

多支路并联流体回路流量分配影响因素分析

杨敏¹, 王德伟¹, 付杨¹, 车邦祥¹, 陈灵¹, 郑红阳¹, 于新刚¹, 黄磊¹, 曹剑峰¹, 黄俊²

(1. 北京空间飞行器总体设计部 空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094;

2. 航天恒星科技有限公司 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100094)

摘要: 多支路并联流体回路热控技术在载人航天器上获得了广泛应用。外热流、重力场和管路阻力特性等因素会影响流阻, 进而影响流量分配和散热能力, 这可能会造成工质冻结并引起回路失效, 威胁航天器安全, 因此亟需针对影响流量分配因素开展分析。基于梦天实验舱6条并联流体回路建立简化模型, 分别研究外热流、重力场和管路阻力特性对流量分配的影响, 发现辐射散热带来的工质物性变化会导致各支路流量分配不均, 外热流变化带来的回路散热量增加, 以及重力场存在会加剧流量分配不均匀性。另外, 回路在设计和运行时都要避免工质温度进入黏度剧烈变化区域, 否则各支路流量容易受外部环境变化影响而发生较大波动。

关键词: 梦天实验舱; 多支路并联; 流体回路; 流量分配; 影响因素

中图分类号: V 444.36

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.05.007

Analysis of Influence Factors for Flow Distribution of Fluid Loop with Multiple Parallel Branches

YANG Min¹, WANG Dewei¹, FU Yang¹, CHE Bangxiang¹, CHEN Ling¹,

ZHENG Hongyang¹, YU Xingang¹, HUANG Lei¹, CAO Jianfeng¹, HUANG Jun²

(1. Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2. State Key Laboratory of Space-Earth Integrated Information Technology, Space Star Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: The thermal control fluid loop technology with multiple parallel branches has been widely used in manned spacecraft. Factors such as external heat flux, gravity, and resistance characteristics can affect the flow resistance, and thereby affects the flow distribution and heat dissipation potential, which may cause fluid freezing and loop failure and threaten the spacecraft safety. Therefore, it is urgent to analyze the influence factors affecting the flow distribution. A simplified model is established based on the fluid loop with six parallel branches in the Mengtian lab module, and the effects of the external heat flux, gravity, and resistance characteristics on the flow distribution are studied. The results indicate that the variations of the fluid physical properties caused by the radiation heat dissipation can lead to an uneven flow distribution in each branch, which would be increased with a higher heat dissipation caused by the external heat flux change and gravity. In addition, during the design and operation of the loop, the working medium temperature should be avoided to enter the area of drastic changes in the fluid physical properties, otherwise the flow rate of each branch might be easily affected by the external environmental changes.

Key words: mengtian lab module; multiple parallel branches; fluid loop; flow distribution; influence factor

0 引言

单相流体回路利用机械泵提供驱动力, 液体介质通过冷板吸收热量后温度升高, 在冷端(如换热

器)放热, 最终通过空间辐射器将热量排散掉。单相流体回路热控技术主要应用于载人航天器^[1-3], 包括载人飞船SZ系列、空间实验室系列、天和核心舱

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900405)

作者简介: 杨敏(1990—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为航天器热控制。

以及问天和梦天实验舱。随着科学技术及航天事业地不断发展,未来航天器载荷功耗越来越大,工作模式复杂多变,单相流体回路技术从载人领域在逐步扩展至通信、导航、遥感等卫星平台^[4-6]。2019年发射的东五平台首发星实践二十号通信卫星,第一次在高轨使用了单相流体回路进行温度控制。目前,在载人登月、深空探测等新领域航天器论证过程中,也都使用了流体回路技术^[7-8]。

