

重型汽车用空气弹簧刚度特性及帘线参数的影响

张俊玲^{1,2}, 王浩宇¹

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550008;

2. 贵州工业职业技术学院 机械与电器工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘 要:为了分析汽车用空气弹簧的刚度特性及影响因素,介绍了空气弹簧的有效承压面积、底座的形状、空气弹簧的初始压力、辅助气室、分子运动过程等影响空气弹簧刚度特性的因素。运用有限元分析软件 ABAQUS,建立了膜式空气弹簧有限元模型,在不同帘线角、帘线层间距、帘线密度、帘线层数等参数条件下对膜式空气弹簧的刚度特性进行了仿真分析。研究表明:帘线参数是影响膜式空气弹簧刚度特性的敏感因素,随着帘线层间距的增加,空气弹簧垂向刚度减小;随着帘线角角度的增加,空气弹簧垂向刚度减小;随着帘线层数增多,空气弹簧的垂向刚度增大;帘线层间距和帘线密度对空气弹簧的垂向刚度影响不大,而帘线角和帘线层数对膜式空气弹簧垂向刚度特性影响较大。

关键词:汽车工程;重型汽车;空气弹簧;ABAQUS;帘线参数;刚度特性

中图分类号:U463.334.2

文献标志码:A

Influence of cord parameters on stiffness characteristics of air springs for heavy vehicles

ZHANG Jun-ling^{1,2}, WANG Hao-yu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550008, Guizhou, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Industry Polytechnic College,
Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: The stiffness characteristics and influential factors of air springs such as effective pressure area, shape of the base site, the initial air spring pressure, auxiliary chamber and the molecule moving process in vehicles were introduced. The FE model of membrane type air springs was established by FEA software ABAQUS. The simulation analysis on stiffness characteristics of membrane type air spring under different cord angles, cord layer spacings, cord densities and cord layers. The results show that the cord parameters are the sensitive parameters which affect the stiffness characteristics of membrane type air springs; with the increase of cord spacing gap, the vertical stiffness of air springs decreases; with the increase of the cord angle, the vertical stiffness of air springs decreases; with the increase of cord layers, the vertical stiffness of air spring increases; and the cord layer gap and the cord spacing density have little effect on the air spring vertical stiffness, but cord angle and cord layer have significant effect. 1 tab, 7

figs, 11 refs.

Key words: automobile engineering; heavy vehicle; air spring; ABAQUS; cord parameters; stiffness characteristic

0 引言

悬架是现代汽车的重要总成之一,它是车架(或车身)与车轴(或车轮)弹性连接机构的总称。悬架的主要任务是传递作用在车轮和车身之间的一切力和力矩,缓和路面对车身的冲击,衰减由此引起的承载系统的振动,保证汽车的行驶平顺性和操纵稳定性,并可降低由车辆动载荷引起的道路损坏程度^[1]。汽车空气悬架系统以空气弹簧作为弹性元件,空气弹簧是在柔性密闭的橡胶气囊中加入压力空气,利用空气的可压缩性进行工作的非金属弹性元件,其弹性恢复力由内部空气压缩反力和空气弹簧有效承压面积变化产生的反力相加之和来提供,具有缓冲、减振及降低噪声等功能。与其他弹性元件相比,空气弹簧具有非线性刚度、较低的固有频率等优点,在汽车悬架上的应用越来越广泛。

空气弹簧在国外汽车上已得到广泛的应用,而在中国,由于受车辆生产技术的影响,空气弹簧的普及率与国外相比有较大差距。因此,加强空气弹簧刚度特性及影响因素的研究,对保证空气弹簧的寿命、提高空气弹簧的运行安全、促进空气弹簧在重型汽车上的推广应用具有积极的意义。目前,空气弹簧的设计和生產主要以试验及经验为依据,在传统的空气弹簧生产过程中,得到囊体参数的变化对空气弹簧刚度特性的影响,需反复试验修改试件参数,耗时长,成本高^[2-3]。为此,本文采用有限元软件 ABAQUS,建立有效的有限元模型,用不同帘线角、帘线层间距、帘线密度、帘线层数等参数进行了空气弹簧刚度特性的仿真分析,缩短了时间,节约了成本,可为空气弹簧的数字设计提供参考。

1 空气弹簧刚度特性

空气弹簧是利用橡胶气囊内压缩空气的反力作为弹性恢复力的一种弹性元件,刚度是空气弹簧的重要性能参数,可通过理论计算和试验 2 种途径确定^[4]。空气弹簧刚度特性的一般表达式为

$$K = p_i \frac{\partial A_e}{\partial s} + n(p_0 + p_i) \frac{A_e^2}{V} \quad (1)$$

