

热声发动机的优化计算设计

韦克 刘旭 陈宇[†]

(清华大学物理系 北京 100084)

摘要 把改进的 12-Bit 格子气模型用于复杂边界的热声发动机的模拟研究, 成功模拟了带共振腔的驻波管中热声振荡演化过程。对热声板叠的长度、热声板叠在共振管中的位置以及共振腔的几何大小对热声振荡振幅的影响进行了数值计算。计算结果显示, 当共振腔与细管的宽度比为 2.2, 板叠位置相对于细管长为 0.34 时, 驻波管中热声振荡振幅达到最大。共振腔尺寸的研究, 对于热声发动机性能的优化设计有指导意义。

关键词 热声发动机, 格子气方法, 12-Bit 格子气模型

Optimization Analysis of A Thermoacoustic Engine

WEI Ke LIU Xu CHEN Yu

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract An improved 12-bit lattice gas method was used to simulate a thermoacoustic engine with complicated boundaries. The evolution process of self-excited thermoacoustic oscillation in a standing wave tube with a resonator was simulated successfully. The optimization of the length and position of a regenerator as well as the size of the resonator were studied numerically. The results show that the sound oscillation reaches a maximum when the size ratio of resonator and the tube is 2.2, and the position of regenerator relative to the length of the tube is 0.34. A study on the size of a resonator is valuable to the design of a thermoacoustic engine.

Key words Thermoacoustic engine, Lattice gas automation, 12-bit lattice gas

1 引言

热声现象的发现已经有很长的历史, 但将热声效应应用于制冷却是近几十年来出现的新技术。热声制冷就是利用热声效应的制冷技

术。由热声驱动的热声制冷机具有结构简单、振动部件少、运行寿命长以及可以利用低品质的热源等优点。热声发动机是热声驱动的声制冷机的一个重要部件。目前, 热声线性理论已经相当成熟, 并已用于热声发动机的开发研究, 但热声发动机的声场通常已达到非线性范围,

2006-05-10 收稿; 2006-10-08 定稿

作者简介: 韦克 (1980-), 男, 广西人, 硕士研究生, 研究方向: 热声学。

刘旭 (1977-), 男, 硕士。

陈宇 (1957-), 男, 教授。

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

因此线性理论不适用更深入地研究热声问题,而复杂的非线性理论却难以求得解析解。为了更深入的研究,采用数值计算方法是一种有效的手段。至今已有很多文献强调了热声装置的数值模拟,但大部分的模拟工作是基于准一维的热声近似,很难应用于复杂边界条件。我们首先^[1]将一种完全不同于传统数值积分的方法——格子气方法引入热声发动机的模拟研究,并成功模拟了一个简单的热声发动机,取得了一些有意义的结果。但之前的工作局限于简单的矩形共振腔,本文在之前工作的基础上进一步利用新型12-bit格子气模型研究了变截面的驻波管,细管带共振腔的驻波热声发动机。发现当共振腔相对细管宽度为2.2,板叠相对位置为0.34细管长时,驻波管中的热声振荡振幅达到最大,而这样的计算结果,对共振腔尺寸的优化,用其他模拟计算方法有很少类似的研究。该工作为利用格子气方法研究对于更有实际意义的复杂边界的热声装置打开突破口。

2 计算方法及物理模型

格子气方法是近年来出现的一种新型模拟计算方法^[2,3],它是从玻尔兹曼碰撞模型出发,通过模拟流体粒子的运动和碰撞来模拟一个物理过程。格子气方法把流体所在空间按照特定模型离散为规则的网格,流体粒子只能在离散的网格线上按碰撞规则运动和碰撞,碰撞过程中质量、动量和能量守恒。各微量也为离散值,宏观物理量可以通过对一块区域进行统计平均而求得。格子气方法具有程序实现简单,运算速度快,算法稳定性高等优点,因此在很多研究中均有应用。格子气理论和数值研究表明^[2],格子气自动机方法的模拟结果符合流体力学或热动力学的基本规律。

