

离子推进系统仿真与故障诊断研究^{*}

任思远¹, 任军学¹, 李宗良², 宋飞², 张宇³,
袁天楠¹, 王墨戈³, 汤海滨¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 102206;

2. 北京控制工程研究所, 北京 100190;

3. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 离子电推进系统由于组成复杂, 发生故障的概率大大增加, 通过系统仿真并在此基础上开展故障诊断研究, 对于识别故障原因及保障离子推力器系统正常工作具有重要作用。本文结合离子电推进系统各子系统数学模型, 利用 Matlab/Simulink 实现了离子推力器系统仿真模型, 基于 LIPS-300 离子推力器数据, 对其性能进行了仿真, 仿真模型输出结果与相关文献中已有的结果一致。采用该系统仿真模型结合故障因子, 对故障状态的离子推力器系统进行了仿真, 利用得到的故障数据与 Matlab 神经网络工具箱建立了离子推力器故障诊断系统。利用仿真模型额外生成另一组已知对应故障模式的故障状态运行数据, 并利用该组数据对故障诊断系统进行了诊断能力测试, 系统诊断结果与其已知对应故障模式相比, 正确率为 93.8%。

关键词: 离子电推进; 系统仿真; 神经网络; 故障模式; 故障诊断

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2023) 06-2209028-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2209028

Simulation and Fault Diagnosis of Ion Propulsion System

REN Si-yuan¹, REN Jun-xue¹, LI Zong-liang², SONG Fei², ZHANG Yu³,

YUAN Tian-nan¹, WANG Mo-ge³, TANG Hai-bin¹

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

3. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Due to the complex composition of the ion thruster system, the probability of failure is greatly increased. It is very important to carry out the fault diagnosis research of ion thruster through the system simulation to ensure the normal operation of the ion thruster system. In this paper, the mathematical model of each subsystem of the ion electric propulsion system is combined with Matlab/Simulink to realize the simulation model of the ion thruster system. Based on the data of the LIP-300 ion thruster, the performance of the simulation model is simulated. The output results of the simulation model are consistent with the existing results in related literature. Using the system simulation model combined with the fault factors, the ion thruster system in the fault state was simulated. The fault data obtained and the Matlab neural network toolbox were used to establish the ion thruster fault diagnosis system. The simulation model was used to generate another set of operating data of the known fault

^{*} 收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-12-26。

基金项目: 基础加强计划技术领域基金 (2019-JCJQ-JJ-259)。

作者简介: 任思远, 硕士生, 研究领域为电推进故障诊断。

通讯作者: 任军学, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究领域为空间电推进技术。E-mail: rjx_buaa@163.com

引用格式: 任思远, 任军学, 李宗良, 等. 离子推进系统仿真与故障诊断研究[J]. 推进技术, 2023, 44(6):2209028. (REN Si-yuan, REN Jun-xue, LI Zong-liang, et al. Simulation and Fault Diagnosis of Ion Propulsion System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6):2209028.)

state corresponding to the fault mode, and the diagnostic ability of the fault diagnosis system was tested by using this set of data. Compared with the actual fault mode, the accuracy of the diagnosis result was 93.8%.

Key words: Ion electric propulsion; System simulation; Neural network; Failure mode; Fault diagnosis

1 引 言

离子电推进比冲高、寿命长、结构紧凑、效率高等特点,是航天器极为有效的推进方式^[1]。但是由于离子电推进组成复杂,系统繁多,诱发故障的可能性大大增加,会严重影响航天器的使用寿命。现阶段离子电推进系统在轨使用相关数据积累较少,对其应用过程中出现的问题认知也存在不足。同时,由于卫星上搭载的传感器数量有限,仅凭有限的遥测数据很难有效还原电推力器故障运行状态,更难以对其故障原因进行深入考察。基于离子推进系统仿真模型,可以对离子推进多种故障模式进行仿真,获得故障数据,通过对故障数据与正常数据的比较分析,可以明确故障类型,进而采取针对性的保障措施。

在推进系统故障诊断领域,液体火箭发动机相关故障诊断研究已经有了长足的发展。从 20 世纪 70 年代起,美国就已开始研究在火箭发动机试车台和运载火箭上使用的健康管理系^[2]。几十年来,液体火箭发动机的故障诊断系统有了巨大的进步,在传感器、故障诊断算法、运算器等方面^[3-8]都取得了极大的提升,可以更高效地完成发动机的故障诊断。此外,相关研究者已结合模型仿真手段开展了一系列液体火箭故障诊断研究。Tulpule 等^[9]利用数量推理工具生成了航天飞机主发动机的定性物理模型,该模型给出了层次化、模块化的发动机结构,可以在不同层次上确定发动机的故障原因。吴建军等^[10]利用偏差模型和关系模型对液体火箭发动机系统建立了定性模型。通过假设-冲突检测-遍历的方法进行了故障诊断研究。目前的研究中在电推进方面的故障诊断研究还比较匮乏,液体火箭的故障诊断研究为电推进领域的相关研究提供了思路和参考。

目前,常见的针对离子电推力器放电室所采用的粒子模拟方法与流体模型均存在着计算量较大的问题^[11],难以结合电源处理单元(PPU)、氙气贮供系统(XFS)等子系统开展对离子电推进系统的联合研究。本文利用 Goebel 零维放电室模型^[12],结合 PPU, XFS 子系统数学模型与优化算法,在 Matlab/Simulink 软件中搭建了一种离子电推进系统仿真模型,对离子电推进系统的稳态运行过程进行了研究。并基于该仿真模型,对离子电推进系统故障运行状态进行

了仿真,利用输出的故障性能参数结合神经网络建立了一个初步的故障诊断系统。

2 数学模型

离子电推进系统涉及包含等离子体、流体力学、电路以及热学等各学科方面的子系统,为了研究简便起见,在这里将离子电推进系统分解为电源处理单元(PPU)、氙气贮供系统(XFS)、离子推力器放电室三个子系统。其中,离子推力器放电室是离子电推进系统的核心,主要用以生成等离子体并产生推力。氙气贮供系统在相应控制单元的调节下向推力器中输入推进剂,并根据推力器状态及时调整气体流量。电源处理单元向各个子系统供电,并具备开关与故障保护功能。考虑到本研究系统仿真的特点,对放电室使用零维模型,建立电源处理单元、氙气贮供系统与放电室这三个子系统的数学模型。

2.1 电源处理单元

电源处理单元是离子推力器的重要组成部分,通常是一个二次电源变换装置。PPU 将来自太阳能板等母电源的供电转化为离子推力器所需的各种电压^[13]。在这里,主要考虑放电电源、阴极触持极电源、屏栅极电源与加速电源,同时采用各自独立的直流电源替代母线电源,对各子电源进行供电。