应用范围、应用场景的新变化,对单相流体回路技术提出了更高的要求,其中最主要的就是流体回路的可靠性和鲁棒性。大型航天器的辐射器一般采用多支路并联的方式,主要目的是降低空间碎片对管路造成泄漏的风险,同时降低系统的阻力。例如天宫空间站梦天实验舱配置了外回路和内回路,其中外回路通过6支路并联的形式来降低流阻并提高可靠性。辐射器各支路的流量会影响辐射器散热能力,反过来由于外热流变化、遮挡等因素造成的辐射器散热能力变化同样会影响各支路温度,进而影响工质黏度和工质流量。最严重的情况会造成工质冻结,导致单相流体回路系统失效,威胁航天器安全运行。因此,亟需针对影响多支路单相流体回路系统流量分配和散热能力的因素开展系统分析,为单相流体回路系统设计提供技术支撑,提高系统设计的可靠性。范含林等^[9]针对载人运输飞船的热工况特点,基于能量平衡分析法设计了两种流体回路方案,进行了热分析和性能比较,并对流体工质的选择给出了建议。刘庆志等^[10]开展了流体回路与辐射器流动/传热及外热流计算的集成分析,研究了控温特性随外热流变化情况。陈江平^[11]等建立了单相流体回路的软件仿真模型,分析了其在典型工况下的控温性能和动态响应情况,并根据极端工况,即外热流为零时进行极限低温工况分析。付杨等^[12]通过仿真获得了神舟飞船流体回路工作特性,与在轨实测数据吻合良好。对于多支路并联单相流体回路系统的建模和仿真目前还比较少,尤其对影响流量分配的因素分析较少。黄磊等^[13]基于特征线法建立了水击效应的数学模型,对一种含并联支路的单相流体回路在阀门闭合工况进行了瞬态水击仿真分析,提出了抑制水击风险的方法。王海英等^[14]针对流体回路在轨泄漏问题开展了仿真分析,建立了基于RBF神经网络

的压力、温度反演方法,可实时获得泄漏孔径大小和泄漏位置。刘欣等^[15]使用(火积)耗散原理对多辐射器航天器热控流体回路的散热特性进行了优化设计,辐射器与流体回路串联时的系统散热性能优于两者并联情况。可见,已有文献并没有针对影响大型多支路并联流体回路流量分配的因素开展研究。

为此,本文基于梦天实验舱外回路6条并联流体回路,使用FlowMASTER软件建立了简化仿真模型,分别研究了外热流、重力场以及管路阻力特性对各条支路工质流量和温度的影响,并给出了设计准则,从而指导大型多支路并联流体回路的方案设计,提高回路系统的安全性和可靠性。

1 仿真系统的建立

1.1 梦天实验舱外回路简介

如图1所示,梦天实验舱总长17 950 mm,主体结构由工作舱、载荷舱及资源舱3部分组成。工作舱与载荷舱为密封舱,资源舱为非密封舱。为高效收集并排散设备废热,梦天实验舱配置了外回路、载荷回路和中温内回路,其中中温内回路和载荷回路用于收集平台及载荷设备工作产生的热量,而外回路包含6条并联支路,通过与辐射器耦合设计向外部空间排散热量。

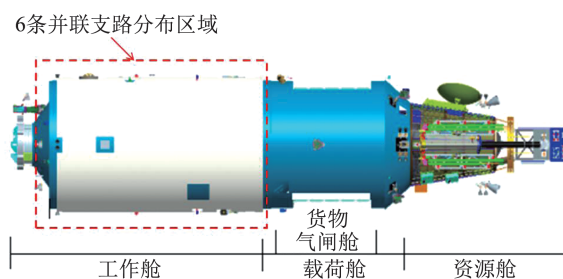


图1 梦天舱构型

Fig. 1 Architecture of the Mengtian lab module

1.2 管路流阻模型验证

为了验证数值仿真的准确性和可靠性,将管路流阻的仿真结果与试验值进行了对比分析。搭建的流阻测试试验台如图2所示, P_1 、 P_2 分别是泵入口和出口压力。系统管路总长约6 m,管径为12 mm,管壁厚度为1.5 mm,测试工质为水,分别测试了不同流量下的系统流阻。针对图2的试验测试系统在

FlowMASTER上建立了数值仿真模型并开展了系统流阻仿真,仿真值与试验数据之间的对比如图3所示。结果表明,数值仿真获得的系统流阻与试验数据吻合较好,证明了本研究所采用的管路流阻模型的准确性。

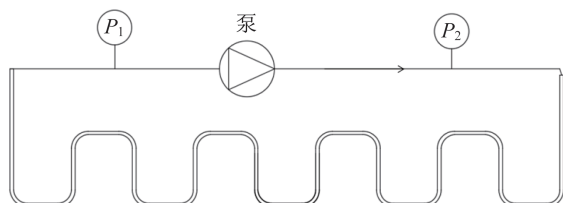


图2 流阻测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of the testing loop for flow resistance

