



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中国科技核心期刊

空间环境模拟器热沉液氮密闭循环方案及数值模拟

单巍巍 王紫娟 龚洁

Scheme and numerical simulation of LN_2 closed loop system for shrouds in space environment simulator

SHAN Weiwei, WANG Zijuan, GONG Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023184>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间环模设备回热式气氮调温系统试验研究

Experimental study of regenerative gas-nitrogen temperature control system for space environment simulation equipment

航天器环境工程. 2020, 37(5): 473-477 <https://doi.org/10.12126/see.2020.05.009>

空间泵驱单相流体回路半物理仿真技术研究

Research on hardware-in-the-loop simulation technology for space pumped single-phase fluid loop

航天器环境工程. 2024, 41(4): 414-420 <https://doi.org/10.12126/see.2023180>

空间环境模拟设备低温系统研制中的软件应用及参数化驱动设计

The software application and the parameter driving design for cryogenic system of space simulator

航天器环境工程. 2021, 38(2): 206-211 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.015>

空间光电跟踪系统闭环全物理仿真试验技术

Closed-loop physical test technology for space electro-optical tracking system

航天器环境工程. 2021, 38(5): 541-547 <https://doi.org/10.12126/see.2021.05.008>

三轴六自由度闭环虚拟随机振动试验系统建模与仿真

Modeling and simulation of closed-loop three-axis six-DOF virtual random vibration test system

航天器环境工程. 2020, 37(5): 428-434 <https://doi.org/10.12126/see.2020.05.002>

稳压 CO_2 气体氛围火星环境模拟试验系统设计

Design of Mars environmental simulation system with pressure-stable gaseous CO_2 atmosphere

航天器环境工程. 2019, 36(4): 398-402 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.017>

空间环境模拟器热沉液氮密闭循环方案及数值模拟

单巍巍, 王紫娟, 龚洁

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 空间环境模拟器中氮系统设备众多, 管路复杂, 通过传统理论计算设计的系统参数与实际运行结果存在一定偏差, 从而导致系统流量和压力偏离预期。为准确分析和确定氮系统的关键参数, 运用数值模拟软件 FloMaster 对某单相密闭循环氮系统进行全系统的一维仿真模拟, 研究氮系统中单一设备的模型参数, 从而确定影响系统运行的关键参数。将系统仿真计算结果与实际运行结果进行对比发现, 液氮管道的阻力损失误差是造成系统流量和压力偏差的主要因素; 同时, 液氮流量的差异也会对换热过程造成影响, 使热沉出口的液氮温度出现偏差。但系统偏差不影响系统的特征参数的变化趋势。综上, 这种仿真方法简化了理论计算方法的计算过程, 提升了设计效率, 为系统设计提供了数据基础和设备选型依据。

关键词: 空间环境模拟器; 氮系统; 单相密闭循环; 液氮; 系统仿真

中图分类号: V416.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)05-0589-06

DOI: [10.12126/see.2023184](https://doi.org/10.12126/see.2023184)

Scheme and numerical simulation of LN₂ closed loop system for shrouds in space environment simulator

SHAN Weiwei, WANG Zijuan, GONG Jie

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the numerous components and complex pipelines of the nitrogen system in space environment simulator, there exists deviation between the system parameters designed by the conventional theoretical calculation and the actual operation results, causing flow and pressure of the system deviating from expectations. In order to accurately analyze and determine the key parameters of nitrogen system, the numerical simulation software FloMaster was used to conduct a one-dimensional simulation of a single-phase closed loop nitrogen system. The parameters of a single device model in the nitrogen system were studied to determine the key parameters that affect the operation of the system. Comparing the simulation and the actual operation results of the system, it was found that the flow resistance of liquid nitrogen (LN₂) pipelines was the main factor causing the deviation of the system flow and pressure. Moreover, the variation of LN₂ flow rate would also affect the heat transfer, resulting in a deviation of LN₂ temperature at the outlet of the shroud. Whereas, the system deviation does not affect the trend of changes in the characteristic parameters of the system. In summary, the proposed simulation method simplifies the calculation process of theoretical calculation methods, improves design efficiency, and provides a data foundation and equipment selection basis for system design.

