一种碘工质电推进贮供系统工作特性研究

顾森东* 赵积鹏 马天驹 于斌 杨文博 杨学虎 马彦龙 黎刚刚 李兴达 张霄
(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室 兰州 730000)

Operational Characteristics of an Iodine Propellant Feed System for Electric Propulsion

GU Sendong*, ZHAO Jipeng, MA Tianju, YU Bin, YANG Wenbo, YANG Xuehu, MA Yanlong, Li Ganggang, LI Xingda, ZHANG Xiao
(*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou* 730000*, China*)

Abstract The paper aims to study an iodine propellant feed system for electric propulsion. Firstly, comparisons of different previous design schemes are carried out, and a design scheme consisting of an iodine reservoir, a Bang-Bang controller, and a thermal throttle is proposed. Then, a simulation model is established using AMESim software to describe the design scheme, and the simulation results and the experimental data are compared. Finally, the effects of the inlet pressure of the thermal throttle and the temperature of the gaseous iodine in the thermal throttle on the flow rate of the gaseous iodine are studied. The operational performance of the Bang-Bang controller and the thermal throttle, and the effect of temperature in the iodine reservoir are analyzed. The results show that if the output flow rate of the gaseous iodine is 0.2 mg/s−3 mg/s with an error of ±10%, the inlet pressure error of the thermal throttle must be ±50 Pa, or the temperature error of the gaseous iodine must be ±15 K; if the high and low threshold pressures of the Bang-Bang controller are changed, the flow rate of the gaseous iodine can be various from 0.2 mg/s to 3 mg/s discontinuously, and the errors of the most output flow rate of the gaseous iodine are less than ±10%. In addition, the output flow rate has an accuracy of ±10% when the temperature change in the iodine reservoir is ±5 K. It is indicated that the design scheme can reduce the difficulty of temperature control in the iodine reservoir and further improve the accuracy of the output flow rate of the gaseous iodine.

Keywords Electric propulsion, Iodine propellant, Feed system, Operational characteristic, Simulation analysis

摘要 本文以碘工质电推进贮供系统为研究对象。比较了以往设计方案的优缺点，提出了一种碘贮罐粗调压，Bang-Bang 控制器精调压，热节流管精确限流的设计方案。采用 AMESim 软件对该方案进行了仿真分析，对比了实验数据和模拟结果。研究了热节流管入口压力和热节流管内气态碘温度对输出气态碘流量的影响。分析了 Bang-Bang 控制器和热节流管的工作特性以及碘贮罐温度对输出气态碘流量的影响。结果表明：在 0.2 mg/s−3 mg/s 的气态碘流量范围内，为实现±10% 的控制精度，热节流管入口压力误差需≤±50 Pa 或气态碘温度误差需≤±15 K；通过改变 Bang-Bang 控制器的压力控制上下限能够有效控制热节流管的输出流量，实现气态碘流量在 0.2 mg/s−3 mg/s 的非连续变化，且大部分流量波动在±10% 之间。碘贮罐温度变化±5 K 时，输出气态碘质量流量误差仍小于±10%。研究结果说明该设计方案可明显降低碘贮罐温度控制难度，提高输出气态碘流量精度。

关键词 电推进 碘工质 贮供系统 工作特性 仿真分析
中图分类号：V439+.4 **文献标识码：**A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202302006

收稿日期：2023−02−09
基金项目：甘肃省科技重大专项项目（22ZD6GA011）
* **联系人：**Email: cast510_gsd@163.com

电推进是一种先进的空间推进方式，广泛应用于空间飞行器姿态调整、轨道修正、动力补偿等方面。与传统的化学推进相比较，电推进具有比冲高、推力调节精度高、体积小、寿命长等优点，在空间科学、大轨道转移、深空探测等任务中发挥了重要作用，是世界各国航天装备发展的重要方向之一。

电推进系统利用电磁能加热或电离推进剂工质产生等离子体，并通过电磁场加速使其高速喷出而产生推力。氙作为传统的电推进工质，性能表现良好，能够满足大多数航天任务需要。然而，氙在自然界中的储量较少且提取难度较大，导致其价格昂贵，不利于氙工质电推进系统大规模应用。因此，20 世纪 60 年代以来，国内外研究人员开展大量研究[1-6]，寻找其他电推进工质。

碘作为其中一种替代工质，储量丰富，价格仅为氙的 18% 左右。2011 年，美国将碘推进剂先后应用于 BHT-200[7]、BHT-1000[8] 和 BHT-8000[9] 霍尔电推进系统的地面测试中。对比结果表明，碘的推力性能与氙的相似，其中碘的推功比表现较突出[10]。可见，以碘作为推进剂的电推进系统具有很高的研究价值。

纯碘在常温常压下是一种紫黑色片状固体，密度达到了 4.9 g/cm^3，是高压氙气（15 MPa 下）密度的 3 倍，具有储存密度高且储存压力低（kPa 量级）的特点，十分有利于电推进贮供系统的小型化和轻量化设计。然而，碘作为推进剂工质需要加热升华为气态碘才能进入推力器中工作，具有一定腐蚀性，整个输送管路还需保持一定温度，流量控制难度较大，对储存固态碘和控制气态碘流量的系统（贮供系统）的设计提出了更高的要求。目前，国外主要有美国 NASA 和 Busek 公司开展碘工质电推进贮供技术研究，Szabo 等[11] 提出了基于比例流量调节模块的碘工质贮供系统设计方案，采用热节流管进行了地面流量试验，得到了在一定气态碘温度和热节流管尺寸下，气态碘质量流量与上下游压差存在定量关系。Polzin 等[12] 介绍了碘工质贮罐的结构和材料，并搭建地面试验平台对 Szabo 提出的设计方案进行了试验研究。Samples 等[13] 通过 GFSSP 流体程序模拟了上述贮供系统工作过程，文中对建模过程进行了介绍，但没有给出详细模拟结果。Paganucci 等[14] 采用热节流管控制流量方式搭建了碘工质贮供系统地面试验平台，得到了贮罐温度和热节流管内气态碘温度对输出流量的影响。在国内，哈尔滨工业大学、中科院微电子所、上海交通大学先后开展了相关研究工作。刘辉等[15] 对比了不同碘工质流量控制方案，认为热节流法结构简单且控制精度高，随后开展了一些系统设计和试验工作。张振华等[16] 针对碘射频离子推进系统，通过试验研究了贮供系统中贮罐温度和管路温度对推力性能的影响。王阳平等[17] 设计了碘工质贮供系统，优化了贮罐结构，实现了地面环境下的流量供给。然而，目前大多数研究主要集中在碘工质贮供系统方案设计与优化，偏向工程应用，对贮供系统中气态碘流量特性的研究相当匮乏。

