

文章编号: 1000-8055(2024)12-20230002-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230002

基于 Kriging 参数优化的液氧系统预冷充填仿真

张晓光, 任孝文, 高玉闪, 邢理想

(中国航天科技集团有限公司 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 针对惰性气体吹除作用下的低温液体火箭发动机液氧系统预冷充填过程, 建立了一种两组分两相充填模型。由于包含 7 个控制方程, 模型参数复杂度提升, 直接开展参数优化存在优化效率低、参数矩阵非线性强的制约因素。基于 Kriging 代理模型采用粒子群优化算法, 高效寻得两组分两相充填模型在多因素耦合影响下的全局最优参数组合, 有效提升了模型的仿真精度。对某型发动机液氧系统预冷充填的仿真研究表明: 仿真结果与试验数据的相对误差仅 2.75%; 喷注器氧容腔内的压力爬升曲线呈现台阶上升特征, 且随入口压力的增大液氧充填速率加快。

关 键 词: Kriging 代理模型; 预冷充填; 液氧; 粒子群优化; 两相

中图分类号: V434.1

文献标志码: A

Simulation of pre-cooling filling process of liquid oxygen system based on parameter optimization of Kriging

ZHANG Xiaoguang, REN Xiaowen, GAO Yushan, XING Lixiang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: For the pre-cooling filling process of liquid oxygen system of cryogenic liquid rocket engines under the action of inert gas blowing, a two-component two-phase filling model was established. Due to the inclusion of 7 control equations, the complexity of the model parameters increased, and there were constraints on the low optimization efficiency and strong nonlinearity of the parameter matrix for direct parameter optimization. Based on the Kriging surrogate model, the particle swarm optimization algorithm was used to efficiently find the global optimal parameter combination of the two-component two-phase filling model under the influence of multi-factor coupling, which effectively improved the simulation accuracy of the model. The simulation study on the pre-cooling and filling of the liquid oxygen system of a certain type of engine showed that the relative error between the simulation results and the test data was only 2.75%. The pressure climb curve in the liquid oxygen dome of injector showed the characteristics of step rise, and the liquid oxygen filling rate accelerated with the increase of inlet pressure.

Keywords: Kriging surrogate model; pre-cooling filling; liquid oxygen; particle swarm optimization; two-phase

由于存在复杂的动态两相流动, 液氧等低温推进剂充填特性的准确仿真一直是低温液体火箭发动机^[1]系统动力学的重点和难点^[2]。目前, 国内外学者对该问题的研究大致可分为均相模型与

分相模型两种。均相平衡模型假设所有相态的压力、温度以及速度是均匀平衡的, 并忽略气液相间的滑移速度, 因此可将两相流体当作具有相同流速的均匀混合物, 按具有平均流体特性的单相

收稿日期: 2023-01-01

作者简介: 张晓光(1986—), 男, 研究员, 博士, 主要从事大推力液体火箭发动机设计研究。

引用格式: 张晓光, 任孝文, 高玉闪, 等. 基于 Kriging 参数优化的液氧系统预冷充填仿真[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20230002. ZHANG Xiaoguang, REN Xiaowen, GAO Yushan, et al. Simulation of pre-cooling filling process of liquid oxygen system based on parameter optimization of Kriging[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20230002.

流体来处理^[3-5]。均相平衡模型在低温流体充填方面的应用最早由德国宇航中心(DLR)的 Hagen 等^[6]提出,其使用此方法对液氢预冷充填管路进行了详细的研究和分析,结果表明由于液氢强烈的沸腾汽化,管路中部产生了压力峰和回流,即充填过程气阻明显。国内高芳等^[7]、程谋森等^[8]、刘昆等^[9]使用均相模型以氢/氧液体推进剂供应管路为对象进行了仿真研究,计算结果均可近似模拟充填过程的动态特性。在分相模型方面,理想的、通用性较高的两流体模型^[10]除了求解六大控制方程(气相、液相各三个控制方程)外,还需增加壁面摩擦、相间传热以及相间质量交换等本构方程以使方程组封闭^[11];由于涉及的方程数量较多,求解过程存在较大的难度^[12-14],因此历史上针对该类模型的应用多进行了适当的简化。Richter^[15]较早提出了模拟液体在大长径比管路中汽化的五方程模型;国内杨永强等^[16]忽略液氧的温度变化,采用动量方程的准稳态形式,并假设充填过程中容腔内的压力主要由气体的压缩性主导,建立了一种模拟低温液氧充填容腔和换热过程的五方程模型。

以上研究工作均针对低温流体的单组分两相流动,即气相与液相均属于同一种介质^[17];而在某些低温液体火箭发动机的特定设计要求下,液氧系统需在氮气等惰性气体吹除作用下进行预冷充填,以防止超前进入燃烧组件的火药燃气侵入喷注器氧容腔^[18],造成内腔烧蚀。在这种情况下,液氧系统的预冷充填由单组分两相流动衍变为两组分两相流动,复杂程度进一步加大。目前针对吹除气作用下的低温流体充填过程,公开文献中鲜有相关研究报道。有鉴于此,本文建立了一种两组分两相充填模型,该模型在六方程基础上增加惰性气体的质量方程,共计求解 7 个控制方程,其中动量方程采用准稳态形式。对于影响容腔动态建压的液氧蒸发过程,本文采用 Kurul 等^[19]学者建立的蒸发模型。

