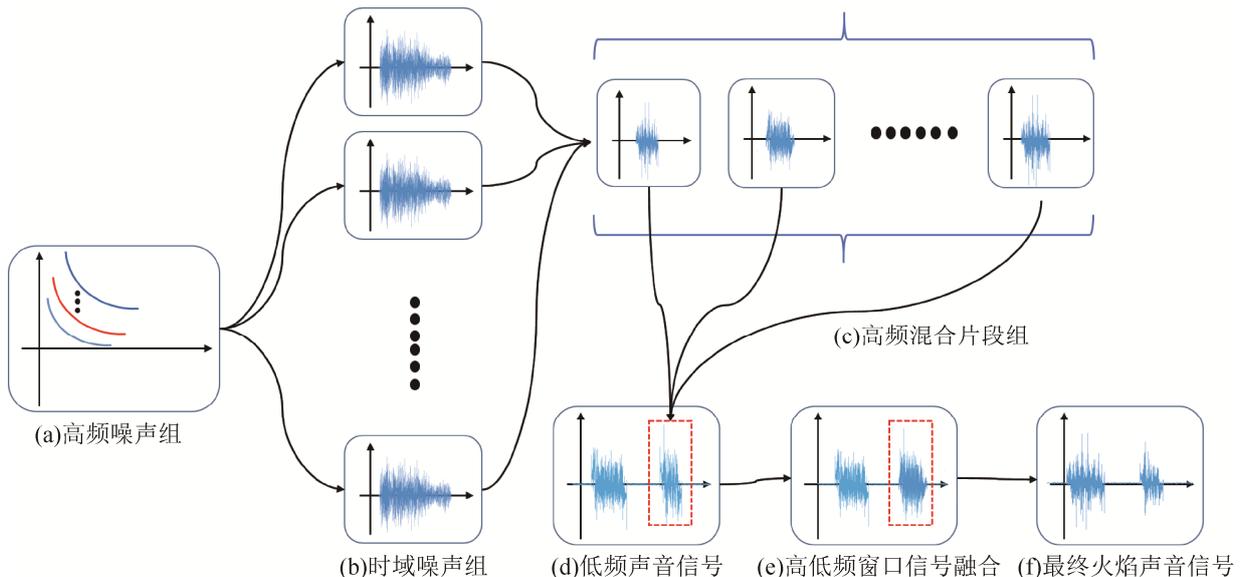


图3 高频混合片段匹配流程图  
Fig. 3 The flow chart of matching the high-frequency mixed sound segment

我们在(2.1,3.4)的频率范围内每隔 0.1 取一个频率,共有 12 个频率来组成高频混合频率片段组。如图 3(a)所示。分别对这 12 个频率在  $\theta_j = [-\pi, \pi]$  上对频域样本  $j$  分配随机均匀相位来获得频域的声压值,即  $\bar{p}_j(f) = f_j^{-\alpha/2} e^{-i\theta_j}$ , 并对其进行傅里叶逆变换得到时域上的 12 组噪声,即  $P_j = \text{IFFT}(\bar{p}_j(f))$ , 如图 3(b)所示。取相同窗口宽度对这高频噪声组进行分割得到相同宽度的不同频率的窗口噪声片段,把他们混合在一起得到高频混合片段组,如图 3(c)所示。并对低频声音信号同样进行窗口分割操作,窗口分割宽度与窗口噪声片段相同。然后对低频声音信号按照窗口进行遍历。对每一个窗口低频信号分别与混合高频片段组中的噪声片段进行匹配,采用信号的欧式距离作为匹配度量的标准,将与低频信号距离最小的噪声片段作为匹配度最高的片段,如图 3(d)中所示。在进行信号融合过程中,先要对噪声信号进行缩放,使其在时域内与低频振幅阈值保持一致,以防振幅差异过大。采用式(13)进行振幅缩放:

$$p'_i = p_i \times \bar{p}_{low} / \bar{p}_{high} \quad (13)$$

式中:  $p'_i, p_i, \bar{p}_{low}, \bar{p}_{high}$  分别代表在第  $i$  个窗口内缩放后的噪声信号、原噪声信号、低频信号平均值、高频信号平均值。经过缩放后便能得到与低频信号窗口中阈值匹配的噪声信号。然后再进行信号融合。在图 3(e)高低频窗口信号融合的过程中,采用最基本的高低通滤波然后信号加成的方法对信号进行融合,如式(14)所示:

$$P_{final} = F_{low}P_{low} + F_{high}P_{high} \quad (14)$$

式中:  $P_{final}, F_{low}, P_{low}, F_{high}, P_{high}$  分别表示最终融合后的声压值,低通滤波器,低频窗口声压值,高通滤波器,噪声窗口声压值。分别分离出低频声音的低频信号与高频噪声的高频信号进行融合,得到最终的火焰声压信号,如图 3(f)所示。整个混合高频片段匹配过程的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 高频混合片段匹配

输入: 分割窗口宽度  $w$ , 低频信号  $P_{low}$

输出: 合成火焰声音信号  $P_{final}$

//合成高频噪声组

FOR  $a=2.2:0.1:3.4$

$\bar{p}_a = f^{-a/2}$ ; //频域噪声

$P_a = \text{IFFT}(\bar{p}_a(f))$ ; //时域噪声

FOR  $i = 1:w:\text{length}(P_a)$

NoiseSets.Add( $P_i$ ); //将高频噪声片段添加到噪声集 NoiseSets 中

END

END

//高低频匹配融合

FOR  $i = 1:w:\text{length}(P_{low})$

在 NoiseSets 中找到最小距离的  $P_i$ ;

缩放  $P_i$  为  $P'_i$ ;

$P_{final}(i) = F_{low}P_{low}(i) + F_{high}P_{high}(i)$

END

## 4 实验结果及对比

基于上述算法,本文生成了不同物质燃烧时的声音效果,包括蜡烛的燃烧、火把的燃烧、喷火器的燃烧等。并且与其它火焰声音生成算法做了对比试验。所有的实验都运行在如下配置的电脑:酷睿 i5-4460 3.20 GHz CPU, NVIDIA GeForce GT745 GPU, 8 GB RAM。所做的模型动画的分辨率均为  $1280 \times 720$ , 动画时长为 10 s。

### 4.1 蜡烛燃烧的声音生成

图 4 模拟了蜡烛燃烧声音生成的过程。蜡烛燃烧的特点就是比较安静,几乎听不到燃烧的声音。因此,我们在动画中添加了两个风力使得蜡烛火焰分别向左以及向右摇摆。在摇摆的过程中由于周围空气的变化进而产生声音的变化。该声音的波形如图 4 所示,我们同时对比了真实的蜡烛燃烧的声音(图 4 第一行最右图)与 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法及 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法。综合来看,三幅波形图均描述出了蜡烛火焰声音在风力下的变化,并且与真实蜡烛燃烧波形相似,但也存在很大的不同。图 4(a)为 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法,该方法  $\alpha$  的取

值为 2.5。可以看出其波动比较大,但是振幅较小,比较符合蜡烛火焰模型的声音。而图 4(b)中 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法生成的波形振幅却过大,产生的声音效果也过于明显,不符合现实中蜡烛火焰声音偏小的特点,而且不同的波形具有很大的相似性。图 4(c)中为本文生成的蜡烛火焰波形。由于本文采用高频混合片段匹配的方法,生成的波形与 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法相比更加丰富,而且

波形振幅要比 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的更大,声音听起来饱满。与 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法相比,本文的声音波形更符合蜡烛声音波形较小的特点,而且相比 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法,本文低频声音部分的信号较少,补偿了在风的作用下的高频信号,使得最终波形振动比较明显,听觉上与真实的蜡烛燃烧声更相符合。

