

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.015

基于CFD的加热仓风量调节装置

陈嘉宏¹, 沈施佳², 刘红²

(1. 浙江瑞邦智能装备股份有限公司, 浙江嘉兴 314006; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要:针对目前烟熏生产工艺中普遍存在烟熏效率低下的问题,应用CFD技术对烟熏炉加热仓气流场的流动进行建模与分析。基于仿真结果,提出一种进风口风量调节机构,通过在加热仓的适当位置设置可变流量的进风口,可以改善加热仓的气流场分布;通过对该机构的运动学和动力学仿真,确定了各项参数;并设计实验方案,验证仿真结果的准确性以及调节机构对加热仓气流场的改善效果。应用结果表明该风量调节机构改善了烟熏炉加热仓的气流场分布,使烟熏效果更加均匀。该研究提高了烟熏食品的加工效率。

关键词:烟熏生产工艺;计算流体动力学;加热仓;风量调节装置

中图分类号:TS205.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)03-0079-07

Air Volume Regulating Device for Heating Bin Based on CFD

CHEN Jiahong¹, SHEN Shijia², LIU Hong²

(1. Zhejiang Ruibang Intelligent Equipment Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314006, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of low smoked efficiency in the smoked production process, this paper applied the CFD technology in the modeling and analysis of smoke fumigator. Based on the simulation results, it proposed a wind quantity regulating mechanism by setting the inlet air with variable flow in the proper position of heating chamber to improve the flow field distribution of the heating chamber. Through the kinematics and dynamics simulation of the mechanism, the parameters of the mechanism were determined. The experimental scheme was designed to verify the accuracy of the simulation results and the improvement effect of regulating mechanism on the flow field of the heating chamber. The application results show that the air flow regulation mechanism improves the distribution of the airflow field in the smoked furnace, makes the smoked effect more uniform and improves the efficiency of food processing.

Keywords: smoked production process; CFD (computational fluid dynamics); heating chamber; air flux regulator

熏制食品在国内外有着悠久的历史。早在1000多年前,烟熏工艺就作为一种储藏肉制品方法被运用^[1-2]。烟熏可以赋予肉质品特殊的风味,促进发色,防止氧化和腐败变质,使得肉制品更容易储藏。烟熏炉中重要的工作装置为换热器,国内关于换热器的研究及成果比较丰富。鞠红香等^[3]研究了管壳式换热器流动对传热效率的影响;杨红江等^[4]讨论了利用外部换热面肋化的方式设计出紧凑、高效和低阻的低温热管换热器;顾荣利等^[5]对不同流速介质下的多管式换热器过程进行了数值计算;焦凤等^[6]通过传热性实

验得到了3个影响传热的因素;于鹏等^[7]研究了主动传热技术。但是前人对加热仓内流场分布的影响因素的研究相对较少。

施明等^[8-9]针对某类型烟熏炉烟熏过程不同步的问题,已进行了结构改进,并通过FLUENT对加热仓内流场进行模拟仿真,但是其改进的结构仍然存在缺陷:进口处风量和方向不可调节。笔者提出一种加热仓进风口风量调节机构,模拟气流场的分布,并设计实验方案,验证仿真结果的准确性以及调节机构对加热仓气流场的改善效果。

收稿日期:2017-12-13;修回日期:2018-01-16

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究项目(2016C31043)。

第一作者简介:陈嘉宏(1970),男,工程师,浙江瑞邦智能装备有限公司董事,主要研究方向为肉制品加工机械。通信作者:沈施佳(1993),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助分析。E-mail:931437265@qq.com

1 风量调节装置设计

由于加热仓顶部出风口产生的负压,使得烟熏蒸气尚未到达加热仓底部时就从顶部回流出去,所以,需要设计一个使加热仓内流速可调的机构,也就是类似空调出风口的摇摆机构,使室内的温度趋于一致。将所设计的机构命名为进风口风量调节机构,设计草图如图1~4所示。

