# 基于二维不确定性量化分析的射流换向阀 切换性能研究<sup>\*</sup>

孙 娜1,谢 悦1,张 莹1,王佳兴1,牛 禄1,张 斌2

(1. 上海航天动力技术研究所,上海 201109;2. 上海交通大学 航空航天学院,上海 200240)

摘 要: 真实情况中, 射流换向阀的边界参数呈现明显的不确定性, 由于主流和控制流压强是影响 射流换向阀切换性能的重要因素, 因此其不确定性将导致切换性能产生明显的波动。采用不确定量化分 析方法中的 PCM 方法 (Probabilistic collocation method), 研究了主流和控制流压强的不确定性对射流换 向阀切换性能的耦合影响, 获得了一维和二维不确定度下的切换性能不确定度带。研究结果显示, 主流 或控制流压强的不确定性均使得射流换向阀切换性能产生明显的波动; 其中控制流压强的不确定性对其 影响尤为突出; 当存在二维不确定性时, 射流换向阀的切换性能将出现更大幅度的波动, 最大波动幅度 达29%。

关键词:射流;换向阀;不确定性;切换性能;数值计算 中图分类号:V439<sup>+</sup>.7 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2021)11-2432-06 DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200073

# Switching Performance of Jet Reversing Valve Based on Two-Dimensional Uncertainty Quantification

SUN Na<sup>1</sup>, XIE Yue<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, WANG Jia-xing<sup>1</sup>, NIU Lu<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China;2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract**: In the real environment, there is uncertainty on the boundary parameters of the jet reversing valve. The main and control pressure are the important factors to affect the switching performance. Thus there is uncertainty on performance of the jet reversing valve, because of uncertainty on main and control pressure. The probabilistic collocation method (PCM) is used to study the coupling effect of main and control pressure uncertainty on the switching performance of the jet reversing valve. And the uncertainty band of switching performance is obtained, under the one-dimensional and the two-dimensional uncertainty. The results show that the switching performance will be affected, if there is uncertainty on main or control pressure. Furthermore, the control pressure uncertainty is more important than main pressure uncertainty to affect the switching performance. In addition, if there is two-dimensional uncertainty, the greater fluctuation of switching performance will appear. The maximum fluctuation range will reach 29%.

Key words: Jet; Reversing valve; Uncertainty; Switching performance; Numerical calculation

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-02-19; 修订日期: 2020-08-07。

通讯作者:孙 娜,硕士,高级工程师,研究领域为火箭动力系统设计及流体数值仿真。

引用格式:孙 娜,谢 悦,张 莹,等.基于二维不确定性量化分析的射流换向阀切换性能研究[J].推进技术, 2021, 42 (11):2432-2437. (SUN Na, XIE Yue, ZHANG Ying, et al. Switching Performance of Jet Reversing Valve Based on Two-Dimensional Uncertainty Quantification[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(11):2432-2437.)

#### 2433

# 1 引 言

射流换向阀具有结构紧凑、响应频率高、抗电磁 干扰性好等优点。20世纪中叶,Harry Diamond实验 室提出了射流控制理论<sup>[1]</sup>,其在工业中已得到了广泛 应用。在军事领域中,俄罗斯"旋风"弹、美国"橡树 棍"、"小约翰"、我国A100火箭弹等<sup>[2-3]</sup>,都应用射流 换向技术来实现对导弹飞行姿态的控制,以提高其 机动性能和打击精度。在民用领域,包括我国在内 的众多国家已将射流换向技术应用在矿业开采和医 疗卫生等方面。

多年来,国内外专家学者对此项技术开展了大 量研究。20世纪,总结出在射流换向元件二维稳态 情况下,内部流体压强、速度、自由流边界等参数之 间的关系<sup>[4]</sup>将超声速射流换向阀成功应用于火箭弹 的姿态控制中,并进行了试验测量<sup>[5]</sup>。21世纪,设计 了二级射流换向阀,并对其流场进行了数值模拟研 究<sup>[6]</sup>,并对射流换向元件的动力特性进行了详细的数 值模拟和冷气试验研究<sup>[7]</sup>。赵磊等<sup>[8]</sup>对弹载射流驱 动机构瞬态响应过程建立了数学模型。王占学等<sup>[9]</sup> 对激波控制的流体矢量喷管进行了试验研究。侯定 起<sup>[10]</sup>对超声速射流双稳阀的控制流压强等工况变化 对切换性能的影响进行了研究。孙娜等<sup>[11]</sup>对流道尺 寸参数对射流换向阀性能的影响进行了研究,优化 了流道参数、提升了切换性能。