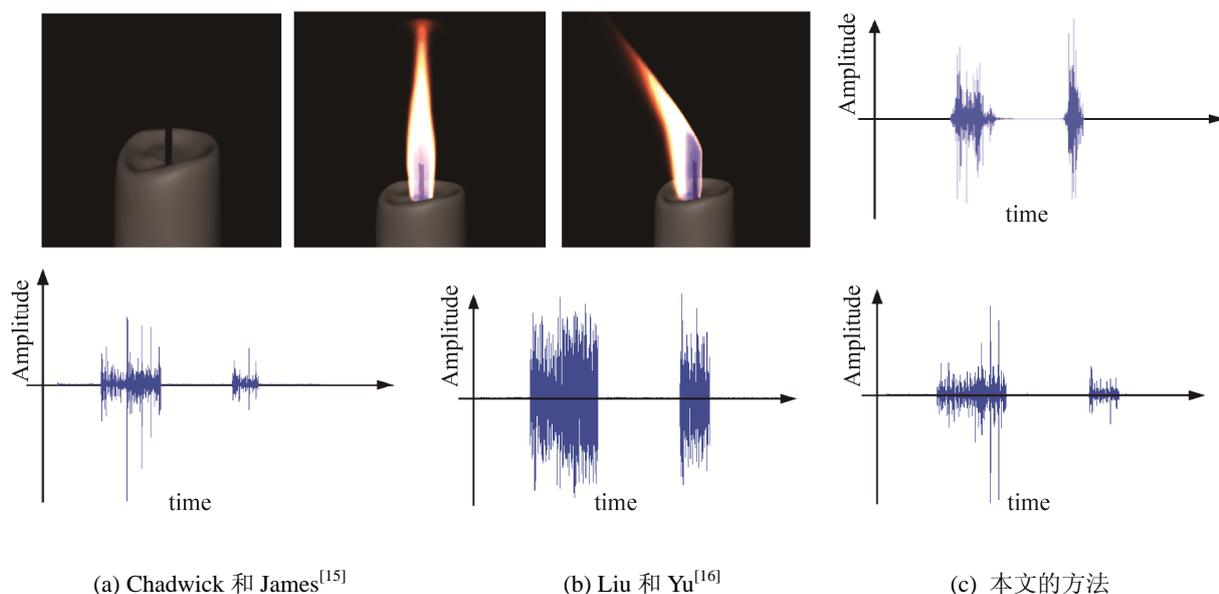


图 4 蜡烛燃烧模型及结果  
Fig. 4 The candle burning model and its corresponding sound result

## 4.2 火把燃烧的声音生成

图 5 模拟了火把燃烧的声音生成过程。在没有添加外力的情况下,模拟了火把左右运动的情况。在该实验动画中,火把首先被点燃,然后会分别沿着向左、向右以及回到原点 3 个方向运动,且时间间隔均为 1 s。该声音的波形见图 5。我们同样对比了真实的火把燃烧的声音(图 5 第一行最右图)与 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法及 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法。综合来看,三幅声音波形均模拟出了火把火焰运动产生的声音波形效果,并且振动幅度与真实火把声音波形相似。每幅波形图中三段突出的波形对应火把动画的运动效果。由于火焰中途运动离听者较远,所以在每幅图中中段波形相比两侧的较小。三

幅波形图整体比较相似,但还是存在不同。首先,Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法产生的波形较平缓,而且振幅相比其他两个较小。该方法产生的声音听起来与其产生的火焰声音比较相似,虽然与动画同步,但是声音缺少火焰低频信息,听到的均为类似于风吹的高频信息。Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法振幅比较明显,但产生的声音低频声音信号又过于明显,听起来低频信号掩盖了高频信号的特征。本文的方法避免了这两个方法的缺点,生成的声音中低频高频分布合理,更符合火把运动的火焰声音。