根据文献[14],对于屏栅极电源,输出电压很大,在 1000V 左右,因此采用全桥功率变换电路。对于放电电源与阴极触持极电源,输出电压在 10~30V 左右,采用稳流方式控制,可以采用正激功率变换电路。对于加速电源,输出电压大,输出电流小,采用稳压方式控制,可以采用反激功率变换电路。各电路示意图如图 1~3 所示。其中 VT 代表晶闸管, N 代表变压器线圈匝数。

2.2 贮供系统

采用文献[15]给出的贮供系统的数学模型。典

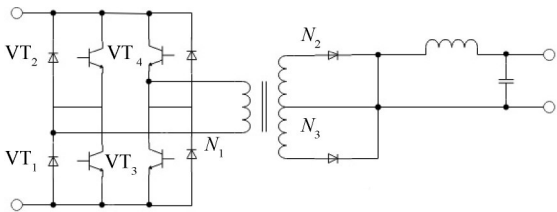


Fig. 1 Schematic diagram of the full-bridge power conversion circuit

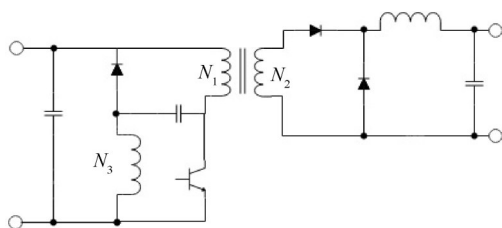


Fig. 2 Schematic diagram of the forward power conversion circuit

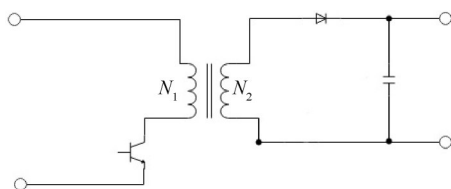


Fig. 3 Schematic diagram of the flyback power conversion circuit

型的XFS系统模型如图4所示。将XFS系统主体分为气瓶、稳压罐、容腔三个部分,此外,还需考虑电磁阀等其他组件,对其内部的气体输运过程进行数学描述。

在实际情况下,XFS系统中的氙气不能视为理想气体,为了便于处理,引入压缩因子 Z 对氙气的理想气体状态方程进行修正,即

$$pV = ZRT \quad (1)$$

为了便于说明,气瓶的压强、体积、温度记为 p_1, V_1, T_1 ;容腔与稳压罐的分别记为 p_2, V_2, T_2 和 p_3, V_3, T_3 。稳压罐输出流量为 q_{m0} ,两个电磁阀(高压电磁阀、低压电磁阀)的流量分别记为 q_{m1}, q_{m2} 。基于XFS的工作特性,考虑不同气体容器之间的气体交换过程均为等温的准静态过程,容器内压强均匀分布。

在上述假设基础上,建立由流量、气体连续性以及能量的三组方程构成的贮供系统数学模型^[15]。在这里,认为高压气瓶与容腔间的高压电磁阀,容腔与稳压罐之间的中压电磁阀经历着相同的物理过程。将电磁阀视为等熵喷管,采用流量参数和气体压缩 Z 因子对其进行修正,得到实际流经电磁阀的气体流

量为^[14]

$$q_{mi} = C_d A \sqrt{k} \frac{p_u}{\sqrt{ZRT_u}} \phi\left(\frac{p_d}{p_u}\right), i = 1, 2 \quad (2)$$

$$\phi\left(\frac{p_d}{p_u}\right) = \begin{cases} \sqrt{\left[\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \left(\frac{2}{k-1}\right)}, & p_{cr} < \frac{p_d}{p_u} \\ \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & p_{cr} \geq \frac{p_d}{p_u} \end{cases} \quad (3)$$

$$p_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

式中下标 u 代表电磁阀上游气体参数,下标 d 代表下游气体参数, p_{cr} 为临界压力比, C_d 为流量系数, A 为阀门口面积, k 为气体绝热指数,对于一般的单原子气体分子, $k \approx 1.669$ 。

根据假设,可以认为气体交换过程为等温等容过程。对于气瓶,连续方程可以写为

$$\frac{dM_1}{dt} = -q_{m1} = \frac{d}{dt} \left(\frac{p_1 V_1}{Z_1 R T_1} \right) = \frac{V_1}{Z_1 R T} \frac{dp_1}{dt} - \frac{p_1 V_1}{Z_1^2 R T} \frac{dZ_1}{dt} \quad (5)$$

类似气瓶的连续方程,可以给出容腔与稳压罐的连续方程。这里主要使用XFS系统的同步工作模式^[15],容腔同时进行充气与放气过程。在仿真过程中,建立该工作模式下系统的Simulink模型,分析XFS系统的工作特征。

2.3 放电室模型

采用Goebel模型^[13]描述放电室工作过程,该模型属于零维模型,可以利用已知的输入参数计算放电室中等离子体的性能参数。在本研究中,将以放电电压、放电电流、阴极电势降(触持极电压)、推进剂(中性气体工质)流量等参数作为放电室模型的输入,输出束流、放电损耗等放电室性能参数。下面对Goebel零维放电室模型做简要介绍。

对于放电室而言,推进剂利用率 η_m 是一个衡量其工作特性的重要参数,定义为

$$\eta_m = \frac{I_b}{Q_{in} e} \quad (6)$$

式中 I_b 为放电室输出的束流, Q_{in} 为输入的中性气体

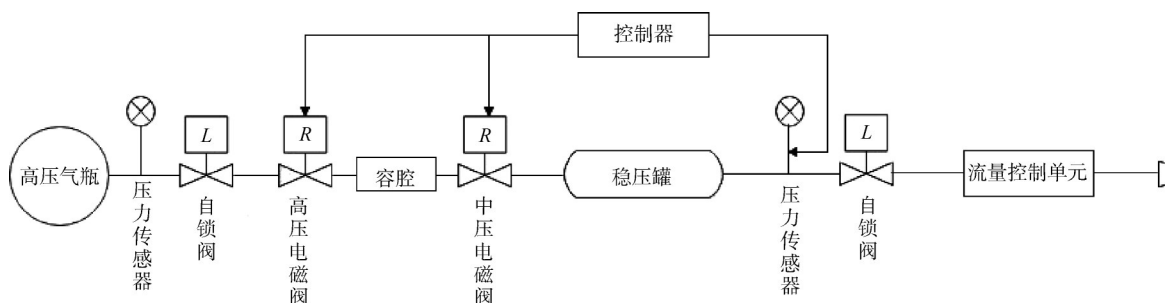


Fig. 4 Xenon feed system (XFS)

