

# 基于帘线角度对空气弹簧刚度影响分析研究

朱卫华<sup>1</sup>, 林 铿<sup>2\*</sup>, 张子俊<sup>2</sup>, 赵建斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>海装上海局驻上海地区第十一军事代表室, 上海

<sup>2</sup>上海船舶设备研究所, 上海

收稿日期: 2025年1月27日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月28日

## 摘 要

利用有限元仿真建立空气弹簧的有限元模型, 研究不同帘线角度在不同工况下空气弹簧弹性特征。从几何形状、囊体材料等方面论述了空气弹簧的非线性特性, 采用灵敏度分析方法, 对空气弹簧不同帘线角度在不同结构下的弹性特性进行分析, 模拟了不同角度的帘线对空气弹簧在不同工况下的影响程度。结果表明不同的帘线角度对空气弹簧的垂向刚度和横向刚度影响程度不同, 其中帘线角度对空气弹簧的横向刚度影响较大, 且均可调节。

## 关键词

空气弹簧, 帘线角度, 刚度分析, 有限元仿真

# The Study on the Influence of Cord Angle on the Stiffness of Air Springs

Weihua Zhu<sup>1</sup>, Keng Lin<sup>2\*</sup>, Zijun Zhang<sup>2</sup>, Jianbin Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The 11th Military Representative Office in Shanghai, Haizhuang Shanghai Bureau, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Shipbuilding Equipment Research Institute, Shanghai

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

A finite element model of the air spring is established using finite element simulation to investigate the elastic characteristics of the air spring under different working conditions with varying cord

\*通讯作者。

文章引用: 朱卫华, 林铿, 张子俊, 赵建斌. 基于帘线角度对空气弹簧刚度影响分析研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(2): 499-505. DOI: 10.12677/mos.2025.142170

angles. First, the nonlinear characteristics of the air spring are discussed from aspects such as geometry and diaphragm material. Sensitivity analysis is then employed to examine the elastic properties of the air spring with different cord angles under various structural configurations. The effects of different cord angles on the air spring's performance under different conditions are simulated. The results show that the impact of cord angle on the vertical and lateral stiffness varies under different states, with the cord angle significantly influencing the elastic properties of the air spring. Furthermore, these characteristics are adjustable.

## Keywords

Air Spring, Cord Angle, Stiffness Analysis, Finite Element Simulation

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. 前言

我国政府对高速列车和船舶的维护非常重视。因此对高铁、普通车辆操纵的稳定性、船舶舒适性有较高的要求[1][2]。空气弹簧以其独有的技术优势,特别是作为缓冲元器件广泛应用于船舶、高速动车组、磁悬浮列车、城轨车辆等交通系统,满足了船舶、高速铁路和城市轨道交通对动力学性能的更高要求,直接决定了设备的稳定性、安全性和平稳性。国内研究者对空气弹簧进行了大量的试验研究[3]-[6]。比如 Wang [7]等通过对空气弹簧刚度特性和受力进行理论分析,得到了空气弹簧位移的三次多项式的非线性恢复力,验证了非线性空气弹簧多项式模型的正确性;Liu [8]等研究了当空气弹簧与节流孔及其辅助储液罐连接时,动刚度和总等效阻尼在位移激励频率、节流孔面积以及辅助储液罐容积等因素的影响下的变化规律。研究表明,在简谐位移激励作用下,橡胶空气弹簧的动刚度与节流孔口面积之间存在负相关关系,而与激励频率则呈现正相关。Yanghong [9]等进行空气弹簧静力学特性和气室容积性能试验,建立了相关力学模型和数学模型。随着对空气弹簧的研究,它的运用范围也越来越广,比如在大型高端超精密仪器测量中作为隔振结构。空气弹簧的设计和理论分析具有一定难度,非线性有限元分析方法能够克服传统计算方法的局限性,并允许在计算机上调整模型参数。因此,许多研究者选择利用将有限元分析技术与实验方法结合,对空气弹簧进行深入研究。比如 Shi [10]等通过有限元仿真建立了空气弹簧模型,分析了帘布层参数对其性能的影响。根据空气弹簧的特殊结构和作用,其横向和垂向刚度特性对车辆运行品质和传动装置缓冲能力有十分重要的影响[11]。本文选择用有限元仿真模型研究不同帘线角度在不同状态下空气弹簧弹性特性,为寻找最适的帘线角度运用在空气弹簧中提供重要参考意义。