目前,国内外对射流换向相关特性的研究中几 乎都默认其边界条件为确定数值,而真实情况中,由 于气源不稳定、机械振动等因素,使得其边界条件呈 现出明显的不确定性。由于射流换向阀依靠激波扰 动使主流发生偏转,其切换性能对边界压强具有极 高的敏感性。因此对边界压强进行不确定性量化分 析,研究其不确定性对系统切换性能的影响,对认识 其真实物理过程,掌握其能否有效完成任务具有重 要意义。

自20世纪70年代起,许多国外学者对不确定性 量化方法(Uncertainty quantification, UQ)开展了研 究。文献[12-14]更是成功地将此类方法应用在不 同领域的燃烧或流动问题中。本文应用不确定性量 化方法中计算量较小且计算精度较高的概率配置点 法(Probabilistic collocation method, PCM)<sup>[15-16]</sup>,研究主 流及控制流压强波动在系统中的传播规律,获得此 二维不确定性对射流换向阀切换性能的耦合影响机 制,并得出其定量化关系。

# 2 物理模型与计算方法

射流换向阀是一种用射流来控制主流体流向的 装置。它将控制流作用在主流体的超声速区域,利 用产生的激波使主流体发生偏转。图1为射流换向 阀原理图,主流1通过射流喷管以超声速形式进入接 收段,控制口流入的小流量控制流2与主流1相互作 用,产生斜激波,使主流改变流向切换到对侧,由于 附壁效应以及劈尖3的限制,使得主流切换后从一侧 通道(即图中4)排出产生推力。



Fig. 1 Schematic diagram of jet reversing valve

由图1所示,b为射流喷管喉部尺寸,也是射流换 向阀的特征尺寸,h为控制口径,w为射流下游的扩张 径,H为劈尖到射流口的劈距,2φ为扩张角(φ为扩张 半角)。本文中计算模型具体尺寸参数如表1所示。 由于射流元件流道为矩形流道,因此可将其简化为 二维问题进行计算,通过网格无关性验证后,确定采 用如图2所示的结构化网格进行计算。

Fable 1	Dimensional	parameters of	f jet	reversing	valve
---------	-------------	---------------	-------	-----------	-------



Fig. 2 Computation area of jet reversing valve

利用 FLUENT 软件,求解二维 Navier-Stokes 方程 组,选择 *k-e* RNG 湍流模型,近壁处理采用非平衡壁 面函数法。计算做出如下假设:

(1)假设气体为单相理想气体;

(2)假设为绝热壁面;

(3)不考虑化学反应和热辐射。

主流和控制流入口压强符合高斯分布,具体选取抽样点方法将在第3节详细说明,其温度均为 1600K。由于主流经过射流喷管后将随机附着一侧 壁面流动,因此将相应侧控制口设置为控制流入口, 另一侧控制口设置为壁面。根据上述模型及假设对 射流换向阀内瞬态流动进行数值计算及分析。

# 3 结果与讨论

#### 3.1 PCM方法简介及抽样点选取

早期,人们常使用蒙卡法、最小二乘法等来解决 不确定性量化问题,但其存在计算量过大等问题。 本文采用UQ方法中收敛速度快、计算精度高的PCM 方法<sup>[17]</sup>。对存在二维不确定性的射流换向阀切换性 能进行研究。此方法的精度验证在参考文献[17-18]中有详细论述。

PCM方法的主要步骤如下:(1)确定参数的不确 定度变化范围;(2)根据分布采用PCM方法获取抽样 点;(3)将抽样点相关参数值输入计算模型,获得目标 输出参数;(4)采用PCM方法对数值计算结果进行分 析,获得不确定度条件下的系统输出响应统计特性。