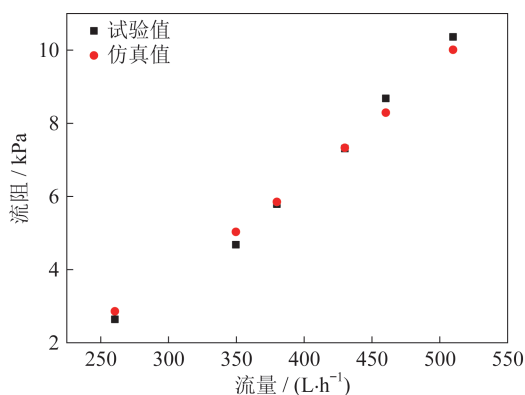


图3 数值仿真结果与试验值的对比

Fig. 3 Comparison of the simulation results with the experimental data

1.3 多支路并联流体回路仿真模型

在FlowMASTER中建立的6支路并联流体回路系统仿真模型,如图4所示。工质从左侧入口流入后,分流至6条支路后最终汇集到出口流出。管路材质均为铝,每条支路上都有一个用来调节流阻的孔板和一段管路,除主管路,6条支路长度均约为35 m,直径为12 mm,壁厚为1.5 mm,发射率为0.92。通过调整孔板来改变流阻,达到流量配平目的。各条主管路直径为20 mm,靠近入口和出口的两段管路长度均为10 m,而支路与支路之间的左右两段管路长度相同。仿真过程的入口设置为流量入口,出口为压力出口,工质为全氟三乙胺,10℃常温,工质物性随温度变化而变化。

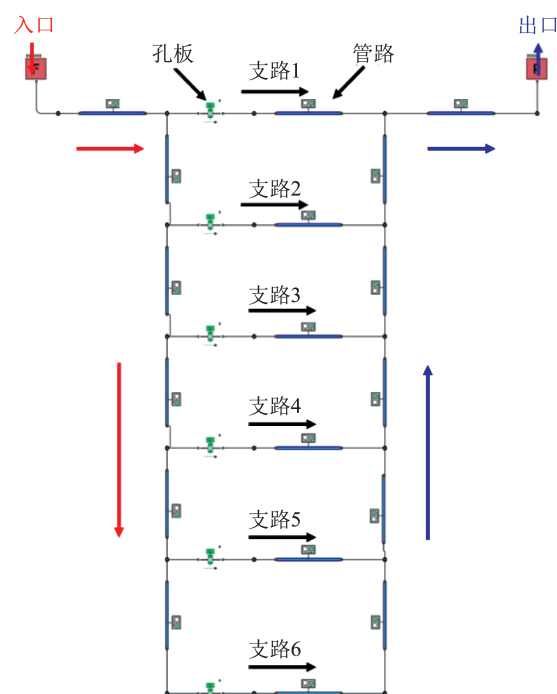


图4 6支路并联流体回路系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the fluid loop with six parallel branches

2 流量分配影响因素分析

2.1 外热流影响

当工质在回路中流动时,会通过对流和导热方式将热量传递到管壁,管壁通过导热方式将热量传递给辐射器,最后辐射至外部空间完成热排散,因此辐射散热使得工质温度沿流动方向越来越低。如图4所示的多支路并联流体回路,进出口温差会导致出口管路流阻增大,从而使得流量重新分配。回路系统向外部空间散热量不同则工质温度不同,因此需要研究回路系统散热量对工质流量分配的影响规律。当载荷工作模式以及回路系统流量确定后,外热流变化是改变回路系统散热量的主要原因。为此,本文设定回路总流量为900 L/h,通过改变辐射散热温度方式模拟外热流变化,继而改变流体回路散热量,需要指出的是,这里假设每条支路所受到的空间辐射外热流一致。在不受重力影响下,仿真外部辐射温度分别为-250℃, -200℃, -150℃和-100℃工况,对应的流体回路散热量分别约为40、30、20和10 kW。

各支路流量随回路散热量变化情况如图5所示,由图5可知:

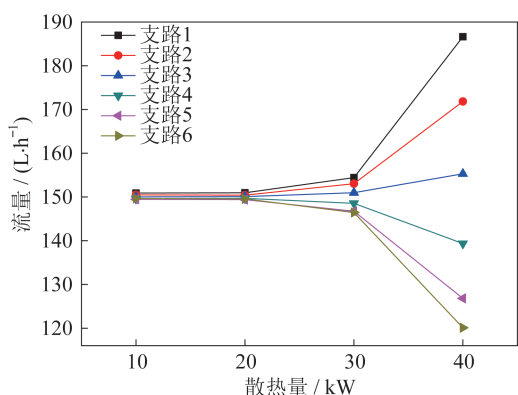


图5 流量随回路散热量变化情况

Fig. 5 Variation of the flow distribution with the radiation heat dissipation

1) 当存在辐射散热时,由于温度变化导致工质黏度变化,因此会导致流量分配变得不均匀,表现为支路1~6的流量依次减小,且散热量越大,各支路出口的工质温度越低,流量分配不均匀现象越显著。对于散热量为30 kW情况,支路1~6流量分别为:154、153、151、149、147和146 L/h,可见1~3支路的流量略大于无散热时的流量,而支路4~6的流量小于无散热时的流量。这种流量分配是因为离入口远的支路因为工质黏度增加,使流阻增加幅度较大,而离入口近的支路因为工质黏度增加,流阻增加幅度较小,如图6所示。以支路5和支路6为例,分析工质黏度变化对支路流阻和流量的影响。初始通过流量配平,支路5流量 Q_5 和支路6流量 Q_6 均为150 L/h,两条支路流阻相同,阻力关系为

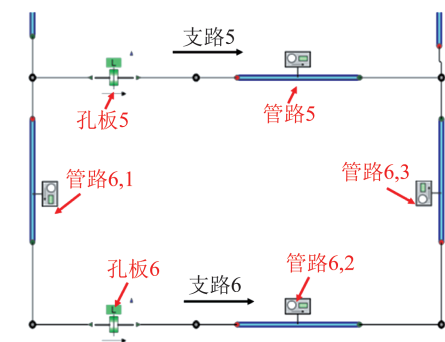


图6 支路5和6

Fig. 6 Branch 5 and 6

$$\Delta p_{\text{孔板},5} + \Delta p_{\text{管路},5} = \Delta p_{\text{孔板},6} + \Delta p_{\text{管路},6,1} + \Delta p_{\text{管路},6,2} + \Delta p_{\text{管路},6,3} \quad (1)$$

且有

$$\Delta p_{\text{孔板},5} = \Delta p_{\text{孔板},6} + \Delta p_{\text{管路},6,2} + \Delta p_{\text{管路},6,3} \quad (2)$$

式中: $\Delta p_{\text{孔板},5}$ 为支路5孔板的流阻; $\Delta p_{\text{管路},6,1}$ 为支路6管路1的流阻,其他同理。

当管路通过对流、导热和辐射向外部空间传递热量,出口温度会低于进口温度,在给定辐射条件的初始时刻两条支路流量均为150 L/h,且两条支路工质的进出口温差相同,此时仍有 $\Delta p_{\text{管路},5} = \Delta p_{\text{管路},6,2}$ 。由于出口工质温度降低导致黏度增大,因此式(2)中的 $\Delta p_{\text{管路},6,3}$ 变大,支路6的流阻大于支路5,而其流量小于支路5,重新达到流阻平衡。

2) 当外热流变化导致辐射散热量增大时,则各支路流量分配不均匀现象更显著,不过这种变化趋势非线性,与黏度随温度变化趋势密切相关。各支路出口温度随辐射散热量的变化情况如图7所示,辐射散热量分别为10、20、30和40 kW时对应的支路出口温度约为 -16°C , -32°C , $(-52.5 \sim -50)^\circ\text{C}$, $(-90 \sim -60)^\circ\text{C}$ 。全氟三乙胺黏度随温度变化情况如图8所示,并标出了不同辐射散热量下对应的支路出口温度。由图8可知,散热量40 kW对应的工质温度处于黏度剧烈变化区,散热量30 kW对应的工质温度也处于黏度变化较大区域,而散热量20和10 kW对应工质温度的黏度与工质初始温度(10°C)对应的黏度相差不大,因此在图5中,10和20 kW散热量下的流量分配与初始相比变化不大,均约为150 L/h,而30和40 kW散热量下的各支路流量差别很大。因此,在进行流体回路设计时,要避免工质温度进入黏度剧烈变化的区域,否则可能会加剧各支路流量分配的不均匀性,影响散热能力。

