烹饪机器人双压强火力数值计算与实验

闫维新[1,2], 马文涛[1,2], 付 庄[1,2], 赵言正[1,2], 周晓燕[3]

(1. 上海交通大学 机器人研究所, 200240 上海, xiaogu4524@163.com;
2. 机器人技术与系统国家重点实验室, 150001 哈尔滨;3. 杨州大学 旅游烹饪学院, 225009 江苏 杨州)

摘 要: 为实现烹饪机器人无级火力强度调节,进行鼓风式燃气燃烧器的双压强火力数值计算与实验.建立燃烧器引射管的基本方程、组分输运方程和湍流方程等数学模型;应用流体力学分析软件FLUENT建立引射管二维轴对称气体运动模型,确定了边界条件、初始状态和有限速率化学反应模型;根据燃烧器喷嘴中心高压空气压力值对可燃气体速度提升和引射吸入空气量的变化曲线,得出特定燃气热负荷下高压空气最佳匹配压力值.将该火力强度双压强控制方法应用于烹饪机器人上,完成高精度的火力热负荷闭环控制,并将常压(2.0 kPa)燃气的热功率提高到18 kW.

关键词: 烹饪机器人;火力系统;双压强;鼓风式燃气燃烧器
中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)05-0099-07

Numerical methods and experiments of dual-pressure fire system for cooking robot

YAN Wei-xin[1,2], MA Wen-tao[1,2], FU Zhuang[1,2], ZHAO Yan-zheng[1,2], ZHOU Xiao-yan[3]

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiao Tong University, 200240 Shanghai, China, xiaogu4524@163.com;
2. State Key Laboratory of Robotics and System, 150001 Harbin, China;
3. School of Tourism and culinary Science, Yangzhou University, 225009 Yangzhou Jiangsu, China)

Abstract: To realize adjusting the fire intensity of cooking robot continuously, a numerical calculation and experiments of dual-pressure fire system for blast gas combustor were carried out. Firstly, the basic equations of fluid mechanics, the equations of component transport and the equations of turbulence for the induction tunnel of combustor were established. Secondly, the CFD software FLUENT was utilized to build the two dimensional axisymmetry gas-kinetic model for the induction tunnel, to define the boundary condition, the initial state and the finite-rate chemical reaction model. Thirdly, the control method of dual-pressure fire intensity was obtained. According to the variation curve of pressure value of high-pressure air in the nozzle central axle with the accelerating value of combustible gas and quantity of air imbibed by ejection, the optimal matched pressure value of high-pressure air based on the specific heat load of combustible gas was obtained. The method was used on the cooking robot, which showed that the fire intensity feedback control could be achieved precisely and the power of common pressure (2.0 kPa) combustible gas combustor could be up to 18 kW.

Key words: cooking robot; fire system; dual-pressure; blast gas combustor

中式菜肴烹调方法多样,操作复杂.中式菜肴烹饪机器人的出现,迎合了中国烹饪工业化的需求.烹饪机器人的火力强度精确控制是烹饪机器人设计的一大难点,烹饪过程中的火力强度标准化是中式菜肴标准化的关键和基础.

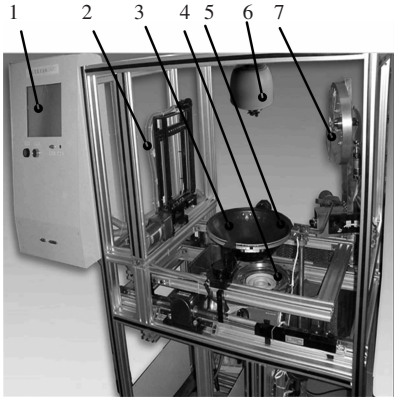
本文介绍了应用于一种鼓风式燃气燃烧器的双压强火力系统,它能够精确地控制常压燃烧器

收稿日期: 2009-11-08.
基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目(SKLRS-2010-ZD-06);国家自然科学基金资助项目(61075086;60875058);国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA041601; 2007AA041602; 2007AA041603).
作者简介: 闫维新(1978—),男,博士研究生;
赵言正(1965—),男,教授,博士生导师.