因此，本文以碘工质电推进贮供系统为研究对象，提出了一种碘贮罐粗调压，Bang-Bang 控制器精调压，热节流管精确限流的设计方案。在实验数据验证仿真模型有效性的基础上，采用 AMESim 软件对该贮供系统中气态碘流量特性进行深入分析，为碘工质电推进贮供系统的研发提供参考依据。

1　碘工质贮供系统方案

1.1　结构组成

从国内外电推进贮供系统的设计来看，不管是氙工质还是碘工质，其贮供系统主要包括三个模块，分别为贮存模块、压力调节模块和流量调节模块。鉴于碘工质供给方式的特殊性，目前常见的设计方案有两种，第一种主要由碘贮罐和比例流量调节阀组成，通过控制碘贮罐内温度使比例流量调节阀前端压力处于一定范围，然后通过比例流量调节阀精确调压和限流输出所需的气态碘流量。该方案原理和结构简单，控制精度高，然而长寿命高精度比例流量调节阀的研制是一个难点，国内很难实现。第二种主要由碘贮罐和热节流管组成，只能通过调节碘贮罐温度来控制热节流管入口压力，然后通过热节流管限流。根据图 1 中纯碘的饱和蒸气压与温度之间的关系。随温度增大，纯碘的饱和蒸汽压随温度呈指数增加趋势。根据以往设计经验，一般将碘贮罐温度控制在 343.15 K 左右[10]，假设碘贮罐的温控精度在±1 K，则压力误差可达±100 Pa 以上。某碘工质电推进系统流量要求为 mg/s 级，流量精度要求小于±10%。在此温度控制引起的压力误差下，输出气态碘的流量很难保证要求的精度。此外，在空间环境中很难通过温度快速降低来减小输出气态碘的流量。

鉴于以上两种设计方案的优缺点，本文提出了

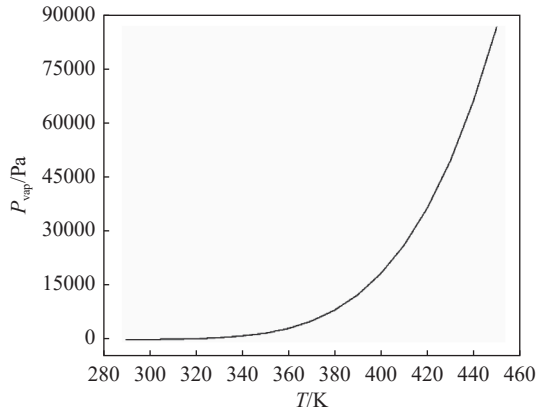

图1 纯碘的饱和蒸汽压曲线[13]

Fig. 1 Vapor pressure curves for molecular iodine (I_2)

一种碘贮罐粗调压，Bang-Bang 控制器精调压，热节流管精确限流的设计方案。如图 2 所示，贮供系统主要由碘贮罐、Bang-Bang 控制器、热节流管组成。碘贮罐起到储存固态碘并产生一定温度气态碘的作用，对碘贮罐内温控要求不高，在一定范围内波动即可。Bang-Bang 控制器由两个电磁阀（A 和 B）、一个小气腔（C）、一个缓冲气瓶（D）、一个压力传感器（E）组成，如图 3 所示。通过两个电磁阀交替开关，逐次将小空腔内的少量压力较高的气体释放到缓冲气瓶内，最终达到精确控制缓冲气瓶内压力的目的。热节流管为可加热的毛细管，起到精确限流的作用。该贮供系统中各部分连接管路内径足够

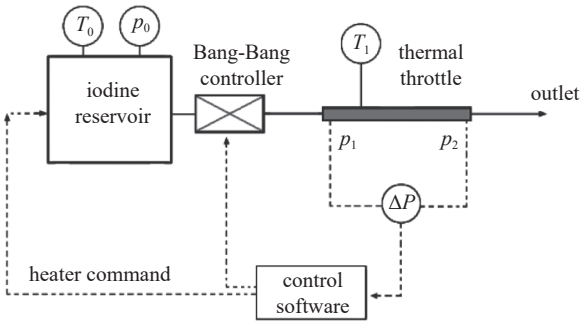

图2 碘工质贮供系统组成示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the proposed iodine propellant feed system

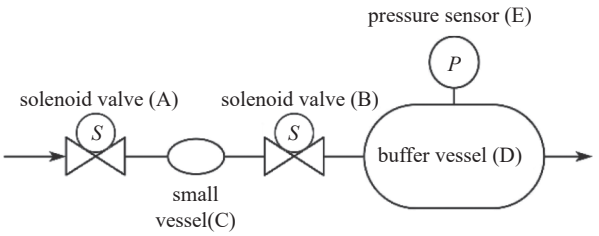

图3 Bang-Bang 控制器组成示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the Bang-Bang controller

