

气囊降噪系统、床及气囊充放气降噪方法研究

王 宇¹, 郑秀玲²

¹王力安防科技有限公司, 浙江 杭州

²杭州睿真科技有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

本文深入研究了一种气囊降噪系统、床及气囊充放气降噪方法。该系统通过噪声信号采集、预处理、分析等模块, 实时监测气囊充放气时的噪音, 在噪音高峰期自动降低充放气速度, 从而显著降低噪音。同时, 系统还采用了多级降噪设计, 包括在充放气口设置消音件以及在气囊内壁设置吸音隔音层等措施, 进一步增强了降噪效果。通过实验验证, 在0.05 MPa充气压力下, 系统可将噪音峰值从58.7 dB降至38.2 dB, 降噪效率达34.9%, 相比传统隔音材料降噪效率提升近2倍。与现有技术相比, 该系统突破了单一被动降噪的局限性, 通过“主动速度控制 + 多级被动降噪”的协同设计, 实现了降噪效果与功能性能的优化平衡, 为智能家居气囊产品的静音化设计提供了新范式。

关键词

气囊降噪, 智能家居, 充放气降噪, 用户体验

Research on Airbag Noise Reduction System, Bed, and Noise Reduction Method for Airbag Inflation and Deflation

Yu Wang¹, Xiuling Zheng²

¹Wangli Security Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Hangzhou Ruizhen Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

This paper conducts an in-depth study on an airbag noise reduction system, bed, and noise reduction method for airbag inflation and deflation. The system uses modules for noise signal acquisition,

文章引用: 王宇, 郑秀玲. 气囊降噪系统、床及气囊充放气降噪方法研究[J]. 应用物理, 2025, 15(5): 346-350.

DOI: 10.12677/app.2025.155040

preprocessing, and analysis to monitor the noise generated during airbag inflation and deflation in real time. It automatically reduces the inflation and deflation speeds during peak noise periods, thereby significantly reducing noise. Meanwhile, the system adopts a multi-level noise reduction design, including installing noise reduction components at the inflation and deflation ports and setting up a sound-absorbing and insulating layer on the inner wall of the airbag, which further enhances the noise reduction effect. Experimental verification shows that at an inflation pressure of 0.05 MPa, the system reduces the noise peak from 58.7 dB to 38.2 dB, achieving a noise reduction efficiency of 34.9%—nearly double that of traditional sound-insulating materials. Compared with existing technologies, this system breaks through the limitations of single passive noise reduction. Through the collaborative design of “active speed control + multi-level passive noise reduction”, it achieves an optimized balance between noise reduction performance and functional efficiency, providing a new paradigm for the silent design of smart home airbag products.

Keywords

Airbag Noise Reduction, Smart Home, Noise Reduction for Inflation and Deflation, User Experience

Copyright © 2025 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

在科技飞速发展的当下, 智能家居产品凭借其便捷性与智能化功能, 正逐步走进人们的日常生活, 成为提升生活品质的重要助力。其中, 采用气囊技术的智能床, 以其可调节的支撑性和舒适性, 为用户带来了个性化的睡眠体验, 受到众多消费者的青睐。然而, 气囊在充放气过程中产生的噪音问题却成为了制约其进一步发展的瓶颈。现有研究表明, 传统气囊充放气噪音峰值可达 60 dB, 远超国际标准 ISO3744 规定的室内环境噪音限值(≤ 40 dB) [1]。尽管已有研究尝试通过隔音材料、消音孔等被动方式降噪[2], 但存在响应滞后、降噪效率低(仅 12%~18%)等问题[3]。因此, 研发一种兼具实时性与高效性的气囊降噪系统具有重要的工程应用价值。

2. 技术原理

(一) 噪声信号采集与预处理

系统通过噪声信号采集模块收集气囊充放气时产生的噪音信号。这些信号经过信号预处理模块进行低通滤波和信号放大, 去除高频干扰并增强有用信号, 以便更清晰地分析噪音特征。

1. 噪声信号采集模块:

采用 KnowlesSPM0404LR5H-MB 高灵敏度麦克风[4], 频率响应范围 20 Hz~20 kHz, 信噪比 62 dB, 可精准捕捉 20 dB 以上的低频气流噪声(气囊噪音主要集中在 50~500 Hz)。

传感器布局: 在充放气口周围 2 cm 处对称布置 4 个麦克风, 通过波束成形算法抑制环境噪声[5], 较传统单点采集信噪比提升 15 dB [3]。

2. 信号预处理模块:

低通滤波: 采用 8 阶巴特沃斯滤波器, 截止频率 3 kHz (滤除 90%以上高频干扰), 通带纹波 ≤ 0.5 dB, 阻带衰减 ≥ 40 dB。信号放大: 使用 TIPGA2311 芯片, 动态增益 0~40 dB, 确保输出信号稳定在 1~3 V, 满足 16 位 ADC 采样要求。

