

远距离负压转运舱的设计与开发

田谨晓, 姜天胜, 苏璟, 陈尧

北京航天新立科技有限公司智能装备研究所, 北京
Email: 15027790660@163.com

收稿日期: 2021年3月12日; 录用日期: 2021年4月15日; 发布日期: 2021年4月22日

摘要

针对疫情爆发阶段, 跨国远距离转运烈性病患者, 设计一种负压转运保障舱, 可提供多人次、远距离的转运保障服务。本产品基于串联式结构设计, 集成了稳定负压设备、高效过滤装置于一体, 利用ANSYS静力学仿真分析验证了转运舱结构的可靠性; 设计的送排风系统与PID控制组成的双闭环系统可以使舱内负压实现 $-60\text{ Pa}\sim 0\text{ Pa}$ 调节, 保证舱内压力保持稳定, 通过实验验证了可靠性; 设计开发的三级空气过滤装置, 可对 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 气溶胶过滤效率为99%, 杜绝了转运过程中病毒的泄露和传播。另外, 通过实验验证了装置的可靠性和可行性。此转运保障舱可以为患者的医疗救助提供便利, 也可为医护人员的安全提供保障, 具有广泛的应用前景。

关键词

负压, 远距离, 转运舱, ANSYS, 医疗救助

Design and Development of Long-Distance Negative Pressure Transfer Cabin

Jinxiao Tian, Tiansheng Jiang, Jing Su, Yao Chen

Beijing Aerospace Xinli Technology Co. Ltd., Beijing
Email: 15027790660@163.com

Received: Mar. 12th, 2021; accepted: Apr. 15th, 2021; published: Apr. 22nd, 2021

Abstract

In view of trans-national long-distance transport of patients with severe diseases during the outbreak of the epidemic, a negative pressure transport support cabin is designed to provide multi-person-time and long-distance transport support services. This product is based on the series

structure design, which integrates the stable negative pressure equipment and the efficient filtration device. The reliability of the transport cabin structure is verified by the static simulation analysis of ANSYS. The closed-loop system composed of the designed air supply and exhaust system and PID control can realize $-60\text{ Pa}\sim 0\text{ Pa}$ adjustment of the negative pressure in the cabin, and ensure that the pressure in the cabin remains stable. The three-stage air filtration device designed and developed can filter $0.3\text{ }\mu\text{m}$ aerosol with an efficiency of 99%, which eliminates the leakage and transmission of the virus in the process of transport. In addition, the reliability and feasibility of the device are verified through experiments. This transport safeguard compartment can provide convenience for the medical assistance of patients and guarantee the safety of medical staff, so it has a wide application prospect.

Keywords

Negative Pressure, Long Distance, Transport Cabin, ANSYS, Medical Assistance

Copyright © 2021 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

2020年,新冠肺炎全球肆虐,对全人类的生命健康带来了巨大威胁,我国在政府的有效措施实施下,疫情已经有了极大好转,但国外大规模爆发,尤其从境外转运至国内,患者的安置及转运工作显得尤为严峻。此过程中既要对患者的生命健康提供保障,同时还要防止患者转运过程中病毒的传播引起交叉感染[1],因此具有病毒隔离功能的转运设备在疫情防控中起到至关重要的作用。负压转运设备是通过负压生成系统使设备中气压低于外界大气压,并通过空气隔离系统达到病毒隔离的效果[2]。此类型负压设备已在包括SARS、H1N1、新型冠状病毒等大流行病中发挥了重要作用,目前市场上的负压保障设备主要分为拱形设计和气囊式设计两种,都可以实现设备的负压状态,但是还存在功能较为单一、只能近距离转运、设备价格较高、维修贵等问题[3]-[8]。据此,本文设计了一款多舱体串联式负压设备,可转运多名患者,并可进行远距离转运工作,成本较低,通用性好。

2. 整体结构与仿真分析

转运保障设备需要保证舱内时刻处于负压状态,通过控制舱内进气和排气的差值进而控制舱内压力状态,负压状态下可保证舱内被污染的空气不会泄露,产生的污染空气经过特定的过滤设备处理后排出,保证转运过程的安全。由于本产品针对长距离的转运过程,因此需要考虑转运过程中医护人员与隔离人员的实际需要。通过调研分析转运的实际过程,将整体结构分为保障舱,设备舱,缓冲舱,中控舱,卫生间等部分,完全满足实际过程中的需要,并且根据各舱使用要求的不同,对各舱具体的压力也设置了相应值。