大，避免气态碘通过连接管路时产生明显压降。

为了保障 Bang-Bang 控制器中电磁阀在空间环境中长期工作的可靠性，首先需要电磁阀选材与高温气态碘的相容性较好，其次电磁阀的工作温度区间需要满足较宽的范围，一般为−30℃~120℃；再次由于存在气态碘凝结在阀芯与阀体密封面的可能，对电磁阀的密封设计提出了更高的要求；最后对电磁阀的开关次数要求较高，在百万次左右。

从国外研究现状[18]来看，碘工质贮供系统所用电磁阀一般选用不锈钢（316L 型）、镍基合金（C276、Inconel718 等）等金属材料，胶圈等连接密封件选取氟胶、硅胶、聚四氟乙烯等非金属材料。对于不能替代的软磁材料可涂覆耐腐蚀涂层。对于工作温度、密封设计和开关次数等要求，在氙工质电推进贮供系统中已有解决案例，可通过参考开展后续的研制。

1.2 工作原理

该方案的工作原理为：开始工作前，依次加热碘贮罐、Bang-Bang 控制器和热节流管，且三者的控制温度依次增高，避免出现负温度梯度引起气态碘凝华。开始工作后，利用固态碘加热升华的特性，将碘贮罐加热到一定温度范围后，依据图 1 中纯碘的饱和蒸汽压曲线，将碘贮罐内气态碘的压力维持到一定的范围。开启 Bang-Bang 控制器，打开电磁阀 A，关闭电磁阀 B，使碘贮罐内压力较高的气态碘通入小气腔；关闭电磁阀 A，打开电磁阀 B，使小气腔内少量压力较高的气体释放到缓冲气瓶内。这两个电磁阀交替开关数次并监控缓冲气瓶内压力，从而可以达到精确控制缓冲气瓶内压力的目的。对热节流管精确控温，使 Bang-Bang 控制器输出的气态碘通过热节流管后维持较稳定的温度。热节流管出口处于真空环境中。稳定一段时间后，则 Bang-Bang 控制器使热节流管入口压力稳定到 P_1，流经热节流管的气态碘温度为 T。根据流经热节流管的气态碘质量流量与上下游压力和气态碘温度满足以下关系[10, 11]：

$$p_1^2 - p_2^2 = \dot{m}\frac{16\Delta l}{\pi r^4}\frac{\mu}{M}kT\gamma = \dot{m}C \qquad (1)$$

可以看出，热节流管出口输出稳定流量。式中，$\dot{m}$为质量流量，单位 kg/s；Δl为热节流管长度，单位 m；r 为热节流管半径，单位 m；μ 为气体粘度，单位 Pa·s；M 为摩尔质量，单位 kg/mol；T 为气体温度，单位 K，稳定后与热节流管温度 T_1 几乎相当；π、k、γ 和 C 为常数。不同尺寸的热节流管及气体温度下，C 不同。可以看出，气态碘的质量流量随上下游压

差增大而增大, 随气态碘温度增大而减小。在本方案中, 出口为真空环境, p_2 很小, 可忽略, 通过改变 p_1 和 T_1 来实现流量调节和误差补偿。

2　碘工质贮供系统仿真模型

为研究所提出的碘工质贮供系统输出的气态碘流量特性, 本文中基于 AMESim 软件模拟碘工质贮供系统工作过程。

2.1　数学模型

假定碘贮罐内充满一定温度和压力的气态碘, 且压力和温度均匀分布。由于在贮供系统工作过程中, 碘贮罐内部压力与该温度下饱和蒸汽压和输出流量相关, 需要根据实验确定。但在微小流量下, 碘贮罐内部压力与该温度下的饱和蒸汽压之间的差距可忽略[13]。

为了准确求解气态碘的热力状态, 本次研究采用 Van der Walls 方程描述气体压力、密度与温度之间的关系, 即:

$$p=\frac{R\cdot T}{V-b}-\frac{a}{V^2} \tag{2}$$

式中, V 为容积, 单位 m^3, R 为普适常数, a 和 b 为常数。

管路内气态碘流动可近似为一维瞬态流动[19, 20], 流动控制方程包括质量、动量和能量守恒方程。

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial\rho\boldsymbol{u}}{\partial x}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}\rho\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial\rho\boldsymbol{u}\boldsymbol{u}}{\partial x}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial\tau}{\partial x} \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}\rho e}{\mathrm{d}t}=-p\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial x}+W+Q \tag{5}$$

式中, ρ 为气态碘密度, $\boldsymbol{u}$ 为速度, p 为压力, τ 为应力张量, e 为比内能, W 为气体粘性力做功, Q 为管路与环境的换热。

为了准确求解气态碘的热力状态, 根据经验公式将气态碘的比热容 C_p、焓 h 和熵 s 描述为温度的函数, 具体表达式为[21]:

$$\frac{C_p}{R}=\frac{a_1}{T^2}+\frac{a_2}{T}+a_3+a_4\cdot T+a_5\cdot T^2+a_6\cdot T^3+a_7\cdot T^4 \tag{6}$$

$$\frac{h}{R}=-\frac{a_1}{T}+a_2\cdot\ln T+a_3\cdot T+\frac{a_4}{2}\cdot T^2+\frac{a_5}{3}\cdot T^3+\frac{a_6}{4}\cdot T^4+\frac{a_7}{5}\cdot T^5+a_8 \tag{7}$$

$$\frac{s}{R}=-\frac{a_1}{2\cdot T^2}-\frac{a_2}{T}+a_3\cdot\ln T+a_4\cdot T+\frac{a_5}{2}\cdot T^2+\frac{a_6}{3}\cdot T^3+\frac{a_7}{4}\cdot T^4+a_9 \tag{8}$$