传统9-bit格子气模型每个格点最多可以有9个粒子,如图1。粒子速率有三种:0,1, $\sqrt{2}$,对应粒子动能有三种0,1/2,1。图2是其模型网络。

用9-bit格子气模型可以引入温度的概

念,从而可以模拟热交换。当处于边界格点附近的粒子与边界温度不同时,边界和粒子可能会发生热交换。若格点温度大于边界温度,则格点上的粒子放热,若格点上的温度小于边界温度,则格点上的粒子吸热。放热通过将 $\sqrt{2}$ 速率粒子变为1速率粒子或将1速率粒子变为0速率粒子来实现,吸热通过将0速率粒子变为1速率粒子或将1速率粒子变为 $\sqrt{2}$ 速率粒子来实现。

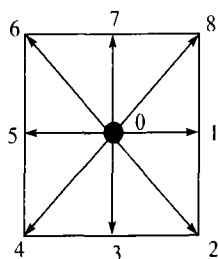


图1 9-bit正方形模型格点

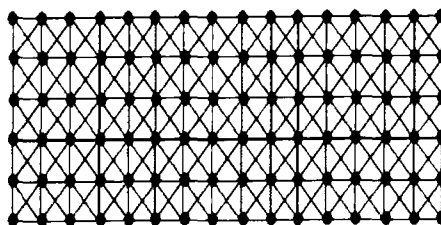


图2 9-bit正方形模型网格

现有的格点类型有:内部格点、滑动边界格点和非滑动边界格点,传统方法是把几种格点按碰撞规则分别编程实现,不仅计算效率低,维护起来也不方便。为了标识边界,提高计算效率,我们引入了虚格点的概念。我们在离散网格边缘外添加一层虚边界,如图3,图中标记

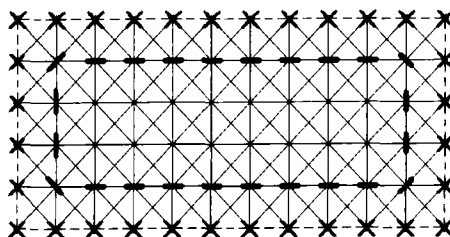


图3 虚格点和边界格点

为 \times 的格点为虚格点。为了简化设计, 我们将边界朝向归结为 4 种: 水平边界 (图中标记为一), 垂直边界 (图中标记为 |), 正斜边界 (图中标记为 \), 反斜边界 (图中标记为 /)。

这样模型中共有 7 种类型的格点。对于这 7 种格点, 我们可以用 3 个二进制为来标识, 因为 3 个二进制位可以表示 8 (2^3) 种类型。现在我们可以用 12 个二进制数 $b_{11}b_{10}b_9b_8b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$ 来表示一个格点的状态, 即一个 12-bit 格子气模型。其中 $b_{11}b_{10}b_9$ 标识格点类型, $b_8b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$ 标识在 9 个方向上是否有粒子存在。这样, 无论对内部格点还是边界格点, 都可以通过统一的算法查规则表来确定状态。利用这种改进的格子气模型方法, 只要增加标记格点的二进制位数, 可以表示任意多种格点。这样, 可以利用格子气模型高效模拟计算同时包含多种格点的混合复杂边界的热声装置, 如模拟计算同时包含刚性固体边界、自由滑移边界、周期性边界以及温度边界等需要特殊处理的格点的热声系统, 而其他的模拟计算方法则是难以实现这类计算的。更进一步的工作可以考虑根据不同类型格点的碰撞规则, 制定一个统一的碰撞规则表, 任意已知类型的格点都可以通过查询这个标准规则表来确定状态, 这相当于为 9-bit 格子气模型建立了统一的计算标准。另外, 其它格子气模型如 FHP, 六边形模型等也可以采用此思想建立标准碰撞规则表, 实现标准高效的模拟计算。

图 4 是我们使用格子气方法模拟的热声发动机物理模型, 是一个两端封闭的系统。靠近左端是热声板叠, 板叠的两端分别是换热器。通过分别设定驻波管壁面和换热器温度, 在板叠上温度梯度超过临界值时, 驻波管中将有热声振荡出现。

