



Research on Closed-Loop Control and Flow  
Noise for Piezoelectric Type Micro Flow  
Controller for Electric Propulsion

---

Yingying Zhang, Xudong Wang, Xinju Fu, Zhanhai Zhang,  
Zhiping Li and Zongliang Li

EasyChair preprints are intended for rapid  
dissemination of research results and are  
integrated with the rest of EasyChair.

April 10, 2022

# 电推进压电式微流量控制器闭环控制及流量噪声研究分析

张莹莹<sup>1,\*</sup> 汪旭东<sup>2</sup> 付新菊<sup>3</sup> 张占海<sup>4</sup> 李志平<sup>5</sup> 李宗良<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> 北京控制工程研究所, 北京市海淀区中关村南三街16号, 100094

\*通讯作者. Email: [zhangyhit@hotmail.com](mailto:zhangyhit@hotmail.com)

## 摘要

针对电推进中使用压电陶瓷作为驱动组件的微流量控制器的控制问题, 以直接采集的流量作为控制量, 给出了可以消除压电陶瓷迟滞和蠕变特性的闭环控制方法, 通过对真实流量控制系统的实验验证了该控制方法能够有效地快速稳定和跟随流量, 并且分析了环境温度对闭环流量控制的影响。通过对所获得的流量数据的功率谱密度分析可知, 闭环控制下的流量在低频下的功率谱密度值较大, 流量噪声在低频段显著。

**Keywords:** 压电陶瓷, 流量控制, 闭环控制, 噪声影响, 功率谱密度

## Research on closed-loop control and flow noise for piezoelectric type micro flow controller for electric propulsion

Zhang Yingying<sup>1,\*</sup> Wang Xudong<sup>2</sup> Fu Xinju<sup>3</sup> Zhang Zhanhai<sup>4</sup> Li Zhiping<sup>5</sup> Li Zongliang<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

\* Corresponding author. Email: [zhangyhit@hotmail.com](mailto:zhangyhit@hotmail.com)

## Abstract

Aiming at the control problem of micro flow controller using piezoelectric ceramics as driving components in electric propulsion, we directly use the collected flow as the control state and give a closed-loop control method which can eliminate the hysteresis and creep characteristics of piezoelectric ceramic. Through the experiment with the real flow control system, it is verified that the control method can effectively stabilize and follow the flow, and the influence of ambient temperature on the closed-loop flow control is analyzed. Then by analyzing the power spectral density analysis of the obtained flow data, it can be seen that the power spectral density of the flow under closed-loop control is large at low frequency, that the flow noise is significant at low frequency.

**Keywords:** Piezoelectric ceramics, flow control, closed-loop control, noise influence, power spectral density

## 1. 引言

微流量控制器作为电推进系统的重要组成部分, 其作用是调节推进剂的流量并实现精确分配, 确保电推进系统的长寿命和高可靠性<sup>[1]</sup>。随着各种科学探测需求的增加, 对微流量控制器提出了更多要求, 包括大流量范围内连续可调以及精度高、输出稳定、响应快等调节特性, 因此找到有效和可靠的微流量控制器的控制方法以满足高精度的流量调节至关重要。

目前, 在电推进系统中使用的微流量控制器包

括以金属毛细管、节流孔板和金属多孔材料作为节流结构<sup>[2-5]</sup>的固定结构节流式微流量控制器, 以及磁致式流量控制阀和压电驱动式流量控制阀。固定结构节流式微流量控制器采用间接流量调节方式, 通过对影响流量的孔径和压力进行调节来达到调节流量的目的, 其结构简单、研制难度低, 但需要预先进行地面标定并以标定值作为空间环境中电推进系统流量调节的依据, 并且流量调节响应速度慢、精度低。磁致式流量控制阀利用励磁电流使磁致伸缩材料产生形变的方式实现流量调节<sup>[6]</sup>, 美国Moog公司开发的以电推力器阳极电流作为采集信号进行流

量控制的51E339型流量比例控制阀<sup>[7-9]</sup>，能够满足大流量范围内调节和高精度的要求，但考虑到推力器阴极流量的控制，还需要在其下游设置流量分配器，因此该磁致式流量比例控制阀仅相当于流量控制系统中的减压器。压电驱动式流量控制阀利用压电材料的逆压电效应驱动阀体运动来实现流量调节，该种阀可以直接利用采集的流量信号进行控制，精度高、调节范围大，英国 Marotta 公司为 ROS 2000、T6 型离子电推进器研制了流量范围为 0~25 mg/s 的压电比例控制阀<sup>[10]</sup>，意大利 AAS-I 公司研制了可在 -30℃~+50℃ 温度范围内工作的压电式流量比例控制阀<sup>[6]</sup>，加拿大 VACCO 公司最新开发了一种高精度的用于真空环境下压电控制阀<sup>[11]</sup>。