本文主要研究射流换向阀边界压强(即主流及 控制流压强)的不确定性对其性能的影响,其它参数 保持不变。因此,这是一个二维不确定性量化问题。 主流和控制流平均压强分别为 $p_m=9MPa, p_e=4MPa$ 。 假设其概率分布符合自然界中普遍存在的高斯分 布,选取 $2\sigma_m = \Delta p_m = 9 \times 12.5\%(\sigma_m)为标准差, \Delta p_m)$ 为 最大偏差,  $\Delta p_m$ 取平均值 $p_m$ 的12.5%), 主流压强分布 在( $p_m - 2\sigma$ ,  $p_m + 2\sigma$ )区间,即(9-1.125,9+1.125)区 间内概率为95.45%;同样选取2 $\sigma_e = \Delta p_e = 4 \times 12.5\%$ ( $\sigma_e$ 为标准差,  $\Delta p_e$ 为最大偏差,  $\Delta p_e$ 取平均值 $p_e$ 的 12.5%), 控制压强分布在( $p_e - 2\sigma$ ,  $p_e + 2\sigma$ )区间,即 (4-0.5,4+0.5)区间内概率为95.45%。根据上述分布 采用 PCM 方法获取此二维不确定性量化问题的抽样 点,即 7<sup>2</sup> = 49个抽样点,进行数值计算,抽样点具体 参数值见表2。

 Table 2
 Main pressure and control pressure of sample points (MPa)

No.	1	2	3	4	5	6	7
$p_{\rm m}$	6.89	7.67	8.35	9.00	9.65	10.33	11.11
$p_{\rm c}$	3.06	3.41	3.71	4.00	4.29	4.59	4.94

#### 3.2 各抽样点计算结果及分析

根据 PCM 方法获取的抽样点,进行不同工况下 的射流换向阀瞬态流动数值计算,获得其开始切换 时间 t1(即射流换向阀受力换向时间)和切换稳定时 间 t2(即完成切换且流场稳定时间),通过 PCM 方法 获得主流及控制流压强不确定性对其切换性能的影 响,并得出定量化关系。

由于工况数量较多,选取射流换向阀切换性能 较差、切换性能较好及不切换等三种具有代表性的 工况的内部流场瞬态变化进行展示,即表3中标红工 况,其马赫数分布云图如图3所示。

由图 3 可以看出主流压强的增加将导致射流喷 管出口流速显著增加,当主流从 6.89~11.11MPa过程 中,其射流喷管出口流速从 Ma1.23 增加至 Ma1.86。 由图 3(a),3(b)可知,喷管出口的主流在受到控制流 扰动时,由于斜激波的作用使其逐渐改变流动方向, 主流开始切换方向到切换稳定,需要一定的过渡时

$p_c$ /MPa	<i>p</i> <sub>m</sub> =6.89МРа		<i>p</i> <sub>m</sub> =7.67МРа		<i>p</i> <sub>m</sub> =8.35МРа		<i>p</i> <sub>m</sub> =9.00МРа		<i>p</i> <sub>m</sub> =9.65МРа		<i>p</i> <sub>m</sub> =10.33MPa		<i>p</i> <sub>m</sub> =11.11MPa	
	t1	<i>t</i> 2	t1	<i>t</i> 2	t1	<i>t</i> 2								
3.06	0.19	0.27	0.11	0.17	—	—	—	—	—	_	_	—	—	—
3.41	0.09	0.19	0.07	0.14	0.08	0.14	0.13	0.20	_	_	_	_	—	—
3.71	0.09	0.15	0.07	0.14	0.07	0.14	0.08	0.14	0.15	0.20	_	_	—	—
4.00	0.08	0.14	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.08	0.14	_	_	—	—
4.29	0.07	0.14	0.07	0.13	0.06	0.13	0.07	0.12	0.08	0.14	0.18	0.24	—	_
4.59	0.07	0.14	0.07	0.13	0.06	0.13	0.06	0.12	0.08	0.14	0.18	0.24	—	—
4.94	0.07	0.14	0.07	0.13	0.06	0.13	0.06	0.12	0.08	0.14	0.18	0.24	_	_

Table 3 Calculating data of sample points (ms)

Annotation:"-"means unable to switch



Fig. 3 Mach number of some examples

间,同时随着主流压强和控制流压强的变化,主流开 始切换时间和切换稳定时间均将出现显著波动。然 而当控制流扰动不足以使得主流切换方向时(见图3 (c)),仅能使主流流动稍作变化而无法使其切换至对 侧出口。为详细地定量分析射流换向阀切换性能随 主流和控制流压强变化情况,将各抽样点具体计算 数据列入表3。