与以往模型相比,本文建立的模型具有较高的复杂度,可调参数数量也相应增加。随着模型参数复杂度的提升,以往传统的、依赖于模型开发者经验的调试方法难以高效寻得多因素耦合影响下的全局最优参数组合。同时,直接对复杂模型开展参数优化也存在优化效率低、参数矩阵非线性强的现实制约因素^[20]。因此,亟需发展一种计算成本少、收敛速度快、寻优能力强的参数优

化方法。代理模型技术,可根据样本点训练出与原模型预测结果相近的代理模型^[21];并可针对代理模型应用遗传算法、模拟退火、粒子群^[22]等优化算法快速搜索得到全局最优解,是减少计算成本、提高优化效率的有效方式。常用的代理模型有响应面、径向基函数^[23]、Kriging 等^[24]。其中 Kriging 代理模型可用较少的样本数据点光滑拟合出原目标函数,其不仅生成可插值的空间模型,还生成模型中每个点的不确定性估计,因此可覆盖固有不确定度,是解决液体火箭发动机系统动力学中计算量过大、方程组强非线性等问题的有效建模方法^[25]。

本文采用基于 Kriging 代理模型的优化方法对建立的两组分两相充填模型关键参数进行优化,获得最优参数组合,有效提升了模型的仿真精度。目前将代理模型技术应用于液体火箭发动机系统动力学仿真中的研究较少,本文工作是该研究方向的有益探索。

1 模型及方法

1.1 物理模型

开式循环液氧煤油发动机(open-cycle liquid oxygen/kerosene engine)在起动过程中采用火药启动器产生的火药燃气起旋涡轮,如图 1 所示。火药燃气对涡轮做功的同时将进入上游的燃气发生器内,为防止提前进入发生器的火药燃气侵入喷注器氧容腔,需要采用氮气或氦气等惰性气体对氧喷嘴及其容腔进行吹除。吹除过程将一直持续至发动机进入稳定工况,因此在起动过程中当氧化剂副阀打开时,液氧将在惰性气体吹除作用下充填喷注器氧容腔。本文即对该物理模型进行数学建模与仿真参数优化研究。

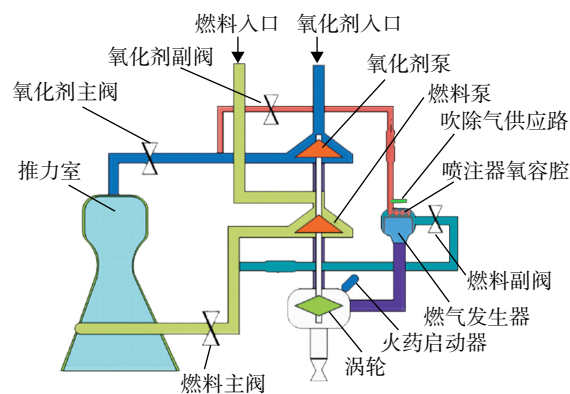


图 1 开式循环液氧/煤油发动机系统简图

Fig. 1 Schematic of open-cycle LOX/kerosene engine system

1.2 两组分两相充填模型

连续方程包含液氧、气氧及吹除气的质量守恒方程, 其中液氧的质量方程如下:

$$\frac{dm_l}{dt} = \dot{m}_{l,in} - \dot{m}_{vap} - \dot{m}_{l,out} \quad (1)$$

式中 m_l 为喷注器氧容腔中的液氧积存质量, $\dot{m}_{l,in}$ 表示进入喷注器氧容腔的液氧流量, $\dot{m}_{l,out}$ 表示流出喷注器氧容腔的液氧流量, $\dot{m}_{vap}$ 为液氧的蒸发率。

相应地, 气氧的质量方程列出如下:

$$\frac{dm_g}{dt} = \dot{m}_{g,in} + \dot{m}_{vap} - \dot{m}_{g,out} \quad (2)$$

式中 m_g 为喷注器氧容腔中的气氧积存质量, $\dot{m}_{g,in}$ 表示进入喷注器氧容腔的气氧流量, $\dot{m}_{g,out}$ 表示流出喷注器氧容腔的气氧流量。

吹除气由于不含相变过程, 其质量方程如下:

$$\frac{dm_{pg}}{dt} = \dot{m}_{pg,in} - \dot{m}_{pg,out} \quad (3)$$

式中 m_{pg} 为喷注器氧容腔中的吹除气体积存质量, $\dot{m}_{pg,in}$ 表示进入喷注器氧容腔的吹除气体流量, $\dot{m}_{pg,out}$ 表示流出喷注器氧容腔的吹除气体流量。

假设充填过程中液氧的密度 ρ_l 不变, 已知喷注器氧容腔体积 V_l , 液氧的充填率 α 可以通过下式计算得到:

$$\alpha = \frac{V_l}{V_t} = \frac{m_l}{\rho_l \cdot V_t} \quad (4)$$

式中 V_l 为液氧所占的体积。

根据热力学第一定律, 忽略气液相间的传热过程, 只考虑液氧与喷注器氧容腔壁面之间的换热, 液氧的温度变化可以通过以下公式计算:

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{Q_{wl} + Q_{ltrans} - Q_{vap}}{m_l \cdot c_{p,l}} - \frac{T_l}{m_l} \cdot \frac{dm_l}{dt} \quad (5)$$

式中 T_l 表示液氧温度, $c_{p,l}$ 为液氧的比定压热容; 单位时间壁面传给过冷液氧的热量由 Q_{wl} 表示, 液氧流进流出喷注器氧容腔的迁移热量为 Q_{ltrans} , 液氧蒸发带走的热量则用 Q_{vap} 表示。

假设在惰性气体吹除作用下, 液氧充填过程产生的氧蒸汽与吹除气瞬间混合均匀, 所形成混合气的温度按照如下公式计算:

$$\frac{dT_{gt}}{dt} = \frac{Q_{wgt} + Q_{gtrans} + Q_{vap}}{(m_g + m_{pg}) \cdot c_{p,gt}} - \frac{T_{gt}}{m_g + m_{pg}} \cdot \frac{d(m_g + m_{pg})}{dt} \quad (6)$$

式中下标 gt 表示混合气; 单位时间壁面传给混合

气的热量由 Q_{wgt} 表示, 混合气流进流出喷注器氧容腔的迁移热量为 Q_{gtrans} ; 其中混合气的比热容 $c_{p,gt}$ 由气氧的比热容 $c_{p,g}$ 与吹除气的比热容 $c_{p,pg}$ 通过各自的质量分数 β 加权平均计算得到:

$$c_{p,gt} = \beta \cdot c_{p,g} + (1 - \beta) c_{p,pg} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{m_g}{m_g + m_{pg}} \quad (8)$$

壁温 T_w 通过壁面释热方程计算:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{-(Q_{wl} + Q_{wgt}) + Q_{nw}}{m_w \cdot c_w} \quad (9)$$

式中 m_w 和 c_w 分别为喷注器氧容腔的壁面质量和材料比热容, Q_{nw} 代表外界环境的热泄漏。

式(5)、式(6)和式(9)中壁面传给过冷液氧的热流 Q_{wl} 、壁面传给混合气的热流 Q_{wgt} 以及外界环境的热泄漏 Q_{nw} 均通过牛顿冷却公式计算得到, 其中表面传热系数按照单相换热经验关系式计算^[26]。

动量方程用来计算液氧、气氧及吹除气的流量, 本文使用动量方程的准稳态形式, 具体可参见文献^[27]; 气液容腔建压过程通过采用等效流容的压力方程模拟, 具体可参见文献^[28]。

1.3 液氧蒸发模型

为使方程组封闭, 还需增加液氧的蒸发模型。本文在 Kurul 等^[19]学者建立的蒸发模型的基础上, 考虑充填过程液氧与喷注器氧容腔壁面接触面积的动态变化, 提出了如下蒸发率计算公式:

$$\dot{m}_{vap} = \frac{\pi d_w^3}{6} \rho_g f \cdot n \cdot \alpha^c \cdot A \quad (10)$$

式中 ρ_g 为氧蒸汽密度, A 为喷注器氧容腔的壁面总面积, c 为换热面积的动态修正系数, n 代表液氧与过热壁面接触时形成的汽化核心密度, 可由 Egorov 等^[29]学者提出的公式计算得到:

$$n = n_{ref} (\Delta T_{sup} / \Delta T_{refsup})^z \quad (11)$$

其中 n_{ref} 为汽化核心密度基准值, 壁面过热度 $\Delta T_{sup} = T_w - T_{sat}$, T_{sat} 为液氧饱和温度, ΔT_{refsup} 代表壁面过热度基准值, z 为汽化核心密度的指数修正。

式(10)中 f 为气泡离壁速率, 具体计算方法见文献^[30]; d_w 为气泡直径, 可用如下公式计算^[31]:

$$d_w = \min \left(d_{ref} \cdot e^{\left(-\frac{\Delta T_{sub}}{\Delta T_{refsub}} \right)}, d_{max} \right) \quad (12)$$

其中 d_{ref} 为气泡直径基准值, d_{max} 为气泡的最大直径, 液氧过冷度 $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$, 液氧过冷度基准值

为 $\Delta T_{\text{refsub}\circ}$

1.4 发动机液氧系统预冷充填过程仿真模型

针对某型液体火箭发动机液氧系统预冷充填过程搭建的仿真模型如图 2 所示。充填开始前, 阀门 2 处于关闭状态, 其上游的管路得到充分预冷且充满液氧; 该部分(图 2 中管路 1、管路 2 及

管路 3)使用纯液相管路模型^[32]。阀门 2 下游的管路(图 2 中管路 4)与喷注器氧容腔为待充填组件, 采用本文建立的两相两组分充填模型。发生器下游的涡轮静子采用喷管模型替代。图 2 中的汽蚀管、阀门、发生器及喷管等模型采用补燃循环发动机仿真模型库^[33]中的相应仿真组件。