式中: K 为空气弹簧的垂直刚度; p_i 为橡胶气囊内气

体工作压力; p_0 为大气压力; s 为空气弹簧行程; A_e 为空气弹簧有效承压面积; V 为空气弹簧的气体容积; n 为多变指数, n 的选择取决于空气弹簧变形的速度,当空气弹簧缓慢振动时,弹簧内的气体状态变化可视为等温过程, $n \approx 1$,当空气弹簧剧烈振动时,弹簧内气体状态的变化接近为绝热过程, $n \approx 1.3 \sim 1.4$ 。

2 空气弹簧刚度特性影响因素

2.1 有效承压面积

有效承压面积 A_e 是指加于空气弹簧上的承载力与空气弹簧内部空气压力 p_i 相平衡时,空气弹簧的横断面积。通常空气弹簧变形时,有效承压面积 A_e 将发生变化,并且不同结构形式的空气弹簧,在不同的弹簧行程 s 上,其有效承压面积 A_e 的变化也不一样。图 1 为双曲囊式、配圆柱形底座和配夹持形底座的膜式空气弹簧在不同初始压力下,3 个不同弹簧位置上有效承压面积 A_e 的特性曲线。

由图 1 可见,与囊式空气弹簧相比较,膜式空气弹簧的刚度特性曲线比囊式空气弹簧平缓的多,膜式空气弹簧刚度比囊式空气弹簧刚度要小。这是因为,膜式空气弹簧在正常的工作范围内,其有效承压面积变化率比囊式空气弹簧小的缘故。

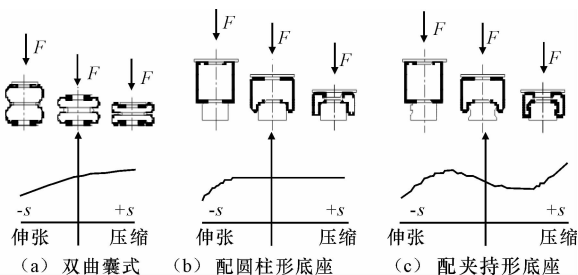


图 1 不同结构形式空气弹簧有效承压面积对刚度特性的影响

Fig. 1 Effects of effective pressure areas of air spring with different structural forms on stiffness characteristics

2.2 底座的形状

已知采用圆柱形底座时,膜式空气弹簧有效承压面积的变化率为 0,此时空气弹簧刚度由橡胶气囊内气体工作压力变化决定;当采用下页图 2(a)中锥角 $\alpha > 0^\circ$ 的正圆锥形底座时,压缩空气弹簧将使底

座的直径逐渐增大,空气弹簧刚度将增大;当采用图 2(c)锥角 $\alpha < 0^\circ$ 中的倒圆锥形底座时,压缩空气弹簧将使底座的直径逐渐减小,空气弹簧刚度将减小。

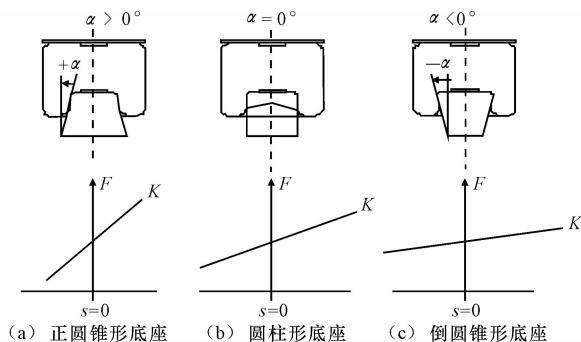


图 2 活塞底座形状对膜式空气弹簧刚度特性的影响

Fig. 2 Effects of piston base shapes on stiffness characteristics of membrane type air springs

2.3 空气弹簧的初始压力影响

空气弹簧的刚度和承载能力可以通过调节空气弹簧的初始压力加以改变^[5]。由空气弹簧刚度特性式(1)可见,空气弹簧的刚度和承载能力均与空气弹簧的初始压力成正比。

当采用圆柱形活塞底座的膜式空气弹簧时,因为其有效承压面积的变化率为 0,则其刚度 K 为

$$K = n(p_o + p_i) \frac{A_e^2}{V} \quad (2)$$

所以有

$$\frac{K}{F} = \frac{K}{p_i A_e} = \frac{n(p_o + p_i)}{p_i} \frac{A_e}{V} = \left(1 + \frac{p_o}{p_i}\right) \frac{n}{h} \quad (3)$$