## 2. 空气弹簧几何特征与分类

空气弹簧主要分为囊式和膜式结构,二者几何模型如图 1 所示。在部分装置中,空气弹簧属于囊式结构,是由橡胶气胎、加强帘线、固定金属圈以及端部支撑组成的复合结构。它主要通过向密闭的囊体内部充入压缩气体,利用气压差和气体特性产生支撑力,从而实现弹性形变。橡胶气胎由内外胶层构成,主要起到密封和保护作用;加强帘线是其主要承载部分。固定金属圈承担囊体内压产生的张力,确保气囊在主座与底座之间发挥缓冲与传力作用。在工作过程中,橡胶囊的形变表现出几何非线性特征,并与内压缩气体形成气固耦合。与此同时,橡胶囊与金属之间的接触状态会随着工作条件的变化而发生变化,产生接触非线性。再加上橡胶材料本身的非线性,使得空气弹簧整体表现出更加明显的非线性特性。

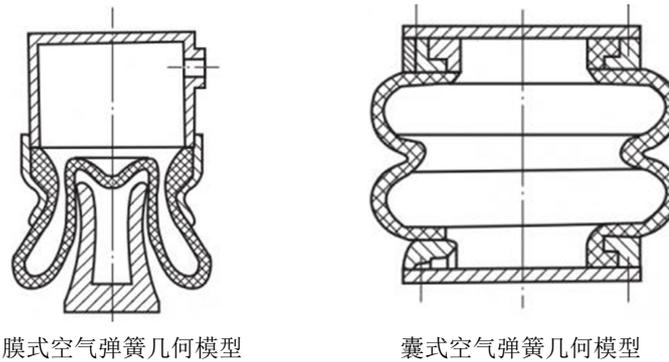


Figure 1. Geometric model of air spring  
图 1. 空气弹簧几何模型

### 3. 空气弹簧有限元分析建模

#### 3.1. 有限元分析方法概述

有限元分析是一种有效解决复杂非线性问题的方法。其基本原理是将连续结构划分为若干有限单元，并在每个单元内定义若干节点。通过将连续体视为相互连接的有限单元集合，问题便转化为离散化问题。在这一过程中，选择适当的场函数节点值作为基本未知量，并假设每个单元内部的场函数分布可通过插值函数进行近似。利用力学中的变分原理，建立有限元方程并求解节点处的未知量。通过这一过程，将原本具有无限自由度的连续问题转化为具有有限自由度的离散问题。当计算出节点处的未知量后，可基于这些节点值和设定的插值函数，进一步确定每个单元及整个结构上的场函数分布情况。

有限元分析共有以下 8 个步骤：

(1) 离散和选择单元。

(2) 位移插值函数的选择。节点处的位移可表示单元体的位移、应变和应力，在分析连续体问题时，须对单元内的位移分布做出一定假设。具体而言，将位移假设为坐标的某种简单函数，通常采用多项式形式作为位移函数。