(工质)流量, e 为电子电荷。根据放电室内部的流量守恒关系, 未被利用的工质流量应该等于输入工质流量与形成束流的工质流量之差, 即

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - \frac{I_b}{e} \quad (7)$$

未被利用的工质气体主要通过栅极泄漏, 即

$$Q_{\text{out}} = \frac{1}{4} n_0 v_0 A_g T_a \eta_c \quad (8)$$

式中 A_g 为栅极面积, T_a 为栅极透过率, η_c 为 Clausing 因子, 用以反映由于栅极厚度造成的栅极导流能力的降低, n_0 为中性气体密度。

由(6)~(8)式可得

$$n_0 = \frac{4Q_{\text{in}}(1 - \eta_m)}{v_0 A_g T_a \eta_c} = \frac{4I_b(1 - \eta_m)}{ev_0 A_g T_a \eta_c \eta_m} \quad (9)$$

考虑中性粒子满足麦克斯韦分布, v_0 为中性气体速度, 可由下式给出

$$v_0 = \sqrt{\frac{8kT_0}{\pi M}} \quad (10)$$

式中 T_0 为中性气体温度, 在这里取 500K, M 为推进剂原子质量。

放电室内单位时间总的生成的离子数为

$$I_p = n_0 n_e \langle \sigma_i v_e \rangle V + n_0 n_p \langle \sigma_i v_p \rangle V \quad (11)$$

式中 n_e 为等离子体电子密度, n_p 为原初电子密度, V 为放电室体积。 $\langle \sigma_i v_e \rangle$ 为中性气体与等离子体电子的反应速率常数 (m^3/s), 可根据对反应速率常数的曲线^[12]拟合给出。

$$\langle \sigma_i v_e \rangle = \begin{cases} 10^{-20} \times (3.79 + 0.645T_e - 0.0368T_e^2) e^{-\frac{12.27}{T_e}} \times \\ \sqrt{\frac{8eT_e}{\pi m}}, T_e \leq 5\text{eV} \\ 10^{-20} \times (-1.031 \times 10^{-4} \times T_e^2 + 6.386e^{-\frac{12.27}{T_e}}) \times \\ \sqrt{\frac{8eT_e}{\pi m}}, T_e > 5\text{eV} \end{cases} \quad (12)$$

式中 σ_i 为原初电子电离碰撞截面 (m^2), T_e 为电子温度 (eV)。

式(11)中 $\langle \sigma_i v_p \rangle$ 为中性气体与原初体电子的反应速率常数 (m^3/s), v_p 为原初电子速度。

$$v_p = \sqrt{\frac{2e(U_d - U_c)}{m}} \quad (13)$$

式中 U_d 为放电电压, U_c 为阴极电势降, m 为电子质量。

单位时间通过各个方向离开放电室的离子数为

$$I_i = \frac{1}{2} n_i e \sqrt{\frac{kT_e}{M}} A_i \quad (14)$$

n_i 为离子密度, A_i 为总的离子损失面积。

利用式(6)~(14), 可得

$$\frac{\sqrt{kT_e/M}}{\langle \sigma_i v_e \rangle V + \frac{n_p}{n_e} \langle \sigma_i v_p \rangle V} = \frac{8Q_{\text{in}}(1 - \eta_m)}{v_0 A_g A_i T_a \eta_c} \quad (15)$$

此外放电损耗也是一个衡量放电室性能的重要参数, 放电损耗被定义为

$$\eta_d = \frac{P_{\text{in}}}{I_b} = \frac{I_d U_d}{I_b} \quad (16)$$

式中 P_{in} 为输入功率, I_d 为放电电流。

Goebel模型中, 放电损耗可以用放电室中的一些参数表示, 即

$$\eta_d = \frac{U_d \left[\frac{I_p}{I_b} U^* + \frac{I^*}{I_b} U^* + \frac{1 - T_a}{T_a} (2U_d + 2U_p - U_c + 2\phi) + U_p + \phi \right]}{U_d + U_p - U_c - 2T_e} + \frac{U_d \left[\frac{A_{\text{as}} f_c}{A_g T_a} (U_p + 2\phi + 2T_e) + \frac{2v_p n_p A_p}{n_e v_a A_g T_a} (U_d - U_c - 2T_e + U_p) \right]}{U_d - 2T_e - U_c + U_p} \quad (17)$$

式中 U^* 是工质气体的电离能, U^* 是工质气体的激发能, I^* 是放电室内处于激发态的离子形成的电流, 其计算过程与式(11)基本一致, 只需要将相应的反应速率常数替换为激发反应速率常数, A_{as} 为与等离子体接触的阳极面积, f_c 为离子限制因子, v_a 为玻姆速度, U_p 是等离子体的电势, 这里考虑 $U_p \approx \frac{T_e}{2}$, ϕ 则是相对于阳极壁的鞘层电势, 可以由电荷守恒关系给出。

$$\phi = \frac{k_B T_e}{e} \ln \left[\sqrt{\frac{2M}{\pi m}} \cdot \frac{A_a}{A_g T_b} \left(\frac{I_d}{I_b} + \frac{f_c A_{\text{as}}}{A_g T_a} - \frac{2n_p v_p A_p}{n_e v_a A_g T_a} \right)^{-1} \right] \quad (18)$$

式中 A_p 为原初电子损失面积, A_a 为热电子损失面积。

在实际的仿真模型中, 由 PPU 和 XFS 输入放电电压 U_d 、放电电流 I_d 、阴极电势降 U_c 以及推进剂流量 Q_{in} , 通过对放电损耗 η_d 与电子温度 T_e 进行遍历, 使得到的相关参数能够满足式(15), 并使联立式(16), (17)给出的放电电流与输入的放电电流基本相同时, 可认为仿真结果收敛, 给出放电室仿真结果, 再通过式(6), (17)等完成束流 I_b 、放电损耗 η_d 等参数的计算。

在利用 Goebel 模型得到束流的结果后, 可以利用下式完成推力的计算^[16]。

$$F = I_b \sqrt{\frac{2MU_b}{e}} \quad (19)$$

式中 U_b 为束流电压, 其值近似等于屏栅极电压。

2.4 模型集成

结合各子系统数学模型及离子电推进系统实际

情况,利用电源处理单元模块、氙气贮供系统模块及放电室模块搭建了离子推进系统 Simulink 模型,图 5 为其示意图,连接线上表明了该子系统模块向下一级子系统模块的输出参数。对于实际的电源处理单元,各子电源供电来自于母线电源。在这里,使用独立的直流电源承担母线电源的作用,对各个子电源进行供电,各直流电源供电电压在 15~70V,经过相应的功率变换电路,被转换为各子电源的电压。氙气贮供系统模块主要向放电室内输入推进剂流量,放电电源模块向放电室内输入放电电压及放电电流;阴极触持极电源模块向放电室内输入触持极电压;放电室模块根据各子系统的输入,计算得到放电室内等离子体的相关参数和束流;加速电源模块、屏栅极电源模块结合放电室的输出束流结果计算推力。该仿真系统可对离子推力器某一参数随时间的变化情况进行仿真。