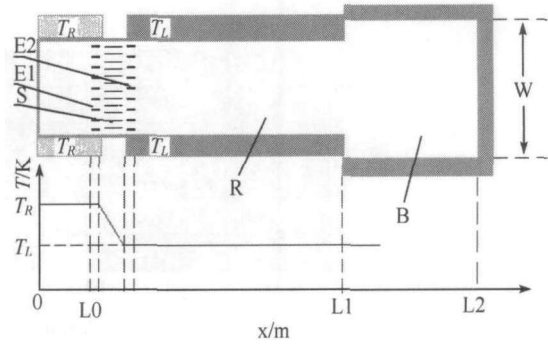


图 4 带共振腔的热声发动机物理模型
S—板叠, E1—热端换热器, E2—冷端换热器,
R—细管, B—共振腔

3 模拟结果

我们计算的目的是为了优化设计实际的热声发动机, 因此在模拟计算中, 主要考虑板叠的位置、长度以及共振腔宽度对热声振荡振幅的影响。主要的模拟参数是: 谐振管总长为 3000 格子单位; 其中细管管长 1000 格子单位, 宽 100 格子单位; 共振腔长 2000 格子单位, 宽 200 格子单位; 热声板叠位于左端 320 格子单位处, 长 60 格子单位; 板叠两端的热交换器长 30 格子单位, 热端计算温度为 2.0, 冷端相对温度为

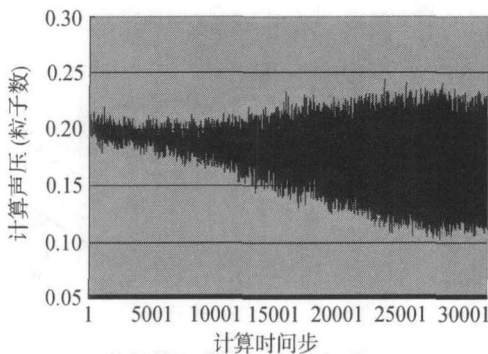


图 5a 计算热声振荡示意

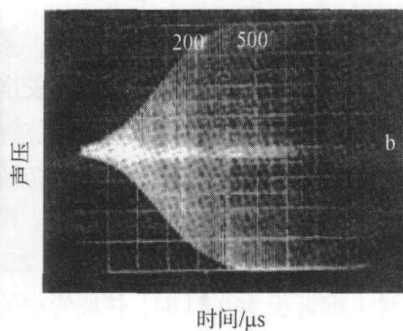


图 5b Wheatley 的热声振荡实验结果

1.33; 格子粒子密度为 1(粒子 / 格)。模拟得到的热声振荡结果如图 5a, 对比Wheatley^[4] 的实验结果 (图 5b), 可以发现定性上是一致的, 这一点也和无共振腔的热声发动机模拟计算结果相对应^[1]。

热声板叠是一个热声发动机的核心部件,

热声板叠的位置和长度对于热声发动机的性能有重大的影响, 因此, 我们研究了带共振腔的条件下, 热声振荡的振幅和板叠位置及长度之间的关系。固定其他参数不变, 改变板叠的位置和长度, 得到的热声振荡振幅关系如图 6 所示。

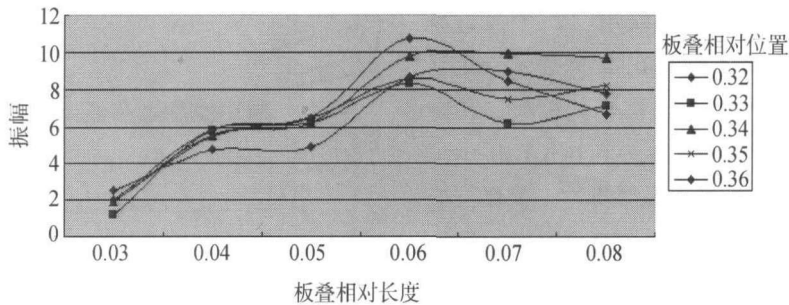


图 6 不同板叠位置下, 声幅随板叠长度的变化曲线

可以看出, 从热端为起点, 板叠位置相对于细管长度为 0.32, 板叠长度相对细管长度为 0.06 时, 热声振荡的振幅要大于其他情况。这是因为细管长度约为 $1/4$ 驻波长, 线性理论认为板叠应位于 $1/8$ 波长处, 但由于非线性等因素, 板叠实际位置要比 $1/8$ 波长略小。当板叠长度大于 0.08 时, 驻波管中有热声振荡出现, 但很快衰减, 不能达到稳态。在实际实验中, 也发现了这种情况。这是由于板叠长度增大, 温度梯度降低, 热致声的声波能量与粘性和热弛豫等耗散能量的竞争的存在, 当热致声的能量不足以克服系统中存在的耗散时, 就维持不了稳定的热声振荡, 但这种情况有待进一步的研究。