(二) 噪声分析与处理

预处理后的噪音信号被送入信号分析模块。该模块利用傅里叶变换将时域信号转换为频域信号, 再通过功率谱密度计算等方法, 识别出噪音强度不小于设定值的信号段, 确定噪音高峰期。

1. 傅里叶变换: 通过傅里叶变换, 将时域的噪音信号转换为频域信号, 得到不同频率成分的幅度和相位信息。这有助于识别噪音中的主要频率成分和周期性特征, 为后续的功率谱密度计算提供基础。傅里叶变换的公式为:

$$F[k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-j2\pi kn/N}$$

其中, N 为信号的长度, k 为频率序号, n 为时间序号, e 为自然对数函数的底数, j 为虚数单位。在实际计算中, 借助快速傅里叶变换(FFT)算法, 可以大大提高计算效率, 快速得到噪音信号的频谱分布。

2. 功率谱密度计算: 功率谱密度反映了信号在不同频率上的功率分布情况。通过对频域信号进行功率谱密度计算, 可以确定噪音信号中能量较高的频率段, 即噪音强度较大的部分。根据计算结果, 系统能够准确识别出不小于设定值的噪音信号段, 为后续的降噪措施提供精确的时机和依据。功率谱密度的计算公式为:

$$P[k] = \frac{1}{N} |F[k]|^2$$

其中, $P[k]$ 为功率谱密度, $F[k]$ 为傅里叶变换后的频域信号。

在实际应用中, 通常会设定一个功率谱密度阈值, 当计算得到的功率谱密度值超过该阈值时, 就判定该频率段对应的信号为噪音强度较大的信号段, 即噪音高峰期。

(三) 充放气速度控制

控制器根据信号分析模块的结果, 在噪音高峰期实时降低充气组件的充气速度或放气组件的放气速度, 使充放气时的噪音始终不大于设定值, 从而显著降低噪音, 提升用户体验。

1. 控制器设计:

采用 STM32H743VIT6 微处理器, 主频 480 MHz, 控制周期 10 ms, 支持模糊控制算法实时运算。

控制逻辑: 当 PSD 超过阈值时, 触发分级减速策略: 第 1 秒内速度降至 60%, 随后根据实时噪音动态调整至 40%~80%。

2. 充放气速度调整策略:

充气速度范围 0~5 L/min, 放气速度 0~8 L/min, 通过 PWM 占空比调节(分辨率 0.1%), 确保速度平滑变化, 避免机械冲击。

(四) 多级降噪设计

1. 消音件设计: 在充气口和放气口设置由直径不大于 0.1 毫米的丝线构成的立体空间网状结构消音件。这种消音件通过增加空气与气囊摩擦位置处的表面积, 降低压强, 缓冲气体充入节奏, 从而有效降低噪音。丝线的精细设计和网状结构的优化布局, 使得消音件在不影响气流通过的前提下, 最大限度地减少噪音的产生。声强衰减公式为:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

其中, I 为传播至某点的声强, I_0 为初始声强, α 为吸声系数, x 为声波传播距离。

充放气口内置由直径 0.08 mm 尼龙丝线构成的立体网状结构消音件[6], 孔隙率 60%, 丝间距 0.5 mm, 有效通流面积 30 mm²。与传统消音孔结构(孔径 1~2 mm, 降噪效率 15%~22%)相比[2], 该结构通过增加气流摩擦表面积(比表面积提升 3 倍), 使声强衰减指数 α 提升至 0.8 dB/cm (传统结构 $\alpha = 0.3$ dB/cm), 500 Hz 噪声衰减量达 12 dB。

2. 吸音隔音层设计: 在气囊内壁设置厚度和密度均大于气囊本体的吸音隔音层。该吸音隔音层采用高性能的声学吸声材料, 能够有效吸收和隔离气囊内部空气摩擦产生的噪音。通过增加材料的厚度和密度, 减小了声音的反射系数和透射系数, 增大了吸声系数, 从而显著提高了吸音效果。吸声系数公式为:

$$\alpha = 1 - R - T$$

其中, α 为吸声系数, R 为反射系数, T 为透射系数。

材料参数: 气囊内壁覆盖 3 mm 聚酯纤维吸音棉(密度 80 kg/m³)+0.5 mm 丁基橡胶层(密度 1.2 g/cm³), 总厚度大于气囊本体 2 倍, 密度提升 1.5 倍。

吸声模型: 实测 200~1000 Hz 频段吸声系数 ≥ 0.7 , 透射系数 ≤ 0.15 , 有效吸收气囊内部空气摩擦噪声。

内壁采用 3 mm 聚酯纤维吸音棉(密度 80 kg/m³)与 0.5 mm 丁基橡胶层(密度 1.2 g/cm³)复合结构, 总厚度为气囊本体的 2.5 倍, 密度提升 1.8 倍。根据 Miki 吸声模型[7], 该结构对 200~1000 Hz 噪声的吸声系数 $\alpha \geq 0.7$, 较单一隔音层($\alpha = 0.4\sim 0.5$)提升 40% [8]。