## 4.3 喷火器喷火的声音生成

图 6 模拟了喷火器喷射火焰的情况。喷火器在整个视频的右侧,会进行上下运动,在喷火器上下

运动期间喷射火焰, 由于喷射器喷射火焰量比较大, 该火焰声音比较剧烈。从图中可以看到喷射器在喷射出火焰的同时由于运动的关系在火焰柱的

周围会有一些零散的火焰簇, 这些火焰动画需要高频部分的声音信号模拟, 该声音波形如图 6 所示。

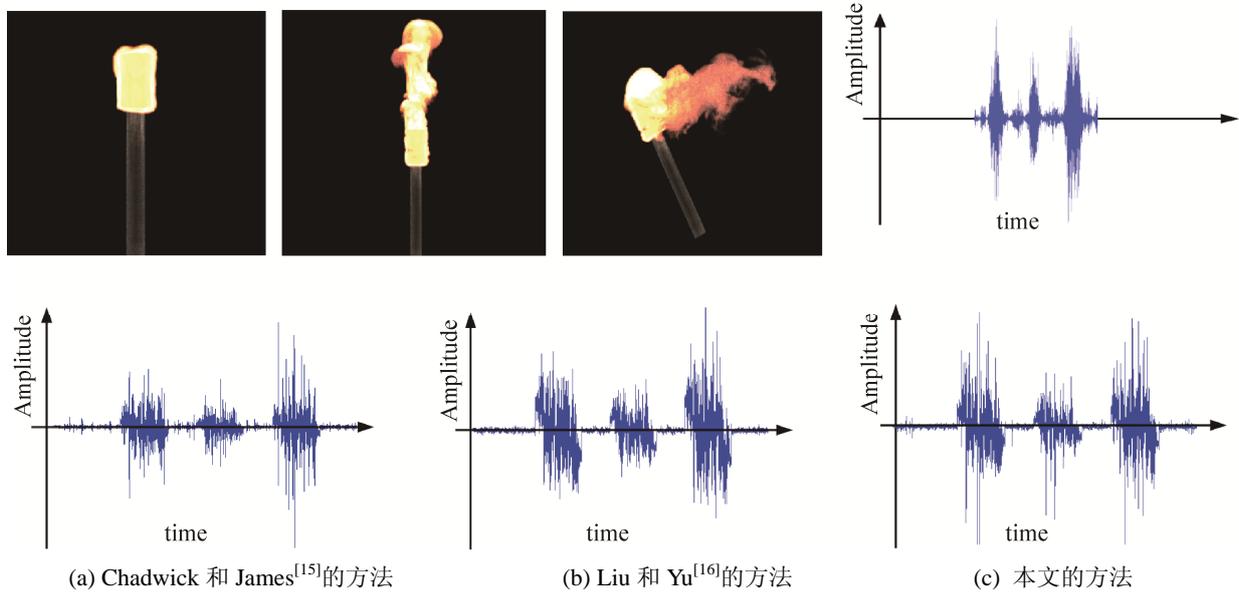


图 5 火把燃烧模型及结果

Fig. 5 The torch burning model and its corresponding sound result

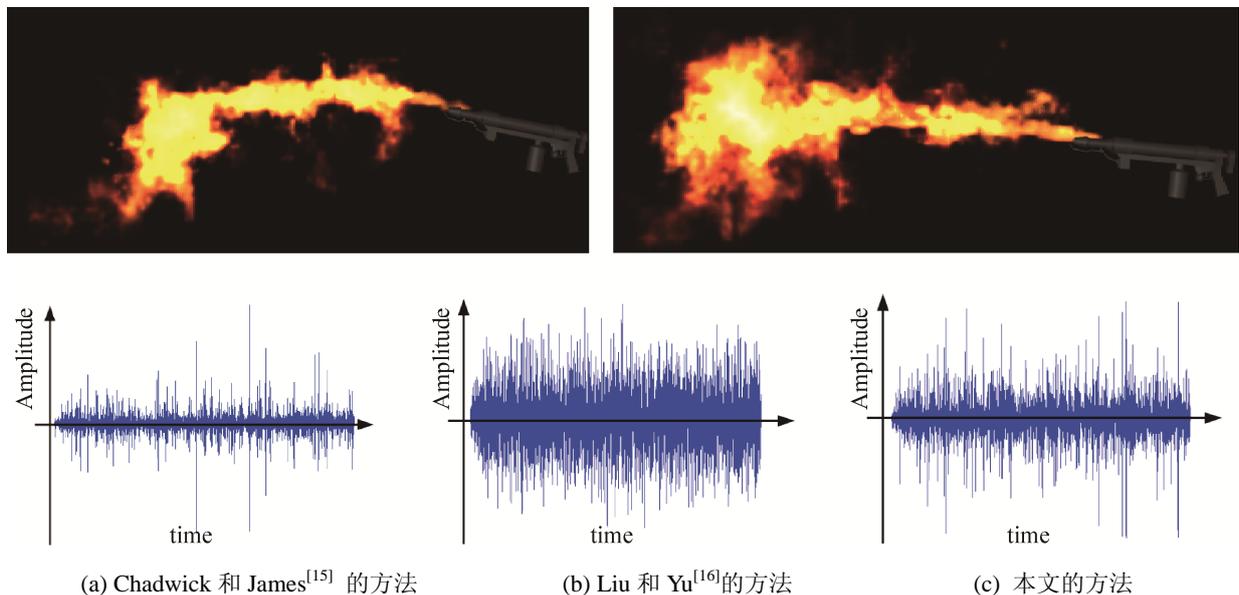


图 6 喷火器燃烧模型及结果

Fig. 6 The fire jet model and its corresponding sound result

综合来看, 三幅波形图均为持续的波形输出, 符合出了喷火器一直喷火的状态, 但存在明显的不同。Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法振幅过小, 声音听起来均为高频部分的信息, 基本不包含低频部分

的信息, 并不像喷火器喷火的声音, 喷火器的主要声音应为射出的火焰柱的声音, 这部分声音应该占整个声音信号的主导地位, 而 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>产生的火焰信号更像火焰柱周围火焰簇的声音信

息。Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法振幅很大,听觉上更符合喷火器喷火声音的特点,然而问题依然是低频信号过于明显,Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法没有很好的表达高频部分的火焰簇信息。