本文将研究以压电材料作为驱动组件的电推进微流量控制器的控制问题。压电材料尤其以压电陶瓷作为执行部件的控制器具有位移输出精度高的特点，但由于压电陶瓷具有开压和降压曲线之间存在位移差值称为蠕变特性，以及位移接近一定值后继续随时间而缓慢变化的迟滞特性<sup>[12-13]</sup>，为流量控制器的精准控制和流量快速稳定带来了困难。因此在本文中考虑直接使用采集流量作为控制量的闭环控制方法，使流量快速到达目标值并保持动态平衡，从而消除压电驱动组件蠕变和迟滞的影响。

本文针对电推进系统中使用的压电式微流量控制器的控制问题，首先给出流量控制器的闭环控制模型，然后将该控制方法引入到真实流量控制系统中来验证该控制方法的可靠性，然后通过在不同环境温度工况下的实验来分析温度对流量闭环控制效果的影响，并用功率谱密度来分析该控制方法的流量噪声影响。

## 2. 微流量控制器控制模型

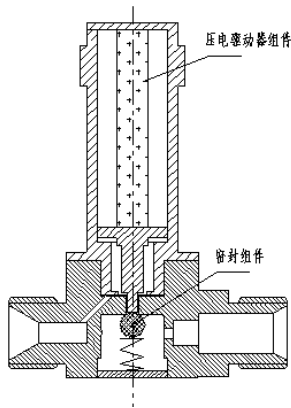


图 1 微流量控制器组件示意图

如图 1 所示，微流量控制器由衔铁组件、密封组件、压电驱动组件等几部分组成，压电驱动组件的主要结构为压电陶瓷。通过控制施加在压电驱动组件上的电压，从而调节微流量控制器的阀口开度实现对流量的控制。在超临界及临界状态下，流量的计算公式为

$$\dot{m} = C_d f_1 P_i \sqrt{\frac{2k}{RT(k+1)}} \times \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (1)$$

其中， $\dot{m}$  为通过阀门的质量流量， $C_d$  为通过阀门的流量系数， $f_1$  为阀口节流面积， $P_i$  为入口压力， $R$  为气体常数， $T$  为通过阀门的推进剂的绝对温度， $k$  为绝热指数。

由公式(1)可知，通过阀门的质量流量  $\dot{m}$  由流量系数  $C_d$ 、通过阀门的推进剂的温度  $T$ 、入口压力  $P_i$  及阀口面积  $f_1$  决定；当入口压力  $P_i$  及推进剂的温度  $T$  一定时，通过阀门的质量流量  $\dot{m}$  主要由阀口面积  $f_1$  决定，所以可以通过调节阀口面积来得到所需的流量。

阀口面积与阀口开度的关系为

$$f_1 = \pi d a \delta \frac{1 + \frac{\delta}{2a}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (a + \delta)^2}} \quad (2)$$

$$a = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3)$$

其中， $\delta$  为阀口开度， $d$  为阀座孔直径， $r$  为密封球半径。

阀口开度和控制电压的关系可用一个二阶阻尼振动模型表示

$$m\ddot{\delta}(t) + b\dot{\delta}(t) + k\delta(t) = k_v V(t) + h(t) \quad (4)$$

忽略压电动态特性时，公式(5)可以简化为

$$\delta(t) = k_v V(t) + h(t) + x_0 \quad (5)$$

其中， $h(t)$  为压电陶瓷的迟滞分量位移。结合公式(1)-(4)，可以实现开环的流量控制过程。

由于压电驱动组件采用压电陶瓷作为驱动机构，而压电陶瓷具有蠕变和迟滞的特性。采用控制阀口开度的开环控制使流量达到稳定存在困难，尤其是在高精度流量控制中，需要消除蠕变和迟滞对阀口开度的影响，因此可以直接采用流量-电压闭环控制的方法，将当前的流量状态实时反馈而形成新的控制率，从而达到流量的动态稳定。