的热负荷,是实现火力控制数字化和标准化的关键. 首先对火力系统总成建模仿真,研究了通过控制燃气和提速空气压力的方法来控制燃烧的热负荷和一次空气匹配,实现了烹饪机器人的火力强度的无级控制和火候的高精度控制.

1 自动烹饪机器人

图 1 所示为中式菜肴自动烹饪机器人的样机,它能够根据指令自主地完成中式菜肴烹饪. 它由人机界面、投料机构、火力系统、锅具动作机构、中间出料机构、火候视觉模块和盖锅机构组成. 烹饪机器人各模块的介绍可参见文献[1], 火力系统的燃烧器是为多功能中式菜肴自动烹饪机器人定制的一款高热负荷、低燃气压力的鼓风引射式燃气燃烧器,如图 2.



1—人机界面; 2—投料机构; 3—锅具动作结构;4—火力系统; 5—中间出料机构; 6—火候视觉模块; 7—盖锅机构

图 1 中式菜肴自动烹饪机器人

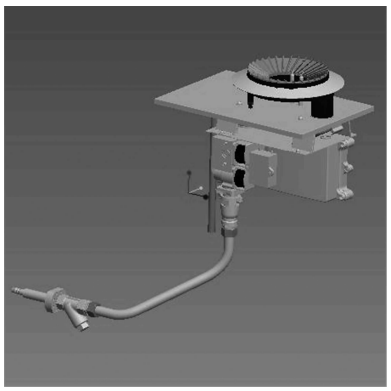
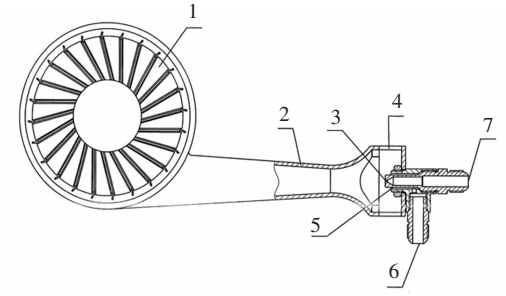


图 2 火力系统燃烧器总成

2 烹饪机器人火力系统

2.1 火力系统燃烧器

火力系统燃烧器总成由 4 部分组成:燃烧器部分、阀门部分、控制执行部分和管路. 燃烧器的作用是将空气和燃气按一定比例混合,完成燃烧. 阀门部分分主阀门和比例阀门,主阀门用于燃气通断,比例阀门用于可燃气体线性输出. 控制执行部分负责整个火力系统的无级热负荷控制. 管路用于可燃气体或空气的输运. 燃烧器由 3 部分组成:火盖、引射管和喷嘴,见图 3. 燃烧器的燃烧过程是:高能量燃气和低能量空气按照一定比例、压强从喷嘴进入引射管,燃气引射空气,在引射管内均匀混合,使得混合气体形成压力克服引射管通道中的阻力损失,并且在火盖的火孔处成为具有一定速度的稳定混合气体,遇明火点燃,与周围空气混合,使燃气完全燃烧[2-3]. 燃气喷口均匀分布在空气喷口外侧四周(如图 4),由空气入口输入高速空气,它和燃气经过空气喷口和燃气喷口同时进入引射管,形成负压,在负压作用下低压的燃气被加速,大量空气从第一进风口快速进入,补充二次空气,最终在引射管内形成均匀混合、高流速、高热负荷的可燃混合气体.



1—火盖; 2—引射管; 3—空气喷口; 4—第一进风口; 5—燃气喷口; 6—燃气入口; 7—空气入口

图 3 燃烧器示意图

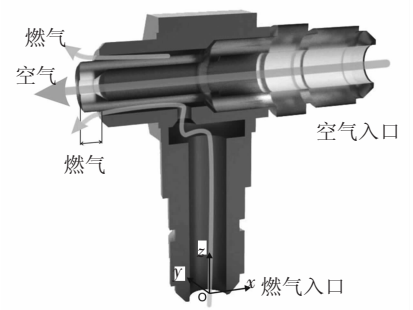


图 4 燃烧器喷嘴示意

空气和燃气分别通过喷嘴输送到引射管内再不发生相互混合. 气体通过喷嘴后压强会发生变化,压强变化可以由 Bernoulli 方程求出:

$$\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_{\mathrm{LT}}. \quad (1)$$

