

拉瓦尔式燃料流量调节阀流量特性分析

李洪洲¹, 徐光², 李松晶^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学 流体控制及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海军驻南京办事处, 江苏 南京 210018)

摘要: 燃料供给的实时、精确调节是冲压发动机技术研究的重点,对提高发动机的效率、改善发动机的工作性能具有重要的意义。为实现冲压发动机气态燃料在高温下流量的精确调节,提出了一种新型的拉瓦尔式燃料流量调节阀,以对流入发动机燃烧室的高温气态燃料进行流量调节。首先,开发了一种用于燃料供应的高温流量调节阀,然后通过采用有限元分析方法,分析了流经主阀阀口的气态燃料速度及压力的分布,从而找出了流量变化规律。研究表明,采用拉瓦尔管状阀口的流量调节阀,在不改变阀芯位移量以及一定入口压力条件下,流经阀口的燃料流量保持不变,且与出口压力无关。

关键词: 冲压发动机; 拉瓦尔管; 流量调节阀; 流量特性

中图分类号: TH137.52; V228.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1036-03

Analysis of flow-rate characteristics for a Laval fuel flow-rate control valve

LI Hong-zhou¹, XU Guang², LI Song-jing¹

(1. Department of Fluid Control and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Nanjing Office of The Navy, Nanjing 210018, China)

Abstract: It is the most important point for scramjet engine to control the supplying flow rate of fuel propely, and it is necessary to enhance the performance of the engine. In order to control the flow of gas fuel precisely in such high temperature situation in ramjet engines, a high flow control Laval valve for the ramjet engines was developed, which controls the gas flowing through the inlet passage of the engine. On this basis, a high temperature flow rate control valve for fuel supply was developed. Research on the characteristics of Laval nozzle mouth of the valve, and analysis on the velocity and pressure distribution with the finite element method were carried out. The research results indicate that, the rate of flow keeps the same when the opening of the valve and the inlet pressure are both fixed. The outlet pressure of the valve has no influence on the flow rate of the valve.

Key words: scramjet; Laval nozzle; flow-rate control valve; flow-rate characteristics

0 引言

高超冲压发动机是冲压发动机的一种,是一种新型的、以高温冲压技术为核心的发动机技术,一般应用于飞行马赫数高于6的飞行器,如高超声速巡航导弹、高超声速飞机和空天飞机^[1-2]。目前各国在该技术领域进行了研究,其中俄罗斯和美国走在前列,已经有初步成型的产品问世。近年来我国在该领域的研

究也取得了一定的进展^[3]。

燃料流量的精确调节是发动机产生稳定的推力和正常工作的关键^[4]。由于超燃冲压发动机在工作过程中机身热力学工况恶劣,需要通过主动热防护方式,利用燃油对发动机壁面进行冷却,降低发动机壁面的温度。因此在进入燃烧室之前,燃油的温度被升高到600℃~700℃^[5]。

为精确调节进入燃烧室的燃料流量,使其准确地

收稿日期: 2012-04-16

作者简介: 李洪洲(1986-),男,山东日照人,主要从事流体控制及自动化方面的研究。E-mail: log1000@126.com

通信联系人: 李松晶,女,博士,教授,博士生导师。E-mail: lisongjing@hit.edu.cn

按照发动机工况的需要进行分配并释放热量,本研究提出一种高温燃油流量调节阀。该阀采用先导控制方式,以减小高温对阀驱动元件的影响。阀口采用拉瓦尔管形结构,具有流量稳定、压力损失小的特点^[6]。

本研究介绍该高温燃料流量调节阀的结构和工作原理,并采用Fluent仿真软件对该阀阀口流动特性进行仿真分析。

1 结构及工作原理

本研究所提出的高温燃料流量调节阀结构示意图如图1所示。

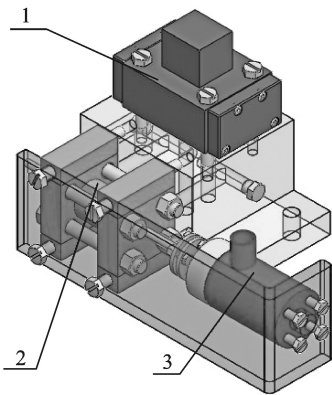


图1 高温流量调节阀结构示意图

1—先导式伺服阀;2—气动活塞缸;3—主阀

图1中的高温流量调节阀由主阀3、电液伺服阀1、驱动活塞2等组成,驱动活塞与主阀阀芯刚性连接。电液伺服阀控制驱动活塞左右移动,从而控制主阀阀芯的位移,调节主阀阀口开度,从而调节经过主阀阀口的燃料流量。图1中,高温流量调节阀的主阀结构如图2所示。