$$[K]\{\delta\} = \{R\}$$

上式中  $[K]$  称为总体刚度矩阵； $\{\delta\}$  为整体结点位移向量； $\{R\}$  为整体结点载荷向量。

(3) 定义位移和应力应变关系。如在一维变形和小应变的情况下， $x$  方向的应变  $\varepsilon_x$  和位移  $u$  的关系如下：

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}$$

应力和应变通过本构关系联系起来，在得到可接受精确定义材料行为的能力非常关键。胡克定律广泛应用于应变分析中，其公式为：

$$\sigma_x = E\varepsilon_x$$

其中， $\sigma_x$  为  $x$  方向的应力， $E$  为弹性模量。

(4) 推导单元刚度矩阵和方程。其矩阵形式为：

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix}.$$

其中  $\{f\}$  是单元节点矢量,  $\{k\}$  是单元刚度矩阵,  $\{d\}$  是单元未知节点自由度或广义位移矢量。

(5) 组装单元方程得出总体方程并引入边界条件。使用直接刚度法将步骤 4 得出单个单元方程加在一起得出整个结构的总体方程, 最后组装的总体方程矩阵形式:

$$\{F\} = [K]\{d\}.$$

其中  $\{F\}$  是整体节点力矢量。

(6) 解未知自由度。在修改边界条件之后, 形成一程组, 可以扩展的矩阵形式:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix}$$

其中  $n$  是未知节点自由度的结构总数, 可用消元法或迭代法求解此方程。

(7) 求解单元应变和应力。

(8) 解释结果。

### 3.2. 空气弹簧有限元分析

根据空气弹簧自身结构特点, 对空气弹簧进行有限元建模, 需考虑空气弹簧的非线性特征。为了描述橡胶材料应力和应变之间的非线性关系, 用应变势能函数描述超弹性材料的关系。根据本空气弹簧结构特点, 建模时将其设置为轴对称模型。其中边界条件如约束、载荷、接触等均为轴对称。空气弹簧部件网格图如图 2 所示。橡胶部分通过轴对称划分网格, 最后得到 16420 个节点, 11616 个网络; 帘线模型通过轴对称特征划分二维网络, 得到 144400 个节点, 14112 个网络; 固定金属圈模型通过轴对称特征划分网络, 得到 3264 个节点, 2352 个网络; 法兰模块分块划分网络, 有 8022 个节点 5504 个网络。

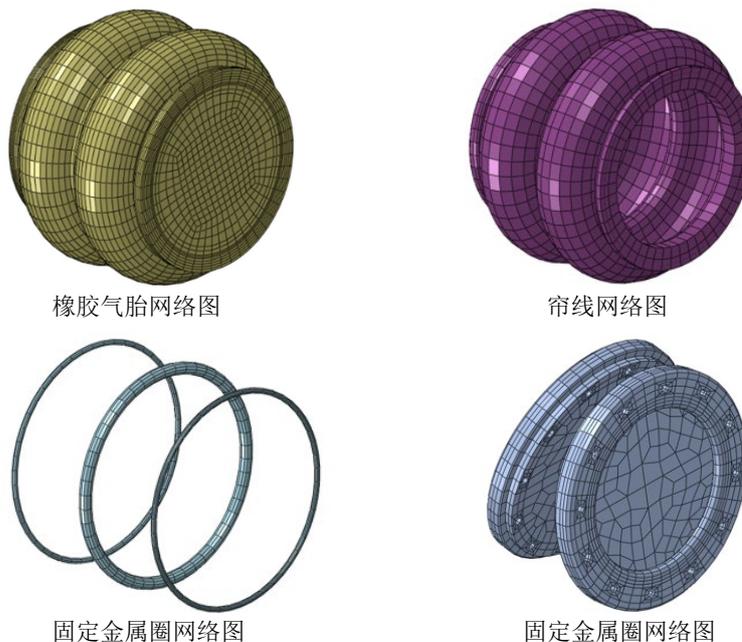


Figure 2. Geometric network diagram of air spring components  
图 2. 空气弹簧部件几何网络图

## 4. 空气弹簧不同帘线角度对刚度影响分析

帘线层是空气弹簧的承载部分，帘线角度的变化会影响空气弹簧的结构和力学特性，导致帘线的拉伸模量发生差异，使得帘线层表现出非线性特性。帘线角度是指帘线与壳体坐标系中性面之间的夹角。为了研究不同帘线角度对弹性特性的影响，本研究选取了 29°、34° 和 39° 三个帘线角度，并在初始条件下保持帘线层的其他参数不变。设定空气弹簧的充气压力为 2.5 MPa，工作行程范围为 -20 mm 至 20 mm 和 -70.25 mm 到 0.25 mm，其中压缩方向定义为正向位移，拉伸方向为负向位移。