式中,z 轴选铅垂向上方向为正方向,h_{LT} 表示通过喷嘴单位质量流体的平均机械能损失. 对于等熵流动,气体流过喷口处的流速为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}. \quad (2)$$

κ 为等熵指数,$\kappa_{\mathrm{air}} = 1.4$,甲烷的 $\kappa_{\mathrm{CH_4}} = 1.315$(15.6 ℃),$R$ 为气体常数,$R_{\mathrm{air}} = 287\ \mathrm{N \cdot m/kg \cdot K}$, $R_{\mathrm{CH_4}} =$

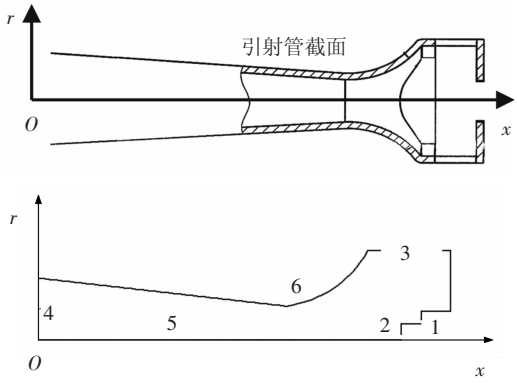
518.3 N·m/kg·K，通过喷口的质量流量(kg/s)为

$$q_m = p_1 S_2 \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}\frac{1}{RT_0}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]}. \tag{3}$$

由式(1)~(3)计算出空气和燃气通过喷嘴到达引射管入口处时的气体压强、流速和质量流量.

2.2　气体运动分析建模

燃气和空气在引射管内混合可以近似认为是一个二维轴对称问题，首先建立引射管柱坐标系 $Or\theta x$. 坐标原点 O 位于引射管出口截面的中心处，沿喷嘴的轴线向内为 x 方向，沿喷嘴截面的径向向外为 r 方向，沿喷嘴截面的圆周为 θ 方向. 对于二维轴对称问题：$v_\theta = 0$，$\partial/\partial\theta = 0$，所以只需要研究其中一个平面上的流体运动即可，如图 5 所示. 对引射管气体运动分析建模需要建立流体力学基本方程组、组分输运方程和湍流模型，然后设定边界条件.



1—燃气入口；2—空气入口；3—空气引射入口；
4—引射管出口；5—对称轴；6—固壁

图 5　引射管柱坐标系示意图

2.2.1　流体力学基本方程组

流体力学的基本方程组包括连续性方程、运动方程、能量方程和状态方程，对于二维轴对称问题，在柱坐标下，连续性方程(质量守恒方程)：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0. \tag{4}$$

式中，x 为轴向坐标，r 为径向坐标，v_x 是轴向速度，v_r 是径向速度.

运动方程(动量守恒方程)：

在轴向，

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_x v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x}\right)\right] + F_x; \tag{5}$$

在径向，

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r}\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right] - 2\mu\frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla\cdot\vec{v}) + F_r. \tag{6}$$

式中，F_x 为轴向外体力，F_r 为径向外体力，且

$$\nabla\cdot\vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}.$$

能量方程(能量守恒方程)：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla\cdot(\vec{v}\rho E + p)) = \nabla\cdot(k_{\text{eff}}\nabla T - \sum_j h_j\vec{J}_j + \bar{\bar{\tau}}_{\text{eff}}\cdot\vec{v}). \tag{7}$$

k_{eff} 是有效传导率，$\bar{\bar{\tau}}_{\text{eff}}$ 是有效偏应力张量，$\vec{J}_j$ 是组分 j 的扩散通量，$E = h - p/\rho + v^2/2$，对于理想气体，显焓 h 的定义为：$h = \sum_j Y_j h_j$(Y_j 是组分 j 的质量分数，$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^{T} c_{p,j}\mathrm{d}T$，$T_{\text{ref}}$ 是 298.15 K). 方程(7)的右边三项分别代表由于传导、组分扩散和粘性耗散引起的能量传递.