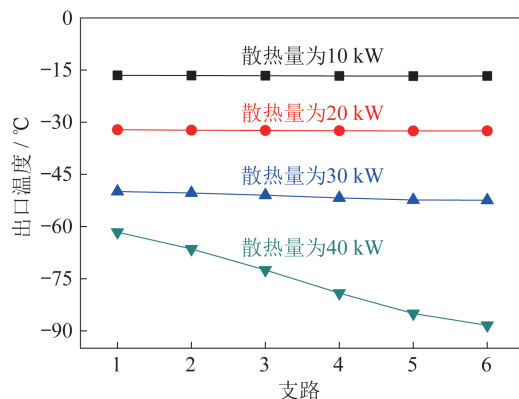


图7 出口温度随散热量的变化情况

Fig. 7 Variation of the outlet temperature with the heat dissipation

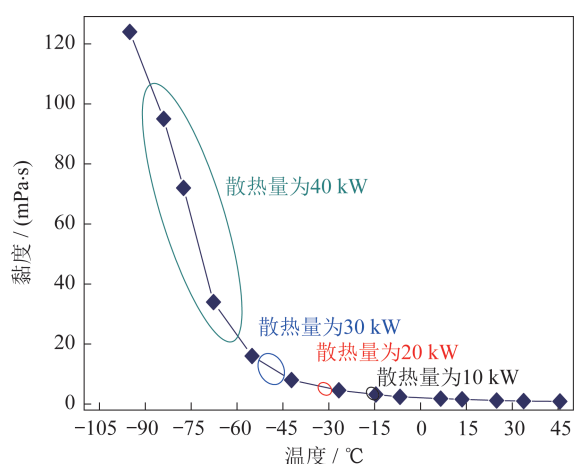


图 8 全氟三乙胺黏度随温度变化情况

Fig. 8 Variation of the perfluorotrimethylamine viscosity with the temperature

2.2 重力场影响

当流体回路向外散热,管路的进出口工质温度会不同,工质密度也不同,此时重力场的存在可能会影响多支路并联单相流体回路系统的流量分配,因此需要开展重力场对工质流量分配,以及温度场影响规律研究,探究地面试验与在轨运行差异。为此,本文在总流量为 900 L/h 时,分别研究有辐射散热及无辐射散热时,重力场对各支路流量分配的影响。

首先在不考虑辐射散热情况下,使用孔板对 6 条支路进行流量配平,不存在辐射散热,即恒温流动时,存在以及不存在重力场时结果见表 1。可见在恒温流时,有无重力场对各支路的流量分配没有影响,这是因为对于图 4 中的任何一条支路,由于重力场的影响,其左边管路工质带来的是驱动力,右边带来的是阻碍流动的力,两者大小相等,方向相反。

表 1 无散热时重力对各支路流量分配影响

Tab. 1 Effects of gravity on the flow distribution of each branch without heat dissipation

支路	流量/(L·h ⁻¹)	
	无重力场	有重力场
1	151	151
2	150	150
3	150	150
4	150	150
5	149	149
6	150	150

当辐射散热量为 40 kW 时,重力对流量分配影响见表 2。由表 2 可知,无论是否存在重力场,支路 1~6 的流量依次减小,这是因为工质在支路流动时温度不断降低,黏度不断增大,具体分析已在上文介绍;重力场加剧了流量分配的不均匀性,有重力场时,支路 1、2 的流量变得更大,支路 3 基本无变化,而支路 4~6 的流量变得更小。

表 2 散热量为 40 kW 时重力对各支路流量分配影响

Tab. 2 Effects of gravity on the flow distribution of each branch when the heat dissipation is 40 kW

支路	流量/(L·h ⁻¹)	
	无重力场	有重力场
1	187	193
2	172	175
3	155	155
4	139	137
5	127	124
6	120	116