式中: F 为外加载荷; $h = V/A_e$,表示膜式空气弹簧的有效高度,借助于空气悬架的高度控制阀,膜式空气弹簧的有效高度 h 可保持不变。

这样圆柱形底座膜式空气弹簧的固有频率 f 为

$$f = c \sqrt{1 + \frac{p_o}{p_i}} \quad (4)$$

式中: $c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ng}{h}}$,其值为常数; g 为重力加速度。

式(4)表明了空气弹簧的初始压力与其固有频率的关系,虽然固有频率随初始压力的变化而变化,但在初始压力的许用范围内固有频率的变化幅度很小,如图 3 所示。由此说明,采用空气弹簧悬架将使汽车的行驶平顺性和乘坐舒适性得到极大的改善。

2.4 辅助气室

根据式(1),空气弹簧在工作时,通过加大空气弹簧的气体容积,即设置辅助气室,便可改善空气弹簧特性曲线^[6]。对于膜式空气弹簧,可将底座制成空心内腔作为辅助气室,当主气室即橡胶气囊容积为

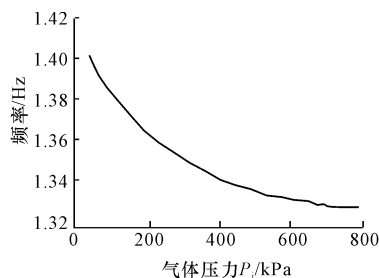


图 3 囊内气体压力对固有频率的影响

Fig. 3 Effect of intracapsular gas pressure on natural frequency

V_b ,辅助气室容积为 V_a 时,膜式空气弹簧的总容积 $V = V_a + V_b$ 。同时,在空气弹簧主气室与辅助气室之间设置节流孔,当空气弹簧受力变形时,主气室与辅助气室之间将产生压力差,气流流经节流孔时,由于阻力而吸收一部分能量,因而具有阻尼作用。节流孔的直径将影响空气弹簧刚度特性,当节流孔直径足够大时,阻尼趋近于 0,则膜式空气弹簧的刚度为

$$K = p_i \frac{\partial A_e}{\partial s} + n(p_o + p_i) \frac{A_e^2}{V_b + V_a} \quad (5)$$

当节流孔直径足够小时,阻尼趋于 ∞ ,则膜式空气弹簧刚度即为无辅助气室时的特殊情况。可见,选择适当的节流孔直径,就能改善空气悬架频率特性。

膜式空气弹簧借助底座空心内腔作为辅助气室,不仅改善了弹簧特性,同时,又没有改变膜式空气弹簧的几何尺寸,更未在空气弹簧以外添加零部件,因而便于在空气悬架中的布置。

2.5 分子运动过程

分子运动过程可用多变指数 n 来表示,主要取决于空气弹簧变形速度,当空气弹簧缓慢振动时,空气弹簧内的气体状态变化可视为等温过程, $n \approx 1$,此时空气弹簧的刚度为静态刚度;当空气弹簧剧烈振动时,弹簧内气体状态的变化接近为绝热过程, $n \approx 1.3 \sim 1.4$,此时空气弹簧的刚度为动态刚度。空气弹簧振动愈剧烈, n 就愈大,相应地空气弹簧刚度就愈大。

3 空气弹簧有限元模型建立

型号为 644 N 的重型汽车膜式空气弹簧,其部分技术指标见下页表 1。

在有限元模型建立后提交作业,空气弹簧发生垂向位移,其内容积变化较大,需要对其内气体进行恰当的模拟^[7-8]。本文采用 ABAQUS 中的流体单元来定义空腔,并施加空腔的压力载荷。利用 Re-

bar 单元来定义胶囊的帘线层数和帘线角。考虑到模型的轴对称性以及垂直刚度的轴对称性,本文的有限元计算模型将空气弹簧沿轴向剖开建立模型。空气弹簧的有限元变形模型如图 4 所示。

