

# 基于 APDL 的空气弹簧可靠性分析

黄会荣<sup>1</sup>, 朱怡婕<sup>1</sup>, 高洪伟<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国建筑科学研究院北京建筑机械化研究分院, 河北 廊坊 065000)

**摘 要:**应用 ANSYS 软件中的 APDL 参数化语言, 建立了包含 SHELL181 单元和 SHELL93 单元的空气弹簧有限元模型. 然后, 根据滑动接触状态的特点, 建立了定义接触单元后的有限元模型. 基于 ANSYS 软件中的 PDS 模块对空气弹簧进行概率有限元可靠性分析, 得到了空气弹簧最大应力 (MAXSTR) 和极限状态函数 (DELTS) 的均值、方差以及灵敏度. 通过对灵敏性的分析表明: 当空气弹簧曲囊橡胶材料的许用极限强度 SIGMA 越大时且  $z$  方向弹性模量越小时结构也越可靠.

**关键词:**空气弹簧; 概率有限元; APDL 语言; PDS; 可靠性

**中图分类号:** TH 135

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)05-0726-05

自 1950 年空气弹簧首次运用于汽车悬挂系统以来, 空气弹簧的形式和运用特性都发生了很大变化. 20 世纪 60 年代, 逐渐取代了钢板弹簧作为二系悬挂系统的部件. 从 20 世纪 70 年代起, 欧美采用空气弹簧的车辆逐渐增多. 特别是进入 20 世纪 90 年代, 新型空气弹簧的研制成功后, 在汽车领域, 空气弹簧悬架已经普及, 尤其在高级轿车, 大巴以及商用车上应用最为广泛.

在以往利用有限元研究分析中, 利用不同的理论对空气弹簧做了不同程度研究并提出了改进措施. 本文以上海科曼中客平台 BMR0509 系列全空气弹簧后悬架系统为研究对象, 并确定 1R12-92 空气弹簧的几何参数.

## 1 空气弹簧实体模型的建立及接触单元的定义

首先, 对模型进行分析、简化; 再采用自底向上的建模方式, 通过定义关键点, 由点生线, 由线生面. 最后利用 SHELL181 壳单元建模, 模型建立完成后, 对模型的所有线段进行等分, 再指定各个面的材料属性, 利用 AMASH 命令对其进行网格划分. 利用 SHELL181 单元建立的实体模型划分网格后的壳模型与实体显示模型如图 1 和图 2 所示.

在编程过程中, 通过不断修改空气弹簧的接触分析实常数和单元关键字, 建立了接触单元的有限元模型 (如图 3 所示). 其中, 面与面之间的接触单元定义后图形中显示为沿面的法线方向的一系列短细线.

模型中共包含 3 894 个节点, 2 800 个壳单元 SHELL181, 874 个弹性壳单元 SHELL93, 392 个目标单元 TARGE170 和 1 120 个接触单元 CONTA173. 由于空气弹簧在安装完成后, 曲囊与活塞的接触面积未知, 故在接触分析中可能产生接触的面必须完全

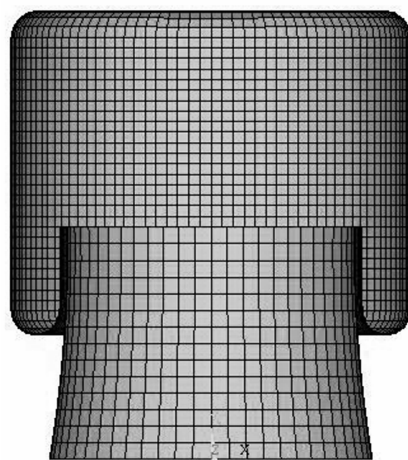


图 1 空气弹簧壳单元实体模型

Fig. 1 The entity model with shell element of the air spring

收稿日期: 2012-07-11 修改稿日期: 2012-10-10

基金项目: 陕西省教育厅专项基金资助项目 (11JK0958)

作者简介: 黄会荣 (1963-), 女, 陕西西安人, 教授, 主要从事现代设计理论与研究.

考虑进来,以保证分析的全面性和结果的正确性.