采用 PID 控制，则流量-电压的反馈控制率可以给出为

$$V(t) = \frac{1}{C_{scale}} \left\{ k_p [m_d - m(t)] + k_i \int_0^t [m_d - m(t)] dt + k_d \frac{dm(t)}{dt} \right\} \quad (5)$$

其中， $C_{scale}$  为电压归一化变量， $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  分别为 PID 参数。

对公式(5)进行离散，则离散形式的流量电压关系为

$$V(k) = \frac{1}{C_{scale}} \left\{ k_p [m_d - m(k)] + k_i \sum_{i=1}^k [m_d - m(k)] \Delta T + \frac{k_d}{\Delta T} [m(k) - m(k-1)] \right\} \quad (6)$$

其中， $\Delta T$  为离散时间周期。

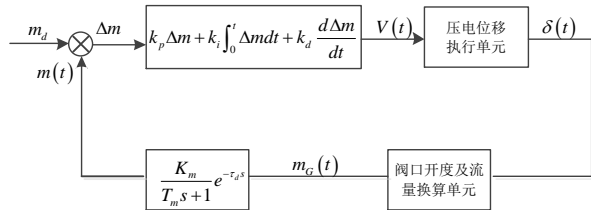


图2 流量控制器闭环控制原理图

流量-电压 PID 控制原理图如图 2 所示，由于流体粘性，流量不会产生突变，故在真实流量和计算流量间存在延迟环节。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 微流量控制器闭环控制结果

假设初始流量控制器内没有气体，即初始流为 0mg/s，采用公式(6)所示的控制率对如图 3 所示的真实流量控制系统进行控制，设置控制参数为  $k_i = 0.015$ 、 $k_p = 0.105$  和  $k_d = 0.001$ ，流量控制的周期为 0.2s，流量的采集周期为 0.4s，给出流量控制器的参数如表 1 所示。

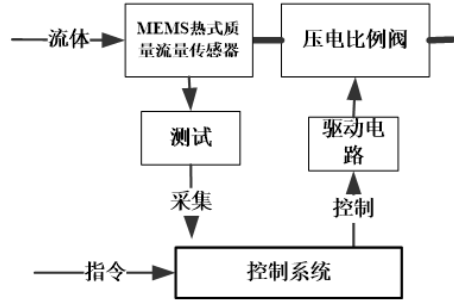


图3 流量控制器闭环控制系统图

表1 流量控制器参数

参数	数值
流量系数 $C_d$	0.6
入口压力 $P_i$	0.25MPa
气体常数 $R$	63.5J/kgK
绝热指数 $k$	1.67
阀座孔直径 $d$	0.002m
密封球半径 $r$	0.002m

设置目标流量为 3mg/s，环境温度为 25°C 时流量达到稳态时的流量-电压曲线如图 4 所示；设置目标流量为从 0mg/s~3mg/s 逐渐增大后再减小，并且在每个目标流量点上停留 30s，分别给出环境温度为 30°C 和 50°C 工况下进行流量跟随的流量-电压变化曲线如图 5-6 所示。