表 1 644 N 膜式空气弹簧基本数据

Tab. 1 Basic data of 644 N membrane air spring

工作气压/MPa	0.3~0.8
工作行程/mm	260
总成设计高度/mm	275
总成拉伸最高高度/mm	415
总成压缩最低高度/mm	155

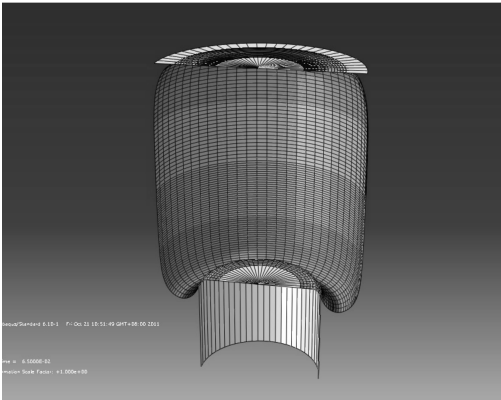


图 4 空气弹簧有限元计算模型

Fig. 4 Finite element model of air spring

4 帘线参数对空气弹簧特性的影响

帘线层是空气弹簧的主要承载部件,本文仅考虑空气弹簧胶囊帘线层的帘线角、帘线密度、帘线层间距和帘线层数对空气弹簧特性的影响。

4.1 帘线角的影响

帘线角的大小对空气弹簧的垂向刚度起决定作用^[9]。在空气弹簧有限元模型中,定义 Rebar 与空气弹簧胶囊子午线夹角为帘线角。图 5 是在其他条件相同而帘线角分别为 30°、45°、60°时的位移-载荷仿真曲线。由图 5 可知,空气弹簧的垂向刚度随帘线角的增大而增大。

4.2 帘线层间距的影响

定义相邻两帘线层间距离为帘线层间距。图 6 是在其他条件相同而帘线层间距分别为 1、2、3 mm 时的位移-载荷仿真曲线。由图 6 可知,随着帘线层间距的增加,空气弹簧垂向刚度有所减小,但影响不大^[10]。

4.3 帘线层数的影响

为了满足各向异性的要求,胶囊至少需要由 4

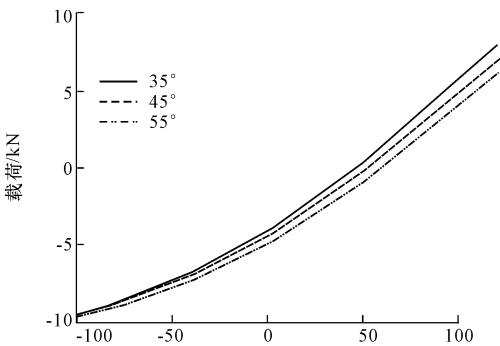


图 5 不同帘线角时空气弹簧垂向位移-载荷曲线
(工作气压 0.5 MPa)

Fig. 5 Vertical displacement of air spring under different cord angles-load curve

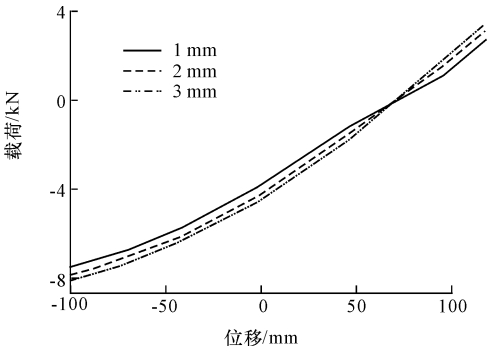


图 6 不同帘线层间距时空气弹簧垂向位移-载荷曲线
(工作气压 0.5 MPa)

Fig. 6 Vertical displacement of air spring under different cord layer spacings-load curve

层不同方向的纤维构成^[11]。图 7 是在其他条件相同而帘线层数分别为 2、4、6 层的位移-载荷仿真曲线。由图 7 可以得出,帘线层数对刚度的影响较大,随着帘线层数增多,空气弹簧的垂向刚度增大且变化较明显。

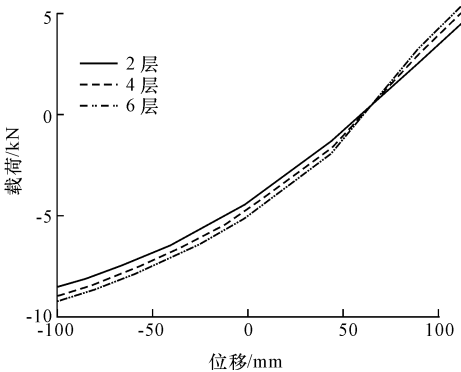


图 7 不同帘线层数时空气弹簧垂向位移-载荷曲线
(工作气压 0.5 MPa)

Fig. 7 Vertical displacement of air spring under different cord layers-load curve

