

一种空调器用浮子式单向阀的设计与仿真

潘祥¹, 刘宜胜¹, 朱玉华²

¹浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

²丰亿电器有限公司, 浙江 绍兴

收稿日期: 2023年6月15日; 录用日期: 2023年7月17日; 发布日期: 2023年7月24日

摘要

本文针对现有空调系统中常用的单向阀结构比较复杂、制造成本较高以及使用寿命不长等问题, 设计一种空调器用浮子式单向阀。本次研究首先通过三维建模软件solidworks建立了浮子式单向阀的三维模型, 再利用Abaqus有限元分析软件对浮子式单向阀进行静力分析和模态分析。有限元仿真结果表明: 浮子式单向阀在导通、密封两种工况下, 最大变形处位于阀芯的头部区域, 最大变形量为 5.22×10^{-6} mm, 最大应力处位于挡圈与阀芯棱部接触的区域, 最大应力值为 1.692×10^{-2} Mpa, 浮子式单向阀结构的前六阶固有频率都高于空调系统运行的共振频率, 从而验证了单向阀在强度、刚度以及共振方面均符合工程设计的要求, 为后续浮子式单向阀的进一步优化设计提供了理论依据。

关键词

空调器, 浮子式单向阀, 结构设计, 静力分析, 模态分析

Design and Simulation of a Float Check Valve for Air Conditioner

Xiang Pan¹, Yisheng Liu¹, Yuhua Zhu²

¹School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

²Fengyi Electric Co., LTD, Shaoxing Zhejiang

Received: Jun. 15th, 2023; accepted: Jul. 17th, 2023; published: Jul. 24th, 2023

Abstract

This paper designs a float check valve for air conditioner, aiming at the problems of complex structure, high manufacturing cost and short service life of the common check valve in the existing air conditioning system. In this study, the three-dimensional model of float checkvalve is established through solidworks, and the static analysis and modal analysis of float check valve are car-

ried out by Abaqus finite element analysis software. The finite element simulation results show that: float check valve under two working conditions of conduction and sealing, the maximum deformation is 5.22×10^{-6} mm at the head area of the spool, and the maximum stress is located at the area where the reece and the spool edge contact, and the maximum stress is 1.692×10^{-2} Mpa. The first six natural frequencies of the float check valve structure are higher than the resonant frequencies of the air conditioning system, which verifies that the check valve meets the engineering design requirements in terms of strength, stiffness and resonance, and provides a theoretical basis for the further optimization design of the float check valve.

Keywords

Air Conditioner, Float Check Valve, Structure Design, Static Analysis, Modal Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

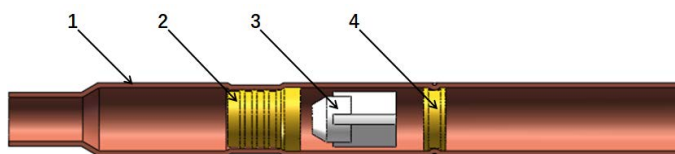
1. 引言

近年来随着社会的不断发展与进步，空调行业也取得了飞速的发展，同时人们对日常生活环境的要求也不断提高，对空调的需求也日益增加[1] [2] [3]。现如今，空调已经应用到了社会的各行各业，扮演着不可或缺的角色[4] [5]。伴随着市场对空调产品的需求不断扩大，空调内部的相关零件需求量也越来越大。浮子式单向阀应用于空调系统中，具有正向导通以及反向截止的特性，以保证空调系统的正常运行。浮子式单向阀作为空调系统的重要组成部分，对整个系统的正常工作起着重要的作用，必须保证浮子式单向阀具有足够长的使用寿命[6]。因此，对浮子式单向阀的动、静态性能进行研究具有十分重要的意义。