Keywords: space environment simulator; nitrogen system; single-phase closed loop; liquid nitrogen; system simulation

收稿日期: 2023-12-18; 修回日期: 2024-10-23

引用格式: 单巍巍, 王紫娟, 龚洁. 空间环境模拟器热沉液氮密闭循环方案及数值模拟[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(5): 589-594

SHAN W W, WANG Z J, GONG J. Scheme and numerical simulation of LN₂ closed loop system for shrouds in space environment simulator[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(5): 589-594

0 引言

热真空试验设备为航天器热试验提供 100 K 的低温冷黑模拟环境,需要有一个独立的外流程为热沉提供持续的冷源。液氮(LN₂)作为常见的低温工质,因其稳定、不可燃及价格便宜等特点,成为空间环境模拟器的高性价比制冷工质^[1]。适用于液氮的外流程有很多种,通常根据热沉的需求、设备布局及经费预算等制定不同的氮系统工作流程。据文献[2-7]报道,目前国际上比较通用的外流程有液氮开式循环、液氮重力自循环式循环和气氮闭式循环。国内很多大型环模设备的氮系统都采用单相密闭循环系统^[8-9],很多研究也认为此系统更适合大型环模设备^[10-14]。因为单相密闭循环模式既保证了热沉内循环的液氮流量,又保证了热沉的平均温度和温度均匀性要求。相比于开式循环,密闭循环中液氮进入热沉的流量更大、压力更高,因此在同等体量下热沉的温度和温度均匀性指标会更好。特别是对于大型立式热沉,进入液氮的低压头和低流量会造成位于高处热沉的液氮量不够,继而达不到温度均匀性指标。另外,虽然液氮开式循环系统所需要的设备较少,但液氮消耗量较大。这是因为热沉出口处多为气液混合状态,但系统未设置残余液氮回收装置,所以这部分液氮在离开热沉后会被排放掉,造成一定浪费。

液氮单相密闭循环系统的配套设备包括液氮泵、阀门、贮槽、过冷器、传感器、管路以及安全附件等,管路系统设计需要结合设备布局,较为复杂,其中系统管路阻力对于液氮泵选型以及系统流量设定至关重要,然而系统参数的传统理论计算结果往往不准确。本文借助商用软件平台 FloMaster 建立密闭循环系统模型,进行仿真模拟,研究系统稳定运行前提下系统中各设备的关键参数,以校核大型环境模拟设备的氮系统设计和设备选型。

1 系统模型

环模设备的氮系统是综合性较强、设备较多的复杂管路阀门系统。氮系统的作用是使热沉维持在低温状态,为环模设备提供稳定的冷黑背景。在系统运行的初期,由于热沉的温度为常温,需要预冷。当液氮进入热沉后,会大量汽化,最后成为氮气排出;而随着热沉温度的不断降低,进入热沉的液氮中部分发生汽化后成为氮气排出,未汽化的液氮可以回收后再次进入循环。预冷过程的动力源为

贮存液氮的贮槽,即将贮槽的压力提高到相应的压力可保证液氮能够流入热沉。待预冷完成后,热沉温度基本在 100~120 K 之间,可以准备进入密闭循环流程。在密闭循环过程中,液氮泵作为整个系统的动力输出源头,将一定流量和压力的单相过冷液氮输送到热沉内。过冷器在整个系统中的功能是换热,即利用过冷器内容器中的常压液氮冷却从热沉流出的高温液氮,以保证在系统内流动的始终是单相液氮。氮系统工作原理如图 1 所示。

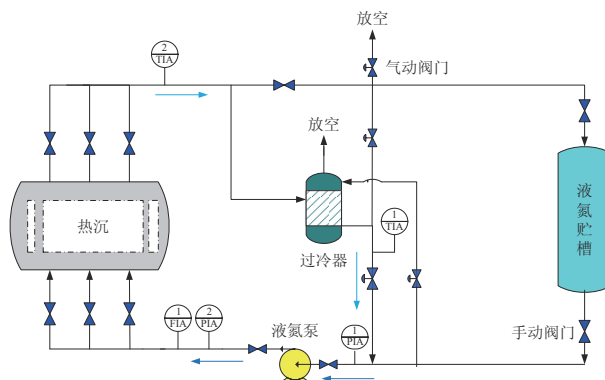


图1 氮系统工作原理

Fig. 1 Working principle of the nitrogen system

2 理论计算公式

单相密闭循环工作模式下,液氮在氮系统中的流动过程可以认为是一个单相流体的闭式循环,且在流动过程伴随着传热过程。假定液氮为不可压缩流体,根据欧拉方程,可以得到连续性方程、动量方程、能量方程以及针对不可压缩一元定常流动的伯努利方程。