式中, a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6、a_7、a_8 和 a_9 为常数。

此外, 气态碘的热传导系数 λ 和粘度 μ 可通过 Svehla 拟合曲线法计算得到, 拟合公式为[22]:

$$\ln\lambda=b_1\cdot\ln T+\frac{b_2}{T}+\frac{b_3}{T^2}+b_4 \tag{9}$$

$$\ln\mu=c_1\cdot\ln T+\frac{c_2}{T}+\frac{c_3}{T^2}+c_4 \tag{10}$$

式中, b_1、b_2、b_3、b_4、c_1、c_2、c_3 和 c_4 为常数。

式 (6)~式 (10) 中各常数的数值可参考文献 [21, 22]。

2.2　AMESim 模型

碘工质贮供系统的 AMESim 模型见图 4 所示。模型中包含碘贮罐(Iodine reservoir)、Bang-Bang 控制器(Bang-Bang controller)、热节流管(Thermal throttle)和真空室(Vacuum chamber)和控制回路(Control circuit)。碘贮罐包括罐体、压力传感器、温度控制(k)和压力控制($f(x)$)根据图 1 中饱和蒸气压曲线描述气态碘压力与温度之间的关系。Bang-Bang 控制器由两个开关阀、一个压力传感器、一个小气容、一个缓冲气瓶以及控制回路组成, 控制回路通过压力传感器反馈信号控制这两个开关阀的通断。表 1 中给出了主要模型参数。模型中小气腔和缓冲气瓶净容积根据 Bang-Bang 控制器开关次数及控压精度调整。

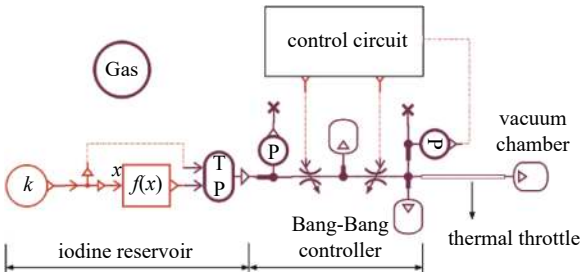

图4　碘工质贮供系统 AMESim 模型

Fig. 4　AMESim model for the iodine propellant feed system

表 1　AMESim 模型主要参数

Tab. 1　Main parameters of the AMESim model

parameter	value
temperature of iodine reservoir/K	353.15-373.15
pressure of iodine reservoir/Pa	2160-6060
inlet pressure of thermal throttle/Pa	1000-4000
gaseous iodine temperature in thermal throttle/K	348.15-378.15
dimension of thermal throttle/mm	Φ0.5×8.6
pressure of vacuum chamber/Pa	0

3　结果与讨论

3.1　仿真结果验证

参考文献 [11] 中的实验参数, 设置以上 AME-

Sim 模型中热节流管入口压力 P_1 分别为 1770 Pa、2020 Pa、2100 Pa、2300 Pa 和 2500 Pa，热节流管内气态碘温度为 363.15 K，得到了热节流管内气态碘质量流量的模拟结果。表 2 对比了热节流管内气态碘质量流量的实验数据和模拟结果。可以看出两者吻合较好，说明了以上数学模型和 AMESim 模型的有效性。此外，图 5 给出了 p_1^2 与流量 $\dot{m}$ 之间的关系，两者呈线性关系，与式 (1) 所表述的关系相符合。表 1 中热节流管尺寸及气体温度条件下，C=5.24869×10^6 Pa^2·s/mg。

表 2 热节流管内气态碘质量流量实验数据与模拟结果对比

Tab. 2 Comparisons between experimental data and simulated results for gaseous iodine mass flow rate in the thermal throttle

experimental data/(mg/s)	simulated results/(mg/s)
0.63	0.62
0.82	0.84
0.88	0.88
1.06	1.01
1.25	1.22

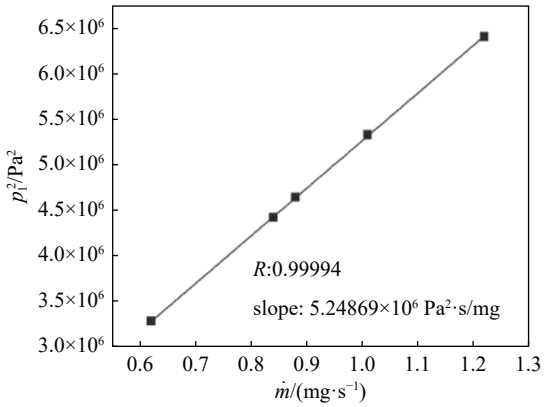

图5 p_1^2 与流量 $\dot{m}$ 之间的关系

Fig. 5 Least-squares fit of p_1^2 vs $\dot{m}$

3.2 热节流管入口压力和气态碘温度对输出气态碘流量的影响

改变 AMESim 模型中热节流管入口压力和热节流管内气态碘温度，图 6 给出了不同条件下热节流管内气态碘质量流量的模拟结果。气态碘质量流量随入口压力增大呈反抛物线增加趋势，随气态碘温度增大呈线性减小趋势。这意味着随着所需输出的气态碘质量流量增加，入口压力变化的影响程度越剧烈，而气态碘温度的影响程度基本不变。