随着单向阀被广泛地应用在各个领域，不少研究者对单向阀进行了各项研究，张爱迎等[7]利用 solidworks 软件建立一种改进型单向阀的三维模型，并研究其阀芯轴的应力、位移及应变分布状态；朱建等[8]介绍了一种新型单向节流阀的结构特征，并对单向节流阀的结构进行了初步的设计；Chao Cao 等[9]设计了一种聚氨酯双凸起结构的单向阀阀芯结构，并且利用 ANSYS Workbench 计算了不同摩擦系数和预压缩量下的应力和变形；孙月秋[10]从节流装置侧做出改进，对空调器的单向阀结构进行创新，既能减少空调噪音，又能达到节能环保的目的；罗绍亮[11]分析液压系统中液压单向阀在系统回路中的科学设计应用，了解不合理的设计导致的危害，从设计不当出发，分析设计不当导致的问题及对应的解决措施；苗长山等[12]采用有限元分析软件 ANSYS，对高压计量泵单向阀密封结构的接触破坏和泄漏进行了分析，研究了阀座的等效应力和接触应力随上扣扭矩和高压液体内压的变化规律；周秀亚等[13]采用有限元分析软件 Abaqus 对某船用低速机扫气集管单向阀模型进行了碰撞分析和静力学分析，根据仿真结果提出了优化方案，为单向阀的设计提供了一定的参考；姚丽英等[14]利用 AMESim16.0 软件搭建了某型号液控单向阀的仿真模型，并对该单向阀进行了工作特性分析；安继萍等[15]分析了单向阀在自动化轻炮中的作用原理并提出了设计要求，利用 AMESim 软件对轻气炮和单向阀进行建模，采用控制变量法研究阀体直径等参数对轻气炮系统性能和单向阀响应特性的影响。通过参考以上文献资料，结合需要解决的相关问题，使用 solidworks 对浮子式单向阀的各零件进行设计与建模，并且装配出浮子式单向阀的整体结构，然后利用有限元分析软件 Abaqus 对浮子式单向阀进行静力分析和模态分析，研究其动、静态性能。

2. 浮子式单向阀结构设计

本文研究设计的浮子式单向阀应用于空调系统中,其常常与毛细管并联,控制制冷剂的正反向流量,使制冷剂只能按某一规定的方向流动,可以保证空调系统的正常运行。本次设计的浮子式单向阀结构主要由阀体(铜管)、阀座、阀芯、挡圈等四个零件组成,其零件示意图如下图 1 所示。设计的这款浮子式单向阀具有结构简单稳定、制造成本较低和使用寿命长等优点。



1——阀体; 2——阀座; 3——阀芯; 4——挡圈

Figure 1. Schematic diagram of float check valve parts

图 1. 浮子式单向阀零件示意图

这款浮子式单向阀为直通式单向阀,阀座和挡圈在单向阀阀体内是固定位置的,唯一可以活动的是阀芯,阀芯主要通过流体冲击力的作用在挡圈和阀座之间移动。

本文设计的浮子式单向阀的阀座及挡圈的三维实体模型如下图 2 所示。阀座与阀体、挡圈与阀体之间都是通过机械式夹紧方式固结成一体的,阀座的主要作用是当浮子式单向阀反向截止时与阀芯头部的圆台面接触,进行密封作用。挡圈的主要作用是当浮子式单向阀正向导通时挡住阀芯,让其在阀座与挡圈之间有限的空间内运动,实现单向阀的正常工作。阀座与挡圈的材质都是黄铜,具有很强的耐磨性,塑形好,有良好的力学性能。

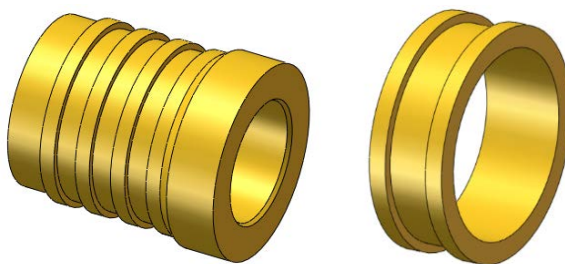


Figure 2. Three-dimensional solid model of valve seat and retainer ring

图 2. 阀座及挡圈的三维实体模型

本文设计的浮子式单向阀的阀芯三维实体模型如下图 3 所示。阀芯结构的外径是小于阀体内径的,阀芯结构的头部是一个相对于阀体内径来说小很多的圆台,阀芯可以在阀体内移动自如。阀芯的主要作用是单向阀正向导通时与挡圈接触,能够让冷媒通过阀芯两条棱之间的通道以及挡圈的内孔流到出口处,保证冷媒有一定的流量;单向阀反向截止时,阀芯结构的头部是一个圆台,与阀座接触进行密封作用,能够保证浮子式单向阀的密封性良好。单向阀的阀芯材质是尼龙 66,疲劳强度和钢性较高,耐热性较好,摩擦系数低,耐磨性好。

由于浮子式单向阀在正常工作状态下,单向阀的阀芯需要在阀体内进行上移以及下移等动作,这样一来将会导致单向阀的阀芯所处的位置发生变化,其受力情况也是不一样的。当应力、应变、振动频率