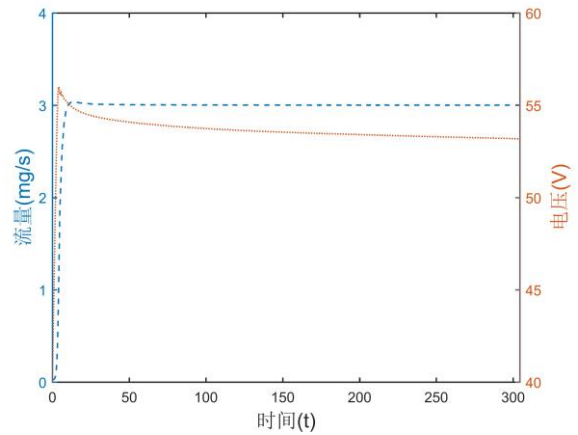


图4 25°C 流量稳态过程下的流量-电压曲线

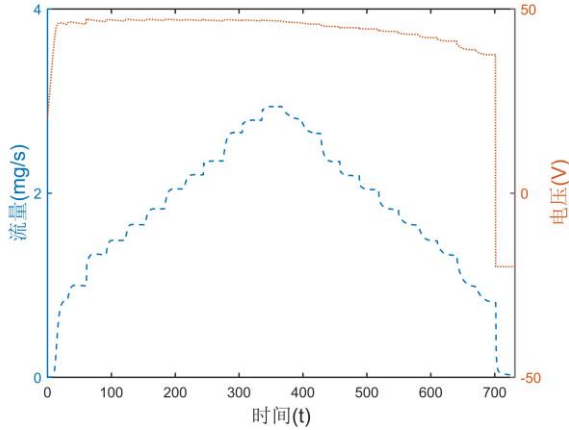


图5 30°C 流量跟随过程下的流量-电压曲线

从图 3 中看出, 采用控制率为公式(6)的闭环控制方法, 可以使流量在较短的时间内爬升到目标值并保持稳定, 而控制电压在流量达到稳定后会逐渐缓慢降低, 这是由于压电陶瓷蠕变特性的影响, 即在恒定不变的电压下, 当压电陶瓷的位移快速达到一定值后, 其位移仍会随时间变化而缓慢增大, 所以闭环控制中为了保持流量稳定需要减小驱动电压。此外, 从图 5 和图 6 中可以看出, 在不同的环境温度下, 该闭环控制可以使流量在不同目标流量点处达到动态稳定, 说明采取闭环控制的方法能够有效地消除压电陶瓷蠕变和迟滞的影响, 使流量控制满足较高的精度要求。

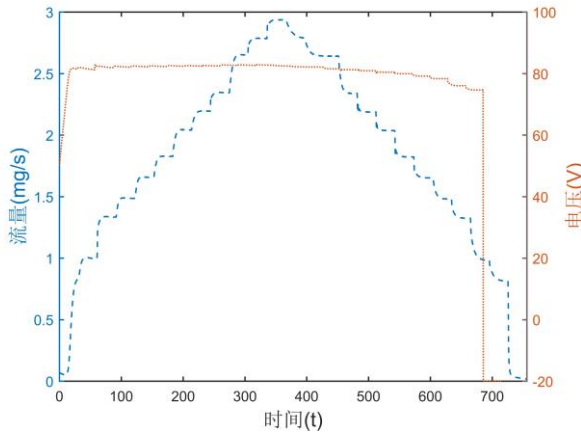


图6 50°C 流量跟随过程下的流量-电压曲线

由于压电陶瓷还具有温度特性, 温度升高会对压电陶瓷的位移变化产生影响, 而这种影响主要取决于距离居里温度的差值。从图 5 和图 6 中可以看出, 流量从 0mg/s 开始升高时, 流量控制器的开启电压相差较大。在 30°C 下压电驱动组件的开启电压约为 45V, 在 50°C 下压电驱动组件的开启电压约为 81V, 说明高温下压电陶瓷的压电效应会显著降低, 需要更高的驱动电压使阀口开度达到相同位置, 从而满足稳定到目标流量的要求。

### 3.2. 流量功率谱密度

由于复杂的流体运动和摩擦、流量入口压力变化、环境温度变化、控制算法等因素会使流量有噪声波动, 流量噪声会影响在相应频段进行科学探测的准确度, 如空间引力波的探测<sup>[14-15]</sup>, 因此本文采用功率谱密度分析闭环控制下流量的噪声。功率谱密度的公式如下

$$S_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |F_x(\omega, T)|^2 \quad (7)$$

$$F_x(\omega, T) = \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) e^{-i\omega t} dt \quad (8)$$

$$= \int_{-T}^T x(t) e^{-i\omega t} dt$$

其中, 公式(7)为信号  $x(t)$  的在频率  $\omega$  处的功率谱密度,  $T$  为采样周期, 对于流量功率谱密度分析有  $x(t) = m(t)$ ; 公式(8) 为信号  $x(t)$  的傅里叶变换,  $x_T(t)$  为  $x(t)$  的截尾函数, 关系式为

$$x_T(t) = \begin{cases} x(t), & |t| \leq T \\ 0, & |t| > T \end{cases} \quad (9)$$

通过不同环境温度下流量闭环控制的结果可知, 温度对压电陶瓷的压电特性会产生影响, 实质上压电陶瓷的性能在真空和大气环境下变化也会不同。设置流量功率谱密度的采点数为 1024, 采样频率为 2.5Hz, 下面分别给出在环境温度 30°C 和 50°C 两种工况下, 在大气下经过热试验(热循环)前后的流量功率谱密度和在真空条件下经过热试验(热真空)前后的流量功率谱密度如图 7-10 所示。