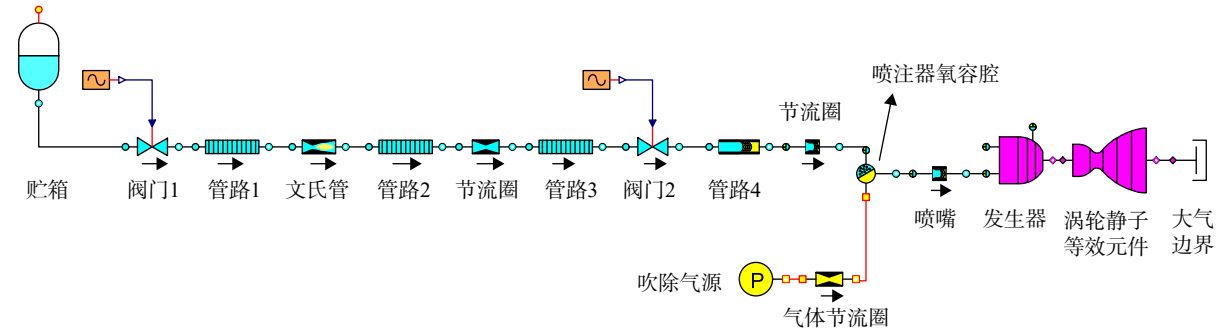


图 2 液氧管路仿真模型
Fig. 2 Simulation model of liquid oxygen line

仿真工况如表 1 所示, 保持吹除压力恒定为 4.0 MPa, 改变氧化剂供应入口压力 p_i 。

表 1 仿真工况
Table 1 Simulation conditions

序号	p_i /MPa
1	1.0
2	2.0
3	2.5
4	2.9
5	3.4
6	6.0
7	8.3

1.5 Kriging 代理模型

Kriging 代理模型本质上是一种响应面模型, 可看做由一个随机过程和一个线性回归模型构成, 也可以看作是全局模型和局部偏离的累加, 其模型可用如下公式表示^[25]:

$$y(x_i) = \sum_{j=1}^m \beta_j g_j(x_i) + Z(x_i) \tag{13}$$

式中 $\beta=[\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_m]^T$ 是回归模型的系数向量, 属于未知参数; $g_j \ (j=1, \cdots, m)$ 是一个已知的基函数, Z 是协方差非零的随机分布, 且服从高斯分布 $N(0, \sigma^2)$ 。

通过样本数据库, 即已知变量 x_i 与目标值 $y(x_i)$ 的映射集, 可求解得到式(13)中的系数向量

β , 从而在优化参数与目标函数之间构建代理预测模型。

2 基于 Kriging 代理模型的参数优化

文中第 1.1 节建立的两相两组分充填模型中, 低温液氧的蒸发率 $\dot{m}_{\text{vap}}$ 对于喷注器氧容腔的动态建压过程具有十分关键的影响作用。因此, 为了提升对液氧充填喷注器氧容腔过程的仿真精度, 需要根据已有试验数据对文中第 1.3 节建立的氧系统预冷充填仿真模型进行参数优化。

将液氧蒸发模型涉及到的 6 个可调参数与液氧在喷注器氧容腔内所建压力 1 个性能指标作为设计空间, 采用傅里叶幅值敏感性试验算法^[34-35]进行敏感性分析, 最终确定了汽化核心密度基准值 n_{ref} 、壁面过热度基准值 ΔT_{refsup} 、液氧过冷度基准值 ΔT_{refsub} 以及换热面积动态修正系数 c 为优化参数; 各参数的取值范围如表 2 所示。

针对上述 4 个优化参数, 采用拉丁超立方抽样方法^[36]进行仿真试验设计, 共生成 200 组仿真

表 2 参数范围
Table 2 Range of parameters

参数	数值范围
$n_{\text{ref}}/\text{m}^{-2}$	5 000~500 000
$\Delta T_{\text{refsup}}/\text{K}$	2~50
$\Delta T_{\text{refsub}}/\text{K}$	2~50
c	0.1~5

样本点。样本点仿真完成后,将仿真与试验得到的压力分别对时间 t 积分,并将积分差值作为仿真与试验的误差,如图 3 中斜线阴影部分所示。图中纵坐标为无量纲压力,以试验或仿真数据的最大值($p_{\max}$)以及环境压力(p_0)为基准对喷注器氧容腔内压力(p)进行归一化处理

$$\bar{p} = \frac{p - p_0}{p_{\max} - p_0} \quad (14)$$

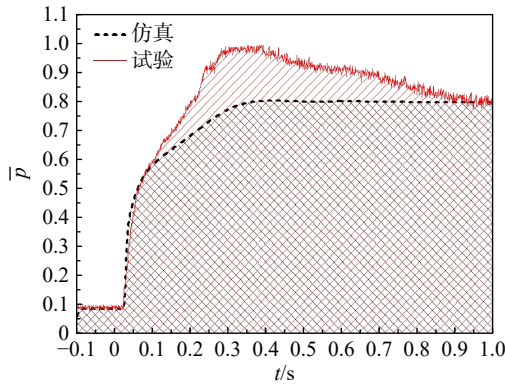


图 3 仿真结果与试验数据误差

Fig. 3 Error between simulation and test

将仿真结果与试验数据的误差作为目标函数,以表 2 中的敏感参数作为自变量,采用 Kriging 方法对 200 组样本点进行数据训练,训练生成目标函数随敏感参数的 Kriging 代理模型

$$y = f_{\text{Kriging}}(n_{\text{ref}}, \Delta T_{\text{refsup}}, \Delta T_{\text{refsub}}, c) \quad (15)$$