2.1. 机械结构设计

负压转运舱采用整体式串联结构,此种设计可保证舱内进气口与排气口之间气体流通顺畅,达到负压的目的,如图1所示。其中,保障舱为患者提供医疗和休息的场所;第一与第二缓冲舱为杀菌消毒的场所;设备舱为放置设备和电力供应舱段;中控舱为中枢舱段,包括负压系统,控制系统等。整体串联式设计可提供左右两处进舱通道,可避免病毒向外传播,防止交叉感染,此舱可安装在运输车上,实现远距离转运工作。

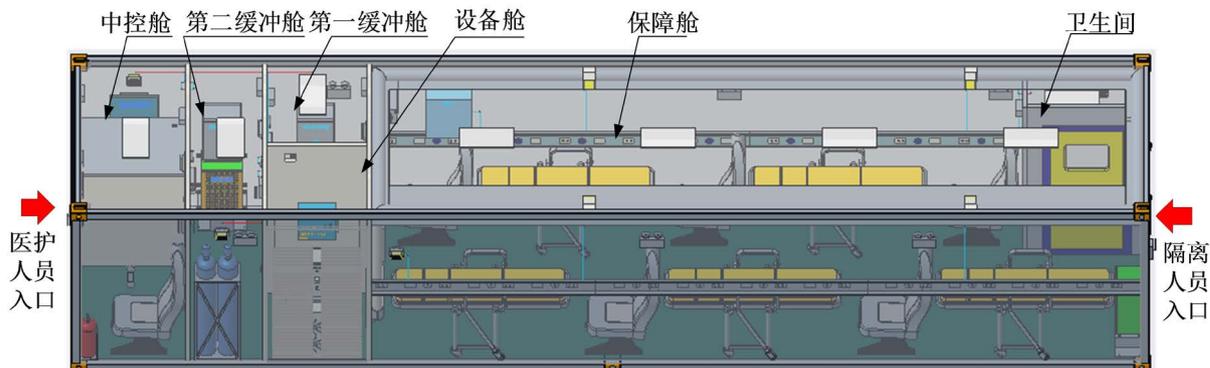


Figure 1. Overall structure drawing of negative pressure transfer cabin

图 1. 负压转运舱整体结构图

2.2. 结构仿真分析

本转运保障舱设计负压范围为 $-60\text{ Pa}\sim 0\text{ Pa}$ ，因此需要校核舱壳能否承受所需压力范围。舱壳整体为铝合金结构，由上下 3 mm 铝板及铝板间的加强筋组成。另外，在铝板间填充了隔热材料提高了保障舱的环境适应能力。通过 ANSYS 静力学仿真分析在 -60 Pa 压力下，舱体结构情况进行校核，结果如图 2 所示。由仿真结果可得出，在负压状态下，舱体受大气压的挤压发生变形，但整体变形量不大，舱壳所受强度也远远低于铝合金的屈服强度，由此可得，舱壳结构可满足使用要求。

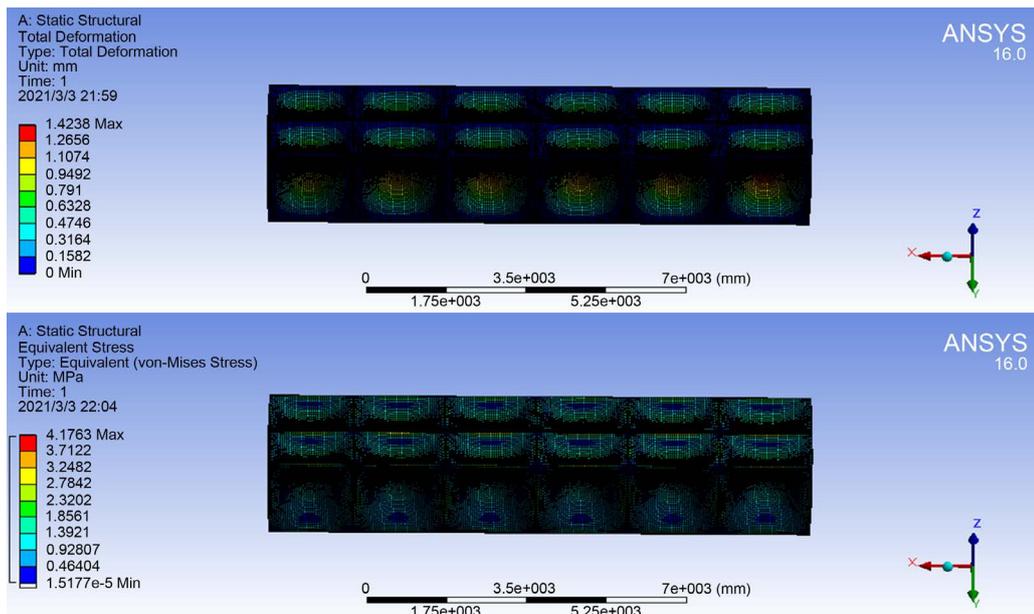


Figure 2. Static analysis of the hull

图 2. 舱壳静力学分析

3. 功能实现方法

负压转运舱的功能主要为负压功能及消毒排气功能。负压即外界气压大于舱内气压。负压功能可保证在打开门时，空气自由流动只能由舱外流向舱内，舱内被污染的气体不会泄露到外界空气中，被污染的气体经过特定的处理装置消毒杀菌后排出，可实现转运过程的零泄露。