### 4.1. 不同帘线角度下对空气弹簧内压 - 反力关系影响分析

固定空气弹簧在安装高度 247 mm 下，计算其在内压范围为 0.1~2.5 MPa 的不同帘线角度的反力载荷变化情况，绘制曲线图如图 3。结果表明，空气弹簧的内部压力与反力满足正相关关系，随着内部压力的增大，所产生的反力载荷就越大；根据图线趋势，表明内压对反力的影响在不同角度下相似。但不同帘线角度会导致反力变化的速率会略有不同。因此，在实际应用中，根据实际对空气弹簧内压和反力关系需求，需设置合适的帘线角度。

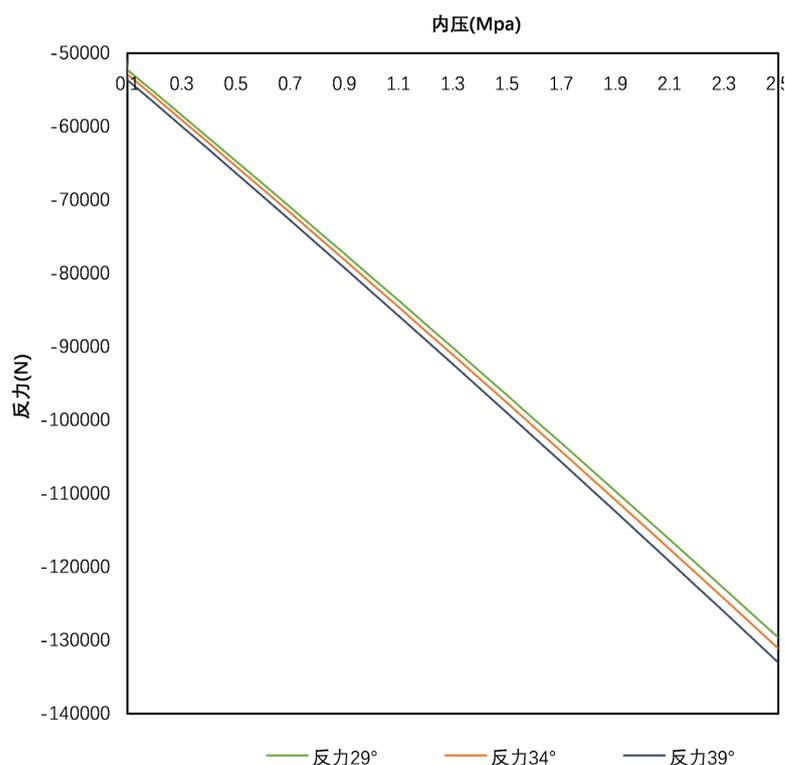


Figure 3. Relationship between internal pressure and reaction of air spring at different cord angles

图 3. 不同帘线角度空气弹簧内压和反力关系曲线图

### 4.2. 不同帘线角度下对空气弹簧横向弹性特征影响分析

如图 4 所示，图中的斜率反映了空气弹簧的横向刚度。从分析结果中看出，不同帘线角度下随位移变化反力变化幅值不同，这是由于仿真计算时帘线角度变化不同、刚度不同造成的。在其他条件相同的情况下，随着帘线角度的增大，横向位移减小，横向刚度越小。这一现象的原因在于，帘线角度的变化导致空气弹簧囊体在各个方向上承受的力分布不均。当帘线角度较小时，气囊的受力相对均匀；然而，