共振腔的宽度也是一个重要影响参数, 系统的热声振荡最大振幅不仅和板叠位置、长度有关, 也与共振腔的宽度有关。改变板叠位置和共振腔宽度, 系统热声振荡的振幅如图 7 所示。可以看出, 共振腔的宽度有一个最佳值, 并不是越大越好。当共振腔相对细管宽度为 2.2, 板叠位置相对于细管长为 0.34 时, 驻波管中的热声振荡振幅达到最大。此时板叠的位置位于 $1/8$ 管中驻波波长位置稍左。从图中还可以看

出, 当共振腔宽度逐渐扩大时, 最佳板叠位置也随之向谐振管右端移动, 这是因为共振腔宽度足够大时, 系统相当于 $1/4$ 波长的开口管^[5], 板叠最佳位置相对靠右。因此, 随着共振腔宽度逐渐扩大, 板叠最佳位置也相应向右移动, 且板叠最佳位置相对于共振腔宽度扩大的向右移动速度逐渐减小, 最后板叠最佳位置趋于一个固定值。

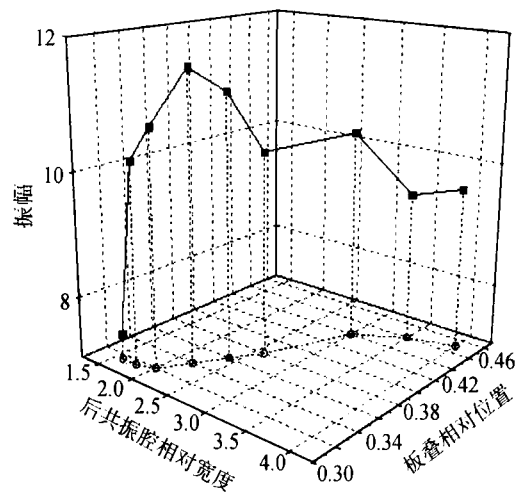


图 7 不同板叠位置和共振腔宽度, 系统声振荡振幅变化图

4 结论

我们成功应用了新型 12-bit 格子气模型, 为使用格子气研究复杂的变边界热声装置奠定了基础。对一个带有共振腔的热声发动机进行了模拟计算, 成功地获得了热声自激振荡, 并研究了板叠位置、板叠长度以及共振腔对热声振荡的影响。计算结果显示, 当共振腔相对细管宽度为 2.2, 板叠位置相对于细管长为 0.34 时, 驻波管中的热声振荡振幅达到最大。优化设计共振腔, 对实际热声发动机的设计有重要意义。但目前还没有见到用其他模拟计算方法的相关研究。我们将本工作的基础上进一步改进方法, 利用格子气研究更复杂的热声问题。

参 考 文 献

- [1] Y Chen, X Liu, X Q Zhang, et al. Thermoacoustic simulation with lattice gas automata, *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(8): 4497-4499.
- [2] Rivet J P, Boon J P. Lattice gas hydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 李元香, 康立山, 陈敏屏. 格子气自动机. 广西: 广西科学技术出版社, 1994.
- [4] Wheatley J, Hofer T, Swift G W, et al. Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with application to heat engines, *Am. J. Phys.*, 1985, 53(2): 147-161.
- [5] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础. 第二版. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [6] Marx D, Blanc-Benon P. Numerical simulation of stack-heat exchangers coupling in a thermoacoustic refrigerator, *AIAA Journal*, 2004, 42(7): 1338-1347.
- [7] 宫瑞婷, 乔五之, 刘克. 声制冷技术, 北京轻工业学院学报, 1997, 15(1): 27-33.
- [8] 陈国邦, 汤珂, 金滔等. 驻波型热声驱动的脉管制冷机研究进展, 低温工程, 2004, (4): 1-10.