在实际设计过程中，为避免气态碘凝华在下游管路中，从碘贮罐到下游管路，加热温度逐渐增加。

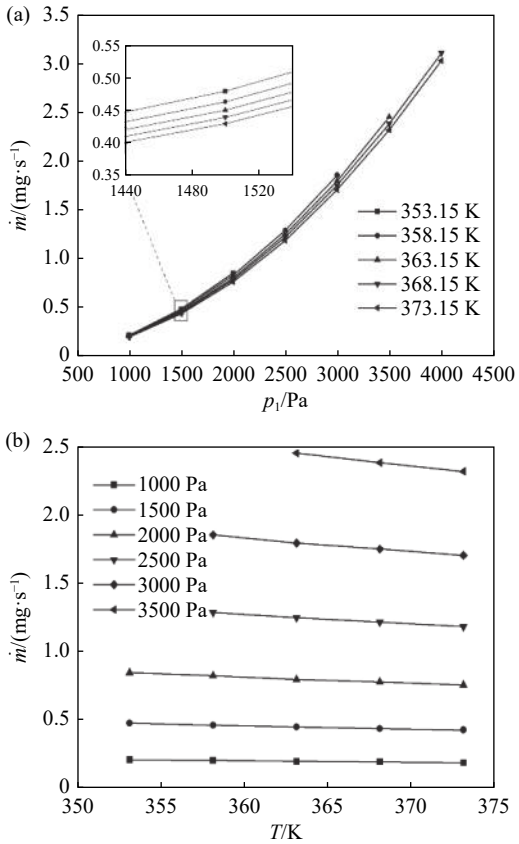

图6 不同条件下气态碘的质量流量 (a)不同气态碘温度；(b)不同入口压力

Fig. 6 Mass flow rate of gaseous iodine under different conditions. (a) Different gaseous iodine temperature; (b) Different inlet pressure

如果进行±10%$\dot{m}$误差控制，在较小的流量 $\dot{m}_1$=0.2 mg/s 下，入口压力为 1000 Pa±50 Pa 或气态碘温度为 363.15 K±15 K；在较大的流量 $\dot{m}_2$=3 mg/s 下，入口压力为 4000 Pa±170 Pa 或气态碘温度为 373.15 K±15 K。可以看出，随着所需输出的气态碘质量流量增加，热节流管入口压力变化使得气态碘质量流量的绝对误差增大，但相对误差减小；气态碘温度变化使得气态碘质量流量的绝对误差增大，但相对误差基本不变。

通常，电推进贮供系统的输出流量精度按照相对误差要求。因此，在 0.2 mg/s−3 mg/s 的气态碘流量范围内，为实现±10% 的控制精度，热节流管入口压力误差需≤±50 Pa 或气态碘温度误差需≤±15 K。由于热节流管形状规整且热容较小，在实际应用中能够较容易的实现±2 K 控制精度，而热节流管入口压力存在一定迟滞和波动且测量精度较低，因此，对于本文中的碘工质电推进贮供系统，难点在于热节流管入口压力精确控制。

3.3 Bang-Bang 控制器工作特性

将碘贮罐温度设定为 353.15 K, 则碘贮罐内压力为 2160 Pa。Bang-Bang 控制器的压力控制上下限分别为 1050 Pa 和 950 Pa。热节流管温度设定为 363.15 K。在 Bang-Bang 控制器中, 首先, 保持小气容的净容积(Vs)不变, 缓冲气瓶的净容积(Vb)依次增大; 其次, 小气容和缓冲气瓶的净容积都依次增大, 且两者的比值保持不变。在以上两种情况下开展研究。

图 7 给出了贮供系统工作过程中小气容内的压力特性。开始工作后, 小气容内气压从较低值与 2160 Pa 之间上下波动数次后快速达到 1050 Pa, 然后呈现周期性上下波动变化。在一个周期内, 由于气态碘输出, 气压首先从 Bang-Bang 控制器的压力控制上限(1050 Pa)缓慢降低到控制下限(950 Pa); 在电磁阀 A 打开, 电磁阀 B 关闭时, 气压很快与碘贮罐内压力相当; 在电磁阀 A 关闭, 电磁阀 B 打开时, 气压很快降低到某一值(大于 950 Pa); 电磁阀交替开关数次后气压达到 1050 Pa。

从图 7(a) 和图 7(b) 中可以看出, 在小气容净容积一定的情况下, 随着缓冲气瓶净容积增大, 在每个周期内气压波动次数增加, 从 1050 Pa 降到 950 Pa 的时间延长。从图 7(b) 和图 7(c) 中可以看出, 随着小气容和缓冲气瓶的净容积都增大, 且两者的比值与图 7(a) 中的相同, 在每个周期内气压波动次数减小到 1 次, 从 1050 Pa 到 950 Pa 的压降时间与图 7(b) 中的相同。

图 8 给出了该贮供系统工作过程中缓冲气瓶内的压力特性。开始工作后, Bang-Bang 控制器出口压力很快增大到 1050 Pa 以上并下降在 950 Pa 到 1050 Pa 之间稳定波动, 呈现周期性变化, 压力呈锯齿形上升过程为小气腔对缓冲气瓶充气过程, 与图 7 中的气压波动过程相对应; 压力下降过程为缓冲气瓶放气过程, 与图 7 中的气压缓慢下降过程对应。

可以看出, 选用多种净容积的小气容和缓冲气瓶组合形式均可将 Bang-Bang 控制器的输出压力稳定到 1000 Pa±50 Pa, 但不同的组合形式影响贮供系统的工作寿命和重量。以 2 kg 碘工质 0.2 mg/s 的流量输出为例, 将表 3 中序号为 1 情况下小气容和缓冲气瓶的重量定为 1, 给出了小气容和缓冲气瓶不同净容积下电磁阀的开关次数(St)以及小气容和缓冲气瓶的相对重量(Rw)。依此可见, 在小气容净容积不变的情况下, 电磁阀的开关次数基本不变;