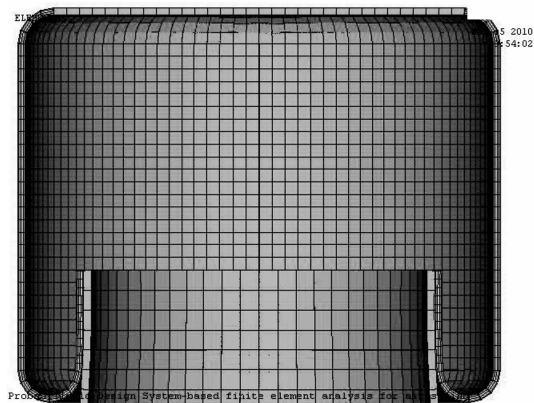


图 2 空气弹簧壳单元模型实体轮廓显示图

Fig. 2 The solid contour mapping of the air spring model with shell element

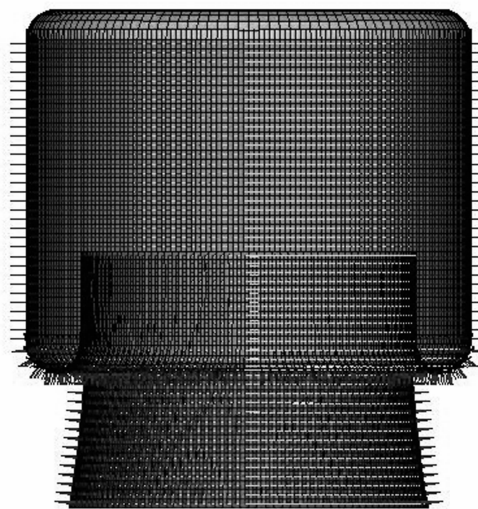


图 3 定义接触单元后的有限元模型

Fig. 3 The finite element model with the contact pairs

## 2 空气弹簧有限元模型的加载与求解

设空气弹簧的两种加载假设模型如图 4、图 5 所示,图中  $P_{\text{内}}=0.55 \text{ MPa}$ ,  $P_{\text{外}}$  为车辆总重力.

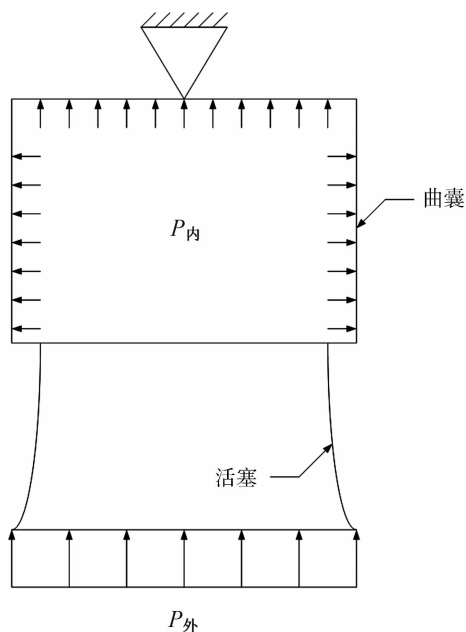


图 4 空气弹簧加载假设模型 I

Fig. 4 The loading hypothesis model I of the air spring

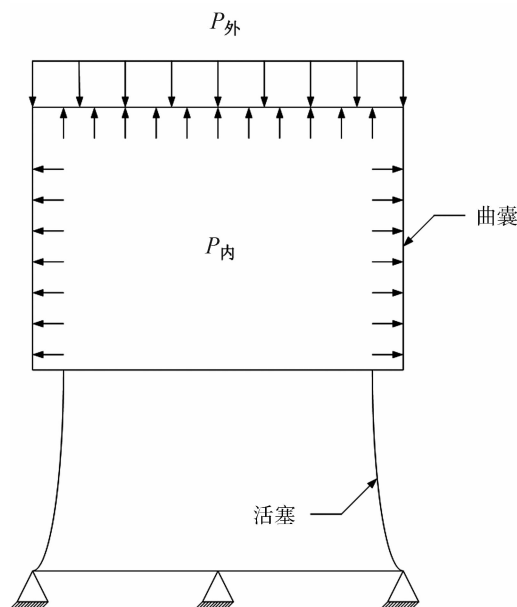


图 5 空气弹簧加载假设模型 II

Fig. 5 The loading hypothesis model II of the air spring

空气弹簧采用的是 1/2 建模. 这里的边界条件为: 剖面的法向位移  $=0$ ; 以法向为轴的转角  $\neq 0$ . (剖面上任何一点的 6 个自由度中一个位移和 2 个转角  $=0$ ). 施加对称位移约束的空气弹簧如图 6 所示.