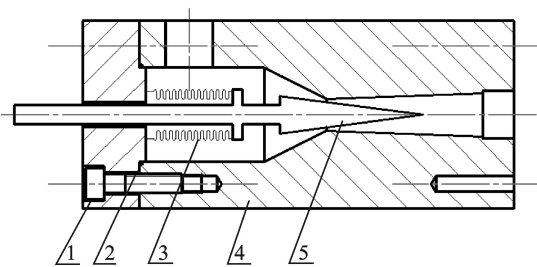


图2 高温流量调节阀的结构图

1—六角螺钉;2—密封圈;3—弹簧;4—主阀阀体;5—阀芯

图2中的主阀由阀芯5、阀体4、弹簧3及端盖等组成。阀芯采用锥阀形式,由驱动活塞推动锥形阀芯动作,从而控制阀口开度。

本研究将拉瓦尔管特性用于主阀阀口设计中,气体从锥阀底部进入,沿锥阀尖部流出,该控制方法的目的是在主阀阀口处形成拉瓦尔管状结构,从而达到准确控制流经阀口气体流量的目的。

2 拉瓦尔管状阀口数学模型

拉瓦尔喷管是一个先收缩后扩张的管道,主要特性是在管道出口得到指定马赫数的超声速气流。在相同面积比的情况下,进口总压与出口反压比值不同时,管内气体呈现不同的流动状态。拉瓦尔喷管的正常工作条件是:管道前后压力比大于临界值;出口截面积与最小截面积的比值与指定的超声速气流马赫数相适应^[7]。

拉瓦尔喷管的流动特性是:同样温度和进口压力条件下,通过喷管的气体流量只与喉部面积及出口面积比有关。这种流动特性利于高温下对于气体流量的控制,因为一定范围内不受前后压差变化的影响,易于实现流量稳定。拉瓦尔管正常工作时,最小截面处气流马赫数为1的临界状态,气流参数是临界参数,运算起来比较简便。因此,研究者一般都用计算流过最小截面的气体流量的方法来确定拉瓦尔管的气体流量。据此,拉瓦尔管的气体流量公式可写为:

$$W = K_m \frac{p_0^*}{\sqrt{T_0^*}} A_t \quad (1)$$

式中: K_m —热流系数, $K_m = \sqrt{kg \cdot K/J}$; p_0^* —进口气体总压, Pa; T_0^* —进口气体总温, K; A_t —喉部面积, m^2 。

从式(1)中可以看出,在最小截面处的气流马赫数为1的临界状态下,拉瓦尔管的气体流量只取决于管道进口气体的总压和总温以及最小横截面积。

其中,进口总压 p_0^* 值为10 MPa。本研究按进口压力 $p_0^* = 10$ MPa,出口压力 $p_e = 1$ MPa进行初步设计,即:

$$\frac{p_0^*}{p_e} = \frac{1}{\pi(\lambda)} \quad (2)$$

$$\pi(\lambda) = 0.1 \quad (3)$$

式中: λ —气体速度系数。

进一步查表确定 $\lambda = 1.75$, $q(\lambda) = 0.4961$, 有:

$$q(\lambda) = \frac{A_t}{A_e} = 0.4961 \quad (4)$$

式中: $q(\lambda)$ —气体相对密度。

综合考虑喉部面积比及加工工艺,本研究可确定阀口结构的具体尺寸。

3 基于FLUENT的阀口流场仿真

本研究运用FLUENT软件对阀口处的流场进行仿真,并分析阀口流量特性及压力和速度分布。

具体仿真步骤如下:

(1) 利用GAMBIT建立计算域和指定边界条件类型;由于阀口形状为完全对称,在仿真过程中为简化

计算,可利用二维图形代替三维仿真^[8];

(2) 利用 FLUENT 求解器求解。

在计算过程中对流体及边界条件做如下假设:

(1) 流体为完全气态,可压缩气体,可用理想气体近似;

(2) 流动为单向流动,采用 Spalart-Allmaras 湍流模型;

(3) 阀入口温度采用实验条件下的 600 °C,出口温度为 500 °C;

(4) 入口和出口分别采用压力入口和压力出口边界条件,其余为壁面接触。

4 流场仿真结果

根据拉瓦尔管建模思想,本研究采用 FLUENT 软件,对设计主阀阀口处进行仿真^[9]。入口为 10 MPa,出口为 5 MPa,阀口位移为 8.0 mm 时的仿真结果如图 3~6 所示。