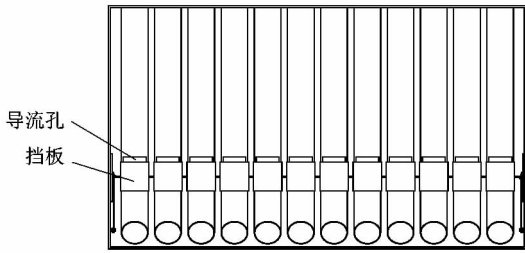
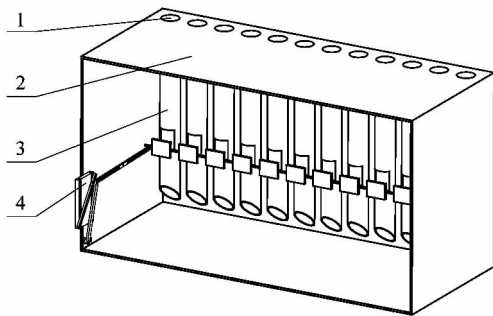


图1 导流管和挡板示意图

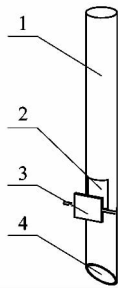
Figure 1 Schematic diagram of deflector and baffle



1—进风口;2—箱体;3—导流装置;4—驱动机构。

图2 加热仓三维结构示意图

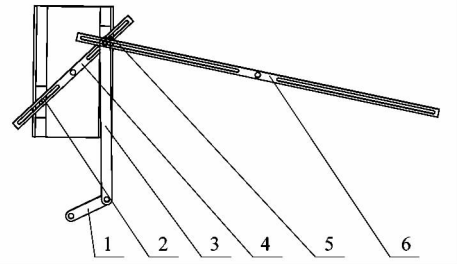
Figure 2 Schematic diagram of three-dimensional structure of heating chamber



1—导流管;2—导流孔;3—挡板;4—出风口。

图3 导流管和挡板三维示意图

Figure 3 Three-dimensional schematic of deflector and baffles



1—原动杆;2—滑块;3—驱动杆;4—传杆;5—滑块;6—传杆。

图4 挡板驱动机构示意图

Figure 4 Schematic diagram of driving mechanism of baffle

图1展示了强制引导烟熏蒸气的导流装置结构。加热仓的长度为4 400 mm,宽度超过3 000 mm,设计原则是尽量避免对原有烟熏炉结构作大的改动,故而设计了导流装置和挡板驱动机构。在加热仓内部导流管合适的高度均匀分布了12个导流孔,每个孔的尺寸为280 mm×280 mm。烟熏蒸气可从导流孔和加热仓底部进入加热仓,为使加热仓内各个位置的流速和流量呈现周期性变化,在每个导流孔上增加了挡板,如图3所示。每块挡板由同一根轴串连,由图4所示的驱动机构带动轴运动,也就是带动挡板作上下运动,改变了导流孔的开口大小,从而获得较为均匀的加热仓流场分布。

图4中原动杆1连接减速装置,减速装置以行星轮减速机为主体,它可以实现同轴减速,简化减速装置内部的结构。选用减速比为1:50和1:10的行星轮减速机各一个,将整个连杆机构的周期确定为10 s。导流孔上的开口打开闭合一次,可使进入加热仓内的烟熏蒸气形成的流场达到动态平衡,使加热仓内部的流场更加均匀。在不考虑图4中滑块2连接的机构和传杆6的情况下,可将其结构简化为如图5所示形式。

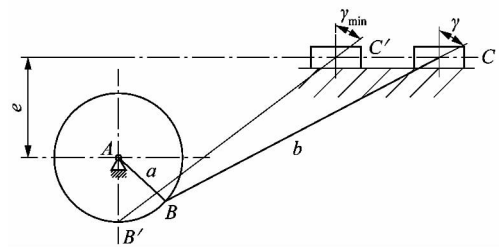


图5 机构示意图1

Figure 5 Schematic diagram 1

在进风口风量调节机构的设计中,将 x 作为设计变量,根据加热仓内部的空间结构,设计滑块行程 $H =$

300 mm,行程速比系数 $K = 1.1$,并假设机构传力性能最优时的 x 值,使得最小传动角 γ_{\min} 为最大,从而计算出图 5~6 所示机构的各个参数。