状态方程为

$$\rho = P/((R/M_\omega)/T). \tag{8}$$

式中，P 为绝对压强，$R = 8.31$ J/(mol × k) 是普适气体常数，M_ω 是气体平均分子量.

2.2.2　组分输运方程

除流体力学基本方程，气体混合问题还要求解组分输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}Y_i) = -\nabla\cdot\vec{J}_i \tag{9}$$

式中：Y_i 为组分 i 的质量分数，$\vec{J}_i$ 为由于浓度梯度引起的组分 i 的扩散通量，对于湍流：$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \mu_t/(Sc_t))\nabla Y_i$(式中 $D_{i,\text{m}}$ 是组分 i 在混合气体中的扩散系数，Sc_t 为 Schmidt 数，$Sc_t = \mu t/\rho D_t$，其中 μ_t 是湍流粘性系数，D_t 是湍流扩散率).

2.2.3　湍流模型

本文使用雷诺(Reynolds)平均 N-S 方程(RANS)进行数值计算，首先将满足动力学方程的湍流瞬时运动分解为平均运动和脉动运动两部分，然后把脉动运动部分对平均运动的贡献通过雷诺应力项来模化，也就是通过湍流模型来封闭雷诺平均 N-S 方程使之可以求解. 雷诺平均 N-S方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u'_i u'_j}).$$

式中，$-\rho\overline{u'_i u'_j}$ 是雷诺应力，由 Boussinesq 假设确定，

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij},$$

μ_t 是湍流粘性系数，由湍流模型确定. 在标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中，湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 由式(10)、(11)确定：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M, \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}. \tag{11}$$

式中：G_k 为由平均速度梯度而产生的湍流动能，在 Boussinesq 假设下，$G_k = \mu_t S^2$，(S 是平均应变率张量的模数)；G_b 是由浮力产生的湍流动能，在本问题中忽略；Y_M 为可压缩湍流中由于脉动膨胀产生的总体耗散率，$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$，($M_t$ 是湍流马赫数，定义为：$M_t = (k/a^2)^{1/2}$，$a \equiv (\gamma RT)^{1/2}$ 是声速)；σ_k 和 σ_ε 是 k 和 ε 的湍流普朗特(Prandtl)数；μ_t 为湍流粘性系数，$\mu_t = \rho C_\mu(k^2/\varepsilon)$；常量 $C_\mu = 0.09$，$C_{1\varepsilon} = 1.44$，$C_{2\varepsilon} = 1.92$，$\sigma_k = 1.0$，$\sigma_\varepsilon = 1.3$.(这些常量是从对空气和水的基本湍性剪切流的实验中得来的，包括均匀切变流和衰减的各向同性网格湍流，对于壁面约束和自由剪切流在很大范围内都适用.)

2.2.4 边界条件

图 5 引射管柱坐标系中数值为仿真分析边界条件：

1) 空气入口为压力入口边界条件，表压为 28.28 kPa，温度为室温，组分质量分数为 100% 空气；

2) 燃气入口为压力入口边界条件，表压为 1.88 kPa，温度为室温，组分质量分数为 100% 甲烷(CH_4)；

3) 空气引射入口为压力入口边界条件，表压为 0 Pa，温度为室温，组分质量分数为 100% 空气；

4) 引射管出口为压力出口边界条件，表压为 0 Pa，温度为室温，组分质量分数为 100% 空气；

5) 对称轴为轴对称边界条件，法向速度为 0，所有物理量的法向梯度都为 0；

6) 其余为固壁边界条件，满足无滑移条件和绝热壁条件，即切向速度为 0 和温度的法向梯度为 0.