随着帘线角度的增大，囊体结构发生变化，使得不同方向上的受力差异增大，从而影响了囊体在拉伸和压缩过程中各方向上的力分布，进而影响横向刚度。

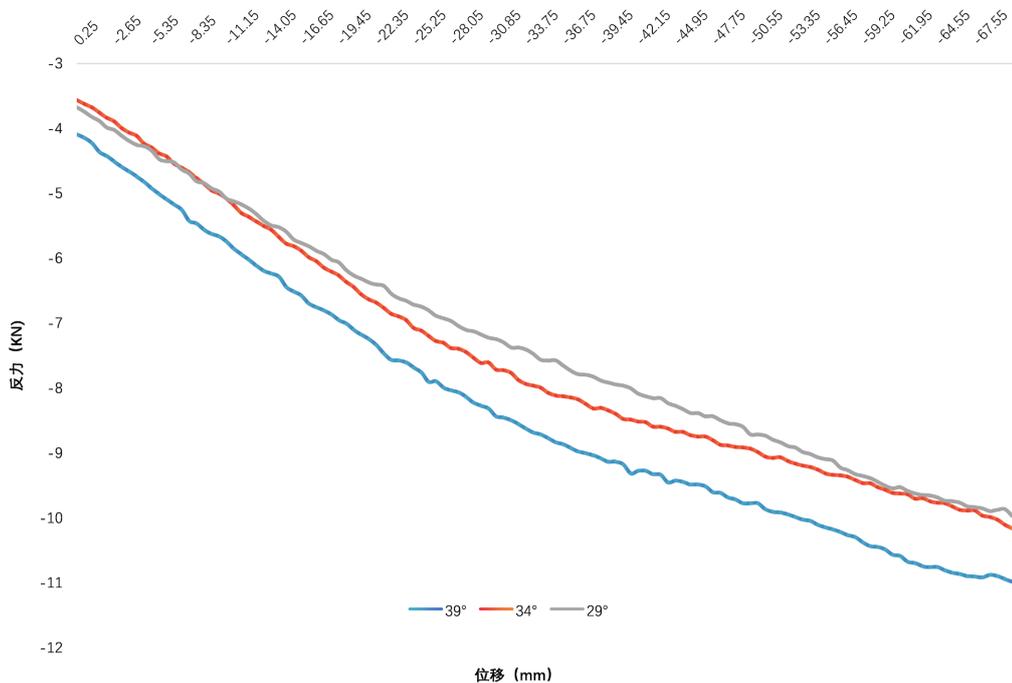


Figure 4. Transverse displacement and load curves of air spring under different cord angles  
图 4. 不同帘线角度下空气弹簧横向位移和载荷曲线图

### 4.3. 不同帘线角度对空气弹簧垂向弹性特征影响分析

如图 5 所示，图中的斜率反映了空气弹簧的垂向刚度。图示结果表明，三条曲线的斜率走势相似，帘线角度的变化对刚度的影响并不显著。虽然随着帘线角度的增大，空气弹簧的高度会略有减小，若帘线角度的变化幅度较小，导致的高度变化也非常有限，进而使得半径的变化可以忽略不计。

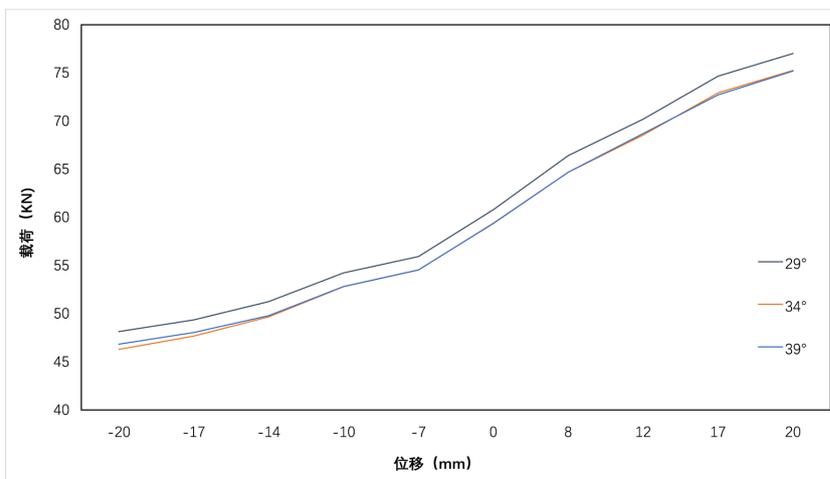


Figure 5. Transverse displacement and load curves of air spring with different cord angles  
图 5. 不同帘线角度空气弹簧横向位移和载荷曲线图