3.1. 负压功能的实现

本保障舱根据功能划分舱室，根据各舱室的洁净度及使用要求，对各舱室的负压大小以及换气次数进行了设计和规划，舱室间采用独立的负压系统以防止相互干扰。下文中将以保障舱为例，简述负压系统功能的实现过程。空气由舱室内特定的进气口及排气口来进行室内气体的循环与换气，控制舱室的进气与排气的速率即可控制舱内的气压值，保障舱内气体流向如图 3 所示。



Figure 3. Air flow in the cabin
图 3. 舱室内气体流向

为了使舱内气体稳定保持负压稳定状态，设计了基于 STM32 的集成控制器，内置风机设备控制模块，过滤设备控制模块，压力传感器，PID 控制模块，压差调节器，压力报警等。由风机设备，集成控制器，空气过滤设备组成的负压系统可实现舱内外压差的闭环控制，保证舱室内气压稳定，如图 4 所示。

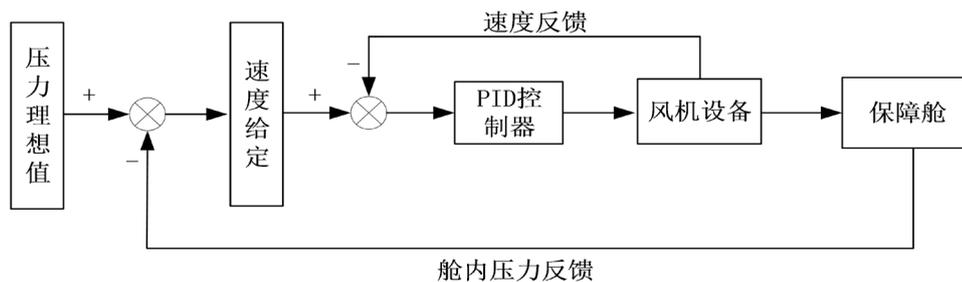


Figure 4. Flow chart of control system
图 4. 控制系统流程图

如图所示，压力传感器测得舱内压力，将此值与压力设定值比较后，由 A/D 转换电路转换为对应的速度值，此值与实际速度值对比后，速度差值经 D/A 转换电路控制电机转速，从而控制舱内进气量，实现负压的功能。

3.2. 空气净化功能的实现

负压设备工作一定时间后，舱内气压将达到理想值，此时进气量与排气量将保持一致，舱内空气进入正常循环状态。舱内被污染气体需经特殊处理后方可排出，为了保证排除气体为无污染气体，设计了一款三级过滤装置，主要分为初级过滤；紫外线杀菌；高级过滤三个过程，如图 5 所示。

初级过滤主要过滤较大颗粒的灰尘及其他污染物，保证过滤装置内部的清洁环境；紫外杀菌装置通过紫外线的照射消灭依附于过滤装置上的污染物；高级过滤装置可过滤 PM2.5，气溶胶等污染物。三级过滤装置可有效消灭病毒及其他污染物，净化效果可达 99%，实物图如图 6 所示。

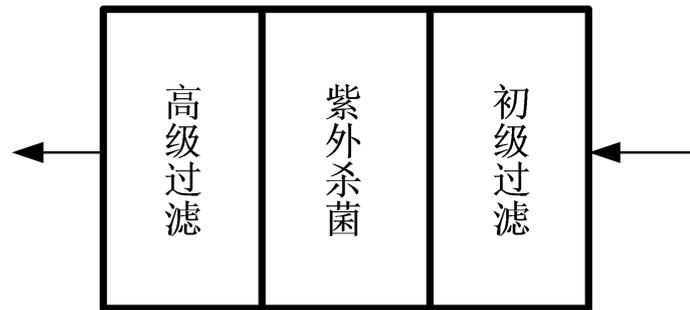


Figure 5. Three-stage filtration process
图 5. 三级过滤过程



Figure 6. Three-stage filtration equipment
图 6. 三级过滤设备

4. 实验结果

为了验证设备的负压效果，需要对工作状态下舱内外实际压差与设定值进行对比。采用压差传感器，同时采集舱内外的压力得到压力差，与设定值进行对比来验证设备效果。随机选取舱内 10 个采集点进行测量，为了使测试结果更具准确性，重复进行实验 20 次，分别计算出最大值，最小值和平均值，实验结果如表 1 所示。