采用粒子群算法(PSO)[37]对 Kriging 代理模型进行全局最小值搜索,获得参数的最优组合。

应用上述方法对表 1 中仿真工况 6 进行参数优化,结果如图 4 所示。可以看到在进化 40 代后,目标函数值停止下降,表明达到最小值,与之对

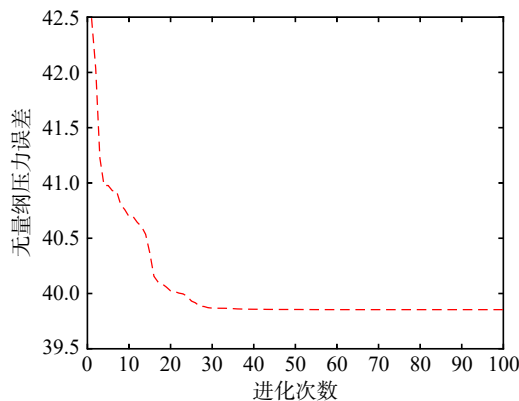


图 4 粒子群算法进化过程

Fig. 4 Evolution of PSO algorithm

应的敏感参数最优组合见表 3,所得仿真结果与试验数据的对比见图 5,仿真与试验的相对误差仅 2.75%。

表 3 最优参数组合

Table 3 Optimal combination of parameters

参数	数值
$n_{\text{ref}}/\text{m}^{-2}$	309 884
$\Delta T_{\text{refsup}}/\text{K}$	9.24
$\Delta T_{\text{refsub}}/\text{K}$	40.4
c	2.13

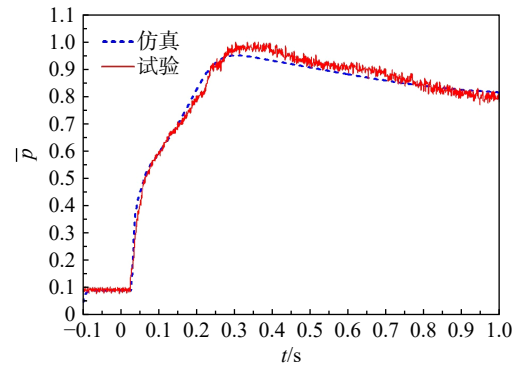


图 5 优化后仿真结果与试验数据对比

Fig. 5 Comparison of the optimized simulation results with the experimental data

3 计算结果及分析

3.1 液氧充填过程分析

在液氧蒸发模型最优参数组合的基础上,采用图 2 所示仿真模型进行发动机液氧系统预冷充填仿真。图 6 所示为液氧入口压力分别为 2.0 MPa 和 3.4 MPa 的仿真结果。

阀门 2 打开前,喷注器氧容腔内初始压力由吹除气建压造成。0 s 时刻阀门 2 打开,喷注器氧容腔内压力开始上升,压力爬升曲线呈现明显的台阶上升特征。结合图 2 中氧系统充填仿真模型,氧化剂阀门 2 打开后,液氧首先对喷注器氧容腔前管路 4 进行充填:图 6 中充填率 α 曲线显示,0 s 开始,管路 4 中液氧充填率的爬升早于喷注器氧容腔。

由于管路壁面过热度较大,液氧在充填过程中发生了剧烈的沸腾汽化现象,导致充填过程中液氧在管路 4 中的充填率长时间处于较低水平,管路内为气液两相状态;由此进入喷注器氧容腔的流体也为气液两相流,且开始时气氧占比更多;

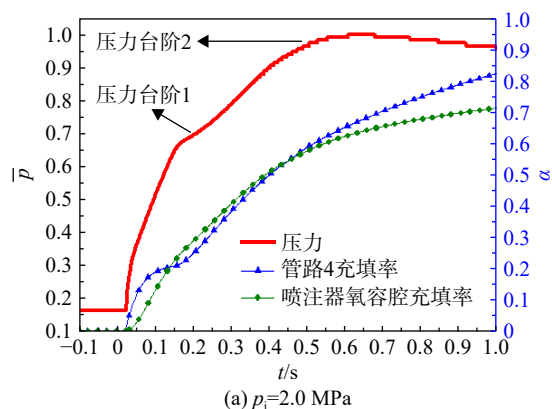
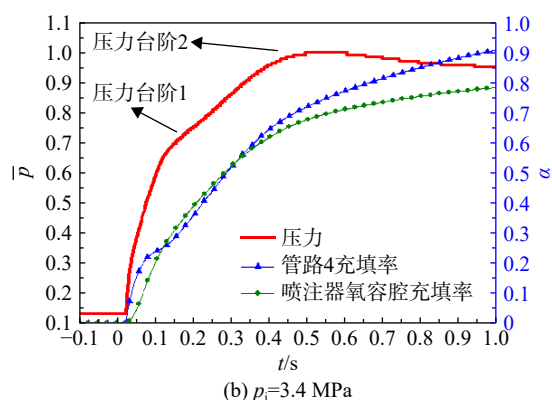
(a) $p_i=2.0$ MPa(b) $p_i=3.4$ MPa