2.1 连续性方程

适用于控制体的连续性方程为控制体内流量质量变化率与流出控制体的质量流率的和,即

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho d\tau + \int_{CS} \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dS = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{V}$ 为相对于控制体的流体速度; $\mathbf{n}$ 为控制面的外法向单位矢量;下标 CV 表示控制体;CS 表示控制面。

对于定常流动,流体密度不随时间变化,故有

$$\int_{CS} \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dS = 0; \quad (2)$$

如果流体仅在控制面的有限区域流出或流入,则式(2)可进一步简化为

$$\dot{m} = \pm |\rho \mathbf{V} A|, \quad (3)$$

式中 m 为控制体质量, 流体流出控制体时取为正值, 流入时取为负值。

2.2 动量方程

动量方程为

$$\frac{dk}{dt} = F, \quad (4)$$

式中: k 为系统的总动量; F 为作用在系统上的合力。

对于静止的控制体或定常流动, 式 (4) 可转变为

$$F = \int_{CS} \rho V V \cdot n dS. \quad (5)$$

2.3 能量方程

能量方程为

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W}, \quad (6)$$

式中: E 为系统总能量; $\dot{Q}$ 为单位时间外界传递给系统的热量; $\dot{W}$ 为单位时间外界对系统所做的功。

根据雷诺运输公式, 式 (6) 可以转变成控制体的表达式

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho e d\tau + \int_{CS} \rho e V \cdot n dS, \quad (7)$$

式中 e 为单位质量流体所具有的能量。

对于定常流动, 式 (7) 可简化为

$$\int_{CS} \left(\bar{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho V \cdot n dS = \dot{Q} + \dot{W}_{\text{轴}}. \quad (8)$$

式中: $\bar{u}$ 为流线方向内能; p 为流线方向压强; z 为流线方向高度; $V^2/2$ 为流线方向动能; gz 为流线方向重力势能; $\dot{W}_{\text{轴}}$ 为控制体与外界通过转轴传递的功, 也称为轴功率。

2.4 伯努利方程

对于单相液氮在管道中的流动, 可以认定为不可压缩流体流动, 则伯努利方程可简化为

$$\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h'_w, \quad (9)$$

其中 h'_w 表示单位质量流体从流道截面 1 流动到截面 2 时所损失的机械能。

以氮系统为研究对象, 将系统简化为一维流体系统, 选择液氮作为流体介质, 对前述 3 个基本方程和伯努利方程联合求解, 可以得到氮系统内流动的液氮的流动特性及液氮在各设备进/出口等关键位置的压强和温度。但这需要进行大量的迭代计

算, 过程耗时、费力, 因此本文考虑运用一维仿真软件对氮系统进行建模仿真, 从而快速准确地得到氮系统中关键位置的参数结果。

3 系统仿真

3.1 设备模型

3.1.1 液氮泵

液氮泵作为单相密闭循环系统中的唯一动力源, 在系统仿真时可以选用离心式液氮泵模型(如图 2 所示)。液氮泵运转时的入口压力为正压, 压力范围 0~0.30 MPa。泵模型需要设置的参数包括额定流量、额定功率、额定转速以及泵的性能曲线。图 3 为某液氮泵的流量特性曲线。系统仿真时, 需要根据图 3 在软件内建立此液氮泵的 Suter 曲线(如图 4 所示), 并在泵模型的参数中选择此曲线, 从而保证泵模型的准确性。