重力场对流量的影响是由温度变化导致工质密度变化引起的,全氟三乙胺密度随温度变化情况如图 9 所示,密度随温度增大而减小,且基本呈线性关系。支路 1~6 沿程的工质温度变化情况如图 10 所示,可以看到,支路 1~6 出口的温度依次降低。各支路两侧由于密度变化带来的压差 ΔP 由式(3)给出:

$$\Delta p = (\rho - \rho')gh \quad (3)$$

式中: ρ 为出口温度对应的密度; ρ' 为进口温度对应的密度; h 为两支路之间高度差。

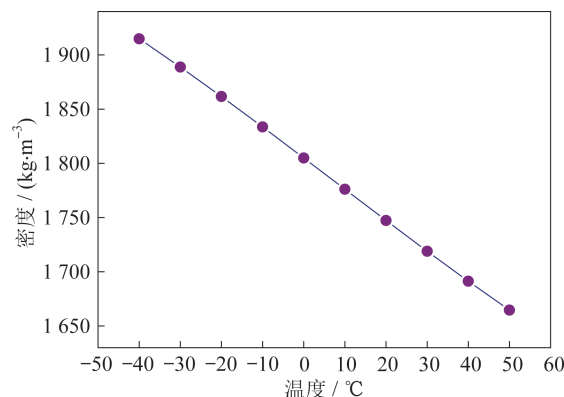


图 9 全氟三乙胺密度随温度变化情况

Fig. 9 Variation of the perfluorotrimethylamine density with the temperature

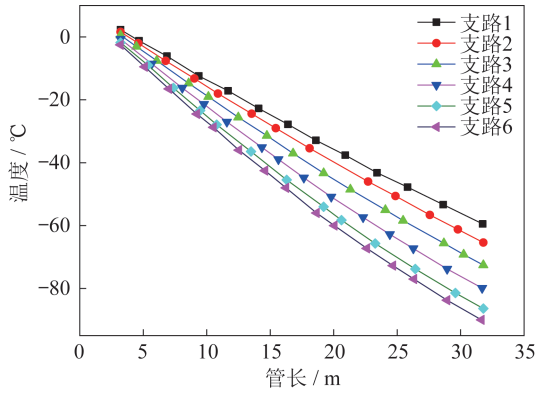


图 10 工质沿程温度变化

Fig. 10 Variation of the working medium temperature along the flowing direction

由于出口温度低于入口温度,因此出口工质密度更大,由图 10 可知,离入口越远的管路,其支路出口温度也越低,因此密度变化带来压差的 ΔP 也越大。支路 1 不存在密度变化带来的流动阻力增大问题。对于支路 2,由于密度变化带来的压差 ΔP_2 为

$$\Delta p_2 = (\rho_2 - \rho'_2)gh_2 \quad (4)$$

对于支路 3,由于密度变化带来的压差 ΔP_3 为

$$\Delta p_3 = (\rho_3 - \rho'_3)gh_3 + (\rho_2 - \rho'_2)gh_2 \quad (5)$$

对于支路 4,由于密度变化带来的压差 ΔP_4 为

$$\Delta p_4 = (\rho_4 - \rho'_4)gh_4 + (\rho_3 - \rho'_3)gh_3 + (\rho_2 - \rho'_2)gh_2 \quad (6)$$

对于支路 5,由于密度变化带来的压差 ΔP_5 为

$$\Delta p_5 = (\rho_5 - \rho'_5)gh_5 + (\rho_4 - \rho'_4)gh_4 + (\rho_3 - \rho'_3)gh_3 + (\rho_2 - \rho'_2)gh_2 \quad (7)$$

对于支路 6,由于密度变化带来的压差 ΔP_6 为

$$\Delta p_6 = (\rho_6 - \rho'_6)gh_6 + (\rho_5 - \rho'_5)gh_5 + (\rho_4 - \rho'_4)gh_4 + (\rho_3 - \rho'_3)gh_3 + (\rho_2 - \rho'_2)gh_2 \quad (8)$$

可见,对于密度变化带来的压差 ΔP : $\Delta P_6 > \Delta P_5 > \Delta P_4 > \Delta P_3 > \Delta P_2$,即支路 6 流量受其影响最大,流量减少最多,达到了 4 L/h,而支路 1 由于不存在密度变化带来的流动阻力增大问题,流量增幅最大,达到了 6 L/h,其流量也最大,为 193 L/h。需要指出的是,流量的具体分配与密度变化所增加的流阻、原有流阻大小均有关系,规律是类似的。