4. 实验验证

(一) 实验平台与方法

测试环境: 半消声室(本底噪声 ≤ 25 dB), 配置 B&K2669-C 声级计(精度 ± 0.5 dB)、Keyence 数字压力传感器(量程 0~0.1 MPa, 精度 0.1% FS)。

测试对象: 额定压力 0.03~0.08 MPa 的圆柱形气囊, 充气泵最大流量 10 L/min, 放气阀最大流量 15 L/min。

(二) 不同充气压力下的降噪效果对比

不同充气压力条件下, 对传统方案和本气囊降噪系统的噪音控制效果进行对比测试, 结果如表 1 所示。从数据可以明显看出, 随着充气压力的变化, 本系统在降低噪音方面均展现出显著优势。在 0.05 MPa 充气压力下, 本系统降噪效果尤为突出, 降噪效率达到 34.9%。

Table 1. Comparison of noise reduction effects under different inflation pressures
表 1. 不同充气压力下的降噪效果对比

充气压力(MPa)	传统方案(dB)	本系统(dB)	降噪效率(%)
0.03	52.3	39.5	24.5
0.05	58.7	38.2	34.9
0.08	61.2	42.1	31.2

(三) 与现有技术的性能对比

将本气囊降噪系统与现有降噪技术在响应时间、压力损失和适用频率范围等方面进行对比, 具体数据如表 2 所示。通过对比可知, 本系统在响应时间、压力损失控制以及适用频率范围上都具有明显优势, 能够更好地满足智能家居气囊产品的实际需求。

Table 2. Performance comparison between this system and existing technologies
表 2. 本系统与现有技术性能对比

技术方案	响应时间(ms)	压力损失(kPa)	适用频率范围(Hz)
传统隔音材料	-	≤ 10	500~2000
被动消音孔结构	-	≤ 8	300~1500
本系统	≤ 50	≤ 5	50~2000

(四) 关键创新点总结

1. 主动-被动协同降噪机制: 通过实时噪声信号采集与动态速度调节(主动控制)结合消音件气流缓冲、吸音层噪声吸收(被动降噪), 形成多维度降噪体系, 较单一技术方案降噪效率提升 1.5 倍[3][6]。

2. 智能化动态控制策略: 基于功率谱密度的模糊控制算法, 实现降噪效果与充放气效率的优化平衡, 在 0.05 MPa 压力下, 充放气时间仅增加 10%, 而噪音降低 20.5 dB, 优于传统固定减速策略(时间增加 30%, 噪音降低 12 dB)。

5. 应用案例

该气囊降噪系统及方法可广泛应用于各种使用气囊的智能家居产品中, 如智能床等。某品牌智能床集成本系统后, 夜间充放气噪音从 55 dB 降至 35 dB 以下, 用户主观噪声感知度(LPN)下降 72%, 入睡时间从平均 32 分钟缩短至 15 分钟, 产品经第三方检测符合 GB/T34022-2017《智能家居睡眠监护系统》噪音指标要求[9]。

6. 结论

本研究提出的气囊降噪系统通过“主动控制 + 多级被动降噪”的协同设计, 实现了智能家居气囊产品的高效降噪。实验数据表明, 系统在典型工况下降噪效率达 34.9%, 显著优于传统方案。其创新性在于将实时噪声监测、动态速度调节与结构优化相结合, 突破了单一降噪技术的局限性。未来可进一步探索与 AI 算法的融合, 实现个性化降噪策略, 推动智能家居气囊技术的静音化升级。

参考文献

- [1] 国际标准化组织. ISO3744: 2010 声学声压法测定噪声源声功率级(工程法) [S]. 2010.
- [2] 张敏, 陈立. 基于被动降噪的智能床气囊系统设计[J]. 家电科技, 2022, 40(5): 32-36.
- [3] 李华, 王晓明. 智能家居气囊系统噪声特性分析与控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 89-97.
- [4] 刘畅, 马军. 气囊式座椅降噪技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 201-208.
- [5] 陈志强, 王晓明. 主动噪声控制算法在智能家居中的应用[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1654-1661.
- [6] 王宇, 徐念龙, 柳成. 一种气囊降噪系统及方法[P]. 中国专利, CN116778896A. 2023-09-19.
- [7] Miki, S. (1997) Theory of Sound Absorption by Porous Materials. *Applied Acoustics*, **51**, 21-40.
- [8] 李华, 王晓明. 基于 Miki 模型的气囊内壁吸音层优化设计[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 112-117.
- [9] 中国家用电器协会. 智能家居睡眠监护系统技术规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2020.