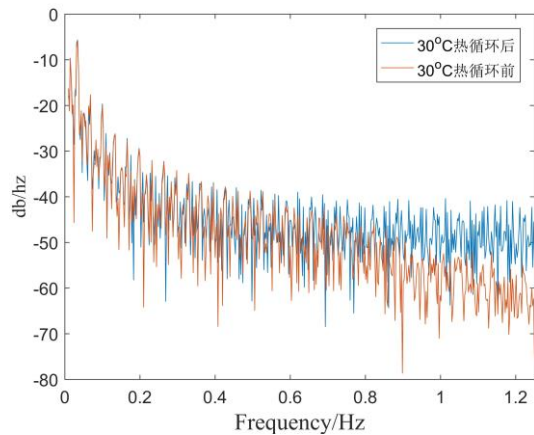


图7 30°C 下热循环前后流量功率谱密度

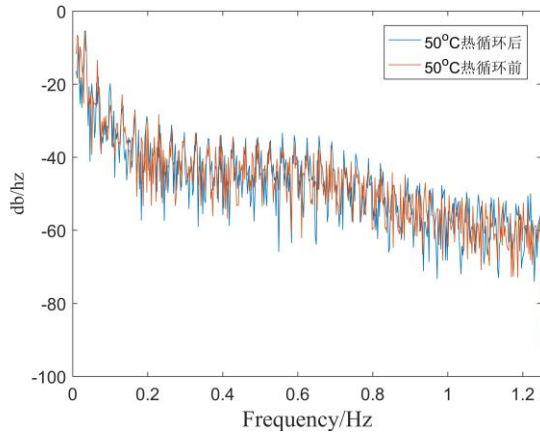


图 8 50°C 下热循环前后流量功率谱密度

从图 7-10 中可以看出，采用闭环控制的流量控制器的流量功率谱密度呈现随频率增大而减小的趋势。频率在小于 0.4Hz 时，流量功率谱密度的变化比较剧烈，最大值接近 -2dB。在频率大于 0.4Hz 后，流量功率谱密度的变化趋近于稳定；对于图 9 和图 10 中热真空前后的流量功率谱密度变化，其值从 -50dB 逐渐下降最后稳定在 -70dB 附近；对于图 8 中环境温度为 50°C 时热循环前后的流量功率谱密度先缓慢上升再下降后趋于稳定；对于图 7 中环境温度为 30°C 时热循环后的流量功率谱密度随频率增大而较快稳定，但热循环前的流量功率谱密度在 0 到 1.25Hz 范围内始终呈减小趋势。从以上分析结果中可知，对于流量控制器的闭环控制，需要关注低频段的流量噪声的影响以满足低频段应用的需求。

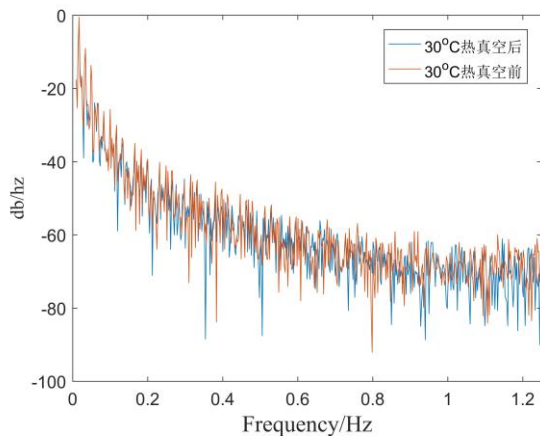


图 9 30°C 下热真空前后流量功率谱密度

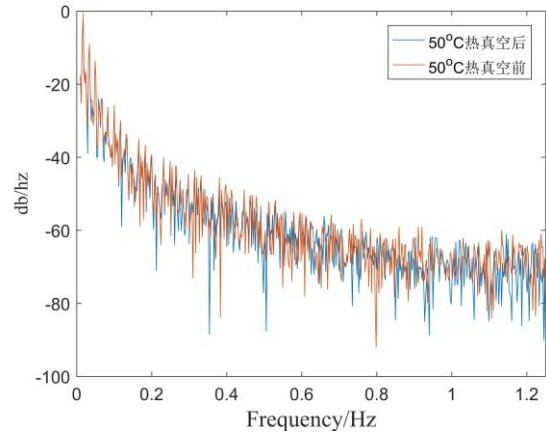


图 10 50°C 下热真空前后流量功率谱密度

此外，从不同工况的流量功率谱密度结果中可以看出，不同环境温度下热真空前后的流量功率谱密度的曲线变化均呈现相同的走势；而对于环境温度为 30°C 时热循环前后的流量功率谱密度，在频率大于 0.6Hz 后，曲线开始分离，但 50°C 时热循环前后的流量功率谱密度的曲线变化一致。这种差异同样反映在压电驱动组件的开启电压上，如表 2 所示，30°C 热循环前后的开启电压相差较大，而其它工况下压电驱动组件的开启电压均较小。以上结果说明，在环境温度低的情况下，大气热传导会对压电陶瓷的压电效应产生显著影响，因此流量控制器的闭环控制参数需根据环境温度做出调整以满足不同控制任务的需求。