在实际工况下, 空气弹簧安装在悬架上, 因此在有限元分析中, 只考虑对称位移约束是不够的. 根据空气弹簧加载的第一种假设, 空气弹簧施加的边界条件还包括上盖板的全位移约束; 在实际工况下活塞与曲囊联接环的随动特性, 通过定义节点耦合约束来实现, 在 ANSYS 操作语言中使用 CP 命令来定义耦合约束. 模型施加耦合约束如图 7 所示, 施加全部边界约束条件如图 8 所示.

在路面载荷作用下计算得到空气弹簧受到的最大应力为 6.979 MPa, 根据复合材料手册查的帘线的纵向拉伸强度为 1 200 MPa, 横向拉伸强度为 30 MPa, 因此综合两层芳纶帘线的力学性能, 计算结果是安全的。

### 3 基于 PDS 模块的空气弹簧可靠性

对前述模型使用蒙特卡洛-LHS 抽样法来分析, 随机输出变量最大应力 MAXSTR 和极限状态函数 DELTS 的采样结果均是收敛, 收敛性随着样本空间的增大会更加明显。在应用中如对结果的要求更精确, 可以继续增加采样次数, 本文中采用的 100 次抽样。计算结果显示: 曲囊的最大应力为 6.71 MPa, 最小应力为 6.5 MPa; 极限状态函数 DELTS 的最大值为 0.968 9 MPa, 最小值为 -0.705 MPa。

在 PDS 模块中, 应用 PDSSENS 显示输出结果对随机输入变量的灵敏度, 该问题分析后应用 PDSSENS 命令显示 MAXSTR 对输入变量的灵敏度, 如图 9 所示。

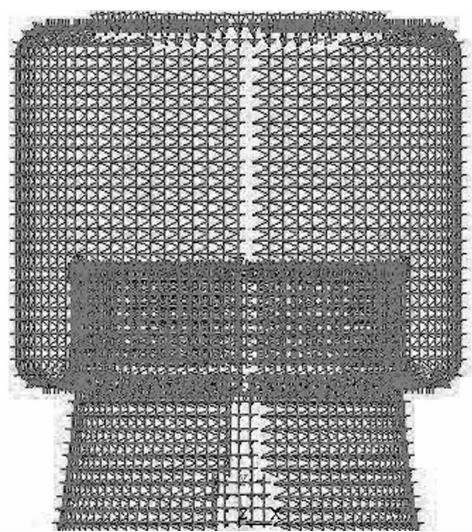


图 6 空气弹簧施加对称位移载荷

Fig. 6 The air spring applied with the symmetric displacement load

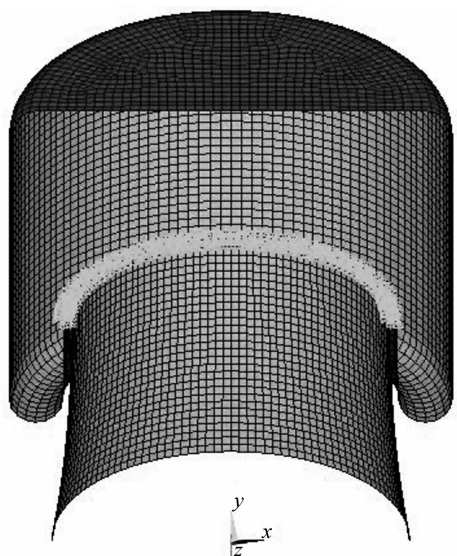


图 7 模型施加耦合约束

Fig. 7 The air spring model applied with the coupling restraint

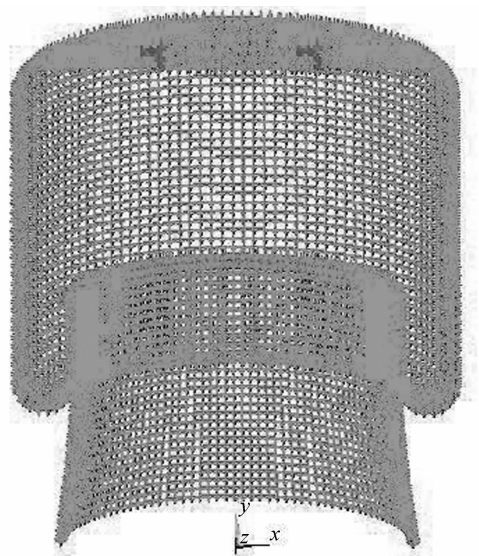


图 8 模型施加全部边界约束

Fig. 8 The air spring model applied with all the boundary constraint

由图 9 可以得出以下结论:

(1) 该模型中影响曲囊结构最大应力的主要因素为曲囊结构材料的主弹性模量 TXM1 (直角坐标系中  $x$  方向的弹性模量) 和主剪切弹性模量 JQM1 (直角坐标系中  $xy$  方向的剪切弹性模量), 其他随机变量对结构的灵敏性影响不明显;

(2) 主弹性模量 TXM1 对结构可靠性的影响程度稍明显一些;

(3) 当 TXM1 和 JQM1 越大时结构就越可靠;

(4) TXM1 和 JQM1 主要体现的是材料本身的物理力学特性, 因此空气弹簧曲囊骨架帘线层的材料是影响空气弹簧可靠性的决定性因素。在设计与开发过程中, 合理的选择曲囊骨架结构帘线层的材料是提高其使用寿命的主要手段。

极限状态函数 DELTS 对输入变量的灵敏度如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 影响该模型可靠性的主要因素为材料的极限强度 SIGMA 和第三弹性模量

TXM3(在直角坐标系中  $z$  方向的弹性模量),其他随机输入变量对极限状态影响不明显.从该结果中可以得出以下结论:

(1)材料极限强度和  $z$  方向弹性模量对结构可靠性影响负相关.当材料极限强度越大时结构越可靠,同时当  $z$  方向弹性模量越小时结构也越可靠,但其值不能无限的减小,只是在满足条件的空气弹簧橡胶曲囊材料中相对较小.

(2)对结构可靠性影响程度而言,SIGMA 占的权重比例最大;

(3)SIGMA 和 TXM3 值的大小主要是由材料本身的力学物理特性决定的.因此该图说明曲囊结构帘线层的材料特性是影响空气弹簧可靠性的决定性因素.

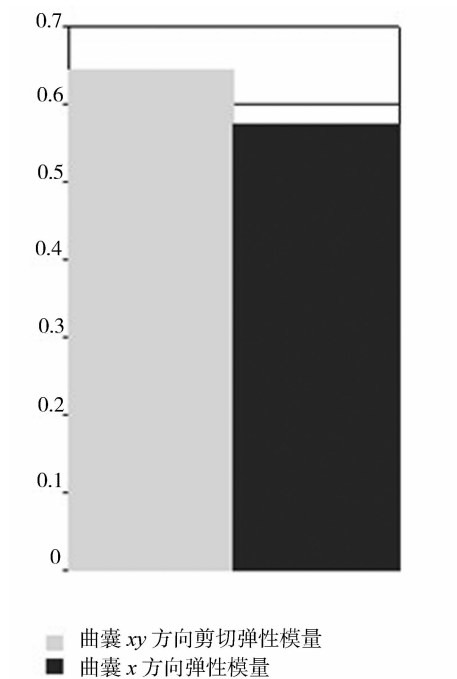


图9 空气弹簧最大应力 MAXSTR  
对输入变量的灵敏度

Fig. 9 Sensitivity of the max stress (MAXSTR)  
of the air spring to the input variables caused

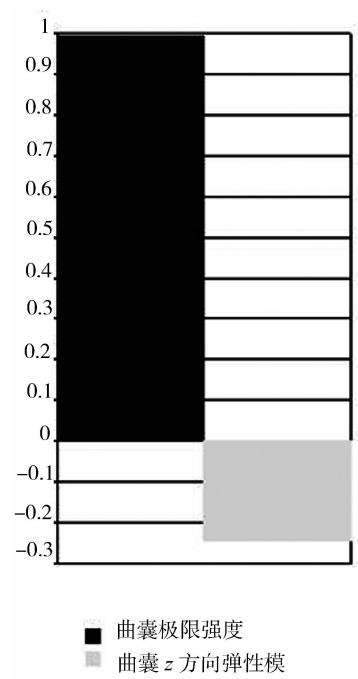


图10 极限状态函数 DELTS  
对输入变量的灵敏度

Fig. 10 Sensitivity of the limit state function  
(DELTS) to the input variables

综上所述,从两个方面考虑了空气弹簧的可靠性,通过对可靠性的分析与研究,得出影响空气弹簧可靠性的主要因素为空气弹簧曲囊骨架帘线层结构的材料.

可靠性分析有限元模型中包括了2 800个 SHELL181 单元、874个 SHELL93 单元、392个 TARGE170 单元、1 120个 CONTA173 单元、3 894个节点;材料的主弹性模量为242 MPa、泊松比0.49.概率分析结果显示:输出变量 MAXSTR 在置信度为95%时的可靠度为0.987 229,可靠度的下限值为0.952 89,上限值为0.984 46.