2.3 引射管仿真

空气和燃气在引射管内混合的物理过程可以通过求解如前所述的流体力学基本方程组(4)~(8)和组分输运方程(9)并结合给定的出口和入口边界条件和流场初始条件进行数值模拟，采用模型为[4-5]有限速率化学反应模型，它是用于求解反应物和生成物输运组分方程，从而定义化学反应机理. 此模型适用于预混燃烧、局部预混燃烧和非预混燃烧. 选择 5 种主要的化学反应：CH_4 和 O_2、CO 和 O_2、N_2 与 O_2 和 CO、N_2 与 O_2 和 CO_2、N_2 和 O_2，设定边界条件开始迭代求解，得到不同燃气压力下，出口处空气燃气比值随喷嘴空气入口压力变化曲线[6].

在图 5 中，当燃气入口处燃气(CH_4)压力为 2.0 kPa，空气入口处压力 30 kPa 时，使用公式(2)和(3)分别得到燃气喷口和空气喷口的压力分别为 1.88 kPa 和 28.28 kPa，将其作为仿真的边界条件完成计算仿真. 从图 6(a)(甲烷质量分数分布)可以看出，燃气(CH_4)和空气通过喷口进入引射管，在喷嘴出口处形成湍流射流，并且与引射管第一进风口快速进入的大量补充的二次空气充分混合，在引射管尾部，也就是图 5 中的边界 4 中混合均匀. 由图 6(b)(密度分布图和绝对压强分布图)可以看出，在引射管内高速空气进入引射管，并形成低压，这个低压可以加速可燃气体. 并且由图 6(c)可以看出，引射管末端形成了剩余压力，它可以克服气流在燃烧器前端的阻力损失，使得可燃的混合气体在火盖出口处达到必要的速度，保证整个燃烧器的稳定运行. 图 6(d)的速度矢量图显示了进入引射管内的高速空气形成的负压大大加速了可燃气体，形成了较高流速的可燃混合气体，提高可燃气体流量亦提高了燃烧器的热负荷.

2.4 双压强控制策略

双压强火力强度控制的核心就是根据燃烧器喷嘴中心高压空气压力值对可燃气体速度提升和引射吸入空气量的变化曲线，得出特定燃气热负荷下高压空气最佳匹配压力值，即通过控制喷嘴前的压力和打气泵输出气压的匹配关系，达到无级火力强度控制. 单个喷嘴输出的热负荷 q(MJ/h)是表征火力强度的物理量，计算公式如下[7]：

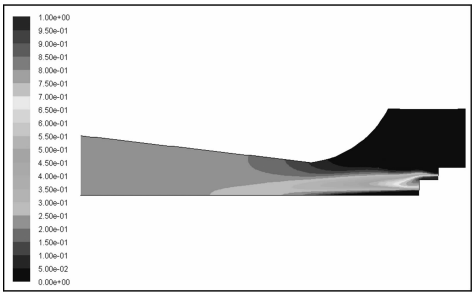
$$q = 0.003\,44 \times \varepsilon \times \mu \times d_g^2 \times \sqrt{\frac{H}{S}} \times H_L \times \frac{273+15}{273+t} = L \times H_L \times \frac{273+15}{273+t}. \tag{12}$$

式中，ε 是流体的膨胀校正系数，(低压燃烧器该值

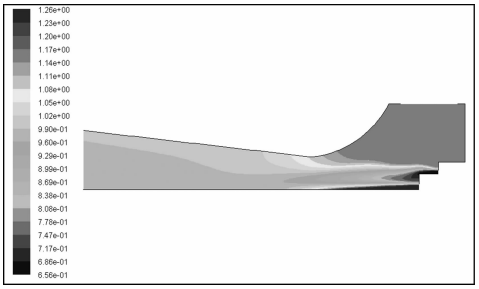
取 1)，μ 是喷嘴的流量系数，它和喷嘴的结构形式、尺寸等有关，一般在 0.7 ~ 0.8，d_g 是喷嘴的直径(mm)，H 是喷嘴前的压力(Pa)，S 是燃气的相对密度，H_L 是燃气的低热值(MJ/Nm^3)，L 为燃气流量，t 是环境温度.