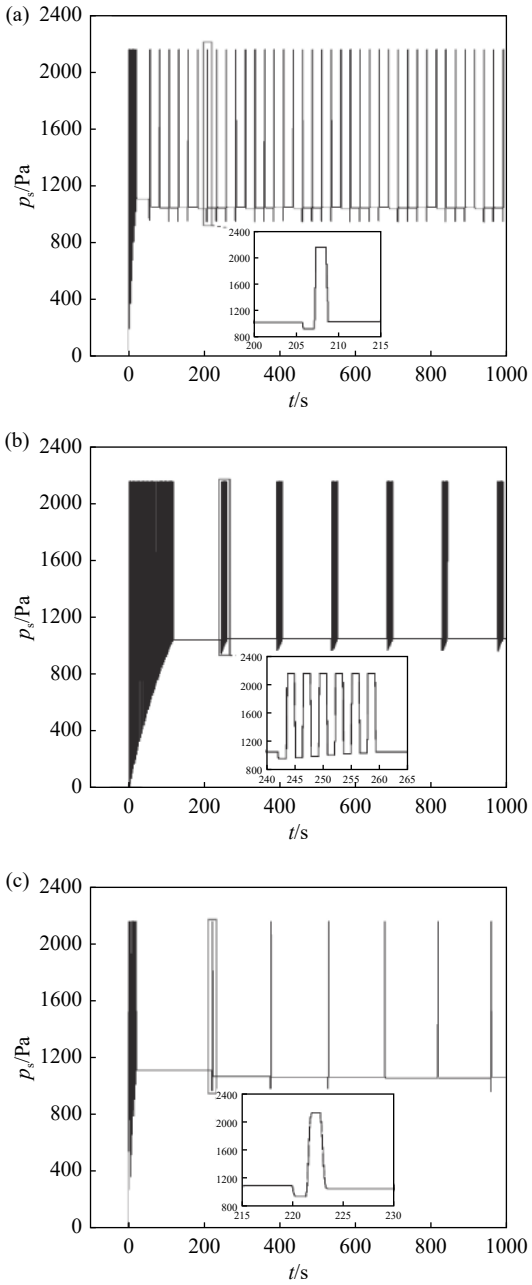

图7　小气容的压力特性(p_s)

Fig. 7　Pressure characteristic of the small vessel (p_s); (a) Vs=0.05 L, Vb=0.5 L (b) Vs=0.05 L, Vb=3 L (c) Vs=0.3 L, Vb=3 L

当小气容净容积增大后, 电磁阀的开关次数大幅降低, 为保障气压输出精度, 缓冲气瓶的净容积也相应增大, 由此带来的重量明显增加。因此, 在电磁阀可靠性较高的情况下可采用较小的气容和缓冲气瓶, 以减小重量; 反之, 可增大气容和缓冲气瓶的净容积, 以减小电磁阀的研制难度。

3.4 热节流管工作特性

采用表 3 中序号为 7 的 Bang-Bang 控制器参数

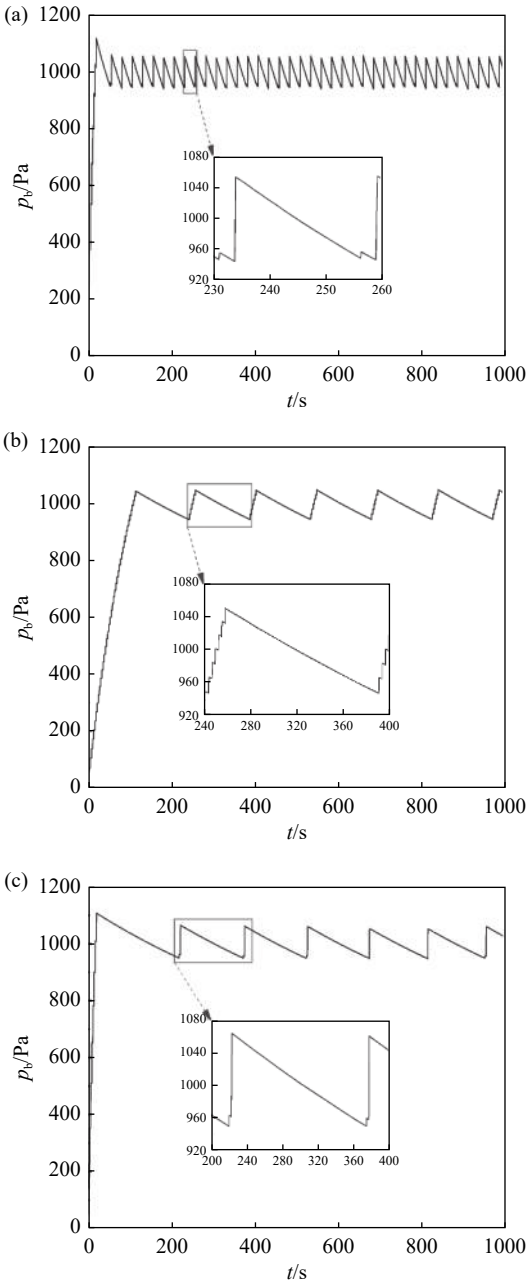

图8 缓冲气瓶的压力特性(p_b)

Fig. 8 Pressure characteristic of the buffer vessel (p_b); (a) Vs=0.05 L, Vb=0.5 L (b) Vs=0.05 L, Vb=3 L (c) Vs=0.3 L, Vb=3 L

进行仿真模拟,热节流管内气态碘质量流量变化如图 9 所示。24 s 后气态碘质量流量达到 0.24 mg/s,然后呈锯齿形周期变化,质量流量在设计输出流量(图中红线)上下波动,变化幅度小于±10%。此外,改变热节流管温度分别为 361.15 K 和 365.15 K 进行仿真模拟 1000 h 以上,得到的气态碘质量流量随时间的变化曲线几乎完全重合,可见小幅改变热节流管温度对气态碘流量输出几乎没有变化。

表 3 不同条件下电磁阀的开关次数和 Bang-Bang 控制器的相对重量

Tab. 3 Switching times of solenoid valve and relative weight of Bang-Bang controller under different conditions

	Vs/L	V_b/L	St	Rw
1	0.05	0.5	397457	1.00
2	0.05	1	410678	1.56
3	0.05	2	409837	2.67
4	0.05	3	412088	3.78
5	0.1	1	200683	2.00
6	0.2	2	102041	4.00
7	0.3	3	68158	6.00