等值超过了允许的范围,将会影响浮子式单向阀的正常工作。因此需要重点考虑浮子式单向阀的阀芯在正向导通上移到挡圈所在位置以及在反向截止下移到阀座所在位置时单向阀的刚度和强度,以及单向阀在正常工作时是否会产生共振等问题,避免在实际生产加工过程中出现不必要的问题。下面利用有限元分析软件 Abaqus 对浮子式单向阀在正向导通和反向截止两种工况下进行静力分析和模态分析。

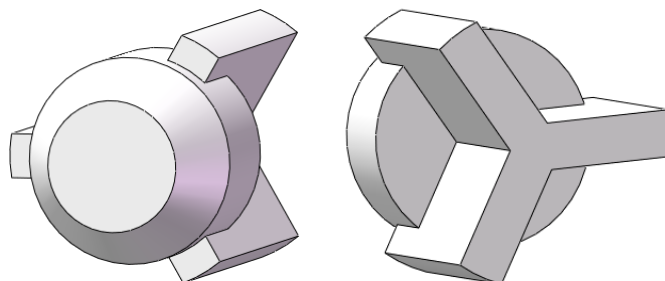


Figure 3. Three-dimensional solid model of valve core
图 3. 阀芯的三维实体模型

3. 浮子式单向阀的有限元仿真分析

3.1. 工况分析和有限元模型的建立

本文设计的浮子式单向阀正常工作时,流体从单向阀下端的入口流入,经过阀座内孔后将单向阀的阀芯往上推,直到阀芯尾部被阀体内的挡圈挡住,从而实现了正向导通,这是浮子式单向阀的第一种工况。当流体从单向阀上端的出口反向流入,经过挡圈内孔后将单向阀的阀芯往下推,直到阀芯头部的圆台与阀体内的阀座接触密封,从而实现了反向截止,这是浮子式单向阀的第二种工况。

在第一种工况中,单向阀的阀体内主要是阀芯尾部与挡圈端面相互作用,故工况 1 的有限元模型由单向阀的阀芯和挡圈构成,如下图 4 工况 1 所示。在第二种工况中,单向阀的阀体内主要是阀芯头部的圆台与阀座内孔面相互作用,故工况 2 的有限元模型由单向阀的阀芯和阀座构成,如下图 4 工况 2 所示。将工况 1 以及工况 2 的三维实体模型导入到 Abaqus 有限元分析软件中,同时其各部件材料属性如下表 1 所示。

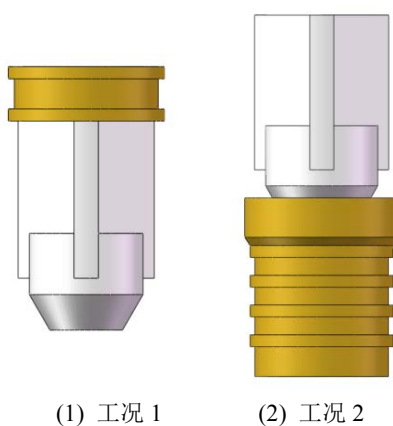


Figure 4. Three-dimensional solid model of two working conditions
图 4. 两种工况的三维实体模型

Table 1. Material properties of each component of float check valve**表 1.** 浮子式单向阀各部件材料属性

部件名称	材料名称	弹性模量(Mpa)	泊松比	密度(t/mm ³)
挡圈	黄铜	1.06e5	0.32	8.8e-9
阀芯	尼龙 66	8.3e3	0.28	1.15e-9
阀座	黄铜	1.06e5	0.32	8.8e-9

3.2. 网格划分、载荷分布与边界条件

3.2.1. 网格划分

由于工况 1 的三维实体模型和工况 2 的三维实体模型都是装配体，为了保证整个三维模型具有良好的网格质量，故而需要对三维模型各个部件分别进行网格划分。工况 1 装配体划分后的网格共有 26,090 个单元，工况 2 装配体划分后的网格共有 36,588 个单元，工况 1 以及工况 2 有限元模型的网格划分图分别如下图 5 工况 1、工况 2 所示。