图 6 喷注器氧容腔压力曲线

Fig. 6 History of pressure in oxygen dome

当气液两相状态的氧进入喷注器氧容腔后,液体部分继续蒸发;因此图中喷注器氧容腔内压力曲线的第1个台阶由气氧建压造成。

之后,随着壁面温度的下降,液氧在管路及喷注器氧容腔内蒸发过程减弱,液氧充填率逐渐上升,大流量液氧开始进入,液氧占比的增多使得喷注器氧容腔内的吹除气受到压缩,喷注器氧容腔内压力上升至图中第2个台阶位置;当充填率进一步增大时,喷注器氧容腔内压力开始由液氧主导,压力开始下降并趋于平稳。

3.2 入口压力的影响分析

液氧入口压力对充填过程的影响见图7~图10。

从图7中喷注器氧容腔压力曲线可以看到,随着液氧入口压力的增大,喷注器氧容腔内建压速度加快,出现压力台阶1的时间从0.2 s逐渐提前至0.1 s,且台阶的压力值也从0.3(压力数据归一化处理,下同)逐渐增大至0.5附近,大流量液氧进入的时间从0.6 s提前至0.25 s左右,压力峰值从0.4增大至1.0。

从图8与图9中的充填率曲线可以看到,随着氧入口压力从1.0 MPa增大至8.3 MPa,喷注器氧容腔上游管路4内液氧的充填速度逐渐加快,

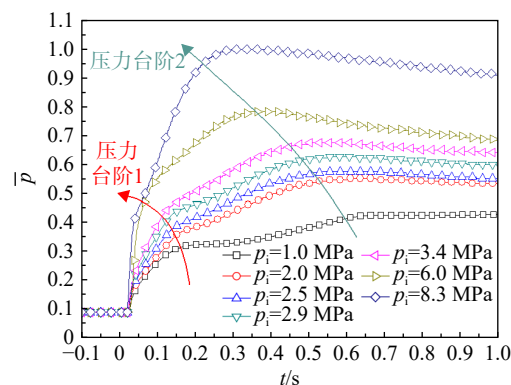


图 7 不同入口压力条件下的喷注器氧容腔压力曲线

Fig. 7 History of pressure in the oxygen dome under different inlet pressures

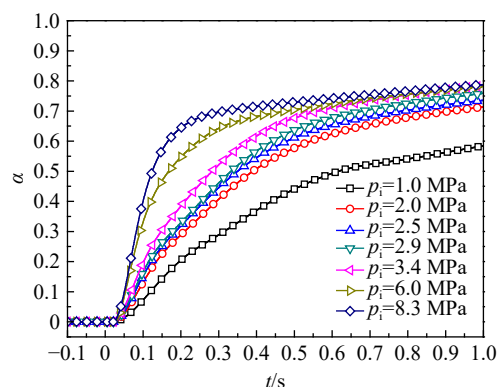


图 8 不同入口压力条件下的喷注器氧容腔充填曲线

Fig. 8 Filling rate in the oxygen dome under different inlet pressures

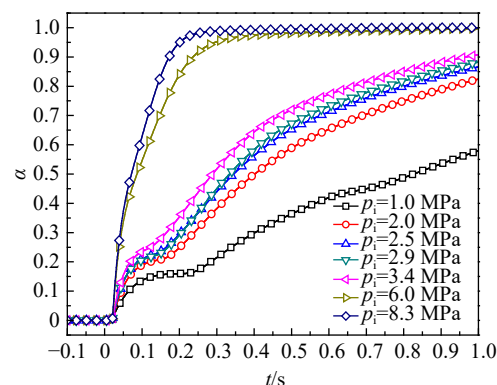


图 9 不同入口压力条件下管路4中充填曲线

Fig. 9 Filling rate in pipe 4 under different inlet pressures

1.0 s时刻充填率值从0.6逐渐增大至0.99;而对于喷注器氧容腔,液氧充填率从0.6左右仅增大至0.82,这是因为在充填过程中,喷注器氧容腔中始终有氮气吹除,随着充填压力的增高,氮气气量减小但仍然存在。

液氧充填速率加快的原因在于,随着入口压力的升高,流量随之增大,液氧与结构壁面的对

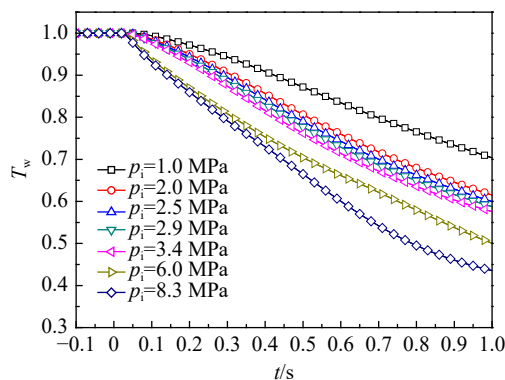


图 10 不同入口压力条件下的壁面温度曲线

Fig. 10 Wall temperature under different inlet pressures

流换热能力增强, 结构冷却速率增快, 如图 10 所示(图中纵坐标 T_w 为无量纲温度, 以仿真数据的最小值和环境温度为基准, 按照式(14)相同形式归一化处理), 壁面温度下降加快; 充填流量中液氧占比增多的速率也同步加快。