在实际的仿真过程中,由于时间步长设置和放电室模型计算效率的问题,会导致极长的仿真时间,

难以得到有效的仿真结果。为了提高仿真模型的计算效率,利用模拟退火算法对放电室代码进行了优化,有效缩短了系统仿真的运行时间。模拟退火算法是一种基于 Monte-Carlo 迭代求解的优化算法,其核心思想是从一较高初值出发,结合一定概率的突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的局部最优解。但是,模拟退火算法本质上仍是一种随机寻优算法,其输出结果并不准确,且波动较大,仍需结合取数据均值的手段对输出数据进行进一步的处理,得到最终的仿真结果。

2.5 系统仿真模型结果

本研究主要采用文献[13,17-20]给出的 LIPS-300 离子推力器放电室参数,作为仿真模型的输入参数,如表 1 所示。

通过调整电源相关元器件参数,使电源处理单元的电压和电流输出值稳定在某一范围内。在此设置下,仿真得到放电电源相关参数变化如图 6 所示。

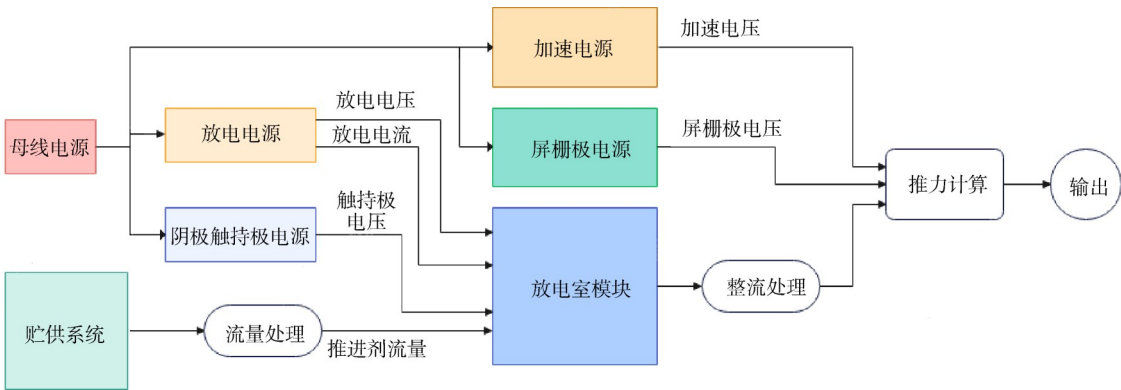


Fig. 5 Simulink simulation model of the ion thruster system

Table 1 Simulation parameter of the LIPS-300 thruster

项目	数据	项目	数据
栅极面积 A_g/m^2	0.069	氙电离截面 σ_i/m^2	2.06×10^{-20}
放电室体积 V/m^3	0.0106	氙激发截面 σ^*/m^2	3.23×10^{-20}
阳极表面积 A_{as}/m^2	0.072	Clausing 因子	0.75
原初电子损失面积 A_p/m^2	1.31×10^{-4}	限制因子 f_c	0.155
热电子损失面积 A_s/m^2	3.11×10^{-3}	推进剂流量 $Q_{in}/(\text{mg/s})$	≈ 5
屏栅极透过率 T_a	0.9	磁尖长度 L_c/m	3.18
氙激发能 U^*/V	8.35	氙电离能 U^+/V	12.13

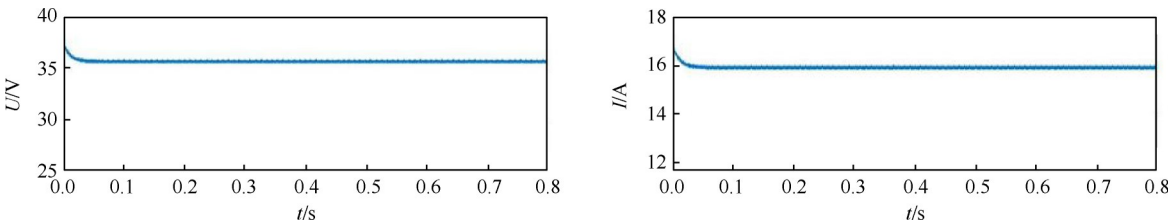


Fig. 6 Simulation results of the discharge power supply

可以看出,各电源输出值在仿真开始的一段极短时间内,都会出现输出先上升再下降最后稳定的情况,这是由电路中的电容电感的充放电过程导致的,随着仿真的进行,电容电感完成充电过程,整个电路进入稳定运行状态。此状态下电路输出值的波动是由于功率变换电路特性所致,放电电源电压稳定在 35.4V 附近,电流稳定在 15.8A 附近。同样给出了阴极触持极电源的输出情况,如图 7 所示。可以看出,阴极触持极电源电压稳定在 7.9V 附近,电流稳定在 0.6A 附近。

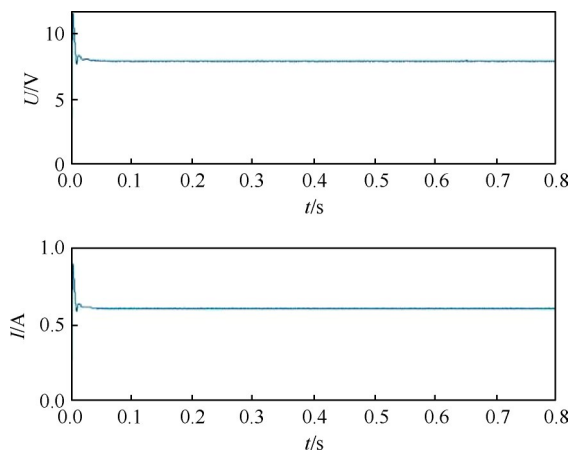
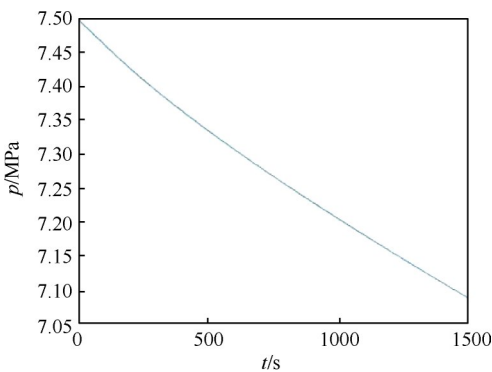