由表3可知,若控制流压强存在不确定性,主流

压强为设计值 9MPa,则随着控制流压强的不断增大, 主流开始切换时间和切换稳定时间将越来越短,而 当控制流压强增加到一定程度后,切换时间将不再 继续缩短,而基本维持不变。若主流压强存在不确 定性,控制流压强为设计值 4MPa,则随着主流压强的 不断增大,开始切换时间和切换稳定时间将先减小 后增大,直至无法切换。表 3 中阴影部分工况为切换 性能较为稳定区域,即  $t1 \in [t1_{min}, t1_{min} + 0.03]$ ,其中  $t1_{min} = 0.06ms; \pm t2 \in [t2_{min}, t2_{min} + 0.03]$ 。其中, $t2_{min} =$ 0.12ms。同时可知,若主流压强由平均压强 9MPa向 减小趋势波动,或控制流压强 4MPa 向增大趋势波 动,则其切换性能将可保持良好的稳健性,若上述波 动趋势相反,当控制流压强低于主流压强的 40% 以 下,其切换性能将急剧下降,直至无法切换。

#### 3.3 试验结果对比及分析

如图4所示,将电磁导阀及射流换向阀组成试验 系统,进行试验,其中电磁导阀负责开启控制口从而 注入控制气流,同时分别在射流换向阀左右两侧的 排气通道下游布置测压点,测压传感器采用耐恶劣 环境能力强的溅射薄膜式压力传感器,其测量值为 0~20MPa,误差为±0.07%,能够满足试验要求。

试验曲线如图5、6所示,自控制端发出控制信号 到射流换向阀相应侧出口下游出现压升的时间,为 射流换向阀总的响应时间,即 $t_x = t_4 - t_3$ ,其平均值  $\bar{t}_{x} = 5.15 \text{ ms}, \bar{t}_{x}$ 由三部分组成,一部分为电磁导阀 开启控制口注入控制气流的响应时间t<sub>4</sub>;一部分为控 制气流作用主气流使其成功偏转切换时间,即为本 文前面研究的射流换向阀切换时间t;另一部分则为 切换后气流从射流换向阀相应侧流经下游排气通道 并在出口产生明显压升的时间 $t_{p}$ ,即 $t_{z} = t_{d} + t_{s} + t_{po}$ 由电磁导阀性能测试可知(见图7),该导阀响应时间 即控制信号发出至相应控制侧入口产生压升时间, 其平均值 $\overline{t}_d$  = 5.05ms,因此, $t_s$  +  $t_p$  =  $t_z$  -  $t_d \approx 0.10$ ms。 由于 t<sub>n</sub> > 0, 故 0 < t<sub>s</sub> < 0.10ms。由表 3 计算数据可 知,其稳定切换工况下射流换向阀开始切换时间t1 均在合理范围内,与试验结果吻合较好,证明数值计 算结果可信。

#### 3.4 不确定性量化分析

应用 PCM 程序对数值计算结果进行分析,获得 主流及控制流压强的不确定度导致的射流换向阀切 换性能不确定度带。其平均值及标准差见表4。如 表4所示,主流压强在12.5%范围内波动(一维不确 定性),将导致射流换向阀切换性能波动的范围分别

Table 4         Influence of pressure uncertainty									
Parameter	Main pressur	e uncertainty	Control pressu	re uncertainty	Main and control pressure uncertainty				
	t1/ms	<i>t</i> 2/ms	t1/ms	t2/ms	t1/ms	<i>t</i> 2/ms			
Average value $\mu$	0.070	0.126	0.074	0.132	0.076	0.133			
Standard deviation $\sigma$	0.005	0.004	0.011	0.014	0.022	0.021			
Deviation degree $\delta = \frac{\sigma}{\mu}$	0.068	0.032	0.150	0.107	0.290	0.160			



Fig. 4 Test system



Fig. 5 Jet reversing valve pressure curve



Fig. 6 Partial enlargement of pressure curve

为: $\delta_{i1} = 6.8\%, \delta_{i2} = 3.2\%$ ;控制流压强在12.5%范围 内波动(一维不确定性),将导致射流换向阀切换性 能波动的范围分别为: $\delta_{i1} = 15.0\%, \delta_{i2} = 10.7\%$ ;主流 和控制流压强都在12.5%范围内波动(二维不确定



性),将导致射流换向阀切换性能波动的范围分别 为:δ<sub>11</sub> = 29.0%,δ<sub>2</sub> = 16.0%。可以看出,控制流压强 的不确定性对射流换向阀切换性能的影响尤为显 著,当主流和控制流均存在不确定性时,即存在二维 不确定性,将对射流换向阀切换性能造成更为严重 的影响,使其切换时间出现大幅波动,最大幅度可达 29%。