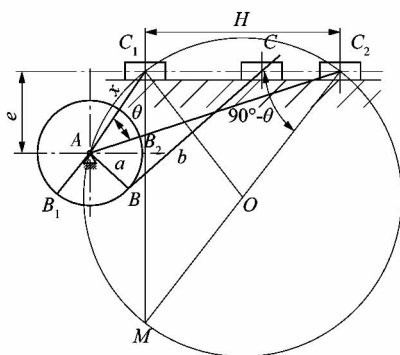


图 6 机构示意图 2

Figure 6 Schematic diagram 2

1) 最小传动角 γ_{\min}

图 5 中的 AB 为主动件曲柄,长度设为 a , BC 为连杆,长度设为 b ,偏心距设为 e , x 是滑块在整个滑动过程中滑块距离曲柄旋转中心的距离。传动角 γ 愈大,对机构的传动性能就更加有利。该风量调节机构的主动件为曲柄,随着其位置的变化, γ 值亦不同,则最小传动角 γ_{\min} 将出现在曲柄与滑块滑动轨迹相互垂直的位置,其值为:

$$\gamma_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{a+e}{b} \right). \quad (1)$$

2) x 和最小传动角 γ_{\min} 的关系

极位夹角为 $\theta = 180^\circ \left(\frac{K-1}{K+1} \right) = 6^\circ$ 。根据已知条件,作出图 6,曲柄的支点在圆周上,它的位置直接决定了传力性能,现设 $AC_1 = x$, x 作为设计变量,一旦确定了 A 点的位置, a , b 和 e 也就确定了。在 $\triangle AC_1C_2$ 中,有 $b-a=x$,应用余弦定理和正弦定理可分别得出:

$$H^2 = (b-a)^2 + (b+a)^2 - 2(b-a)(b+a)\cos\theta = x^2 + (x+2a)^2 - 2x(x+2a)\cos\theta; \quad (2)$$

$$\frac{H}{\sin\theta} = \frac{a+b}{\sin(\angle AC_1C_2)} = \frac{x+2a}{e/x}; \quad (3)$$

$$e = \sin\theta(x^2 + 2ax)/H. \quad (4)$$

将式(2)~(3)代入式(5), γ_{\min} 仅为 x 的函数,则可求得

$$\gamma_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{e+a}{x+a} \right). \quad (5)$$

3) 设计变量 x 的取值范围

变量 x 的寻优区间的起点在 C_1 处,由于该机构需要驱动左右两侧的挡板,所以该风量调节机构必然为

偏心设置,即 $x_{\min} > 0$ 。

变量 x 的寻优区间的终点在 C_2 处:

$$x_{\max} = \frac{H}{\tan\theta} = \frac{300}{\tan(6 \times \pi/180)} \approx 5000 \text{ mm}.$$

由于加热仓内部高度也远远不到 5 000 mm,所以 x 的最大取值就是烟熏炉加热仓的高度,即 $x_{\max} = 2000 \text{ mm}$ 。

在 x 的取值范围内,根据式(2)~(4)可求得 x 对应的 γ_{\min} 。利用一维寻优最优化技术黄金分割法,可以求得 γ_{\min} 取极大值时的 x 。将 γ_{\min} 最大时的 x 代入式(2)~(3),可以求出 a , e 和 b 。

经计算,当 $x = 443.6 \approx 450 \text{ mm}$ 时, γ_{\min} 的最大值为 9° ,此时,曲柄 $a = 150 \text{ mm}$,连杆 $b = 600 \text{ mm}$,偏心距 $e = 120 \text{ mm}$ 。

笔者采用 SolidWorks Motion 对加热仓改进结构进行运动学仿真,将仿真结果列表输出并作为有限元仿真中的前处理边界条件添加到后期的 CFD 仿真中。在 10 s 的运动周期中,选择 0.02 s 的间隔进行逐点输出。