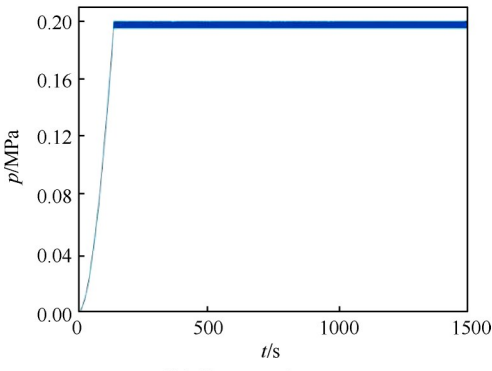
Fig. 7 Simulation results of the cathode keeper power supply

XFS 系统中氙气从气瓶中流出,再由稳压罐向放电室中输入,完成推进剂气体的输出过程,其仿真结果如图 8 所示。设置图 4 中的稳压罐的输出流量为 5.2mg/s,此时仿真模型最能还原该离子推力器的稳定运行状态。XFS 系统不断地将气瓶中贮存的气体输出,使得气瓶中的气压随时间不断减少。稳压罐的压强阈值为 0.2MPa,当稳压罐压强达到 0.2MPa 时,稳压罐会排出气体,并随着电磁阀的开关过程不断循环这一过程,使其中的压强在一定小范围内波动。

图 9 给出了离子推力器放电室输出参数随时间的变化情况。在仿真开始的一段时间,各参数输出都出现一定的波动情况,其原因在于仿真开始阶段电源处理单元的稳定工作状态需要一个建立过程,随着仿真的进行,各子系统输入趋于稳定,放电室输出也随之趋于稳定。可以看到,仿真中离子推进系统稳定工作状态输出束流约 3.70A,放电损耗约 152.3W/A,输出推力约 0.21N,由于加速电源电压在较短时间内的微弱波动,导致推力表现出了微小的增加趋势。文献[17-20]中有关 LIPS-300 离子推力器相关性能参数如表 2 所示。将系统仿真结果与表 2



(a) Gas cylinder pressure



(b) Surge tank pressure

Fig. 8 Simulation results of the XFS

数据进行比较,可以认为系统仿真模型较好地还原了该离子推力器的稳态运行。

Table 2 Comparison between the simulation results and literature value

项目	本文值	文献值 ^[17-20]
推力/mN	210.0	205.3
束流/A	3.70	3.67
放电损耗/(W/A)	152.3	152.2
放电电压/V	35.4	35.2
放电电流/A	15.8	15.6
阴极触持极电流/A	0.6	0.6

3 故障诊断系统

3.1 故障诊断方法

本研究结合仿真模型,红线阈值法^[21]以及神经网络开展离子电推进系统的故障诊断研究。在故障诊断进行前,基于故障数据特点、实际离子推力器特征以及红线阈值法形成故障模式分类表。之后,利用已搭建好的系统仿真模型,人为引入故障因子,针对离子电推进系统故障运行状态进行仿真,得到相关数据。再根据之前形成的故障分类表对故障数据进行分类,得到故障数据与故障类别这两个相互对应的数据集。最后,结合神经网络工具,利用数据集

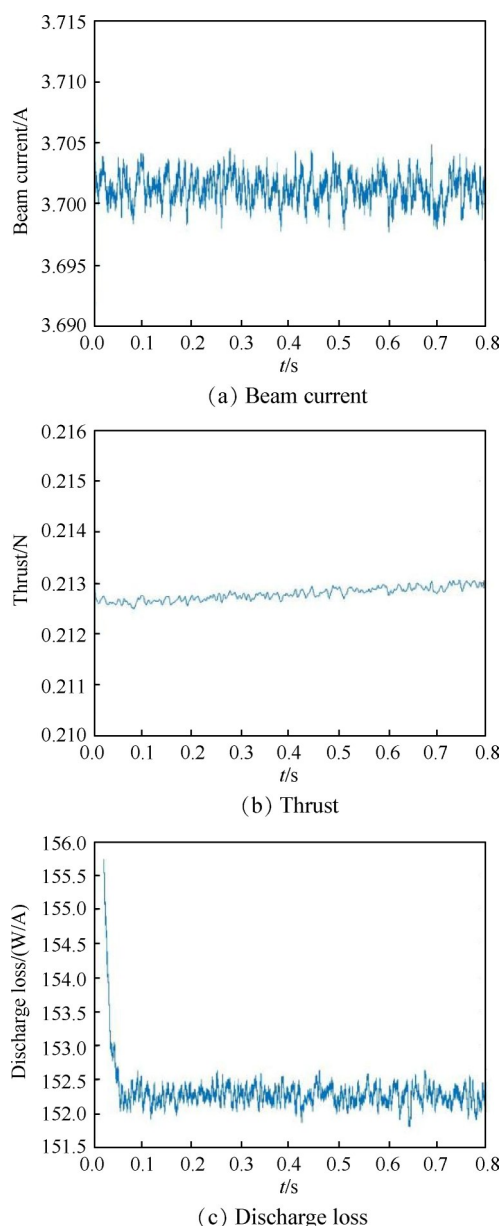


Fig. 9 Output of the ion thruster simulation model

对神经网络进行训练,使之具备故障诊断的能力。经过训练的神经网络可结合故障数据对故障进行诊断与定位,其诊断结果可作为实际实验中所出现的故障模式的初步参考。

3.2 故障阈值设定

通过红线阈值法给出了故障阈值范围,红线阈值法^[21]的核心是一套基于统计学原理的自适应算法,该算法的主要思路可以如下描述。在稳态工作情况下,离子电推进系统测量参数在第 N 次测量时的均值与方差可以分别表示为

$$\bar{x}^N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (20)$$

$$\hat{s}^N = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}^N)^2 \quad (21)$$

可采用递推的思想改写式(14),(15)为

$$\bar{x}^{N+1} = \bar{x}^N + \frac{x_{N+1} - \bar{x}^N}{N+1} \quad (22)$$

$$\hat{s}^{N+1} = \frac{N-1}{N} \hat{s}^N + \frac{(x_{N+1} - \bar{x}^N)^2}{N+1} \quad (23)$$

得到在第 N 次测量时,参数 x 的正常区间为

$$M^N: [\bar{x}^N - n\hat{s}^N - \frac{c_i}{2}, \bar{x}^N + n\hat{s}^N + \frac{c_i}{2}]$$