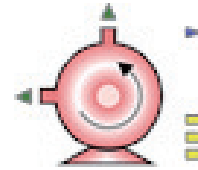


图 2 离心式液氮泵的软件模型
Fig. 2 Model of a centrifugal LN₂ pump

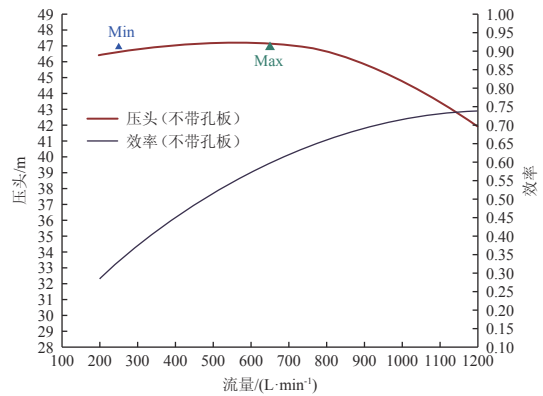


图 3 液氮泵性能曲线
Fig. 3 Performance curve of the LN₂ pump

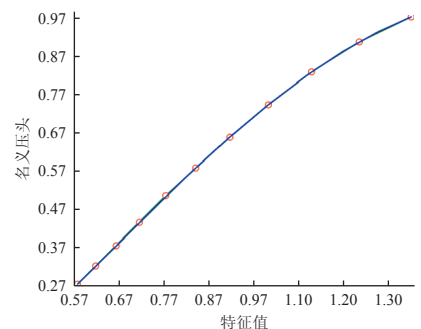


图 4 离心泵特征曲线
Fig. 4 Characteristic curve of the centrifugal pump

3.1.2 过冷器

过冷器由过冷器容器和板翅式换热器组成。容器内存储低温液氮,与从热沉返回的高温液氮进行换热,使高温液氮变成低温液氮。系统仿真时,过冷器的软件模型如图 5 所示,需要设置的参数包括热负荷、阻力系数、换热面积及水力直径。

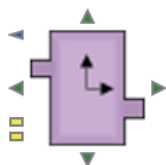


图 5 过冷器的软件模型

Fig. 5 Computing model of the subcooler

3.1.3 热沉

热沉可以认为是一个换热阻力元件,由大门、筒体和端部组成。系统仿真时,选用换热器和压力损失元件组合来模拟热沉的流动换热情况,如图 6 所示。换热器需要设置的参数包括热负荷、阻力系数、换热面积及水力直径等;阻力损失元件需要设置的参数包括截面积、阻力系数及水力直径。



图 6 热沉的软件模型

Fig. 6 Computing model of the shroud

3.1.4 贮槽

贮槽可为整个系统提供稳定的压力源,同时在系统需要补液时供应液氮。系统仿真时,采用压力源元件模拟液氮贮槽的功能,其软件模型如图 7 所示。



图 7 压力源的软件模型

Fig. 7 Computing model of the pressure source

3.1.5 系统管路

系统管路一般由直管、三通和弯头等组成。系统仿真时,选用不可压缩管道元件(如图 8 所示)及弯头元件(如图 9 所示)进行组合。管道需要设置的参数包括管道绝对粗糙度、管道直径及管道长度;弯头需要设置的参数包括弯曲角度、弯曲半径、直径及粗糙度。



图 8 管道的软件模型

Fig. 8 Computing model of the pipeline



图 9 弯头的软件模型

Fig. 9 Computing model of the bend

3.1.6 阀门

管道系统中的阀门是用来截断或建立液氮的流通路径。因此,需要根据实际使用情境来设置阀门。根据使用要求,可以选择低温气动阀门和低温手动阀门。系统仿真时,无论手动还是气动阀门均可选用如图 10 所示模型,需要设置的参数包括阀门直径和阀门开度等。

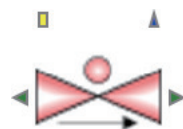


图 10 阀门的软件模型

Fig. 10 Computing model of the valve

3.2 系统仿真及结果分析

采用系统仿真软件 FloMaster,以某中型环境模拟设备的氮系统为原型,建立单相密闭循环系统仿真模型,并进行不可压缩流体稳态换热仿真计算,可得到整个系统的流动和换热结果。系统仿真模型如图 11 所示。