2 风量调节装置 CFD 分析

添加风量调节机构之后,加热仓整体结构与原来相比并没有很大的变化,仅仅是在两侧添加了导流管和挡板,加热仓内部可以看作若干个相同单元并排组合而成^{[8]180},只需选取其中一个单元建立模型即可。加热仓的工作状态分为空仓和满仓 2 种状态,由于食物的大小和形状各异,满仓状态的仿真建模比较困难,而空仓状态不仅建模容易,而且能很好反映气流场的变化情况,因此后面的分析将考虑空仓状态。加热仓内部简化后的结果如图 7 所示,网格划分效果如图 8 所示。

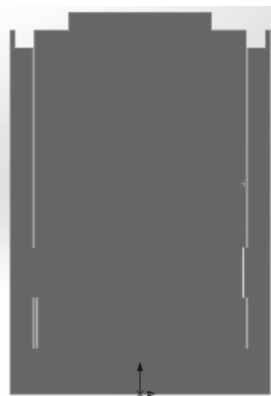


图 7 加热仓空仓二维结构示意图

Figure 7 Schematic diagram of heating chamber two-dimensional structure

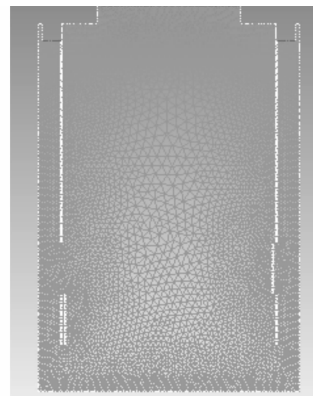


图 8 加热仓空仓网格示意图

Figure 8 Schematic diagram of heating chamber grid positions

在 FLUENT 软件中选择标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型进行计算, 计算域选用空气流体域, 设置 $93\text{ }^\circ\text{C}$ 时空气的密度为 1.29 kg/m^3 , 黏性系数为 $21.7 \times 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$; 左右进风口设置为速度入口边界, 风速为 20 m/s ; 中间出风口处设置为压力出口边界, 压力为 $101\ 325\text{ Pa}$, 即表压为 0 Pa ; 导流孔挡板边界和加热仓内边界都设置为绝热壁面, 将该模型设置为瞬态模型 Transient, 周期性循环的边界条件; 最后, 设置收敛条件为所有方程的残差的绝对值小于 1.0×10^{-4} 。

由于该模型是一个瞬态模型, 烟熏炉加热仓内部的流场随着时间的变化而发生周期性改变, FLUENT 软件可对模型的仿真计算结果做动态输出。图 9~10 就是笔者分别以风速和动压为研究对象, 对流体域在以上设置条件下仿真计算而输出的云图。