对于每一条支路,本文分别计算了有重力和无

重力时的流量差 ($Q_{\text{with,g}} - Q_{\text{without,g}}$),结果如图 11 所示。由图 11 可知,辐射散热量分别为 10 和 20 kW 时,由于工质温度变化不大,密度变化也小,各支路两侧由于密度变化带来的压差 ΔP 可以忽略不计,此时重力场对流量分配没有影响。而当回路散热量增至 30 和 40 kW 时,此时工质进出口温差大,如当散热量为 40 kW 时,支路 6 工质进出口温差超过了 100 °C,此时各支路两侧由于工质密度变化带来的压差 ΔP 就会导致流量分配不均,且随回路散热量增加会加剧流量分配不均的情况。

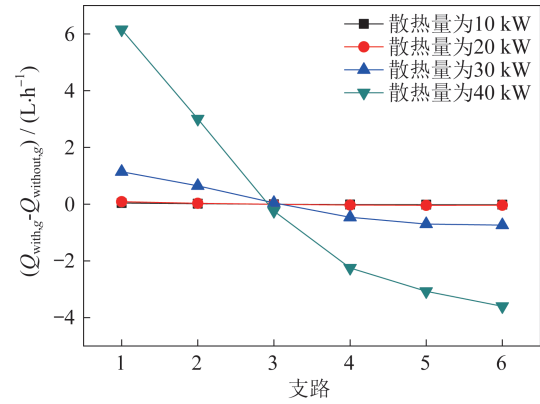


图 11 有重力和无重力时各支路流量差随散热量变化情况

Fig. 11 Variation of the flow difference with the heat dissipation with and without gravity

2.3 管路阻力特性影响

对于多支路并联单相流体回路,如果因为流量配平工作未做好或其他原因导致各支路的管路阻力特性不同,此时如果工质向外部空间进行辐射传热,有可能会进一步加剧流量分配的不均匀性,影响流体回路系统的安全性和可靠性。为此,本文首先基于总流量为 900 L/h 进行了管路阻力特性调整,使支路 1~3 流量为 130 L/h,支路 4~6 流量为 170 L/h,后将入口总流量改为 200、400 和 600 L/h,分别研究流体回路有辐射散热和无辐射散热时,6 条支路的流量分配规律。

1) 不存在辐射散热。

表 3 给出了流体回路与外部无热量传递时管路阻力特性对各支路流量分配的影响,由表 3 可知,随着总流量的减少,6 条支路的流量均减小。

表 3 无散热时管路阻力特性对各支路流量分配影响

Tab. 3 Effects of the resistance characteristics on the flow distribution without heat dissipation

支路	流量/(L·h ⁻¹)			
1	130	90	58	29
2	130	90	58	29
3	130	90	57	28
4	170	110	76	38
5	170	110	75	38
6	170	110	76	38
总流量	900	600	400	200

2) 存在辐射散热。

设定辐射散热量为 10 kW,存在重力场时,表 4 是仿真得到的 6 条支路流量和出口温度。对总流量 600 和 900 L/h 情况,有无散热对流量分配没有非常

明显的影响,因为此时温度变化引起的物性变化不明显。对于流量为 200 和 400 L/h 情况,存在散热使得支路 1~3 的流量有明显降低,这是因为各支路流量较小,且辐射带来的温度降低明显,对物性产生了很大影响。

由表 4 可知,流量为 200 和 400 L/h 时,支路出口温度处于工质黏度随温度剧烈变化的区域,因此温度的较小波动也会使得黏度产生较大变化。支路 1~3 流量相对支路 4~6 流量更低,温度也更低,因此支路 1~3 的出口工质黏度远高于支路 4~6,从而导致支路 1~3 的流量有明显降低,而支路 4~6 流量有明显上升。因此,对于流阻特性不同的情况,要特别注意流阻大、流量小的支路,防止在相同辐射散热量下,其温度进入黏度剧烈变化的区域,从而导致流量分配偏离设计。

表 4 散热量为 10 kW 时管路阻力特性对各支路流量分配影响

Tab. 4 Effects of the resistance characteristics on the flow distribution when the heat dissipation is 10 kW