烷烃类燃气燃烧时所需的单位最小空气量[7]3-5：

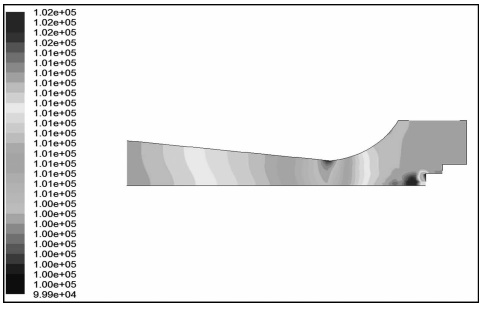
$$V_O = 2.68 \times 10^{-4} H_L. \quad (13)$$



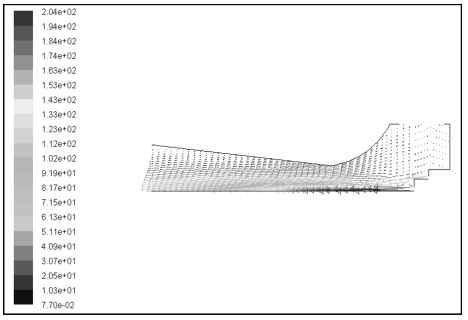
(a)甲烷质量分数分布图



(b)混合气体密度分布



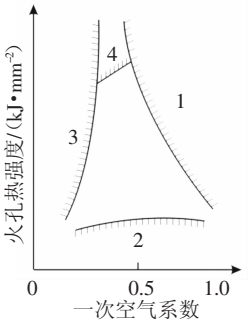
(c)混合气体压强分布



(d) 混合气体速度

图 6　仿真结果

燃烧必须具备的条件是燃气中的可燃成分和空气中的氧气需按一定比例成分子状态混合. 燃烧状态与一次空气系数 a' 和过剩空气系数 a_V 密切相关，它们表征了燃气和空气的比例关系. 对于部分预混燃烧的大气式燃烧器，燃气在一定压力和流速下产生负压吸入一次空气，然后与空气混合进入火盖完成燃烧，一次空气系数 a' 的大小直接影响燃烧的工况(如图 7)，它也是衡量燃烧器性能重要指标之一[8]. 实际空气供给量 V_F 与理论空气需要量 V_0 之比为过剩空气系数 a_V[9]，在实际燃烧过程中正确的 a_V 值十分重要. a_V 过小燃气的化学能不能充分转换；a_V 过大，烟气体积增大，增加了排烟热损失，降低了燃烧器的热效率[10]. 本文涉及的烹饪机器人燃烧器一次空气系数 a' 为 0.9 ± 0.05，过剩空气系数 a_V = 1.5.



1—脱火区；2—回火区；3—光焰区；4—一氧化碳极限区

图 7　常压民用大气式燃烧器燃烧特性曲线

图 8 是通过引射管气体运动模型仿真得到的不同燃气压力下的出口处空气燃气比值随喷嘴空气入口压力变化曲线，通过控制燃烧器喷嘴前的燃气压力来控制流量从而控制相应的输出热负荷根据式(12)，通过公式(13)算出燃烧所需的空气燃气质量比，得到引射管出口处空气燃气质量比最佳区域范围(图 8 中的阴影部分)，然后控制喷嘴处空气压力，使得引射管出口处空气燃气质量比落在最佳区域内，此时的燃烧状况即为最佳状况.

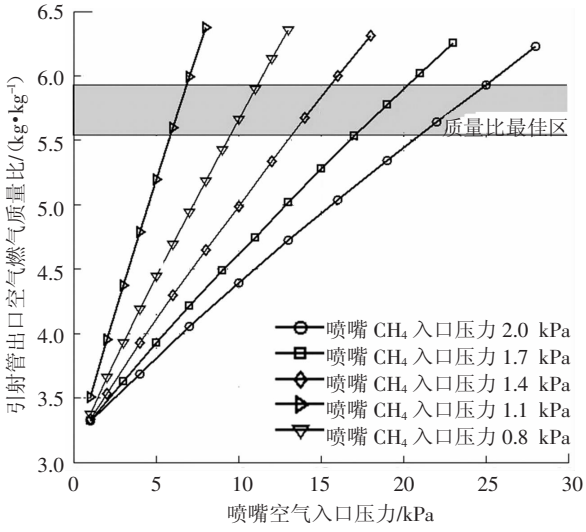


图 8　不同 CH$_4$ 压力时引射管出口质量比

图 9 为双压强燃气热负荷控制流程框图，本控制系统选用 TI 公司 TMS320LF2407A 作为处理器，选用 Honeywell 公司的 AWM3000 作为流量传感器.

