

# 航天器用侧向力气源装置供气特性的研究

## Research on Gas Supply Characteristics of Lateral Force Device of Spacecraft

杨美娟<sup>1</sup> 卢猛<sup>1</sup> 张建海<sup>2</sup> 林乐刚<sup>1</sup>

1 中国空空导弹研究院凯迈(洛阳)气源有限公司 2 总装驻郑州地区军事代表室

**摘要:**传统的直接侧向力一般是由燃气发生器提供,在国内由燃气瓶提供侧向力有很多缺点,并且极易造成爆炸,容易干扰航天器的电磁信号的收发。所以本文尝试采用小型气瓶提供侧向力,对比了负载为直孔、节流片和拉瓦尔喷管的情况下侧向力的大小以及氮气和氩气的供气时间。结果表明,拉瓦尔喷管由于其特殊结构,起到显著增加侧向力的作用;在相同负载的前提下,氩气的供气时间比氮气的有所增加。

**Abstract:** Direct lateral force is usually provided by a gas-powered engine. In the domestic, gas bottle generating lateral forces has many shortcomings, and is apt to explode, can easily interfere with the electromagnetic signals transceivers of the spacecraft, so the paper tries using a small cylinder to provide the lateral force, and compares with the lateral force of straight holes, cutting pieces and laval nozzle, and also compares the working hours of the nitrogen and argon. The results show that, laval nozzle plays a significant role to increase the lateral force as its special structure; the working hours of argon are longer than the nitrogen under the same load condition.

**关键词:** 气瓶; 拉瓦尔喷管; 侧向力; 氩气; 氮气

**Keywords:** cylinder; laval nozzle; lateral force; argon; nitrogen

## 0 引言

为了提高制导控制精度,最直接有效的办法是在拦截过程末段增加直接侧向力控制系统<sup>[1]</sup>。直接侧向力一般是由燃气动力发动机或燃气发生器提供。燃气动力发动机通常采用许多径向排列的快速点火的小型推进发动机组合,其喷口在壳体表面绕纵轴周围均匀的形成环形分布;或者以侧向喷流的形式,沿弹体截面以90°的间隔均匀分布四个侧向喷管,各喷管的轴线垂直于弹体轴线<sup>[2]</sup>,产生的直接侧向力施加在弹体纵轴上。美国和俄罗斯的燃气动力直接侧向力技术已经较为成熟,其供气时间也是可控的。国内直接侧向力技术的研究起步较晚,目前多采用燃气瓶提供侧向力,但是燃气的释放会造成发动机内部温度的降低,极易造

成爆炸,而且供气时间也不可控。所以目前国内尝试采用小型气瓶提供侧向力,气瓶中可充装氮气、氩气或氟气,采用一次性开瓶提供所需的侧向力。

但是现有的这种侧向力气瓶所能提供的供气时间和侧向力是两个矛盾的参数,由于安装空间有限,气瓶的容积受到限制,往往在能满足供气时间的前提下侧向力达不到要求,本文就侧向力和供气时间的影响因素做了一系列试验,并就侧向力提高措施方

面做了一些探索。

## 1 试验设备与试验方法

### 1.1 试验设备

气试验设备包括由凯迈(洛阳)气源有限公司提供的气源控制台(型号为QYZ025)、弹上气源测试装置(型号为QY-JZ017)和力传感器(型号为QYZ062)。

### 1.2 试验方法

试验气路图如图1所示。

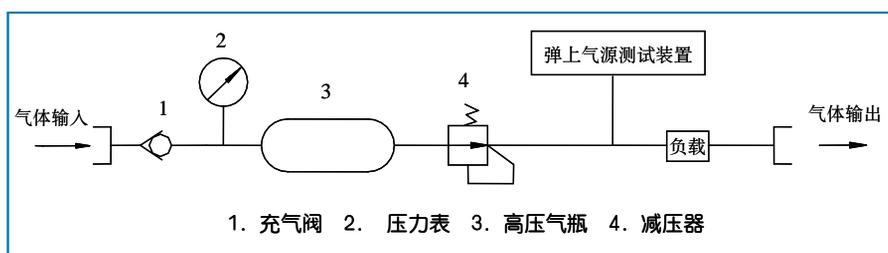


图1 试验气路图

给气瓶充气到65MPa, 调整减压阀到所需的压力, 通过相应的负载输出气体, 利用弹上气源装置收集气瓶的供气时间, 采用力传感器测试侧向力, 其中负载分别采用直孔、节流片和拉瓦尔喷管。图2为直孔、节流片和拉瓦尔喷管的结构示意图。