支路	总流量=900		总流量=600		总流量=400		总流量=200	
	流量/(L·h ⁻¹)	温度/℃	流量/(L·h ⁻¹)	温度/℃	流量/(L·h ⁻¹)	温度/℃	流量/(L·h ⁻¹)	温度/℃
1	134	-19.14	80	-32.64	19	-72.61	13	-79.60
2	134	-19.17	80	-32.57	39	-54.74	19	-72.91
3	134	-19.19	81	-32.28	48	-48.23	25	-67.12
4	166	-14.45	120	-21.88	99	-26.86	51	-46.07
5	165	-14.59	119	-22.05	97	-27.32	46	-49.48
6	166	-14.48	119	-21.95	98	-27.06	45	-49.94

3 结束语

为提高大型多支路并联流体回路系统的安全性和可靠性,本文基于梦天实验舱的 6 条并联流体回路建立了仿真模型,研究了外热流、重力场以及管路阻力特性对流量分配的影响。

1) 存在辐射散热时,工质温度变化带来的黏度变化会导致流阻变化,从而使各支路流量分配变得不均匀,表现为远离入口的支路流量会变小,而靠近入口的流量会变大;

2) 当外热流变化导致回路辐射散热量变大,以及存在重力场时,流量分配不均会更显著,另外,重力场对流量分配的影响也随着散热量的增大而变得更显著;

3) 回路在设计和运行时都要避免工质温度进入黏度剧烈变化区域,否则各支路流量很容易受外热流、重力场以及管路阻力特性变化的影响,从而

威胁航天器运行安全。

参考文献

[1] 苗建印,钟奇,赵啟伟,等.航天器热控制技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018:160-179.

[2] GILMORE D G. Spacecraft thermal control handbook [M].Second edition. EI Segundo, CA: The Aerospace Corporation Press, 2002: 91-121.

[3] 于新刚,孟繁孔,韩海鹰,等.我国载人航天器热控制技术发展[J].航天器工程,2022,31(6):156-165.

[4] 刘庆志,黄磊,任红艳,等.应用可展开辐射器的大功率卫星热设计与验证[J].航天器工程,2022,31(4):54-58.

[5] 施哲栋,毛云杰,景海涛,等.星载缝隙波导微波天线热控方案研究与验证[J].上海航天(中英文),2022,39(4):192-197.

[6] 曹建光,顾燕萍,陈钢,等.微泵驱动流体回路主动热控

- 系统在轨测试试验研究[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(4): 343-349.
- [7] 文金远, 许安易, 李鹏, 等. 基于单相回路及热泵回路的月球居住舱热控系统对比分析[J]. 载人航天, 2021, 27(5): 543-548, 573.
- [8] 向艳超, 刘自军, 宁献文, 等. 我国月球探测器热控技术发展[J]. 航天器工程, 2022, 31(2): 29-34.
- [9] 范含林, 黄家荣, 刘庆志, 等. 载人运输飞船流体回路方案研究[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(5): 38-43.
- [10] 刘庆志, 刘炳清, 钟奇. 与流体回路耦合的空间辐射器流动/传热分析[J]. 航天器工程, 2007, 16(3): 65-68.
- [11] 陈江平, 黄家荣, 范含林, 等. 载人航天器单相流体回路分析[J]. 航天器工程, 2012, 21(1): 77-82.
- [12] 付杨, 范宇峰, 于新刚, 等. 神舟载人飞船流体回路动态仿真研究[J]. 载人航天, 2014, (3): 228-232.
- [13] 黄磊, 王福军, 于新刚, 等. 航天器热控单相流体回路水击效应仿真研究[J]. 航天器工程, 2018, (2): 68-73.
- [14] 王海英, 王伟魁, 王领华, 等. 流体回路在轨泄漏检测与定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(1): 248-251.
- [15] 刘欣, 梁新刚. 多辐射器航天器热控流体回路布局的(火积)耗散分析[J]. 宇航学报, 2019, (2): 231-238.

欢迎关注《上海航天(中英文)》微信公众号

为了加强《上海航天(中英文)》数字化、网络化建设以及信息化管理,扩大刊物宣传力度,本刊现已开通微信公众平台。关注微信公众号后,读者可查阅期刊发表论文,进行文章检索;作者可随时查询自己稿件的处理状态,了解期刊最新发展动态;编辑部能更便捷地加强编者、作者和读者之间的交流,促进学术沟通,创建学术共同体,扩大《上海航天(中英文)》期刊的学术影响力。

欢迎大家关注我刊微信公众号!