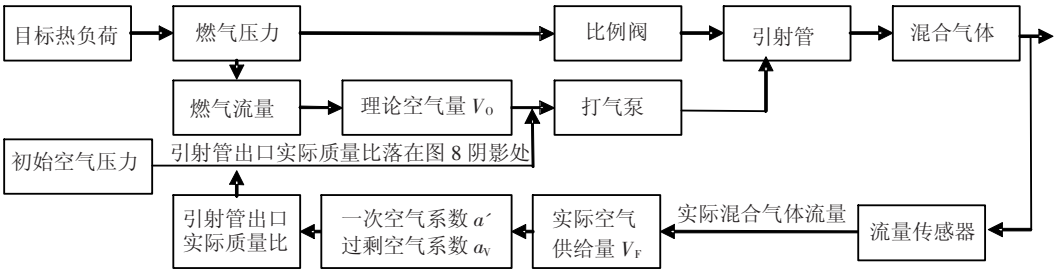


图 9 双压强控制流程框图

3 实 验

配备双压强火力系统的烹饪机器人于 2006 年 3 月通过鉴定,期间邀请多位中国菜肴烹饪大师进行菜肴评分. 鉴定过程中,烹饪机器人完成了对火力精度要求极高的菜肴,包括水晶虾仁、宫爆鸡丁、糟香鱼柳和波罗咕噜肉等. 2008 年烹饪机器人火力系统通过了国家燃气相关质检部门安全及性能监测,检测过程中对燃烧的每一种典型热负荷的火力热负荷同档位重复控制精度和同档位燃烧过程中热负荷变换范围进行了多次检验,检验报告概要如表 1.

检验条件:检验依据 CJ/T28 – 2003; 燃气种类为天燃气; 燃气额定压力为 2.0 kPa; 燃气低热值 36.49 MJ/m^3; 华白数 W 为 53.65 MJ/m^3); 燃烧势 CP 为 40.1. 检验结果完全符合国家燃气性能及安全要求,燃烧热负荷保持高度的一致性和重复性,完全满足了烹饪机器人严格的火力强度控制精度.

表 1 燃气燃烧检验报告

火焰传递状态	火焰状况	燃烧器稳定性	干烟气中 $\varphi_{CO_{a=1}}$/%（简介排烟式）	噪声/dB		实测功率值/kW
				燃烧	熄火	
点燃一处火孔后,火焰在 2 s 内传遍所有火孔,且无爆燃.	清晰、均匀、无黄焰、无黑烟	无熄火、无回火、离焰火孔数目小于4%	≤0.028	64	69	18.2

热流量准确度/%	表面温升/K				
	易接触部位	灶具壳体部分	阀门外壳	燃气接头	电点火器及导线
≤1	3	32	3	3	3

通过主观对比对烹饪火候进行了检验,邀请了 10 位中式菜肴烹饪大师,对烹饪机器人和厨师完成的菜肴采用百分制评分(评分标准见表 2).

表 2 菜肴火候评定标准

火候评定			
色泽	香气	口味	质感
颜色鲜明,光泽明亮. 固有色表现充分,调和色使用准确,加热色运用恰当.	香气充盈、持久. 主料香味表达充分,辅料香味表现恰当,调料香味表达适当.	君料之味突出,臣料之味得当,综合口味特征表现清晰,如清淡、浓郁、醇厚、隽永、爽滑.	菜肴整体形状均匀,不同原料混合合理,质感均匀、丰富,纹理自然,赏心悦目.

表 3 为 10 位大师给菜肴中对火候要求最为严格的水晶虾仁的完成情况打分,从表中可以看出,在火候精确控制下,采用了双压强火力控制的烹饪机器人在火力强度的控制精度和火候掌握准确的程度是厨师无法比拟的.