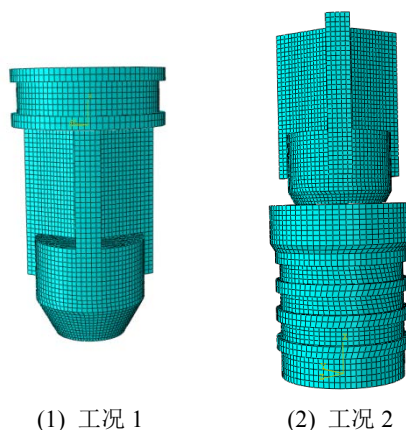


Figure 5. Meshing diagram of two working conditions

图 5. 两种工况的网格划分图

3.2.2. 载荷分布

在浮子式单向阀的阀体内，阀座和挡圈是固定不动的，唯一可以活动的是阀芯。阀芯主要在流体冲击力的作用下，向上移动进行导通，反之向下移动进行密封。在工况 1 下，阀芯移动到最上端与挡圈接触；在工况 2 下，阀芯移动到最下端与阀座接触。其中，浮子式单向阀内的流体采用 R410A 制冷剂，流速 $V = 0.86 \text{ m/s}$ ，密度 $\rho = 1038 \text{ kg/m}^3$ 。

流体冲击压强： $P = \rho v^2 = 767.70 \text{ Pa}$ 。

流体冲击压强作用于阀芯移动的横截面上，使其向上或者向下移动，浮子式单向阀阀芯具体的载荷施加如下图 6 所示。

3.2.3. 边界条件

本文研究设计的浮子式单向阀阀座与阀体、挡圈与阀体之间都是通过机械式夹紧方式固结成一体的，阀座和挡圈在阀体内都是固定位置的，唯一可以活动的是阀芯，因此可以将阀座的铜管收缩段和挡圈的凹槽部视为固定约束，即 6 个自由度全部约束。

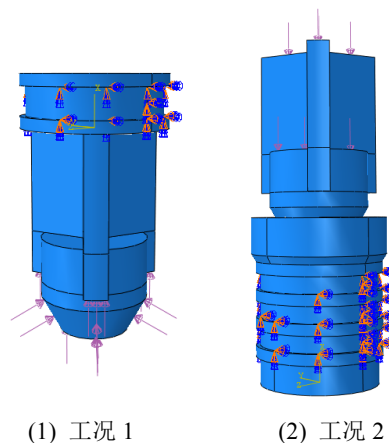


Figure 6. Load distribution diagram of two working conditions

图 6. 两种工况的载荷分布图

3.3. 静力分析

静力分析是用来计算结构在固定不变载荷作用下的响应，如位移、应力、应变等。浮子式单向阀的阀芯在阀体内正常工作的过程中，主要在流体冲击力的作用下进行上下移动。当移动到最上端时，阀芯与挡圈端面接触；当移动到最下端时，阀芯与阀座内孔接触。经过施加上述流体冲击力产生的压强载荷后，在 Abaqus 有限元软件里对两种工况的有限元模型进行静力分析，最后可以在软件的可视化模块里直接得到两种工况下的等效应力云图(如图 7 所示)和等效位移云图(如图 8 所示)。

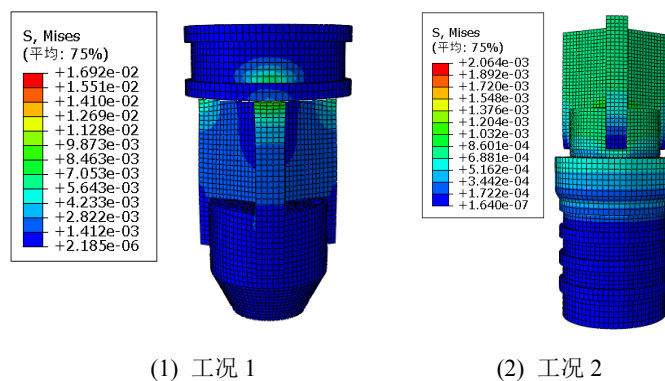


Figure 7. Equivalent stress cloud diagram of two working conditions

图 7. 两种工况的等效应力云图

由两种工况的等效应力云图得出：在工况 1 下受到的最大应力处为挡圈与阀芯棱部接触的区域，在工况 2 下受到的最大应力处为阀座内孔与阀芯头部接触的区域。两种工况下受到的最大应力为 1.692×10^{-2} Mpa，由于挡圈和阀座采用的材料都是黄铜，黄铜的屈服应力为 120 Mpa，单向阀阀芯采用的材料是尼龙 66，尼龙 66 的屈服应力为 104 Mpa，故两种工况下受到的最大应力小于材料的屈服应力，因此单向阀的强度符合工程上的使用要求。

