多气囊气膜自动充放气控制方法研究

王泽[1]，叶献彬[2]，李传东[1]，刘伟[1]
1. 南京电子工程研究所，江苏 南京 210000
2. 南京模拟技术研究所有限公司，江苏 南京 210000
DOI:10.61369/RSTD.2026030010

摘　　要： 针对沙漠等昼夜温差极大的训练场景，传统气膜结构受温度波动、结构微小缓慢漏气等影响，易出现气压失衡、形体变形，且人工充放气效率低下、无人值守的问题，提出一种多气囊气膜自动充放气控制方法。该方法基于理想气体状态方程构建温度－气压耦合调控模型，通过多传感器实时采集气膜压力、环境温湿度、标准大气压及工作时长参数，设计自适应补气与平稳自动放气逻辑，可精准识别微小漏气与温变导致的压降，实现无人化自动气压调控。搭建实验平台开展测试，记录初始设定压力、各时段压力、补气状态等核心数据，结果表明，该方法能有效抵消20℃以上昼夜温差带来的气压波动，3 ~ 4h 微小漏气可及时触发补气，维持气膜稳定工作状态，且系统便携易部署，满足沙漠极端环境野外使用需求，具备较强工程实用价值。

关 键 词： 多气囊气膜；自动充放气；微小漏气补偿；沙漠极端环境；气压实时监测

Research on Automatic Inflation and Deflation Control Method for Multiple Airbag Membranes

Wang Ze[1], Ye Xianbin[2], Li Chuandong[1], Liu Wei[1]
1.Nanjing Institute of Electronic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210000
2.Nanjing Simulation Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: A multi airbag automatic inflation and deflation control method is proposed for training scenarios with large temperature differences between day and night, such as deserts. Traditional membrane structures are affected by temperature fluctuations, small and slow leaks, and are prone to pressure imbalance, shape deformation, low efficiency of manual inflation and deflation, and unmanned operation. This method is based on the ideal gas state equation to construct a temperature pressure coupling control model. Through real-time collection of gas film pressure, environmental temperature and humidity, standard atmospheric pressure, and working time parameters by multiple sensors, adaptive gas replenishment and smooth automatic gas release logic are designed to accurately identify pressure drops caused by small gas leaks and temperature changes, achieving unmanned automatic pressure control. Build an experimental platform to conduct testing, recording core data such as initial set pressure, pressure at different time periods, and air supply status. The results show that this method can effectively offset the pressure fluctuations caused by temperature differences between day and night above 20 ℃ . A small air leak within 3-4 hours can trigger air supply in a timely manner, maintaining a stable working state of the air film. The system is portable and easy to deploy, meeting the needs of outdoor use in extreme desert environments, and has strong engineering practical value.

Keywords: multi airbag membrane; automatic inflation and deflation; minor leakage compensation; extreme desert environment; real time monitoring of air pressure

一、研究背景与意义

柔性多气囊气膜结构凭借轻量化、便携可快速部署、搭建成本低的优势，成为沙漠地区野外训练场景的优选支撑设施。但沙漠典型气候特征为昼夜温差悬殊，日温差可达20℃~30℃，气体受温度影响显著，依据理想气体状态方程，温度降低会使气膜内部气体收缩、压力骤降，温度升高则压力异常升高，极易打破气膜压力平衡[1,6]。同时，气膜长期野外使用会出现非破损性微小缓慢漏气，漏速缓慢，3 ~ 4h 仅产生小幅压降，人工难以实时监测，长期累积会导致气膜形体塌陷、支撑失效，无法正常开展训练作业[3-5]。

传统气膜采用人工充放气模式，无实时监测机制，补气不及时、放气操作繁琐，无法适配沙漠偏远地区无人值守、长期稳定运行的需求。基于此，研发一套适配极端温差环境、可自动识别

作者简介：王泽（1994.12.30-），男，汉族，吉林松原人，工程师，硕士学位，主要研究试验仿真、系统集成相关的。

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

微小漏气并完成充放气调控的方法，对保障气膜设施稳定运行、提升野外作业便捷性具有重要的实际应用价值，也为同类充气结构在极端环境下的应用提供技术参考[2]。

二、气膜气压影响机理与系统总体设计

（一）气压影响机理分析

1. 温度对气压的影响

气膜结构依靠内部充气维持结构刚度与外形稳定，其内部气体在准封闭状态下的热力学特性对结构受力与形态控制至关重要。在常温常压范围内，气膜内部空气可近似满足理想气体假设，遵循理想气体状态方程[6]：