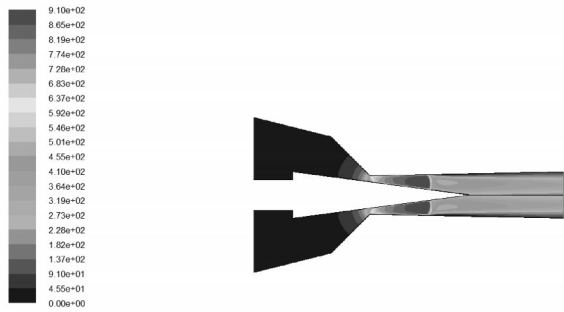


图 3 阀芯位移 $x=8.0$ mm 速度分布

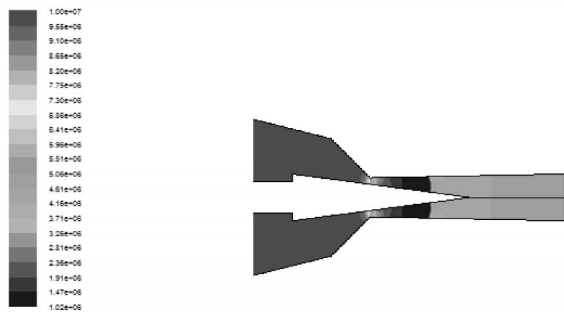


图 4 阀芯位移 $x=8.0$ mm 压力分布

图 3、图 4 仿真结果表明,在拉瓦尔管阀口起始阶段流场压力较大,速度较小,在阀口最小截面处速度达到声速,约为 182 m/s,压力约为 5.51 MPa,经过阀口最小截面后,速度继续增加,压力继续减小,产生激波后压力恢复为背压 5 MPa,速度恢复至亚声速。之后,气体继续加速变为超声速。仿真结果表明,达到稳定时,气体在阀入口与阀出口处流量持平。

阀口入口压力不变时(10 MPa),本研究通过改变阀口出口压力,作出多组仿真结果,得到不同出口压力下的气体通过阀口的流量如图 5 所示。同理,当阀

口出口压力保持不变(1 MPa)时,研究者改变不同的入口压力值,得到的流量结果如图 6 所示。

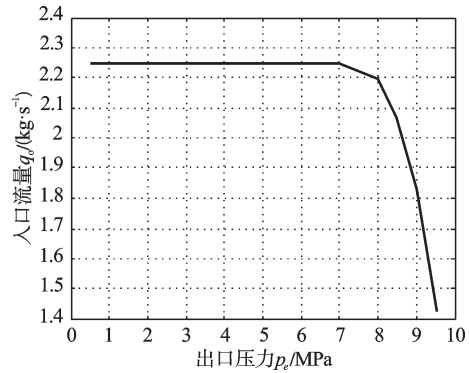


图 5 一定入口压力(10 MPa)下阀口流量与出口压力关系图

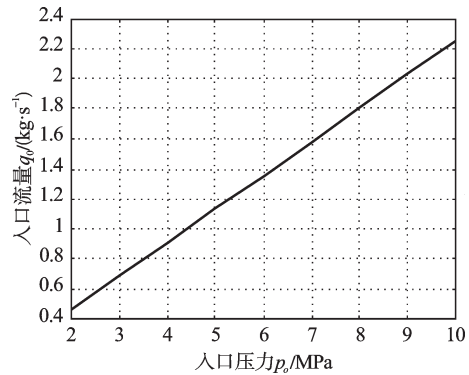


图 6 一定出口压力(1 MPa)下阀口流量与入口压力关系图

仿真结果表明,阀口形状固定后,出口压力大于一定值(7 MPa)时,流入流出阀口的气体流量与出口压力无关,只取决于入口压力(10 MPa)。即当 $p_e/p_o^* < 0.7$ 时,质量流量只与入口总压(10 MPa)有关,且近似成线性关系,与公式(1)相符合。这与拉瓦尔管达到壅塞的状态相适应,即气体流经拉瓦尔管时,若背压低于一定值后,质量流量不再发生变化。此时喉部即阀口最小截面处压力约为进口总压 0.528 倍^[10]。

通过改变阀芯位移 x 或者改变阀芯形状,可以得到相似的仿真结果。

5 结束语

为了提高冲压发动机的效率、改善发动机的工作性能,本研究开发了用于燃烧供应的高温流量调节阀,对比仿真结果与数学模型,可以得出以下结论:

(1) 高温阀的阀口采用拉瓦尔管形状设计方案后,当阀口开度不变时,阀前后压力在一定的比值范围内,流经阀口前后的气体质量流量基本保持不变,此时达到拉瓦尔管壅塞状态,与拉瓦尔管流量特性相吻合。

(2) 气体在阀口喉部流速达到声速,进入阀口后进一步加速到超声速,仿真结果与拉瓦尔管的数学特性相适应。

(下转第 1045 页)