Table 1. The maximum and average values of pressure difference at each collection point
表 1. 各采集点压差的最值及平均值

舱内采集点	最大值/Pa	最小值/Pa	平均值/Pa	设定值/Pa
1	60.2	60	60	60
2	60.3	59.9	60.1	60
3	60.2	60	60	60
4	60.1	59.8	59.9	60
5	60	60	60	60
6	60	59.9	60	60

Continued

7	60.3	60	60.1	60
8	60.1	59.9	60	60
9	60.2	59.8	60	60
10	60	59.7	60	60

由表 1 数据可得, 在测试过程中各组压差均在设定值上下浮动, 可以证明本装置可以保证舱内压力稳定在某一特定值, 且舱内压力无明显差异。各点的最值波动不尽相同, 但是平均值相对较为稳定, 无明显波动, 如图 7 所示。

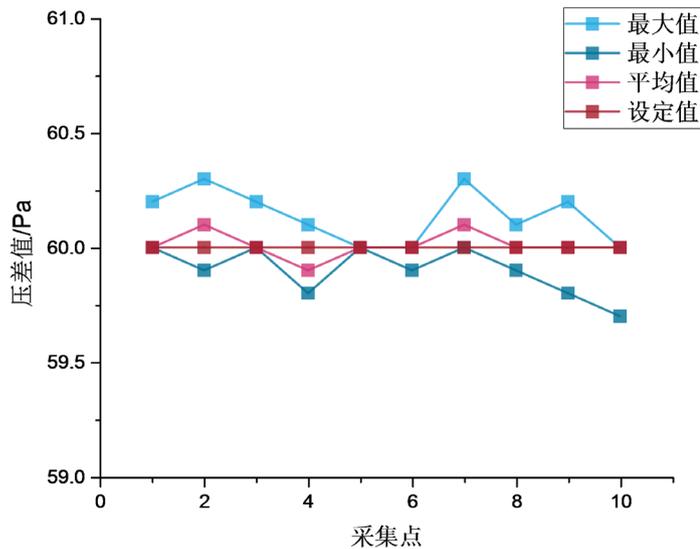


Figure 7. Differential pressure data analysis
图 7. 压差采集数据分析

5. 结论

本文着重对负压转运舱的结构方案、负压实现方案、空气净化方案进行了说明, 可得出设计开发的负压转运舱实现了负压、空气净化功能, 可保证在患者转运过程中的零泄露, 在保障患者的生命安全的同时杜绝了交叉感染的风险。此设备可满足多人、长距离的转运需求, 可为患者的集中隔离治疗提供有力保障。在后期的研究中, 需要与实际医疗应用对接, 经过功能和安全性测试后, 将本产品投入到实际应用中, 在过程中继续对设备进行优化和升级, 使之具有更高的通用性和实用性。

基金项目

中国航天科工集团自主创新课题“可移动式负压隔离转运保障舱”。

参考文献

- [1] 李金年, 宋东. 负压隔离舱在 SARS 转运中的应用[C]//中华医学会. 2003 全国 SARS 防治学术交流会. 2003: 30-31.
- [2] 尚辉, 刘乃智, 李静. 便携式防传染医用负压隔离舱的设计[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(2): 60-62.
- [3] 解晓谜, 黄洁娜, 凌枫盛, 等. 负压隔离保护装置及其研究进展[J]. 现代预防医学, 2014, 41(5): 902-904, 915.

-
- [4] 防化研究院信息研究中心. 美军联合军种化学与生物防御计划概要[M]. 2008-2009 版. 北京: 军事谊文出版社, 2008.
 - [5] 李莹. 应对生物恐怖袭击医学防治技术的情报研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 军事医学科学院, 2008.
 - [6] 杨冬梅, 祁建城. 烈性呼吸道传染病防护装备链及其应用[J]. 中国个体防护装备, 2008(2): 37-40.
 - [7] 孙秋明, 刘圣军, 田丰, 等. 传染病人负压隔离床控制系统设计[J]. 中国医学装备, 2008, 5(3): 4-6.
 - [8] 邱士起. 全封闭负压隔离防护罩(箱)控制有毒挥发物扩散的应用[J]. 上海预防医学, 2003, 15(9): 458-458.