本文的方法则弥补了以上两种方法的不足。我们合成的声音信号不仅描述了喷火器火焰柱的音频信息,也在高频匹配融合了周围火焰簇的声音信息。通过本文的方法,生成的火焰声音更符合喷火器喷火的声音。

综上所述,虽然 Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的方法以及 Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法都能产生与火焰动画同步的火焰声音信号,但是也存在着一些问题。Chadwick 和 James<sup>[15]</sup>的带宽增强方法更适合于一些运动比较平缓的火焰声音模拟如蜡烛的燃烧,他们的结果中高频信息补偿很充分,这也导致了其低频信息过少。Liu 和 Yu<sup>[16]</sup>的方法正好相反,虽然他也合成了高频信息,但是往往会被低频声音信号掩盖。我们的方法不仅增强了低频部分的声音,而且按照低频信号的幅度补偿了高频部分的声音,这样最终产生的声音高低频相结合,更符合火焰声音的特点。

## 5 结论

本文提出了一种新颖的火焰声音生成方法。该方法将火焰分为低频以及高频的两部分。对于低频声音,考虑了两类物理机制的作用:一类为直接燃烧噪声,由于热量释放的波动,导致空气质量密度的波动,进而导致的气压的波动产生的声音;另一类为湍流旋涡噪声,由于火焰湍流旋涡运动产生的声音。将这两部分融合便得到低频声音信号。对于高频信号,采用混合高频片段匹配的方法,构造多组高频噪声信号,将其分割为相等大小的窗口组成混合高频片段组,并与低频信号进行匹配融合,得到最终的火焰声音信号。

当然,该方法也存在有一定的局限性。由于匹配片段比较多,导致匹配效率不高,未来我们将引入并行化的方法提高算法效率。此外,不同火焰声音相似性比较大,没有表现出不同燃烧介质火焰声