表1 机组空载、满负荷状态动态检测数据

检测项目	空载状态	满负荷状态
转速/(r·min ⁻¹)	83.3	83.3
推力轴承2#瓦温/°C	29.2	32
推力轴承4#瓦温/°C	28.8	32.9
推力轴承6#瓦温/°C	28.5	32.3
推力轴承8#瓦温/°C	28.7	32.5
推力轴承10#瓦温/°C	28.8	32.4
推力轴承12#瓦温/°C	28.9	32
冷却器入油温度/°C	27.7	29.1
冷却器出油温度/°C	19.8	21.3
冷却油流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0.033 5	0.033 2
镜板泵出口压力/MPa	0.4	0.38
喷油管出口压力/MPa	0.22	0.21
冷却器进水温度/°C	15.9	16.4
冷却器出口温度/°C	17.2	19.3

4 结束语

本研究从推力轴承支撑特点出发,阐明了银盘水电站采用弹性油箱支撑对机组运行的优点,即当某块瓦受力超过其他瓦时,液压连通器自动调整各瓦受力,达到受力均匀的目的,大大提高了机组推力轴承的可靠性。通过分析推力轴承内、外循环的特点,基于镜板泵外循环系统的优点,本研究通过对镜板泵压头和流量关系的计算,结合机组运行的数据,得出了银盘水电站镜板泵实际压头系数和流量系数($\eta=0.286$, $K=0.18$),通过机组运行工况检测数据来看,推力轴承各个瓦温偏差较小,说明弹性油箱支撑

能够自动均衡负载,能够保证机组运行安全可靠,同时镜板泵外循环系统能够在设计工况点附近工作,从进、出口油温变换来看,能够极大地提高冷却作用,为机组轴瓦润滑提供保障。

通过机组运行工况来看,银盘水电站采用弹性油箱支撑的镜板泵外循环推力轴承其设计选型可靠,可为大中型轴流转桨式水轮发电机生产提供技术经验。

参考文献(References):

- [1] 单文培. 水电站机电设备的安装运行与检修[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 武中德,张宏,张仁江,等. 水轮发电机镜板泵外循环技术[J]. 华中电力,2004,17(6):32-34.
- [3] 罗正平. 水轮发电机推力轴承支撑结构性能的研究[J]. 东方电气评论,2000,14(3):142-147.
- [4] 于兰阶. 水轮发电机的安装与检修[M]. 北京:中国水利水电出版社,1995.
- [5] 黄瑛. 浅谈推力轴承的几种支撑形式[J]. 水电站机电技术,2003(3):18-21.
- [6] 张振祥,陈永清. 基于线阵CCD的轴承外圆表面缺陷检测[J]. 轻工机械,2010,28(4):70-72.
- [7] 王学锋. 汽轮机径向滑动轴承损坏原因及预防[J]. 现代制造技术与装备,2011(4):58-60.
- [8] 刘大凯. 水轮机[M]. 3版. 北京:水利水电出版社,1997.
- [9] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [10] 盛英英,黄德杰,尹迪江,等. 轿车轮毂轴承耐久性试验载荷谱的研究[J]. 机电工程,2010,27(6):40-43.

[编辑:罗向阳]

(上接第1038页)

参考文献(References):

- [1] 刘兴洲. 超燃冲压发动机性能初步研究[J]. 航空发动机,2007,33(2):1-4.
- [2] 任加万,谭永华. 冲压发动机燃烧室热防护技术[J]. 火箭推进,2006(4):38-42.
- [3] 鲍文,周伟星,周有新,等. 超燃冲压发动机再生冷却结构的强化换热优化研究[J]. 宇航学报,2008,29(1):246-251.
- [4] LIN K C, TAM, C J, JACKSON K. Fueling study on Scramjet Operability Enhancement [C]//Proceedings of 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Denver: [s.n.], 2009.
- [5] LI Song-jing, ZANG Zeng-wei, LI Yong-hong, et al. thermodynamic analysis of friction pairs inside a high temperature flow rate control valve for scramjet engines[J]. **Materials Science Forum**, 2008, 575-578(4): 1240-1245.
- [6] SOUKHANOVSKII V A, KUGEL H W, KAITA R, et al. Supersonic gas injector for plasma fueling [C]//Proceedings-Symposium on Fusion Engineering. Knoxville, TN, United states: [s.n.], 2005: 1-4.
- [7] 何立明,赵罡,程邦勤. 气体动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 周文祥,黄金泉,周人治. 拉瓦尔喷管计算模型的改进及其整机仿真验证[J]. 航空动力学报,2009,24(11):2601-2606.
- [10] 陈卓如,金朝铭,王洪杰,等. 工程流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[编辑:张翔]