## 4 结 论

本文研究了射流换向阀主流和控制流压强的不 确定性对其切换性能的影响,得出以下结论:

(1)当主流压强不变时,随着控制流压强的增 大,射流换向阀的切换时间将不断缩短,当控制流压 强增大到一定程度后,切换时间将不再继续缩短,基 本维持不变;当控制流压强不变时,随着主流压强的 增加,切换时间将呈现先减小后增大的趋势,直至无 法切换。

(2)当主流压强向减小趋势波动,控制流压强向 增大趋势波动,则系统切换性能将可保持良好的稳 健性;若上述波动趋势相反,则当控制流压强低于主 流压强的40%以下时,系统切换性能将急剧下降,直 至无法切换。

(3)当主流和控制流压强其中之一存在波动时, 其切换性能都将随之波动,其中控制流压强的不确 定性对系统切换性能的影响更为显著,其波动范围

### 参考文献

- [ 1 ] Joyce J W, Gottron R N. Fluidics-Basic Components and Applications[R]. HDL-SR-83-9, 1983.
- [2] 伊凡斯J, 霍夫曼J. 射流导弹控制系统低成本生产研究[R]. AD-690853.
- [3] 薛晓强.超音速射流双稳阀的数值模拟[D].浙江:浙 江工业大学,2004.
- [4] Cornelius C S. Research and Development Fluidic Control Concepts and Designs[R]. AD-724126, 1971.
- [5] Victor W Ruwe. DCAT Experimental Evaluations and System Development[R]. AD-022892, 1975.
- [6] Roger R P, Chan S C. Numerical Study of Fluidic Bistable Amplifiers[R]. AIAA 2003-3459.
- [7] Jun-Young H, Kwanghee Y, Yeol L, et al. Dynamic Characteristics of a Fluidic Valve for Divert and Attitude Control System[R]. AIAA 2010-6854.
- [8] 赵 磊,杨树兴.弹载射流驱动机构的瞬态响应分析
   [J].弹箭与制导学报,2002,22(3):117-120.
- [9] 王占学,王玉男,李志杰,等.基于激波控制的流体 推力矢量喷管试验[J].推进技术,2010,31(6):751-756. (WANG Zhan-xue, WANG Yu-nan, LI Zhi-jie, et al. Experiment on Fluidic Thrust-Vectoring Nozzle Based on Shock Control Concept[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(6):751-756.)
- [10] 侯定起.超音速射流双稳阀的设计[D].北京:北京理工大学,2015.

- [11] 孙 娜,王佳兴,马新建,等.轻小型超声速射流控制元件性能影响因素研究[J].推进技术,2019,40
  (3):525-531. (SUN Na, WANG Jia-xing, MA Xin-ji-an, et al. Analysis of the Influence Factors of the Light-Small Supersonic Fluidic Element[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(3):525-531.)
- [12] Davis M J, Skodje R T. Global Sensitivity Analysis of Chemical-Kinetic Reaction Mechanisms: Construction and Deconstruction of the Probability Density Function
  [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2011, 115(9): 1556-1578.
- [13] Cinnella P, Gloerfelt X, Merle X. Direct and Inverse Uncertainty Quantification of Acoustic Refraction Phenomena Through a Shear Layer[R]. AIAA 2015-2675.
- [14] Platteeuw P D A, Loeven G J A, Bijl H. Uncertainty Quantification Applied to the k-Epsilon Model of Turbulence Using the Probabilistic Collocation Method [R]. AIAA 2008-2150.
- [15] Li H, Zhang D. Probabilistic Collocation Method for Flow in Porous Media: Comparisons with Other Stochastic Methods [J]. Water Resources Research, 2007, 43 (9): 1-13.
- [16] Eldred M, Burkardt J. Comparison of Nonintrusive Polynomial Chaos and Stochastic Collocation Methods for Uncertainty Quantification[R]. AIAA 2009–976.
- [17] Xiu D, Hesthaven J S. High-Order Collocation Methods for Differential Equations with Random Inputs [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2005, 27(3): 1118-1139.
- [18] 孙 娜,张 莹.控制压强不确定性对超声速射流控制元件性能影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39 (5): 73-76.

(编辑:史亚红)