音的特点,这个问题也是我们以后的研究方向。

## 参考文献:

- [1] Raveendran K, Wojtan C, Thurey N, et al. Blending liquids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2014, 33(4): 1-10.
- [2] Zhang Y, Ma K L. Spatio-temporal Extrapolation for Fluid Animation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2013, 32(6): 2504-2507.
- [3] 钱宜婧, 杨旭波. 流体模拟的压缩感知上采样方法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1426-1434.
- [4] Qian Yijing, Yang xubo. Compressed-sensing Based Up-sampling Method for Fluid Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1426-1434.
- [4] 王双双, 许化强, 白成杰. 基于数学物理方法和纹理作用的火焰模拟[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(2): 197-201.
- Wang Shuangshuang, Xu Huaqiang, Bai Chengjie. Flame Simulation Based on Method of Mathematical Physics and Texture Effect[J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(2): 197-201.
- [5] 戴青. 基于 GPU 的可交互实时流体模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- Dai Qing. Interactive Fluid Simulation on the GPU[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [6] 方贵盛, 潘志庚. 水虚拟仿真技术研究进展[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 1981-1989.
- Fang Guisheng, Pan Zhigeng. Overview of Modeling Technologies on Water Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(9): 1981-1989.
- [7] Serra X, Smith J. Spectral modeling synthesis: A sound analysis/synthesis system based on a deterministic plus stochastic decomposition[J]. Computer Music Journal (S0148-9267), 1990, 14(4): 12-24.
- [8] Strobl G, Eckel G, Rocchesso D, et al. Sound texture modeling: A survey[C]// Proceedings of the 2006 Sound and Music Computing (SMC) International Conference. 2006: 61-68.
- [9] Roads C. Microsound[M]. USA, the MIT Press, 2004.
- [10] Dubnov S, Bar-Joseph Z, El-Yaniv R, et al. Synthesizing sound textures through wavelet tree learning[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2002, 22(4): 38-48.
- [11] Cardle M, Brooks S, Bar-Joseph Z, et al. Sound-by-numbers: motion-driven sound synthesis[C]// Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. Eurographics

- Association, San Diego, USA, 2003: 349-356.
- [12] 姜婕妤. 非预混火焰中的流动及燃烧不稳定性的直接数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Jiang Jieyu. A Study of Flame Instabilities in Nonpremixed Reacting Plumes by Direct Numerical Simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [13] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Synthesizing sound from turbulent field using sound textures for interactive fluid simulation[J]. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing, Inc (S0167-7055), 2004, 23(3): 539-545.
- [14] Schwarz A, Janicka J, Eds. Combustion Noise[M]. Germany: Springer, 2009.
- [15] Chadwick J N, James D L. Animating fire with sound [C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2011, 30(4): 84-92.
- [16] Liu S, Yu Z. Sounding fire for immersive virtual reality[J]. Virtual Reality (S1359-4338), 2015, 19(3/4): 291-302.
- [17] Nguyen D Q, Fedkiw R, Jensen H W. Physically based modeling and animation of fire[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2002, 21(3): 721-728.
- [18] Crighton D G, Dowling A P, Williams J E F, et al. Modern methods in analytical acoustics[M]. Germany, Springer Press, 1992.
- [19] Howe M S. Theory of vortex sound[M]. UK, Cambridge University Press, 2003.
- [20] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. I. General theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society (S1364-5021), 1952, 211(1107): 564-587.
- [21] Powell A. Theory of vortex sound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America (S0001-4966), 1964, 36(1): 177-195.
- [22] Mitchell D P, Netravali A N. Reconstruction filters in computer-graphics[J]. Computer Graphics. ACM (S0097-8493), 1988, 22(4): 221-228.
- [23] Rajaram R, Lieuwen T. Acoustic radiation from turbulent premixed flames[J]. Journal of Fluid Mechanics (S0022-1120), 2009, 637: 357-385.

## 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10% 为国际影响力品牌学术期刊。TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10% 之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。