5 结 语

(1) 通过采用非线性有限元技术,利用 ABAQUS 非线性有限元软件,建立了膜式空气弹簧有限元模型,对影响空气弹簧刚度特性的帘线参数进行了仿真模拟。结果表明:随着帘线层间距的增加,空气弹簧垂向刚度减小;随着帘线角角度的增加,空气弹簧垂向刚度减小;随着帘线层数增多,空气弹簧的垂向刚度增大;在本次研究中帘线层间距和帘线密度对空气弹簧的垂向刚度影响不大。

(2) 研究表明,帘线参数是影响膜式空气弹簧刚度特性的重要因素。不同的帘线角、帘线间距、帘线密度和帘线层数对空气弹簧的特性均有影响,在帘线角、帘线层间距、帘线密度和帘线层数中,帘线角和帘线层数对膜式空气弹簧垂向特性影响较大,可以适当增大帘线角和增加帘线层数来增大空气弹簧的承载能力,提高空气弹簧垂向刚度特性。

参考文献:

References:

- [1] 何 锋,张 军,曹龙田,等.基于 ADAMS 的重型汽车道路友好性仿真研究[J].拖拉机与农用运输车,2010,37(4):54-56.
HE Feng,ZHANG Jun,CAO Long-tian,et al. Simulation study of road friendly suspension for heavy vehicle based on ADAMS[J]. Tractor & Farm Transporter,2010,37(4):54-56. (in Chinese)
- [2] 李 芾,付茂海,黄运华,等.车辆空气弹簧动力学参数特性研究[J].中国铁道科学,2003,24(5):91-95.
LI Fu,FU Mao-hai,HUANG Yun-hua,et al. Research on car air spring dynamics parameter traits[J]. China Railway Science,2003,24(5):91-95. (in Chinese)
- [3] 陈灿辉,谢建藩,陈娅玲.汽车悬架用空气弹簧的非线性有限元分析[J].汽车工程,2004,26(4):468-471.
CHEN Can-hui,XIE Jian-fan,CHEN Ya-ling. Nonlinear finite element analysis for air spring used in automotive suspension[J]. Vehicle Engineering,2004,26(4):468-471. (in Chinese)
- [4] 何 锋,徐 军,杨洪江,等.商用车空气悬架的关键技术分析[J].农机化研究,2005(2):236-240
HE Feng,XU Jun,YANG Hong-jiang,et al. Analysis of key technologies of air suspensions for commercial vehicles[J]. Journal of Agricultural Mechanization

Research,2005(2):236-240. (in Chinese)

- [5] 郑明军,陈潇凯,林 逸.空气弹簧力学模型与特性影响因素分析[J].农业机械学报,2008,36(5):10-14.
ZHENG Ming-jun,CHEN Xiao-kai,LIN Yi. Dynamical model and characteristics analysis of air spring [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,36(5):10-14. (in Chinese)
- [6] Toyofuku K. Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber[J]. JSAE Review,1999,20(3):350-355.
- [7] 庄 苗,由小川,廖剑晖,等.基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
ZHUANG Zhuo,YOU Xiao-chuan,LIAO Jian-hui,et al. Finite element method of analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2009.
- [8] 周孔亢,牛 光,吴琳琪.膜式空气弹簧动态特性有限元分析与实验研究[J].拖拉机与农用运输车,2009,36(3):81-83.
ZHOU Kong-kang,NIU Guang,WU Lin-qi. The finite element analysis and experiment study on dynamic characteristics of diaphragm air spring[J]. Tractor and Farm Transporter,2009,36(3):81-83. (in Chinese)
- [9] 鲍卫宁,陈立平,张云清,等.基于腔体单元和 Rehar 单元的空气弹簧性能分析[J].汽车技术,2007(10):21-24
BAO Wei-ning,CHEN Li-ping,ZHANG Yun-qing,et al. Performance analysis of air spring based on cavity unit and rebar unit[J]. Automobile Technology,2007(10):21-24. (in Chinese)
- [10] 叶珍霞,朱海潮,鲁克明,等.囊式空气弹簧刚度特性的非线性有限元法研究[J].振动与冲击,2006,25(4):94-97
YE Zhen-xia,ZHU Hai-chao,LU Ke-ming,et al. Study on stiffness characteristics of air spring with nonlinear finite element method[J]. Vibration and impact,2006,25(4):94-97. (in Chinese)
- [11] 袁春元,周孔亢,吴琳琪,等.车用空气弹簧有限元分析方法[J].机械工程学报,2009,45(6):262-266.
YUAN Chun-yuan,ZHOU Kong-kang,WU Lin-qi,et al. Finite element method to analyze vehicle air spring [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(6):262-266. (in Chinese)