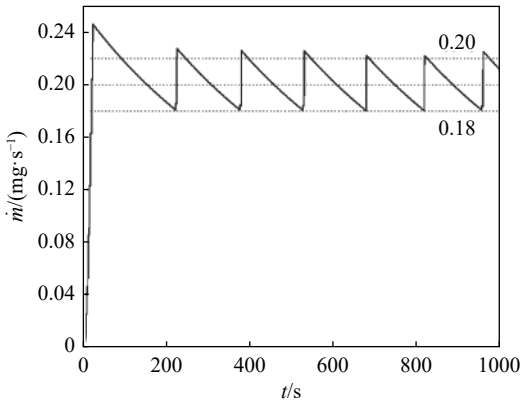

图9 碘贮罐温度不变时热节流管的输出流量

Fig. 9 Flow rate characteristic in the thermal throttle with a constant reservoir temperature

将碘贮罐温度设定为 373.15 K,则碘贮罐内压力为 6060 Pa,小气容净容积为 0.1 L,缓冲气瓶的净容积为 3 L。采用表 4 中的 Bang-Bang 控制器的压力控制上下限进行仿真分析,得到了热节流管内气态碘质量流量变化,如图 10 所示。可以看出,在其他参数不变的情况下,通过改变 Bang-Bang 控制器的压力控制上下限能够有效控制热节流管的输出流量,实现气态碘流量在 0.2 mg/s−3 mg/s 的非连续变化。除 0.2 mg/s 时的流量误差达到了±15%,其他流量波动在±10% 之间。此外,在该小气容和缓冲气瓶净容积条件下,输出流量越大,电磁阀在一定

表 4 Bang-Bang 控制器压力控制上下限

Tab. 4 High and low threshold pressure of the Bang-Bang controller

	high threshold pressure/Pa	low threshold pressure/Pa
1	1075	925
2	1615	1515
3	2280	2180
4	3200	3100
5	3930	3830

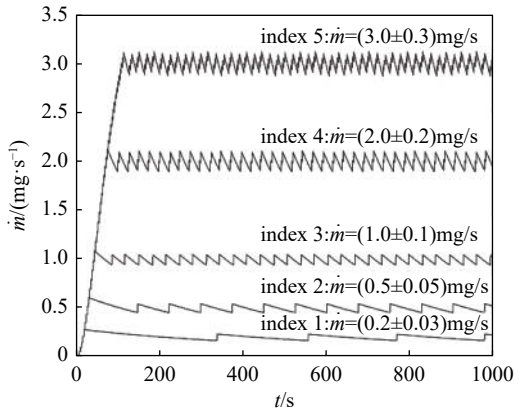

图10　不同 Bang-Bang 控制器压力控制上下限时热节流管的输出流量

Fig. 10　Flow rate characteristic in the thermal throttle under different high and low threshold pressures of the Bang-Bang controller

时间内开关次数越多，因此，在大范围流量输出时，需要进一步考虑电磁阀的工作寿命是否满足要求。

3.5　碘贮罐温度变化的影响

改变碘贮罐温度，使其在 353.15 K 的基础上变化±5 K，则碘贮罐内压力在 1700 Pa-2800 Pa 之间变化，仍然采用表 3 中序号为 7 的 Bang-Bang 控制器参数进行仿真模拟。图 11 为碘贮罐温度变化时 Bang-Bang 控制器出口压力随时间的变化。不同碘贮罐温度下该出口压力同样呈现锯齿形周期变化，不同之处在于，碘贮罐温度较低时，在缓冲气瓶压力增大过程中电磁阀的开关次数增加了一次；碘贮罐温度较高时，压力波动幅度增大，达到了 920 Pa-1080 Pa。但在 3000 s 的大部分时间内 Bang-Bang 控制器出口压力基本维持在 (1000±50) Pa。

图 12 给出了碘贮罐温度变化时热节流管内气态碘质量流量随时间的变化。可以看出，碘贮罐温度变化±5 K 时，热节流管内气态碘质量流量仍可控制在 10% 的精度范围内。根据热节流管入口压力对其内气态碘质量流量的影响，所需的输出流量更大时，热节流管入口压力控制精度要求更低，更易实现。结果表明，本文所提出的碘工质贮供系统设计方案可明显降低碘贮罐温度控制难度，提高输出气态碘流量精度。

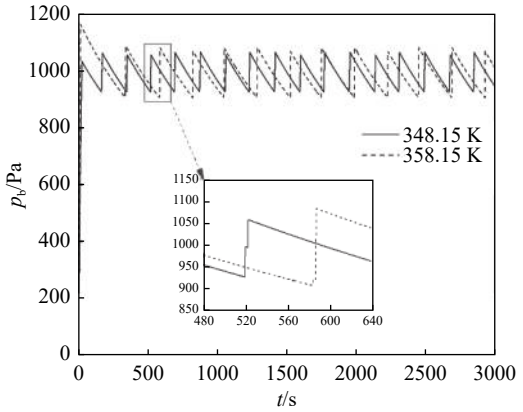

图11　碘贮罐温度变化时 Bang-Bang 控制器的压力特性

Fig. 11　Pressure characteristic of the Bang-Bang controller with variable reservoir temperatures

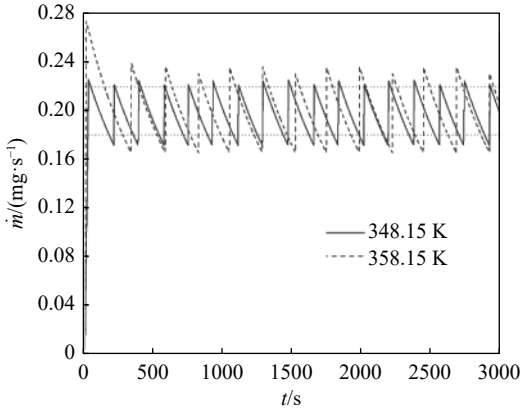

图12　碘贮罐温度变化时热节流管的输出流量

Fig. 12　Flow rate characteristic in the thermal throttle with variable reservoir temperatures