## 5. 总结和结论

本文从囊体材质、几何形状和模型应用等多个方面,探讨了空气弹簧的非线性特性及其作用,并通过有限元仿真建立了空气弹簧的有限元模型,用于模拟其弹性特性。针对帘线参数设计,本文采用灵敏度分析方法,研究了不同帘线角度对空气弹簧弹性特性的影响。分析结果表明,帘线角度对空气弹簧垂向刚度的影响程度可以忽略不计,而对横向刚度的影响程度存在显著差异;同时,空气弹簧内部压力与反力的线性趋势也因不同帘线角度而表现出不同的规律。因此,在空气弹簧设计过程中,应根据实际需求合理选择帘线角度,避免角度过大或过小,以确保其性能满足预期要求。

## 参考文献

- [1] Li, X., He, Y., Liu, W. and Wei, Y. (2015) Research on the Vertical Stiffness of a Rolling Lobe Air Spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **230**, 1172-1183. <https://doi.org/10.1177/0954409715585370>
- [2] Li, X. and Li, T. (2013) Research on Vertical Stiffness of Belted Air Springs. *Vehicle System Dynamics*, **51**, 1655-1673. <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>
- [3] 李健, 李美, 谭偲龙, 等. 空气弹簧各向动刚度特性的有限元研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 105-111.
- [4] Toyofuku, K. (1999) Study on Dynamic Characteristic Analysis of Air Spring with Auxiliary Chamber. *JSAE Review*, **20**, 349-355. [https://doi.org/10.1016/s0389-4304\(99\)00032-6](https://doi.org/10.1016/s0389-4304(99)00032-6)
- [5] 李毅磊, 闫鹏程, 黄伟, 等. 空气弹簧用橡胶材料的研究进展[J]. 弹性体, 2022, 32(2): 76-82.
- [6] 张迪, 刘琼, 谢济兴, 等. 帘线参数对橡胶空气弹簧垂向刚度的影响研究[J]. 机械设计, 2023, 40(11): 62-68.
- [7] Wang, J., Lv, K., Wang, H., Guo, S. and Wang, J. (2021) Research on Nonlinear Model and Fuzzy Fractional Order  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  Control of Air Suspension System. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **41**, 712-731. <https://doi.org/10.1177/14613484211051854>
- [8] Liu, H. and Lee, J.C. (2011) Model Development and Experimental Research on an Air Spring with Auxiliary Reservoir. *International Journal of Automotive Technology*, **12**, 839-847. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0096-7>
- [9] Chen, Y., Yang, X. and Wang, X. (2002) Testing Analysis on Dynamic Characteristics of Air Springs of Buses. *Automobile Technology*, **10**, 19-21.
- [10] Shi, W., Jiang, W., Huang, Y., Yao, W., Ya, H. and Liu, Z. (2009) Finite Element Analysis of an Air Spring Concerning Initial Pressure and Parameters of Cord Fabric Layer. 2009 *Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications (PACIIA)*, Wuhan, 28-29 November 2009, 496-499. <https://doi.org/10.1109/pacii.2009.5406380>
- [11] Murata, A., Kume, Y. and Hashimoto, F. (1987) Application of Catastrophe Theory to Forced Vibration of a Diaphragm Air Spring. *Journal of Sound and Vibration*, **112**, 31-44. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(87\)80091-3](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(87)80091-3)