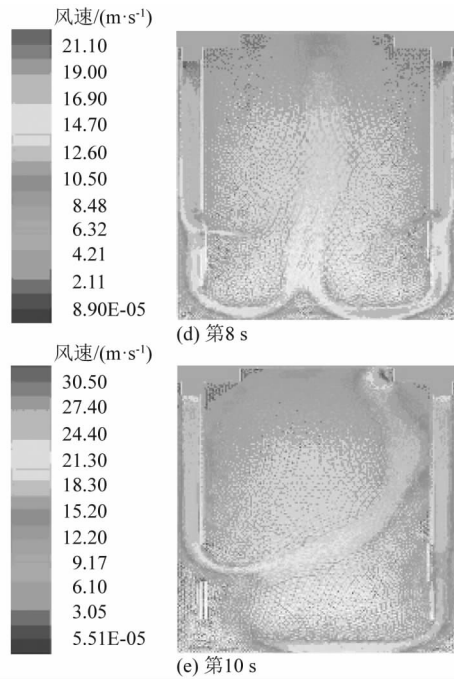
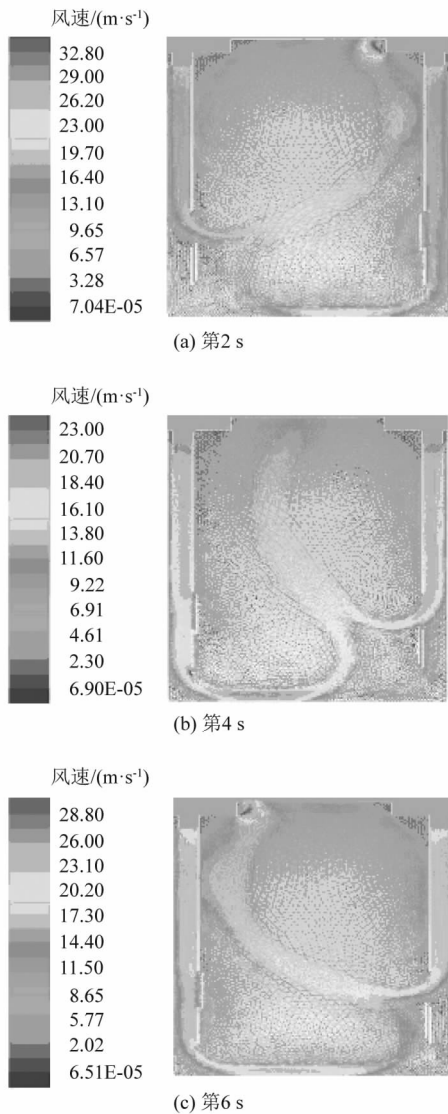
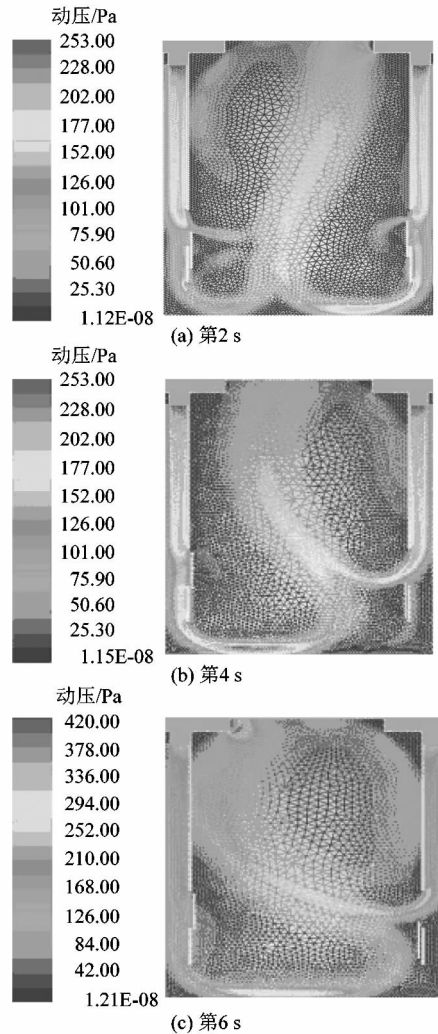


图 9 风速云图

Figure 9 Cloud map of wind speed



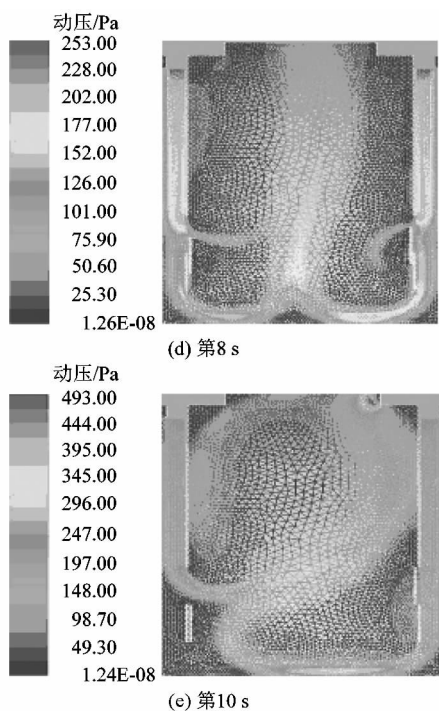


图 10 动压云图

Figure 10 Cloud map of dynamic pressure

对比 5 组同一时刻的风速和动压云图,发现两者的变化趋势几乎完全相同,这与 $P = 0.5 \times \rho \times v \times v$ 相吻合(ρ 为密度, v 为速度)。以 10 s 为一个周期,如果将加热仓内部的食物蒸煮区域分成左上、右上、左下、右下 4 个区域,则每个区域都经历了进风量由少到多,再由多到少的一个过程,此过程是一个类正弦变化。这符合设计初衷,使得加热仓内部每个区域的食物尽量均匀的蒸煮。