由两种工况的等效位移云图得出：在工况 1 下变形最大的位置为阀芯的头部位置，在工况 2 下变形最大的位置为阀芯的尾部位置。两种工况下的最大变形量为 5.22×10^{-6} mm，工程上的技术要求为最大变形量在 1 mm 以内，故两种工况下的最大变形量在要求范围以内，因此单向阀的刚度符合工程上的使用

要求。

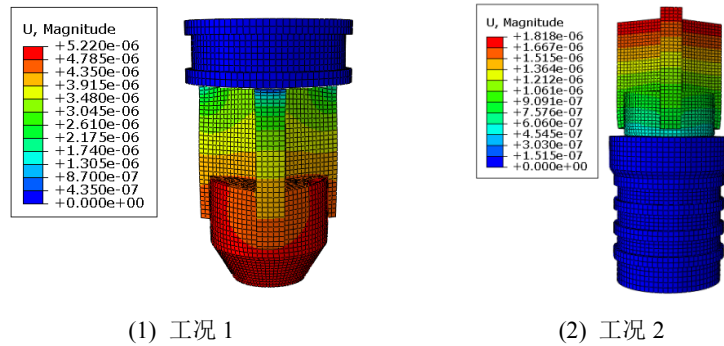


Figure 8. Equivalent displacement cloud diagram of two working conditions
图 8. 两种工况的等效位移云图

3.4. 模态分析

结构动力学分析中，最基本、也是最重要的一种分析就是结构模态分析，模态分析主要用于计算结构的振动频率和振动形态，因此又可以叫做频率分析或者是振型分析。通过对结构进行模态分析，可以反映出结构的薄弱位置，进而可以对相应位置做出改进，此外还可以判断是否发生共振情况，避免结构在共振频率下工作，以保证其具有较长的使用寿命。本文将在 Abaqus 有限元分析软件中对浮子式单向阀在正向导通以及反向截止两种工况下分别进行模态分析，然后提取其前六阶固有频率及振型作为参考。浮子式单向阀模态分析模型、网格划分、接触关系等均与上述静力分析中的条件一致。浮子式单向阀在两种工况下的前六阶固有频率和振型分析如图 9 和图 10 所示以及表 2 和表 3 所示。