表 2 不同工况下压电驱动组件的开启电压

工况	开启电压
30°C 热循环前	45V
30°C 热循环后	59V
50°C 热循环前	81V
50°C 热循环后	79V
30°C 热真空前	50V
30°C 热真空后	51V
50°C 热真空前	81V
50°C 热真空后	79V

#### 4. 结论

本文提出了对使用压电陶瓷作为驱动机构的微流量控制器的闭环控制方法，并通过实验验证了闭环控制对流量稳定和流量跟随的有效性，说明了闭环控制能够有效地消除压电陶瓷的蠕变和迟滞作用的影响，使微流量控制器满足高精度流量控制的需求。同时，分析了闭环控制下的微流量控制器的流量噪声的影响，分别给出了不同环境温度下热真空和热循环前后的流量功率谱密度，通过对功率谱密



度随频率变化曲线的分析可知, 闭环控制下的流量在低频下的功率谱密度值较大, 在高频段的流量功率谱密度值较小并且趋近于稳定, 说明流量噪声在低频段显著。此外, 通过对不同环境温度下的流量-电压曲线和功率谱密度分析可得到, 大气环境下的热传导对压电陶瓷的压电效应影响显著。

## 作者贡献

张莹莹进行了数据分析并撰写了文章, 汪旭东提出研究想法并同付新菊、张占海进行了实验, 李志平和李宗良对论文进行了修正审核。

## 致谢

本论文受国家重点研发课题“微流量精密调控技术”资助(2020YFC2201002, 2020YFC2201101)。

## 参考文献

- [1] 李永,刘旭辉,汪旭东,等.空间极小推力宽范围可调推进技术研究进展[J].空间控制技术与应用,2019,45(06):1-12+19.
- [2] Day M , Maslennikov N , Rogers W . SPT-100 subsystem development status and plan[C]// Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2013.
- [3] Li X, Huang Y, Zhang X, et al. Micro-thrust measurement of a MEMS based cold gas micro-thruster in vacuum conditions[C]//2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). IEEE, 2018: 392-397.
- [4] David M P. continuing development of the proportional flow control valve (PFCV) for electric propulsion systems[R]. IEPC, 2007
- [5] Day I M, et al. SPT-100 Subsystem Qualification Status [C]. USA: AIAA, 1995. 2666.
- [6] 付玮.压电气体微流量比例控制阀节流口特性研究[C],大连理工大学,2020.
- [7] Peter S. xenon flow control unit development and qualification programme[R]. AIAA, 2006.
- [8] Robert S, Butler G W, Duff B, et al. Evaluation of proportional flow control valves for potential use in electric propulsion feedsystems[R]. AIAA, 2000.
- [9] Schappell D T, McLean C H. Multi-function valve extended developmenttesting[R]. AIAA, 1999.
- [10] Smith P. Xenon Flow Control Unit Development and Qualification Programme[C]// Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2006.
- [11] Osborn M , Netwall C . High Performance Xenon Flow System (XFS) Optimized for Low Mass, Volume, and Cost[C]// Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2009.
- [12] 阎瑾瑜. 压电效应及其在材料方面的应用[J]. 数字技术与应用, 2011 (1): 100-101.
- [13] 谈萍等. 霍尔电推进系统中的微流量控制器[J]. 功能材料 2010: 3(41):385-392.
- [14] 于达仁, 崔凯, 刘辉,等. 用于引力波探测的微牛级霍尔电推进技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 177-187.
- [15] 于达仁,牛翔,王泰卜,等.面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(Z1): 194-212.

## 作者简介:

张莹莹(1989-),女,工程师,主要进行深空探测制导控制技术方面的研究。

通信地址:北京市海淀区中关村南三街16号(100094)

电话:(010)68113970

E-mail:zhangyyhit@hotmail.com