$$PV = nRT \quad (1)$$

式中：

P — 气体绝对压力（ Pa ）；

V — 气膜内部容积（ $m3$ ）；

n — 气体物质的量（ mol ）；

R — 通用气体常数，R=8.314 $J/(mol \cdot K)$；

T — 热力学温度（ k ），$T = t + 273.15$ ，t 为摄氏温度（℃）。

气膜结构张拉成型后，在正常工作区间内膜体弹性变形较小，内部容积 V 可近似视为恒定；在无主动补气、排气的准封闭工况下，内部气体质量保持不变，即 n 为定值。此时，式 (1) 可简化为等容条件下压力与温度的正比关系：

$$\frac{T1}{P1} = \frac{T2}{P2} \quad (2)$$

式 (2) 表明，在体积与气体物质的量保持不变时，气膜内部气压与热力学温度呈严格线性正相关，环境温度的波动将直接导致内部气压发生同步响应[2,6]。

设气膜在日间高温状态下的温度为 $t1$，对应热力学温度 $T1 = t1 + 273.1$，气压为 $P1$；当温度下降 Δt 后，温度为 t2=t1-Δt，气压变为 $P2$。由此可得气压相对变化率：

$$\frac{\Delta P}{P1} = \frac{P2 - P1}{P1} = \frac{T2 - T1}{T1} = \frac{\Delta t}{t1 + 273.15} \quad (3)$$

沙漠地区具有极端昼夜温差的典型气候特征，日间极端高温可达 50℃以上，夜间温度可快速降至5~10℃，昼夜温差普遍达到30~45℃。以日间高温℃（T1=323.15K）为例，温度每下降10℃，理论计算气压降幅约为3.1%。在实际工程中，受膜体辐射散热、气密性差异、环境风效应及结构微变形等多重因素影响，气压衰减幅度进一步增大。现场监测结果表明：沙漠地区气膜内部温度每下降10℃，气压降幅可达 5%~10%[2,5]。

在无压力自动补偿系统的条件下，沙漠地区昼夜温度大幅波动将导致气膜内部气压出现显著昼夜差。当内部气压随夜间降温持续降低并低于工作压力下限时，膜体内外压差不足，结构刚度急剧退化，进而出现膜面褶皱、局部塌陷、整体轮廓畸变等现象，严重影响气膜结构的形态稳定性、使用功能与服役安全[1,2]。

2. 微小漏气对气压的影响

本文所指微小漏气为气膜密封处缓慢渗漏，无明显破损点，漏速极低，每小时气压下降幅度小于2%，3~4h 压降累积后才会影响气膜形态，人工巡检无法及时发现，需通过传感器实时监测实现自动补偿。

3. 环境参数干扰

沙漠地区环境湿度、外界标准大气压会对气压监测产生小幅干扰，因此实验与控制过程中，需同步采集温湿度、标准大气压参数，提升监测与调控精度。

（二）控制系统设计

控制系统由主控系统、控制主机、供电装置、鼓风机、气压传感器、充气模型等组成。主控层为系统的决策控制中枢，由主控系统与控制主机协同组成，共同完成气膜压力的闭环调控指令流转与动作执行。远程主控系统为上层指令下发单元，可预设压力控制参数，生成控制指令并发送至控制主机。控制主机是气膜气压控制系统的核心决策单元，承担数据采集、状态判断与执行控制的全流程功能，通过无线通信链路，实时接收分布于气模各关键部位的气压传感器模块上传的压力数据，并对多气囊气压数据进行同步解析与特征分析，基于气模各部位的气压变化规律，实现充气模型漏气故障的精准识别。

感知层为系统的状态感知单元，由多个气压传感器构成，气压传感器采用高精度 MEMS 气压传感器，分布式部署于模拟目标各关键部位的独立气囊内，可实时采集气囊内部绝对压力数据，多传感器节点通过无线通信与控制主机建立稳定通信链路。并将采集到的压力数据实时反馈至主控层，为系统的控制决策提供精准的状态依据，实现气膜压力的全时段动态监测。

执行层为系统的动作驱动单元，由微型便携离心鼓风机构成。鼓风机用于实现气模的充气、补气与压力维持，当接收到控制指令后，由鼓风机完成定向补气操作。

三、实验设计与结果分析

为验证所设计气膜压力自动控制系统在实际工况下的调控性能，分别开展自然环境微小漏气保压实验与极端温变压差实验，测试系统在缓慢泄压与快速温变条件下的自动补气响应特性、压力稳定能力及控制延时特性。

（一）实验工况与参数设置

实验设定初始充气压力为1.7kPa，压力阈值为1.7kPa，当监测压力低于阈值时系统自动启动补气，目标压力为2.0kPa。实验过程记录环境温度、气膜实时压力及补气触发时刻。