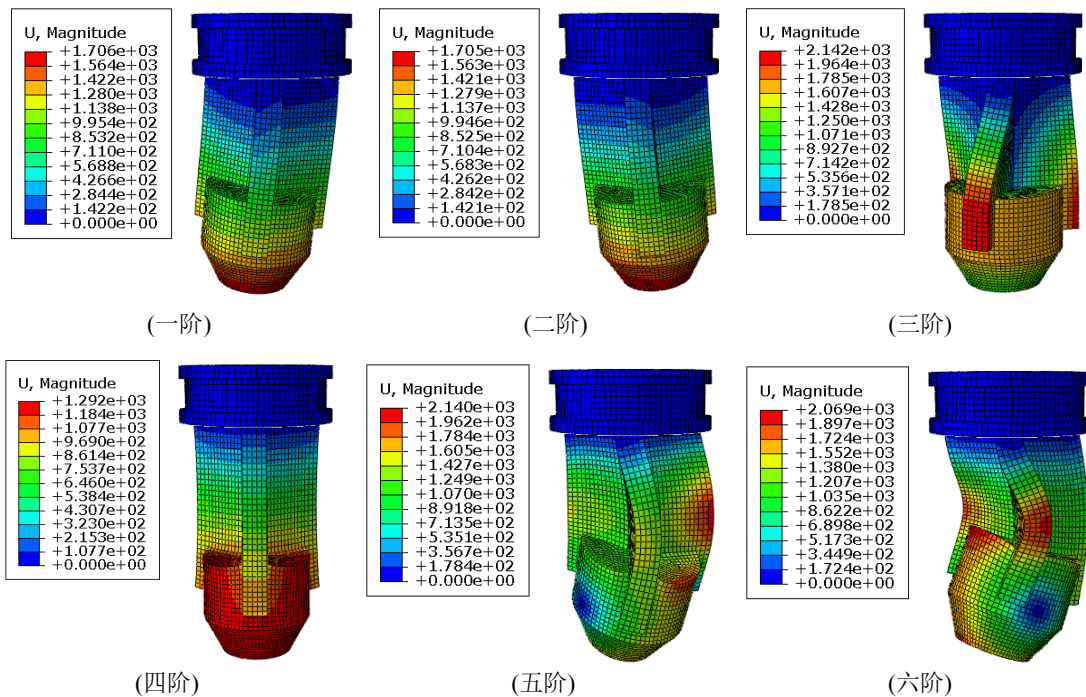


Figure 9. Mode shape diagram of condition 1
图 9. 工况 1 模态振型图

Table 2. The first six-order natural frequencies and the corresponding mode shapes under working condition 1
表 2. 工况 1 下的前六阶固有频率以及相应振型

阶数	频率(Hz)	振型分析
1	8119.3	沿 Y、Z 轴方向振动
2	8119.8	沿 X、Y 轴方向振动
3	8855.6	沿 Y、Z 轴方向振动
4	30,518	沿 X 轴方向振动
5	31,465	沿 X、Y、Z 轴方向振动
6	31,470	沿 X、Y、Z 轴方向振动

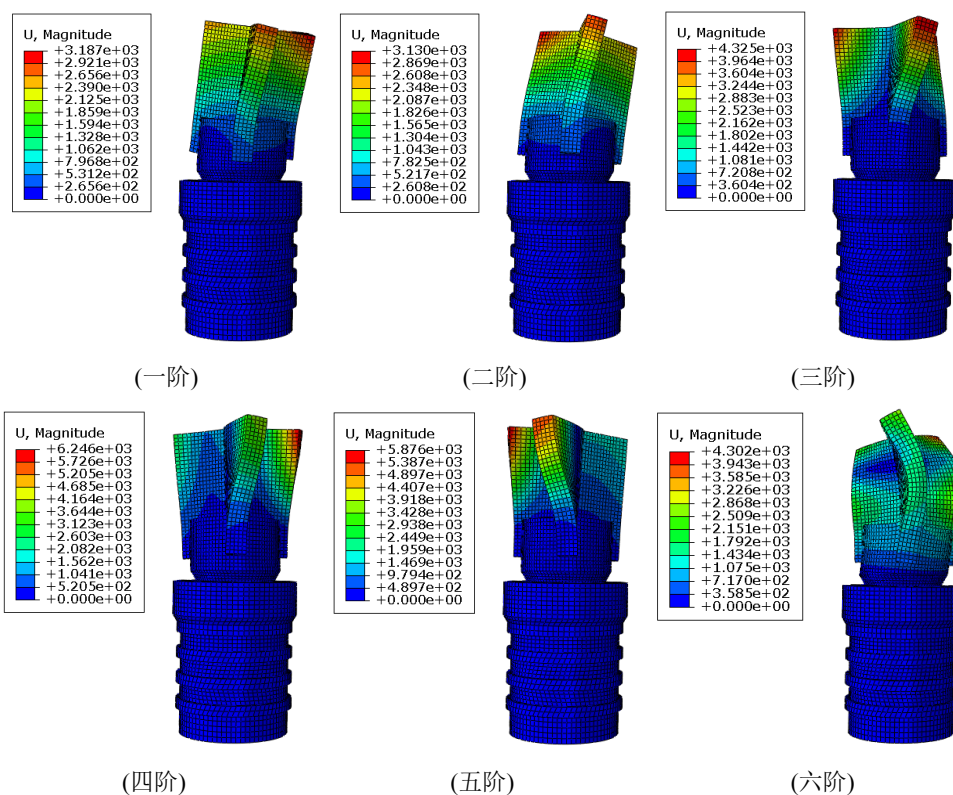


Figure 10. Mode shape diagram of condition 2

图 10. 工况 2 模态振型图

Table 3. The first six-order natural frequencies and the corresponding mode shapes under working condition 2
表 3. 工况 2 下的前六阶固有频率以及相应振型

阶数	频率(Hz)	振型分析
1	15,031	沿 Y 轴方向振动
2	15,033	沿 Y、Z 轴方向振动
3	15,859	沿 Y、Z 轴方向振动
4	35,783	沿 Y、Z 轴方向振动
5	35,825	沿 X、Y、Z 轴方向振动
6	47,580	沿 X、Y、Z 轴方向振动