4　结论

本文提出了一种碘工质电推进贮供系统设计方案，采用 AMESim 软件对贮供系统工作特性进行了深入分析，可以得到以下结论：

(1) 在 0.2 mg/s−3 mg/s 的气态碘流量范围内，为实现±10% 的控制精度，热节流管入口压力误差需≤±50 Pa 或气态碘温度误差需≤±15 K。

(2) 通过改变 Bang-Bang 控制器的压力控制上下限能够有效控制热节流管的输出流量，实现气态碘流量在 0.2 mg/s−3 mg/s 的非连续变化，且大部分流量波动在±10% 之间。

(3) 碘贮罐温度变化±5 K 时，输出气态碘质量流量误差仍小于±10%，说明该设计方案可明显降低碘贮罐温度控制难度，提高输出气态碘流量精度。

参　考　文　献

[1]　Chen K, Li D T, Gu Z J, et al. Latest progress of colloid electric propulsion thruster technology[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(10): 918−926 (陈凯, 李得天, 谷增杰, 等. 胶体推力器的研究进展及关键技术[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(10): 918−926(in chinese))

[2] Xu Z Q, Tian L C, Ye Z W, et al. Design and experimental research on principle prototype of iodine hall thruster[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(6): 456−461 (徐宗琦, 田雷超, 叶展雯, 等. 碘工质霍尔推力器原理样机设计与实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(6): 456−461(in chinese))

[3] Yu X F, Yan R X, Zhou X Q, et al. Modeling and evaluation of xenon charging characteristics for spacecraft electric propulsion[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(4): 279−283 (喻新发, 闫荣鑫, 周雪茜, 等. 航天器电推进系统氙气工质充装特性模型与评估[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(4): 279−283(in chinese))

[4] Yu D R, Q L, Jiang W J, et al. Development and prospect of electric propulsion technology in china[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(1): 1−12 (于达仁, 乔磊, 蒋文嘉, 等. 中国电推进技术发展及展望[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 1−12(in chinese))

[5] Li Y, Zhou C, LYU Z, et al. Progress on high power space nuclear electric propulsion technology development[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(1): 12−27 (李永, 周成, 吕征, 等. 大功率空间核电推进技术研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 12−27(in chinese))

[6] Tirila V G, Ryan C, Demairé A, et al. Zinc Propellant Storage and Delivery System for Hall Thrusters[C]// AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, VIRTUAL EVENT, AIAA 2021-3407, 2021

[7] Dankanich J W, Selby M, Polzin K A, et al. The Iodine Satellite (iSat) Project Development through Critical Design Review (CDR)[C]// 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, USA, AIAA 2016-4540, 2016

[8] Azziz Y, Warner N Z, Martinez-Sanchez M, et al. High Voltage Plume Measurements and Internal Probing of the BHT-1000 Hall Thruster[C]// 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, FL, USA, AIAA 2004-4097, 2004

[9] Hofer R R, Johnson L K, Goebel D M, et al. Effects of an Internally-Mounted Cathode on Hall Thruster Plume Properties[C]// 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, USA, AIAA 2006-4482, 2006

[10] Szabo J, Robin M, Paintal S, et al. Iodine Propellant Space Propulsion[C]//33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, USA, IEPC 2013-311, 2013

[11] Szabo J, Pote B, Paintal S, et al. Performance Evaluation of an Iodine-Vapor Hall Thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(4): 848−857

[12] Polzin K A, Peeples S. Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat[C]// 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, USA, AIAA 2014-3915, 2014

[13] Samples S A, Dankanich J W, Polzin K A. Iodine Hall Thruster Feed System Design, Development and Testing [C]// 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Orlando, FL, USA, AIAA 2015-3823, 2015

[14] Paganucci F, Saravia M M. Development of an Iodine Feeding System for Low Power Ion and Hall Effect Thrusters[C]// AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN, USA, AIAA 2019-3996, 2019

[15] Liu H, Niu X, Li X, et al. Reviews on electrical propulsion technology using iodine alternatives[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(1): 12−25 (刘辉, 牛翔, 李鑫, 等. 碘工质电推进技术研究综述[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 12−25(in chinese))

[16] Zhang X H, Zhang Z H, Jia S X, et al. Influence of anode temperature on ignition performance of the IRIT4-2D iodine-fueled radio frequency ion thruster[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(10): 1−12

[17] Xu Z Q, Hua Z W, Wang P Y, et al. Principle and progress of hall thruster with iodine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(1): 1−7 (徐宗琦, 华志伟, 王平阳, 等. 碘工质霍尔推力器原理与研究进展[J]. 火箭推进, 2019, 45(1): 1−7(in chinese))

[18] Polzin K A, Peeples S R, Seixal J F, et al. Propulsion System Development for the Iodine Satellite (iSAT) Demonstration Mission[C]// Presented at Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, Hyogo-Kobe, Japan, 2015

[19] Wang X D, Li G X, Chen J, et al. Simulation study on flow characteristics of a xeon micro propulsion system under regulation of piezoelectric proportional valve[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(12): 2867−2873 (汪旭东, 李国岫, 陈君, 等. 压电比例阀调节的氙气微推进系统流量特性仿真研究[J]. 推进技术, 2019, 40(12): 2867−2873(in chinese))

[20] Feng Y B, Sun F, Li S Z. Effects of temperature on vectoring nozzle electro-hydraulic servo system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(12): 2843−2850 (冯永保, 孙飞, 李淑智. 温度对矢量喷管电液伺服系统影响研究[J]. 推进技术, 2017, 38(12): 2843−2850(in chinese))

[21] Gordon S, McBride B J. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications[R]. NASA-RP-1311, 1994

[22] McBride B J, Zehe M J, Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species[R]. NASA/TP-2002-211556, 2002