式中 n 为带宽系数,可以由自适应算法给出,这里根据正态分布的99.73%置信区间,设定 $n=3$ 。 c_i 是综合系数,反映了同一系数在不同测试场合下的非线性差别,可以由如下方法给出:取 k 组某一参数在相同测试时间内稳态运行阶段的均值 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_k$,则

$$c_i = \max(l_1, l_2, \dots, l_k) - \min(l_1, l_2, \dots, l_k) \quad (24)$$

如此就可以根据数据情况,给出正常运行状态的数据判定范围。

3.3 神经网络方法

本文利用 Matlab 神经网络工具箱中的模式识别功能建立了用于故障诊断的神经网络。神经网络是一类模仿动物神经网络行为特征,对信息和数据进行分布式并行处理的算法数据模型。神经网络在对大量数据的平行处理过程中,不断调整每个神经元之间的连接权重,以做到对所有信号的非线性逼近,寻找输入信息之间的联系。图10为一个具有三层结构的神经网络,第0层为输入层,第1层为隐含层,第2层为输出层。其中,第0层中的 x_i 就相当于离子推力器故障的故障数据(参见表3中13类“模型参数”),第2层中的 u_i 就相当于离子推力器故障的故障模式(参见表7中18类“故障模式”),通过这样一种神经网络,就可以在故障数据与相应的故障模式之间建立关系,实现神经网络对离子推力器故障的诊断能力。

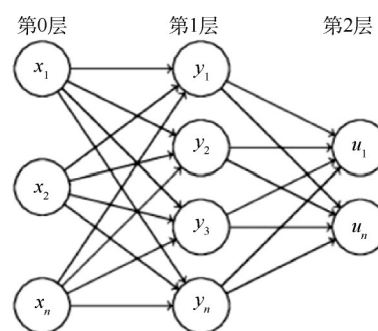


Fig. 10 Schematic diagram of the artificial neuron network

本文主要使用 Matlab 神经网络工具箱中的反向传播(BP)式神经网络方法进行故障诊断。BP神经网络通过计算输出层与期待值之间的误差来调整网络

中的连接权重,达到非线性信号的连续函数拟合。从优化的角度来看,该神经网络的学习过程等价于寻找全局优化函数最小值的过程。共轭梯度法将问题的初始值和最优解表示为共轭向量线性组合的形式,利用共轭向量之间的负残差寻找问题的局部最优方向及最优解。量化共轭梯度算法^[22]在共轭梯度算法的基础上,又结合了 Levenberg-Marquardt 算法中的模型信赖域方法,进一步提高了算法的性能。Matlab 神经网络工具箱采用了量化共轭梯度算法作为其神经网络训练的核心算法,用于寻找神经网络中连接权重的最优值,完成整个神经网络的构建。

4 结果与分析

4.1 故障模式分类

根据所建立的离子电推进系统中的子系统类型、仿真模型可以输出的参数,以及实际情况下可以获得的离子电推进系统测量参数,选择放电电源电压、放电电源电流、推进剂流量、束流、阴极触持极电源电压、阴极触持极电源电流、加速电源电压、加速电源电流、气瓶、容腔以及稳压罐压强变化情况及高压、中压电磁阀流量这 13 类数据作为系统仿真模型输出结果与神经网络输入变量。

根据 3.2 节中红线阈值方法,给出了以上模型参数的正常工作范围,如表 3 所示。

Table 3 Normal operation parameter range of subsystem		
子系统类型	模型参数	正常工作范围
XFS	推进剂流量/(mg/s)	$4.887 < Q_m < 5.773$
	高压电磁阀流量/(g/s)	$1.031 < Q_1 < 1.042$
	中压电磁阀流量/(g/s)	$0.971 < Q_2 < 1.011$
	气瓶压强变化率/(Pa/s)	$121.40 < \Delta p_1 < 122.63$
	容腔压强变化率/(Pa/s)	$71.91 < \Delta p_2 < 72.64$
	稳压罐压强变化率/(Pa/s)	$2396.16 < \Delta p_3 < 2490.84$
放电电源	电压/V	$35.39 < U_d < 35.81$
	电流/A	$15.67 < I_d < 16.68$
阴极触持极电源	电压/V	$7.853 < U_c < 7.947$
	电流/A	$0.5967 < I_c < 0.6035$
加速电源	电压/V	$388.62 < U_a < 410.87$
	电流/A	$0.0128 < I_a < 0.01368$
放电室	束流/A	$3.692 < I_b < 3.711$

当各子系统对应的参数不处于正常工作范围时,即认为故障发生。根据故障的发生位置与数据特点,形成了相应的故障模式分类。表 4~6 是部分故障模式及其故障数据示例(表 4~6 中的数据来源于 4.2 节的故障仿真结果),展示了故障模式形成的主要

过程:如当放电电源电压、电流和束流仿真数据均不处于正常范围,认为发生了放电电源超差类故障,只有电压和束流仿真数据均不处于正常范围时,认为发生了放电电压异常类故障;当推进剂流量和束流不处于正常范围,则认为发生了流量控制单元故障;当气瓶、稳压罐、容腔的压力变化率异常,则认为压力控制单元异常故障;而当气瓶压力急剧变化时,则认为发生了气瓶外泄故障。

Table 4 Example of discharge power supply fault			
故障模式	故障数据项		
	放电电源电压/V	放电电源电流/A	束流/A
放电电源超差	38.54	16.75	3.754
放电电压异常	38.54	15.87	3.72

Table 5 Example of flow control unit fault		
故障模式	故障数据项	
	推进剂流量/(mg/s)	束流/A
流量控制单元异常	4.52	3.073

Table 6 Example of pressure control unit fault and gas cylinder leakage fault			
故障模式	故障数据项/(Pa/s)		
	气瓶压强变化率	容腔压强变化率	稳压罐压强变化率
压力控制单元异常	98	21	680
气瓶外泄	317.6	72.1	2397.8

基于以上思路,形成了 18 类故障模式,具体故障模式分类如表 7 所示。

4.2 故障诊断系统结果

利用先前建立的离子推进系统仿真模型,通过将模型参数分别乘以故障因子来表征故障,例如电源系统的故障可以通过对电路内部的电阻或电容参数乘以故障因子来表征,贮供系统的故障可以通过对流量参数乘以故障因子来表征等。故障因子不是一个固定的数,其值可在一定范围内变化,其大小可以在一定程度上反应故障的严重程度。基于这种方式,建立相应的故障状态,并对其进行仿真,共得到 3680 组故障仿真数据,根据表 7 明确了这些故障数据对应的故障模式,每种故障对应的数据数量基本在 200 组左右。形成了故障数据与故障模式数据集,作为神经网络训练的样本集。

利用故障仿真所得到的数据作为神经网络训练的样本,完成了神经网络自我训练与建立过程。经过多次调整发现,当神经网络中间层层数取 10 时,有

最好训练结果,其训练结果如混淆矩阵图 11 所示。图中最左边一列数字代表了该列所对应的故障模式类别(与表 7 相对应),对角线单元是神经网络在训练中正确诊断的结果,非对角线的单元则对应错误诊断的结果。如果考虑矩阵中的某个元素为 x_{ij} ,那么该元素就代表了第 j 类故障被诊断在第 i 类故障中的数据数量。每个单元格中都表明了相关对象的数量及其在总样本中百分比。矩阵最右边的列是同一类别