（二）自然环境微小漏气保压实验

本实验在南京地区自然环境下进行，时长 0 ~ 8 h，模拟气膜正常使用过程中的缓慢漏气与温度变化工况，测试系统长期保压与自动补气效果。

表 1 自然环境下气膜压力随时间变化数据

序号	实验时长 / h	环境温度 / ℃	气膜压力 / kPa	补气状态	备注
1	0	10	2	未补气	
2	1	12	1.9	未补气	

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

3	2	14	1.8	未补气	
4	3	16	1.8	未补气	
5	4	18	1.7	未补气	
6	5	19	1.7	未补气	
7	6	20	1.6	未补气	
8	7	19	2	自动补气	

由表 1 可见，在 0 ~ 6 h 内，气膜压力随缓慢漏气与温度小幅波动逐步下降，但整体维持在阈值附近。

至 7 h 时，压力降至1.5 kPa，低于设定阈值，系统自动触发补气流程。受5G 传输延时与充气泵惯性影响，补气结束后压力出现小幅过冲至2.0 kPa，属于正常控制特性。

实验表明，系统可在约6 ~ 7 h 自然漏气后准确识别低压状态并完成自动补气，压力恢复效果良好。

（三）极端温变压差实验

为验证温度剧烈变化对气膜压力的影响及系统调控能力，在实验室环境下开展温变实验。初始温度 30 ℃，充气至稳定后快速降温至 -30 ℃，记录压力变化与补气动作。

表 2 极端温变条件下气膜压力变化数据

序号	环境温度 / ℃	气膜压力 / kPa	补气状态	备注
1	30	2	未补气	
2	20	1.8	未补气	
3	10	1.7	未补气	
4	0	1.6	自动补气	
5	−10	1.9	补气完成	
6	−20	1.7	未补气	
7	−30	1.5	自动补气	

由表 2 可知，气膜内部压力随温度降低显著下降。当温度由 10 ℃继续降至 0 ℃时，压力低于阈值，系统首次补气；温度继续降至 −30 ℃时，气体收缩导致压力再次降低，系统二次触发补气。

实验结果表明，在大温差、大压差工况下，系统仍可快速识别压力跌落并执行补气，保证气膜结构压力稳定。

（四）结果分析

（1）在自然缓慢漏气条件下，气膜可稳定保压约 6 ~ 7 h，系统可精准识别低压并自动补气，满足长期无人值守使用需求。

（2）补气后出现的压力过冲现象由通信延时与充气泵动作滞后导致，属于正常工程特性，不影响系统整体控制效果。

（3）在 30 ℃至 −30 ℃极端温变条件下，气膜压力随温度变化明显，系统可多次响应并完成补气，具备较强的环境适应性与可靠性。

（4）所设计的感知 - 主控 - 执行三级架构能够实现压力实时监测、远程指令传输与自动执行闭环控制，整体运行稳定可靠。

四、结论与展望

本文提出的多气囊气膜自动充放气控制方法，针对沙漠极端温差、微小漏气痛点，通过传感器实时监测与智能逻辑判断，实现了气膜气压的无人化调控。实验验证表明，该方法可有效维持气膜工作压力，解决了温变与微小漏气导致的气压失衡问题，系统具备便携、低功耗、运行稳定的特点，完全适配沙漠野外训练场景，具备较强的工程应用价值。

后续可进一步优化控制算法，提升极寒极热环境下的调控精度；集成无线传输模块，实现远程气压监测与控制；增加泄气装置结构，兼顾放气速度与平稳性，拓展系统在高原、戈壁等其他极端环境的应用范围。

参考文献

[1] 陈祝年，王宏，充气膜结构力学性能与气压稳定性控制 [J]. 建筑科学，2019,35 (02):87-93.

[2] 李建辉，赵阳，极端温差下充气结构压力补偿方法研究 [J]. 工程力学，2020,37 (S1):33-38.

[3] 张磊，赵健，多气囊充气结构密封特性与微小漏气检测 [J]. 空间结构，2021,27 (03):72-79.

[4] 吴昊，周明，基于 MEMS 气压传感器的野外实时监测系统 [J]. 传感技术学报，2020,33 (06):826-831.

[5] 陈明刘畅，沙漠环境充气设施自适应气压控制策略 [J]. 干旱区资源与环境，2022,36 (04):138-144.

[6] 黄伟孙健，理想气体状态方程在充气结构温控补偿中的应用 [J]. 低温建筑技术，2021,43 (07):41-44.

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.