表 3 烹饪机器人和厨师完成水晶虾仁评分对比

操作者	色泽	香气	口味	质感
烹饪机器人	85	74	82	87
	90	81	80	87
	86	81	86	88
	94	85	74	79
	87	81	83	85
	91	76	85	85
	90	80	84	78
	87	74	84	80
	83	78	82	80
	89	78	84	83
厨师	80	74	74	78
	82	78	74	74
	81	75	76	75
	78	74	80	72
	82	75	79	72
	84	70	74	70
	85	73	70	65
	79	74	69	69
	79	79	70	70
	80	74	77	72

4　结　论

1）本文研究了烹饪机器人双压强火力系统，介绍了火力系统总成和燃气喷嘴气体混合过程，详述了引射管气体运动分析建模，对引射管内气体混合过程进行仿真，得出了双压强火力强度无级控制方法.

2）该系统可以使低压燃气达到比较高的燃烧功率，达到高精度的无级火力强度控制，提高了火焰的燃烧状况，完全达到国家规定的燃气性能和燃气要求.

参考文献：

[1] YAN Weixin, FU Zhuang, LIU Yinhua, *et al.* A novel automatic cooking robot for Chinese dishes[J]. Robotica, 2007, 25(4): 445 – 450.

[2] NORBERT P. Turbulent combustion[M]. Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2000: 75.

[3] GIBSON C H. Turbulent mixing, diffusion and gravity in the formation of cosmological structures: the fluid mechanics of dark matter[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 830 – 835.

[4] CHUI E H, MAJESKI A J, LUA D Y, *et al.* Simulation of entrained flow coal gasification[J]. Energy Procedia, 2009(1): 503 – 509.

[5] MILTNER M, MAKARUK A, HARASEK M, *et al.* CFD-modelling for the combustion of solid baled biomass [C]//Fifth International Conference on CFD in the Process Industries. Melbourne: CSIRO, 2006: 777 – 782.

[6] WATANABE H, SUWA Y, MOROZUMI Y, *et al.* Spray combustion simulation for a jet burner with compressible flows [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2006, 32(2): 153 – 162.

[7] 同济大学. 燃气燃烧与应用[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005：3 – 5，138.

[8] WIINIKKA H, GEBART R. Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(6): 645 – 652.

[9] LI Jianqiang, NIU Chenglin, GU Junjie. The determination of optimal excess air coefficient based on data mining in power plant [C]//Proceedings of the 2008 Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Washington: IEEE Computer Society, 2008: 384 – 388.

[10] 金志刚. 燃气燃烧产物的过剩空气系数[J]. 燃气技术，2005(9)：9 – 14.

（编辑　杨　波）

（上接第 78 页）

[6] WANG Jianyong, SHAN Songwei, LEI M, *et al.* Web search engine: characteristics of user behaviors and their implication [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2001, 44(5): 351 – 365.

[7] RICARDO B Y. Web log mining in search engines [EB/OL]. http://db. uwaterloo. ca/ ~ tozsu/seminars/notes/rbaeza. pdf.

[8] JANSEN B J, POOCH U. Web user studies: A review and framework for future work [J]. Journal of the American Society of Information Science and Technology, 2000, 52(3): 235 – 246.

[9] SPINK A, JANSEN B J, WOLFROAM D, *et al.* From e-sex to e-commerce: Web search changes [C]//Computer. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2002, 35(3): 107 – 109.

[10] 王继民，彭波. 搜索引擎用户访问量模型[J]. 计算机工程与应用，2004，40(25)：9 – 11.

[11] EASTMAN C M, JANSEN B J. Coverage, relevance, and ranking: The impact of query operators on Web Search Engine Results [C]//ACM Transactions on Information Systems. New York, NY: ACM, 2003, 21(4): 383 – 411.

[12] 陈红涛. 基于搜索日志的用户行为研究及应用[D]. 北京：北京邮电大学，2007.

[13] DANIEL G A. A survey on session detection methods in query logs and a proposal for future evaluation [C]//Information Sciences: An International Journal. New York, NY: Elsevier Science Inc, 2009, 179(12): 1822 – 1843.

（编辑　张　红）