4 结 论

通过以上研究, 本文结论如下:

1) 基于 Kriging 代理模型采用粒子群优化算法, 高效寻得所建立的两组分两相充填模型在多因素耦合影响下的全局最优参数组合, 有效提升了模型的仿真精度, 仿真结果与试验数据的相对误差仅 2.75%。

2) 喷注器氧容腔内的压力爬升曲线呈现台阶上升特征, 其中第 1 个台阶由气氧建压引起, 第 2 个台阶由大流量液氧进入造成。

3) 液氧充填速率与入口压力呈正相关变化, 同时随入口压力的增大, 液氧流量增大, 液氧与结构壁面的对流换热能力增强, 结构冷却速率加快。

参考文献:

- [1] 李东, 王珏, 陈士强. 长征五号运载火箭动力系统总体技术分析[J]. 推进技术, 2021, 42(7): 1441-1448.
LI Dong, WANG Jue, CHEN Shiqiang. Key technology analysis of CZ-5 launch vehicle propulsion system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(7): 1441-1448. (in Chinese)
- [2] AGRAWAL G, SUNIL KUMAR S, AGARWAL D K. Pressure surge during cryogenic feedline chilldown process[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2016, 8(1): 011005.
- [3] 吕俊复, 吴玉新, 李舟航, 等. 气液两相流动与沸腾传热[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LYU Junfu, WU Yuxin, LI Zhouhang, et al. Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

- [4] HURISSE O. Numerical simulations of steady and unsteady two-phase flows using a homogeneous model[J]. Computers & Fluids, 2017, 152: 88-103.
- [5] HURISSE O. Application of an homogeneous model to simulate the heating of two-phase flows[J]. International Journal on Finite Volumes, 2014, 11: 1-37.
- [6] HAGEN S, GERD K. Numerical simulation of transients in feed systems for cryogenic rocket engines: AIAA 95-2967[R]. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1995.
- [7] 高芳, 陈阳, 张振鹏, 等. 液体火箭发动机实验台液路系统工作过程仿真[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 417-420.
GAO Fang, CHEN Yang, ZHANG Zhenpeng, et al. Fault simulation and analysis of the FLPRE test-bed fluid systems[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 417-420. (in Chinese)
- [8] 程谋森, 刘昆, 张育林. 低温推进剂供应管路预冷充填瞬变流计算[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 38-41.
CHENG Mousen, LIU Kun, ZHANG Yulin. Numerical analysis of pre-cooling and priming transients in cryogenic propellant feed systems[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5): 38-41. (in Chinese)
- [9] 刘昆, 程谋森, 张育林. 低温推进剂供应管道系统充填过程的动力学模型[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 1-5.
LIU Kun, CHENG Mousen, ZHANG Yulin. Dynamic model of priming processes of cryogenic propellant feed lines[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 1-5. (in Chinese)
- [10] CHAN A M C, BANERJEE S. Refilling and rewetting of a hot horizontal tube: Part III application of a two-fluid model to analyze rewetting[J]. Journal of Heat Transfer, 1981, 103(4): 653-659.
- [11] FONTALVO E M G, BRANCO R L C, CARNEIRO J N E, et al. Assessment of closure relations on the numerical predictions of vertical annular flows with the two-fluid model[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 126: 103243.
- [12] ZHANG Hao, YANG Yanhua. A split scheme for the two-fluid seven-equation model with source terms[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 124: 103350.
- [13] LIU Fayue, CHEN Huandong, CHEN Jiayue. Numerical simulation of shock wave problems with the two-phase two-fluid model[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 121: 103259.
- [14] ZHANG Hao, YANG Yanhua. Development of a Riemann solver for the two-fluid seven-equation model[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 142: 107391.
- [15] RICHTER H J. Separated two-phase flow model: application to critical two-phase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1983, 9(5): 511-530.
- [16] 杨永强, 刘站国, 徐浩海. 液氧煤油发动机低温组元两相充填过程研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 11-15.
YANG Yongqiang, LIU Zhanguo, XU Haohai. Research on two-phase filling process of cryogenic propellant for a LOX/Kerosene LRE[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(2): 11-15. (in Chinese)
- [17] 程向华, 薛会建, 李宏刚, 等. 低温预冷管路流动及传热非稳态特性研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(6): 53-56.
CHENG Xianghua, XUE Huijian, LI Honggang, et al. Investigation on unsteady characteristics of flow and heat transfer in cryogenic precooling pipe[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(6): 53-56. (in Chinese)
- [18] 姜垒, 刘上, 刘志让, 等. 燃气发生器点火接力过程对发动机起动性能的影响[J]. 火箭推进, 2021, 47(3): 74-82.