负载类型	示意图	$\Phi_d$ /mm
直孔		1.10 ± 0.01 1.15 ± 0.01 1.20 ± 0.01
节流片		
拉瓦尔喷管		

图2 负载结构示意图

## 2 结果和分析

### 2.1 气瓶的侧向力与负载类型的关系

气瓶中充装氮气, 分别对三种类型的负载进行侧向力的测量, 其结果如表1所示。

从表1可以看出, 无论是对于节流孔、节流片还是拉瓦尔喷管, 侧向力随着负载孔径的增加而增大; 另外对于同等孔径的负载, 直孔的侧向力最小, 主要是因为直孔流道长, 摩擦损失增大, 所以侧向力也随之减小。而拉瓦尔喷管起到了显著增大侧向力的作用。下面就拉瓦尔喷管的工作原理进行简单介绍。

喷管的前半部是由大变小向中间收缩至一个窄喉, 窄喉之后又由小变大向外扩张至箭底。箭体中的气体受高压流入喷嘴的前半部, 穿过窄喉后由后半

表1 三种负载侧向力的大小

负载类型	1.10 $_{-0.01}^{+0.01}$ 的侧向力(N)	1.15 $_{-0.01}^{+0.01}$ 的侧向力(N)	1.20 $_{-0.01}^{+0.01}$ 的侧向力(N)
直孔	5.59	5.78	6.17
节流片	5.78	5.98	6.47
拉瓦尔喷管	7	7.42	7.57

部逸出。这一结构可使气流的速度因喷截面积的变化而变化, 使气流从亚声速到声速, 直至加速至跨声速。

分析一下拉瓦尔喷管的原理。发动机中的燃气流在燃烧室压力作用下, 经过喷管向后运动, 进入喷管的 $A_1$ 截面。在这一阶段, 燃气运动遵循“流体在管中运动时, 截面小处流速大, 截面大处流速小”的原理, 因此气流不断加速。当到达窄喉时,

流速已经超过了声速。而跨声速的流体在运动时却不再遵循“截面小处流速大, 截面大处流速小”的原理, 而是恰恰相反, 截面越大, 流速越快。在 $A_2$ 截面, 燃气流的速度被进一步加速, 为2~3千米/秒, 相当于声速的7~8倍, 这样就产生了巨大的推力。

拉瓦尔喷管实际上起到了“流速增大器”的作用<sup>[3]</sup>。

所以, 在同样输出负载的前提下, 要想使侧向力有所增加, 只有采用拉瓦尔喷管。

### 2.2 气瓶的供气时间、侧向力与输出压力的关系

选取负载孔径为1.15 ± 0.01mm的拉瓦尔喷管, 气瓶中充装氩气, 输出压力分别为5MPa、6MPa, 观察气瓶

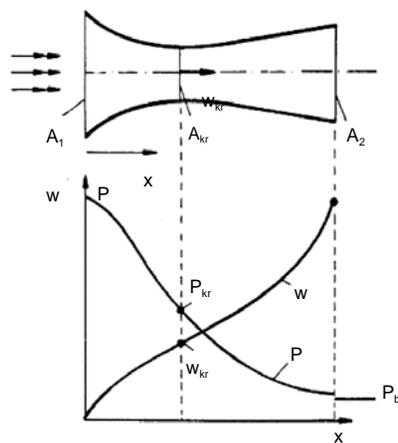


图3 拉瓦尔喷管原理图

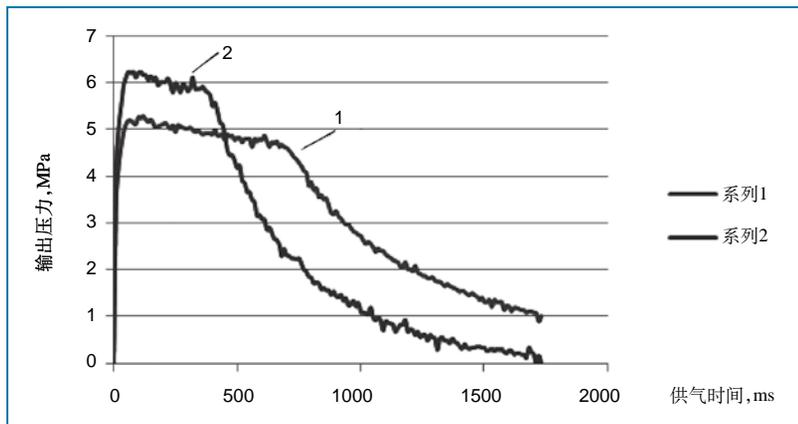


图4 同种气体的供气时间随输出压力的变化曲线

的供气时间，试验结果如图4所示。

其中系列1的输出压力为5MPa；系列2的为输出压力为6MPa。

从图4可以看出，在气瓶中气体均为氩气的情况下，随着输出压力的增加，气瓶的供气时间呈减小趋势。从表2可以看出，侧向力的大小随着输出压力的增加而增加。这主要是因为当输出压力增加时，气体的流量增加，从而造成供气时间的减少。