3 实验比较分析

3.1 实验方案设计

实验是在烟熏炉加热仓空仓状态下进行动态分解的风循环测量,将实验获得的实验数据和加热仓空仓的仿真结果进行对比分析,以验证加热仓风量调节机构的改进效果。通过对几个关键点的压强的监测,来反映烟熏炉加热仓内的总体流场分布和机构改进之前的区别。

测量时,选择烟熏炉加热仓横向方向上的某一平面为 XY 面,根据仿真时的食物摆放,选取该平面上的 9 个点位置进行测量,9 个点的位置分别为(单位为 mm): $(-400, 400)$, $(0, 400)$, $(400, 400)$, $(-400, 1000)$, $(0, 1000)$, $(400, 1000)$, $(-400, 1600)$, $(0, 1600)$, $(400, 1600)$ 。所选的 9 个点均布在加热仓同

一个出风口所在的截面上,如图 11~12 所示。实验中需要用到侧风仪、风压力传感器、万用表和直流稳压电源等仪器。

本实验通过风压力传感器输出 0~5 V 电压,再将电压转换为相应的 0~1 000 Pa 的压力。进行动态分解,即根据循环周期将导流孔长度分为 30 份,进程从 0 mm 到 280 mm,每间隔 20 mm 观测一次;回程从 280 mm 到 0 mm,同样间隔 20 mm 观测一次,具体是对 9 个观测点进行测量。每个点测 3 次,列表取平均值,由于在动态分解测量时,进程和回程在同一个位置,获得的数据将统一处理,所以,在现场实验时,只需进行 15 组的测量即可,再根据数据绘制 9 个实验选点的风压-周期行程曲线;同时,将 FLUENT 仿真结果的风压-时间曲线转化为风压-周期行程曲线,对比两者,从而判定仿真结果的可靠性和改进机构的优越性。