中正确诊断或错误诊断的对象所占的百分比,矩阵最底部的行记录了不同类别中正确诊断或错误诊断的对象所占百分比,矩阵最右下角内的数据记录了所有故障数据在训练过程中的正确率。

从混淆矩阵图图 11 上可以看到,全部数据的训练正确率在 94.0%。在训练过程中,多次发生误判,除了部分故障之间数量较少的误诊外,其余误诊主要发生在放电电压异常故障(11 类)与放电电源超差

Table 7 Fault mode classification

类别	第 1 类	第 2 类	第 3 类
故障模式	正常运行	放电电源电压异常	放电电源电流异常
类别	第 4 类	第 5 类	第 6 类
故障模式	放电电源超差	阴极触持极电源电压异常	阴极触持极电源电流异常
类别	第 7 类	第 8 类	第 9 类
故障模式	阴极触持极电源超差	流量控制单元异常	高压电磁阀异常
类别	第 10 类	第 11 类	第 12 类
故障模式	中压电磁阀异常	加速电源电压异常	加速电源电流异常
类别	第 13 类	第 14 类	第 15 类
故障模式	加速电源超差	空心阴极熄弧	空心阴极不能点火
类别	第 16 类	第 17 类	第 18 类
故障模式	放电室工作失效	气瓶外泄	压力控制单元异常

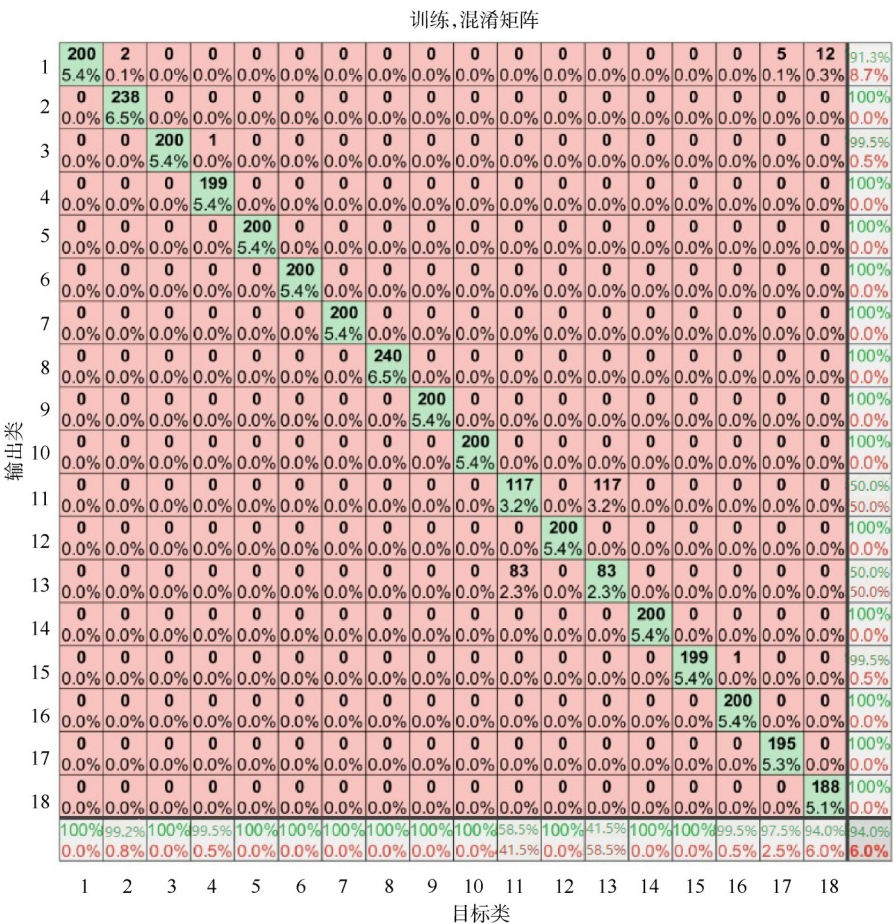


Fig. 11 Training results of neural network for failure mode

故障(13类)之间。考虑其中诊断错误的原因,一部分源于神经网络本身的性能不足,另外部分故障数据在数值上的差异较小也不利于神经网络的判断。如表4所示,放电电压异常故障与放电电源超差故障主要在放电电源电流上存在差距,且部分差距较小,不易判别,最终影响了神经网络的学习结果,导致了误诊的发生。

为了检验神经网络的故障诊断能力,又针对各故障模式额外仿真了一组全新的数据,对神经网络进行了附加测试。该测试用于检验神经网络的训练结果与诊断能力,让神经网络自行判断一组故障数

据对应的故障类型,并与其相应实际的故障模式比较,可反映神经网络的故障诊断能力,测试结果如图12所示。

可以看到,在附加测试中,神经网络的故障诊断正确率为93.8%,略低于训练结果。从图中结果可以看到,对于除放电电压异常故障(11类)与放电电源超差故障(13类)之外的其他故障,基本上可以全部做出正确判断,但这两种故障仍出现了误诊,总共有20组数据被判断错误,其原因如前文所述,主要在于故障数据在部分数据类型上差异较小,不利于神经网络的故障诊断。