以该仿真模型进行计算得到氮系统工作状态下的各节点压力、温度以及系统流量。计算边界条件:热沉初始温度 $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$,贮槽供液压力 0.25 MPa ;卧式热沉直径 3.5 m 、筒体长度 10 m ,阻力损失约 0.01 MPa ,换热面积 129 m^2 ,总热负荷 40 kW 。过冷器的设计换热能力为 60 kW ;氮系统管路总长度约 200 m 。

关键节点的压力如表 1 所示,可以看出,整个系统的驱动来自于液氮泵,管路最高压力出现在液氮泵出口,其压力和流量符合液氮泵的性能曲线。

关键节点的温度如表 2 所示,可以看出,整个系统的温度最低点在过冷器出口位置;热沉的液氮出口温度高于进口温度,这是因为热沉吸收热负荷导致液氮温度升高。

氮系统的液氮总流量为 $47.9\text{ m}^3/\text{h}$,其中大门、筒体和端部热沉中的分配流量分别为 $11.1\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $11.1\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $21.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。这三部分流量分配不均是因为筒体热沉的阻力性能和其他两部分不一样。

- Capabilities and Facilities. Annapolis, MD, USA, 2008
- [2] MOON G W, CHO H, LEE S H, et al. Shroud system design for a large thermal vacuum chamber[C]//49th Annual Technical Meeting and Exposition of the Institute of Environmental Sciences and Technology, 2003
- [3] IIIDE S, SAKAZUME N, SASAMURA C, et al. 6 m diameter space simulation chamber[C]//Proceedings of the Third International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes, 1997: 257-262
- [4] WATSON R, BONN J. A new thermal vacuum facility at the Martin Maritta Waterton plant[C]//17th Space Simulation Conference, Baltimore, 1992: 165-182
- [5] HAEFER R A. Vacuum and cryotechniques in space research[J]. *Vacuum*, 1972, 22(8): 303-314
- [6] MERCER S. Cryogenics: a technological tool for space scientist[J]. *Cryogenics*, 1968, 8(2): 68-78
- [7] CHISABAS R S S, BÜRGER EE, LOUREIRO G. Space simulation chambers state-of-the-art[C]//67th International Astronautical Congress (IAC). Mexico, 2016: 26-30
- [8] 单巍巍, 刘洋, 吕世增, 等. 空间环境模拟设备低温系统研制中的软件应用及参数化驱动设计[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(2): 206-211
- SHAN W W, LIU Y, LÜ S Z, et al. The software application and the parameter driving design for cryogenic system of space simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(2): 206-211
- [9] 王飞, 景加荣, 李灿伦, 等. 深空探测器真空热环境模拟试验系统[J]. *真空*, 2019, 56(3): 16-20
- WANG F, JING J R, LI C L, et al. Development of vacuum thermal environment test system for deep space detector[J]. *Vacuum*, 2019, 56(3): 16-20
- [10] 刘波涛. 重力式自循环液氮系统在大型空间模拟器中应用的探讨[C]//2003年低温技术学术交流会论文集, 乌鲁木齐, 2003: 123-127
- [11] 单巍巍, 刘波涛, 丁文静, 等. 重力式自循环系统中热沉降结构设计方法研究[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(4): 468-492
- SHAN W W, LIU B T, DING W J, et al. A study on the method of shroud design in gravity fed system[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(4): 468-492
- [12] 刘波涛, 黄本诚, 余品瑞, 等. 液氮系统设计技术[J]. *中国空间科学技术*, 2002(3): 61-64
- LIU B T, HUANG B C, YU P R, et al. Development of liquid nitrogen system of KM6 large space simulator[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002(3): 61-64
- [13] 刘波涛, 孙来燕. 空间环模设备液氮系统中文丘利管的研究[J]. *中国空间科学技术*, 1995(6): 62-68
- LIU B T, SUN L Y. Study of Venturi in space simulator liquid nitrogen system[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1995(6): 62-68
- [14] 孙来燕, 刘波涛, 余品瑞. 大型空间环境模拟器的一种液氮制冷系统[J]. *低温工程*, 1999(4): 236-238
- SUN L Y, LIU B T, YU P R. Liquid nitrogen system of a large space simulator[J]. *Cryogenics*, 1999(4): 236-238

(编辑: 冯露漪)