- JIANG Lei, LIU Shang, LIU Zhirang, et al. Influence of ignition relay process of gas generator on starting performance of engines[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(3): 74-82. (in Chinese)
- [19] KURUL N, PODOWSKI M Z. On the modeling of multidimensional effects in boiling channels[C]//Proceedings of the 27th National Heat Transfer Conference. Minneapolis, US: American Society of Mechanical Engineers, 1991: 1-20.
- [20] ZAMEER A, MIRZA S M, MIRZA N M. Core loading pattern optimization of a typical two-loop 300MWe PWR using Simulated Annealing (SA), novel crossover Genetic Algorithms (GA) and hybrid GA(SA) schemes[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 65: 122-131.
- [21] 叶一帆, 王占学, 张晓博. 基于多代理模型的航空发动机建模及优化方法[J]. 推进技术, 2021, 42(12): 2684-2693.
YE Yifan, WANG Zhanxue, ZHANG Xiaobo. Multi-surrogates based modelling and optimization algorithm suitable for aero-engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(12): 2684-2693. (in Chinese)
- [22] 刘显为, 李华聪, 史新兴, 等. 基于粒子群算法的航空离心泵复合叶轮优化设计研究[J]. 推进技术, 2019, 40(8): 1743-1751.
LIU Xianwei, LI Huacong, SHI Xinxing, et al. Optimization design of composite impeller of aero-centrifugal pump based on particle swarm optimization[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8): 1743-1751. (in Chinese)
- [23] 姜金朋, 刘志超, 刘筑, 等. 火箭发动机涡轮叶片疲劳寿命可靠性分析[J]. 火箭推进, 2020, 46(2): 57-63.
JIANG Jinpeng, LIU Zhichao, LIU Zhu, et al. Reliability analysis of fatigue life for rocket engine turbine blade[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(2): 57-63. (in Chinese)
- [24] 李洁翎, 孙伟, 丁鑫, 等. 代理模型在复杂机电系统全局敏感度分析中的应用[J]. 机械设计与制造, 2017(增刊 1): 229-232.
LI Jieling, SUN Wei, DING Xin, et al. Application of agent model in global sensitivity analysis of complex electromechanical systems[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(Suppl.1): 229-232. (in Chinese)
- [25] LIU Fei, HAN Zhonghua, ZHANG Yang, et al. Surrogate-based aerodynamic shape optimization of hypersonic flows considering transonic performance[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 93: 105345.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [27] 任孝文, 李平, 陈宏玉, 等. 管路中常温推进剂的两相充填特性仿真[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 125047.
REN Xiaowen, LI Ping, CHEN Hongyu, et al. Simulation of two-phase filling characteristics of storable propellant in pipelines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 125047. (in Chinese)
- [28] 任孝文, 李平, 陈宏玉, 等. 预存气体闭端管路的充填水击研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2700-2708.
REN Xiaowen, LI Ping, CHEN Hongyu, et al. Investigation on water hammer during filling process of closed conduit with entrapped air[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12): 2700-2708. (in Chinese)
- [29] EGOROV Y, MENTER F. Experimental implementation of the RPI boiling model in CFX-5.6[R]. Budenheim, Germany: ANSYS GmbH, 2004.
- [30] COLE R. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux[J]. *AIChE Journal*, 1960, 6(4): 533-538.
- [31] TOLUBINSKY V I, KOSTANCHUK D M. Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling[C]//Proceeding of International Heat Transfer Conference 4. Connecticut: Begellhouse, 1970: 5.
- [32] REN Xiaowen, LI Ping, CHEN Hongyu. Numerical simulation of water hammer in liquid methane feedline based on two compressible fluid models[J]. *Cryogenics*, 2020, 109: 103122.
- [33] 陈宏玉, 刘红军, 陈建华. 补燃循环发动机强迫起动过程[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 3010-3016.
CHEN Hongyu, LIU Hongjun, CHEN Jianhua. Forced start-up procedure of a staged combustion cycle engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12): 3010-3016. (in Chinese)
- [34] CANNAVÓ F. Sensitivity analysis for volcanic source modeling quality assessment and model selection[J]. Computers & Geosciences, 2012, 44: 52-59.
- [35] 薛鹏飞, 刘正先, 李孝检, 等. 跨声速离心压气机多部件耦合优化扩稳[J]. 航空动力学报, 2023, 38(2): 491-503.
XUE Pengfei, LIU Zhengxian, LI Xiaojian, et al. Multi-component coupling optimization for stability improvement of transonic centrifugal compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(2): 491-503. (in Chinese)
- [36] 杜丽, 吕利叶, 孙伟, 等. 一种适用于约束空间的拉丁超立方取点策略[J]. 机械设计与制造, 2021(8): 43-47.
DU Li, LV Liye, SUN Wei, et al. An Latin hypercube sampling approach for constrained design space[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(8): 43-47. (in Chinese)
- [37] 姚李超, 邹正平, 付超, 等. 超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环性能分析及优化设计方法研究[J]. 推进技术, 2022, 43(3): 85-94.
YAO Lichao, ZOU Zhengping, FU Chao, et al. Performance analysis and optimization design method of supercritical carbon dioxide recompression brayton cycle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(3): 85-94. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)