### 2.3 气瓶的供气时间与气体性质的关系

选取负载孔径为 $1.15 \pm 0.01\text{mm}$ 的拉瓦尔喷管，气瓶中分别充装氮气和氩气，试验结果如图5所示。

其中系列1为氮气；系列2为氩气。

从图5可以看出，当气瓶充装氩气时，供气时间比充装氮气的有所增加。原因分析如下。

$$\text{由流量公式 } Q = aI13AP\sqrt{\frac{273}{T}} \quad (1)$$

其中， $a$ 为将空气流量转换为不

同气体使用的大约系数，对于氮气， $a \approx 1$ ；对于氩气， $a \approx 0.852$ 。 $A$ 为负载节流孔面积。 $P$ 为负载前端压力，即图5中曲线的纵坐标。 $T$ 为试验环境温度。

将已知参数代入式(1)中得出，氮气的流量： $Q_{\text{氮气}} = 577.5\text{L/min}$

氩气的流量： $Q_{\text{氩气}} = 492\text{L/min}$

工作时间的计算：

$$Q_{\text{气瓶}} = Q_{\text{余}} + Q_{\text{耗}}$$

$$Q_{\text{气瓶}} = V\rho_{\text{余}} + Q_{\text{耗}}t_{\text{工作}} \quad (2)$$

其中，气瓶充氮气的充气量： $Q_{\text{气瓶}} = 10.84\text{g}$ ；气瓶充氩气的充气量： $Q_{\text{气瓶}} = 18.5\text{g}$ 。气瓶的容积 $V = 25\text{mL}$ ，氮气余气的密度 $\rho_{\text{余}} = 0.132\text{g/cm}^3$ ；氩气余气的密度 $\rho_{\text{余}} = 0.254\text{g/cm}^3$ 。工作状态下氮气的密度 $\rho_{\text{工作}} = 0.00116\text{g/cm}^3$ ；工作状态下氩气的密度 $\rho_{\text{工作}} = 0.00166\text{g/cm}^3$ 。

将上述数据代入式(2)得出，

氮气的工作时间： $t_{\text{氮气}} = 675\text{ms}$

氩气的工作时间： $t_{\text{氩气}} = 890\text{ms}$

无论理论计算还是试验，氩气

的供气时间都比氮气时间长，这主要是因为氩气的分子量为40，而氮气的为28，分子量的增加导致充气总量增加，所以造成供气时间的延长。

通过理论计算，氩气供气时间比氮气有明显增加，但是实际中氩气的供气时间比氮气略有增加，增加效果不大，这是由于氩气的分子量大，造成气瓶中余气增加所致。此外，对氮气的特性进行了研究，由于分子量大，其供气时间和侧向力都增加，但由于分子量大供气末端仍产生一定的力影响，控制时需综合考虑。

### 3 结论

综上所述，可得出三点结论。

- 1) 拉瓦尔喷管由于其特殊结构，起到显著增加侧向力的作用。
- 2) 氩气的供气时间比氮气有所增加，所以在成本和产品总重允许的前提下，尽可能采用氩气。
- 3) 供气时间和侧向力是一对矛盾的指标，要想使两者同时满足要求，则需要采用拉瓦尔喷管结构。

### 参考文献

[1] 王宏利. 导弹复合控制系统切换控制方法[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2010.

[2] 程凤舟,万自明,陈士槽,于本水. 防空导弹直接力与气动力复合控制系统设计[J]. 飞行力学, 2003(6):49-52.

[3] 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002:780-786.

[4] 毕明树. 工程热力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2008:304-306.

### 作者简介

杨美娟, 助理工程师, 主要从事军用气瓶、阀门等方面的研究工作。

表2 侧向力的大小

介质	输出压力(MPa)	1.15 <sub>-0.01</sub> 的侧向力(N)	1.20 <sub>-0.01</sub> 的侧向力(N)
氩气	5	7.42	6.17
氩气	6	8.1	6.47

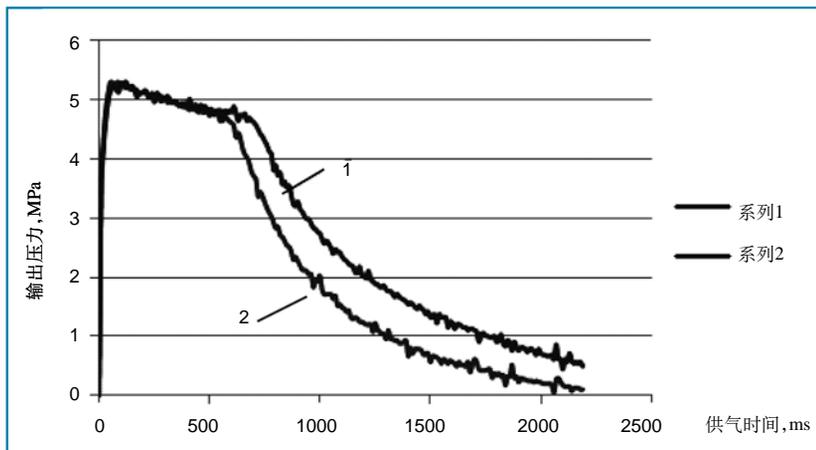


图5 不同气体的供气时间随输出压力的变化曲线