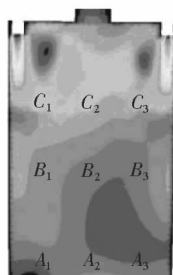


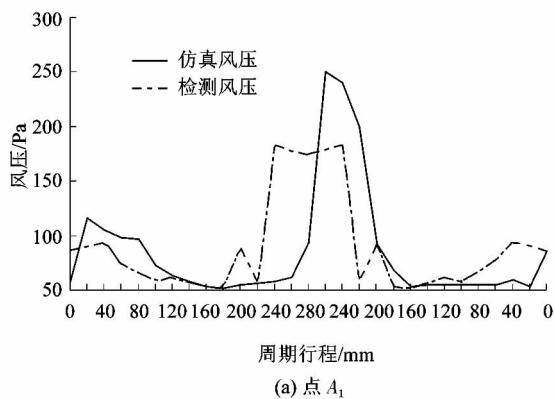
图 11 实验选点
Figure 11 Location map



图 12 加热仓内检测布点
Figure 12 Point map for detection in heating chamber

3.2 实验数据分析

机构改进后对观测点的数据列表分析。根据前述实验方案可以得到每一个点的风压-周期曲线,并与仿真的风压-周期行程曲线进行对比,结果如图 13 所示。



(a) 点 A₁

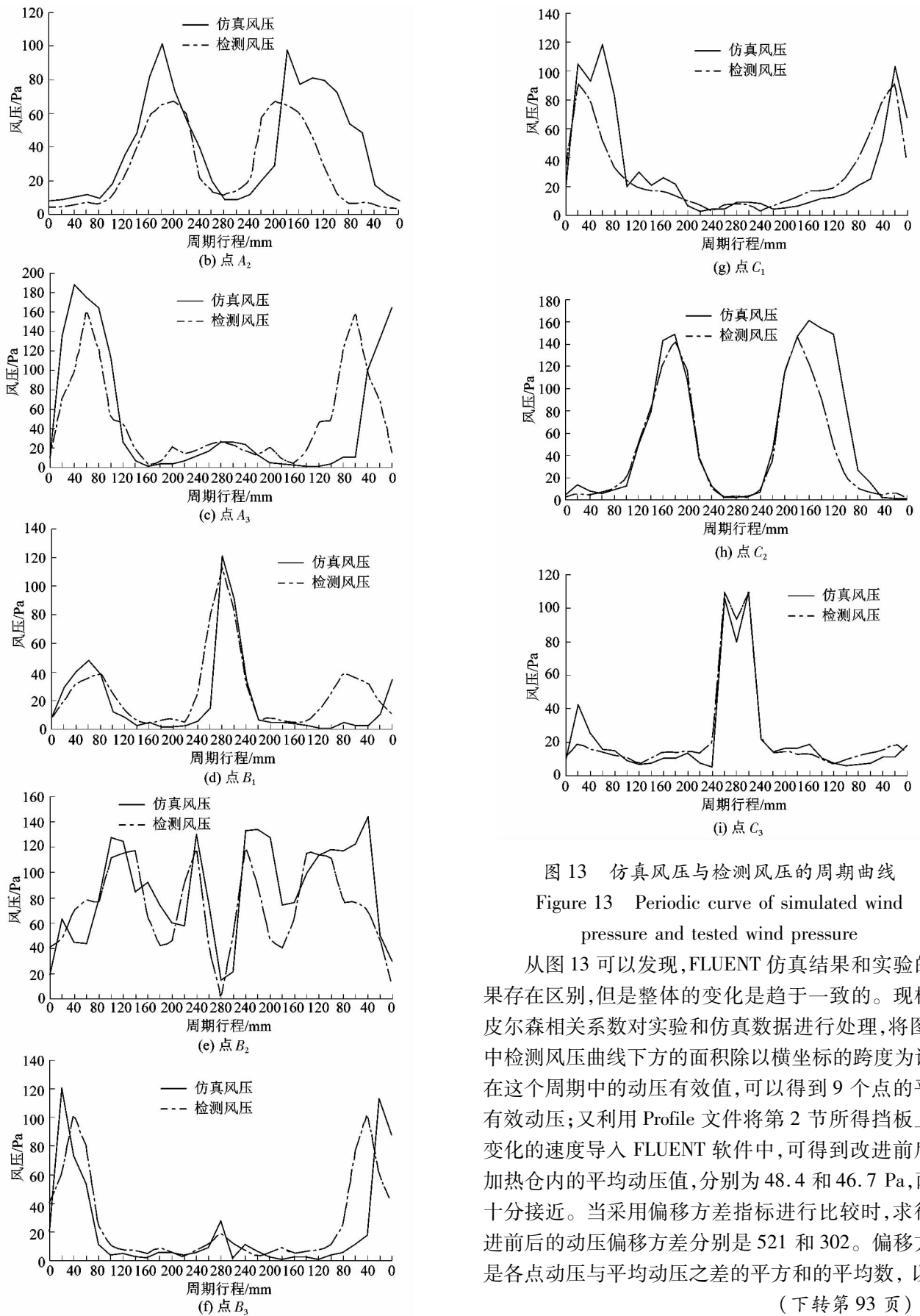


图 13 仿真风压与检测风压的周期曲线

Figure 13 Periodic curve of simulated wind pressure and tested wind pressure

从图 13 可以发现,FLUENT 仿真结果和实验的结果存在区别,但是整体的变化是趋于一致的。现根据皮尔森相关系数对实验和仿真数据进行处理,将图 13 中检测风压曲线下方的面积除以横坐标的跨度为该点在这个周期中的动压有效值,可以得到 9 个点的平均有效动压;又利用 Profile 文件将第 2 节所得挡板上沿变化的速度导入 FLUENT 软件中,可得到改进前后的加热仓内的平均动压值,分别为 48.4 和 46.7 Pa,两者十分接近。当采用偏移方差指标进行比较时,求得改进前后的动压偏移方差分别是 521 和 302。偏移方差是各点动压与平均动压之差的平方和的平均数,以风

(下转第 93 页)