由两种工况的模态振型图得出：浮子式单向阀在工况 1 下，前两阶的模态振型振动幅度比较小，第三阶和第四阶的模态振型振动幅度相对前两阶有所增大，后两阶的模态振型振动幅度比较大；在工况 2 下，前两阶的模态振型振动幅度比较小，第三阶至第五阶的模态振型振动幅度相对前两阶有所增大，最后一阶的模态振型振动幅度比较大。

由两种工况的模态特征表得出：浮子式单向阀在工况 1 下，前三阶的固有频率是比较接近的，都在 8000 Hz~9000 Hz 的范围内，后三阶固有频率比较接近，都在 31,000 Hz 左右；在工况 2 下，前三阶固有频率比较接近，都在 15,000 Hz~16,000 Hz 的范围内，第四阶和第五阶固有频率比较接近，都在 35,800 Hz 左右，最后一阶固有频率比较大，达到了 47,580 Hz。浮子式单向阀在两种工况下的最低固有频率高于空调系统正常运行的共振频率(400 Hz)，因此浮子式单向阀不会发生共振情况。

4. 结论

本文以空调器用浮子式单向阀为研究对象，结合单向阀的基本工作原理，对浮子式单向阀结构进行了设计与研究。同时对浮子式单向阀在两种不同工况下进行静力分析和模态分析，得出以下结论：

1) 该浮子式单向阀正向导通时流体流量大，反向截止时密封性能好，整体结构简单稳定、制造成本较低；

2) 该浮子式单向阀处于正向导通时，阀芯棱部末端与挡圈接触时受到的应力值比较大，若对阀芯结构进行相应改进，能够有效降低受到的应力值；

3) 该浮子式单向阀的阀芯在正常工作过程中变形量始终很小，故尼龙 66 是阀芯的一个较佳材料；

4) 该浮子式单向阀固有频率比较高，在空调系统中可以避免在共振频率下工作，具有足够长的使用寿命。

综上，本研究通过对浮子式单向阀结构的设计以及有限元仿真分析，探究了其在正常工作过程中的应力分布、变形情况、前六阶固有频率以及模态振型，为后续浮子式单向阀的进一步优化设计提供了理论依据。

参考文献

- [1] 孙利敏, 王少辉. 户式中央空调发展趋势分析[J]. 科技视界, 2012(29): 185.
- [2] 王文琪, 冯雪莲. 家用中央空调发展趋势之分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2011(3): 14-15.
- [3] Okochi G.S. and Yao, Y. (2016) A Review of Recent Developments and Technological Advancements of Variable-Air-Volume (VAV) Air-Conditioning Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 784-817. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.328>
- [4] 王亮添, 周志, 黄国斌, 李迎春, 黄海峰. 新型地铁站空调系统设计分析[J]. 制冷与空调, 2023, 23(4): 10-14.
- [5] 林莉萍. 高层建筑暖通空调系统设计分析[J]. 低碳世界, 2022, 12(12): 103-105.
- [6] 殷海明, 张桃, 郝彩宁, 庄嵘. 房间空调器用单向阀可靠性研究[C]//第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集. 南京: 中国制冷学会, 2006: 4.
- [7] 张爱迎, 夏法锋. 基于 Solidworks 的改进型单向阀有限元分析[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(9): 27.
- [8] 朱建, 肖庭庭. 一种新型单向节流阀的设计与研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 116-117.
- [9] Cao, C., Zhao, J.Y., Li, G.L., Jin, X. and Cao, Z.J. (2019) Dynamic and Static Sealing Performance of Elastic Check Valve Spool. *The Journal of Engineering*, 2019, 28-31. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8979>
- [10] 孙月秋. 一种改进后空调器单向阀的节能技术分析[J]. 电子制作, 2017(17): 68-69.
- [11] 罗绍亮. 液控单向阀的故障分析和解决方法[J]. 设备管理与维修, 2019(24): 56-57.
- [12] 苗长山, 李增亮, 于艳艳, 李继志. 计量泵单向阀密封的有限元分析[J]. 石油机械, 2007, 35(9): 58-61.
- [13] 周秀亚, 张耀中, 李孝连, 王奎. 某船用低速机扫气集管单向阀有限元分析[J]. 装备制造技术, 2017(7): 31-34.

-
- [14] 姚丽英, 高宇龙, 张占东. 基于 AMESim 的液压支架用液控单向阀工作特性分析[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 75-77.
- [15] 安继萍, 李新洪, 张治彬, 贺广松, 王谦. 自动化轻气炮中单向阀的分析与设计[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(3): 51-55.