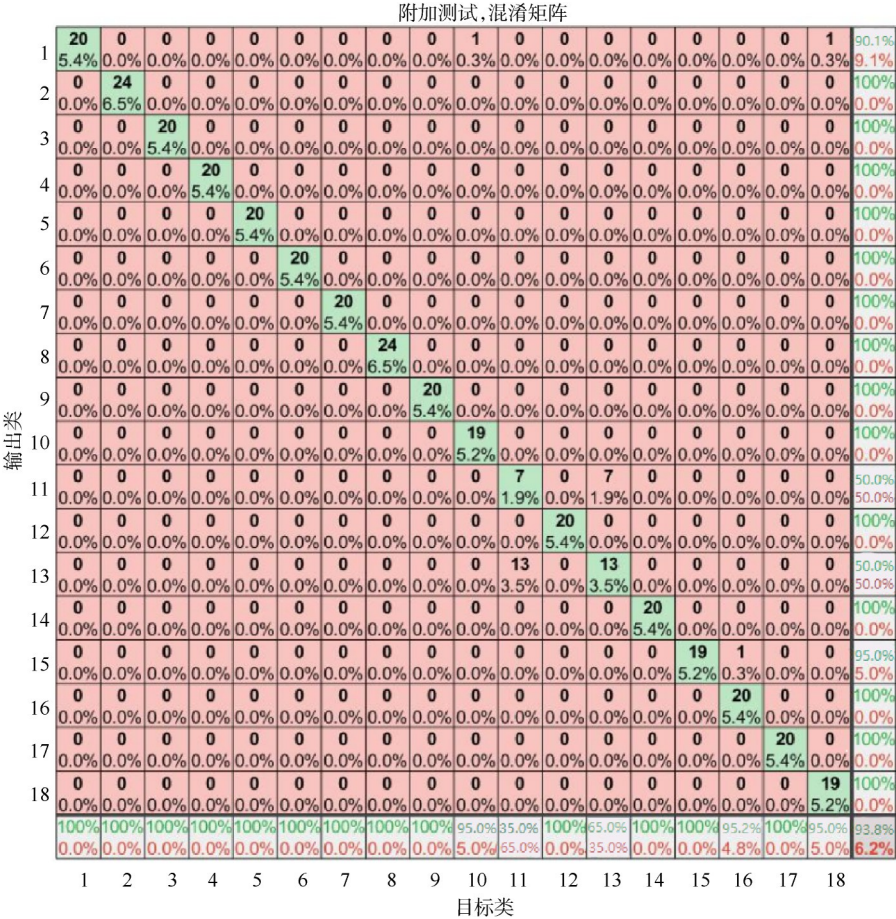


Fig. 12 Test results of neural network for failure mode

5 结论与展望

本文利用 Matlab/Simulink 软件搭建了离子推力器各子系统及其整体的仿真模型,并基于仿真模型进行了离子推进系统故障诊断方面的研究,研究结论如下:

(1)本研究利用零维模型,并结合模拟退火算法,实现了离子电推进的系统仿真模型,解决了传统方法由于仿真时间过长而无法得到有效仿真结果的问题。

(2)在各个子系统模型的基础上,搭建了由电源处理单元、氦气贮供系统、放电室组成的离子推力器系统模型。对 LIPS-300 系统稳定工作状态进行了仿真,其输出束流约 3.70A,放电损耗约 152.3W/A,产生推力 0.21N,还原了该离子推进系统的稳定工作情况。

(3)在系统仿真模型的基础上,结合液体火箭发动机故障诊断中的数学模型方法与红线阈值方法,以及神经网络,建立了一种初步的具有故障定位能力的故障诊断系统,为电推进的故障诊断研究提供

一种新的思路。

(4)利用建立的系统仿真模型对离子推力器故障状态进行了仿真,并利用输出的故障数据结合 Matlab 神经网络工具箱建立了离子推力器故障诊断系统。建立的故障诊断系统具备一定的诊断能力,在故障诊断测试中,正确率为 93.8%,诊断结果可作为实际实验结果提供参考。

本文的研究尚有一些不足,可进一步开展研究:在系统仿真方面,未能将放电室阴极与中和器引入到仿真模型中,后续的研究可围绕更准确与更精细的仿真模型展开。在故障诊断方面,目前所建立的故障诊断系统可以对故障进行初步的定位,但是用于诊断的数据类型有限,不能更准确地对故障原因进行判断。此外,为了更加真实地还原实际电推进系统的运行情况与故障情况,还可将本文的故障诊断方法与电推进系统运行的实验数据相结合,进一步增强故障诊断的实用性。

致 谢:感谢基础加强计划技术领域基金的资助。

参考文献

- [1] 康小录,张 岩. 空间电推进技术应用现状及发展趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 24-34.
- [2] Figueroa F, Walker M, Underwood L W. NASA Platform for Autonomous Systems(NPAS)[C]. San Diego: AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [3] 金云飞,王后茂,王咏梅. 航天器发动机羽流紫外辐射的在轨监测试验及分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 460-465.
- [4] 赵晋平. 液体火箭发动机羽焰光谱采集系统研究与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [5] 赵永学,张育林,李麦亮,等. 羽流 UV-VIS 辐射在液体火箭发动机故障诊断中的应用技术研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 34-39.
- [6] Srivastava A N, Buntine W. Predicting Engine Parameters Using the Optic Spectrum of the Space Shuttle Main Engine Exhaust Plume[C]. San Antonio: 10th Computing in Aerospace Conference, 1995.
- [7] Hawman M W, Galinaitis W S, Tulpule S, et al. Framework for a Space Shuttle Main Engine Health Monitoring-System[R]. NASA-CR-185224, 1990.
- [8] Nemeth E. Health Management System for Rocket Engines[R]. NASA-CR-185223, 1990.
- [9] Tulpule S, Winston H. Model-Based Diagnostics for the SSME[C]. Sacramento: 27th Joint Propulsion Conference (AIAA), 1991.
- [10] 吴建军,郑 威. 液体火箭发动机基于关系模型的故障诊断方法[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 1-3. (WU Jian-jun, ZHENG Wei. Relation-Model Based Fault Diagnosis Technique for Liquid-Propellant Rocket Engines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 1-3.)
- [11] Mahalingam S, Menart J A. Particle-Based Plasma Simulations for an Ion Engine Discharge Chamber[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(4).
- [12] Dan M Goebel, Richard E Wirz, Ira Katz. Analytical Ion Thruster Discharge Performance Model [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(5).
- [13] 李 峰,康 庆,邢 杰,等. 大功率电推进电源处理单元技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1575-1583.
- [14] 王少宁,成 钢,赵登峰. 空间离子电推进系统电源处理单元设计[J]. 真空与低温, 2011, 17(4): 235-240.
- [15] 苟浩亮,潘海林. 电推进系统压力调节单元的建模和分析[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(5): 49-52.
- [16] Dan M Goebel, Ira Katz. Fundamentals of Electric Propulsion[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] 张天平. 兰州空间技术物理研究所电推进新进展[J]. 火箭推进, 2015, 41(2): 7-12.
- [18] 赵以德,李建鹏,张天平,等. 两种会切场离子推力器对比研究[J]. 推进技术, 2021, 42(11): 2633-2640. (ZHAO Yi-de, LI Jian-peng, ZHANG Tian-ping, et al. Comparative Study of Two Types of Cusp Field Ion Thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(11): 2633-2640.)
- [19] 胡 竟,王 亮,张天平,等. LIPS-300 离子推力器环形会切磁场等效磁路分析研究[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 715-720. (HU Jing, WANG Liang, ZHANG Tian-ping, et al. Research on Equivalent Magnetic Circuit of Ring-Cusp Magnet Field for LIPS-300 Ion Thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(3): 715-720.)
- [20] 王 亮,张天平,江豪成,等. LIPS-300 离子推力器放电室设计及实验研究[J]. 真空与低温, 2016, 22(6): 344-349.
- [21] 吴建军,黄 强,程玉强,等. 液体火箭发动机故障检测诊断理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [22] Martin F M. A Scaled Conjugate Gradient Algorithm for Fast Supervised Learning[J]. Neural Networks, 1993, 6(4): 525-533.

(编辑:白 鹭)