## 4 结 论

本文给出了应用 SHELL181 单元模拟橡胶复合材料的方法,应用 ANSYS 软件中的 APDL 参数化语言,建立了包含 SHELL181 单元、SHELL93 单元的有限元分析模型.然后,根据滑动接触状态的特点建立了定义接触单元后的有限元模型.针对最常见的 B 级路面情况,研究了动态载荷作用下的空气弹簧模型.

最后,应用 PDS 模块,定义了14个随机输入变量和2个输出变量,通过100次分析循环,完成了可靠性分析过程.灵敏性的结果表明:合理的选择空气弹簧曲囊帘线层的材料是提高其使用寿命的主要手段.

## 参考文献 References

- [1] 高洪伟. 基于 ANSYS 的空气弹簧可靠性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.  
GAO Hong-wei. The reliability analyses of air spring[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010.
- [2] 吴善跃, 黄映云. 空气弹簧刚度的有限元分析方法[J]. 海军工程大学学报, 2001(6): 94-98.  
WU Shan-yue, HUANG Ying-yun. Analysis of air-spring's stiffness by finite element method[J]. Journal of naval university of engineering, 2001(6): 94-98.
- [3] 李锋祥, 杨卫民, 丁玉梅. APDL 实现空气弹簧动态试验仿真[J]. 系统仿真学报, 2007(1): 437-440.  
LI Feng-xiang, YANG Wei-min, DING Yu-mei. The Simulation of Dynamic Test of Air-spring by APDL[J]. Journal of System Simulation, 2007(1): 437-440.
- [4] 袁春元, 周孔元, 王国林, 等. 车用空气弹簧力学性能仿真及试验研究[J]. 农业工程学报, 2008(3): 38-41.  
YUAN Chun-yuan, ZHOU Kong-kang, WANG Guo-lin, et al. Simulation and experimental investigation of mechanical property of air spring for vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(3): 38-41.
- [5] 赵洪伦, 沈 钢, 张广世. 基于空气弹簧非线性横向刚度的车辆动力学仿真[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002(11): 167-171.  
ZHAO Hong-lun, SHEN Gang, ZHANG Guang-shi. The Simulation of Vehicle dynamics based on The Nonlinear Transverse stiffness of Air spring[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002(11): 167-171.
- [6] 李锋祥. 基于 APDL 的空气弹簧力学性能有限元分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2003.  
LI Feng-xiang. The finite element analyses about Mechanical properties of air spring based on APDL[D]. Beijing: Beijing University of Chemical, 2003.
- [7] 徐 军. 基于有限元的商用车膜式空气弹簧垂直刚度特性分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2006.  
XU Jun. The Vertical Stiffness Properties of Air Spring in Commercial Vehicle based on Finite Element[D]. Guiyang: Guizhou University, 2006.
- [8] 郑明军, 林 逸, 王海花, 等. 多曲囊式空气弹簧非线性弹性特性研究[J]. 振动与冲击, 2009(8): 11-15.  
ZHENG Ming-jun, LIN Yi, WANG Hai-hua, et al. Nonlinear stiffness characteristics of multilayer cystiform air spring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009(8): 11-15.
- [9] 黄会荣, 郝际平, 黄 义. 考虑横向剪切变形厚扁壳的动力方程[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 620-626.  
HUANG Hui-rong, HAO Ji-ping, HUANG Yi. Vibration equations of the thick flat shells by transverse shearing deformation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 620-626.

## Reliability research of air spring based on APDL

HUANG Hui-rong<sup>1</sup>, ZHU Yi-jie<sup>1</sup>, GAO Hong-wei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical &amp; Electrical Engineering, Xi'an Univ. of Arch. &amp; Tech., Xi'an 710055, China;

2. Beijing Construction Mechanization Research Branch of China Building Science Research, Beijing 065000, China)

**Abstract:** The finite element model of air spring, including unit SHELL181 and SHELL93, is established by the parametric language APDL of ANSYS. Then, according to the characteristic of sliding contact state, the finite element model with contact unit is established. The probability finite element research of air spring is analyzed by the PDS module of ANSYS. The air spring maximum stress and the average, variance, sensitivity of the limit state function are worked out.

**Key words:** air spring; probability finite element; APDL Language; PDS (Probabilistic Design System); reliability