

膜式空气弹簧刚度特性影响因素研究

姚丽华¹, 蔡永周²

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要:介绍空气弹簧刚度特性的影响因素, 并利用有限元分析软件 ABAQUS 建立膜式空气弹簧有限元模型, 分析气压对空气弹簧刚度特性的影响。结果表明, 气压是影响膜式空气弹簧刚度特性的重要因素, 随着气压的提高, 弹簧的垂向和横向承载能力均增大。

关键词:空气弹簧; 刚度特性; 气压

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2012)07-0428-04

空气弹簧具有变刚度等许多优点, 已广泛应用于火车、汽车和机械设备上。空气弹簧用于汽车和火车上可有效改善车辆的行驶特性, 提高车辆的运行品质。在国外, 空气弹簧在车辆上已得到较广泛的应用, 而我国在车辆上的应用还比较少, 因此加强空气弹簧刚度特性影响因素的研究对促进空气弹簧在车辆上的应用有积极的意义。

文献资料^[1-14]表明, 利用有限元法研究空气弹簧刚度取得了很多成果。本研究运用有限元分析软件 ABAQUS 建立有效的有限元模型, 分析气压对空气弹簧刚度特性的影响, 以期对空气弹簧的数字化设计提供参考。

1 空气弹簧刚度特性及其影响因素

1.1 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两种途径确定。空气弹簧刚度特性计算公式^[1]为

$$K = p_i \frac{dA_e}{ds} + m(p_a + p_i) \frac{A_e}{V} \cdot \frac{dV}{ds} \quad (1)$$

式中 K ——空气弹簧垂直刚度;

p_i ——空气弹簧内压力;

p_a ——大气压力;

A_e ——空气弹簧有效承压面积;

s ——空气弹簧行程;

m ——多变指数;

V ——空气弹簧的体积。

空气弹簧刚度特性的一般表达式为

$$K = p_i \frac{\partial A_e}{\partial s} + m(p_a + p_i) \frac{A_e^2}{V} \quad (2)$$

m 的选择取决于空气弹簧变形的速度。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, $m \approx 1$; 空气弹簧剧烈振动时, 弹簧内的气体状态的变化接近为绝热过程, $m = 1.3 \sim 1.4$ 。

1.2 空气弹簧刚度特性影响因素

1.2.1 底座形状

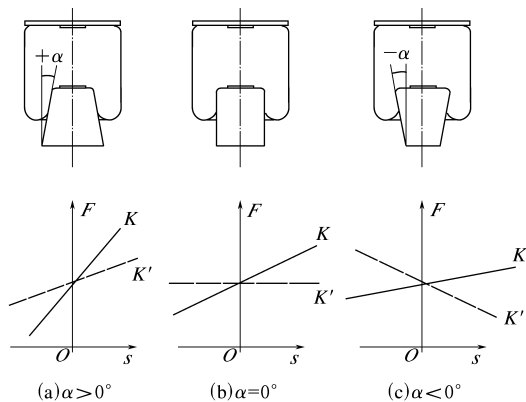
已知采用圆柱型底座时, 膜式空气弹簧有效承压面积的变化率为零, 此时空气弹簧刚度由橡胶气囊内气体工作压力变化决定^[1]。活塞底座形状对膜式空气弹簧刚度特性的影响如图 1 所示。当采用图 1(a)所示的正圆锥型底座时, 压缩空气弹簧将使底座的直径逐渐增大, 空气弹簧刚度将增大; 当采用图 1(c)所示的倒圆锥型底座时, 压缩空气弹簧将使底座的直径逐渐减小, 空气弹簧刚度将减小。

1.2.2 有效承压面积

有效承压面积是指施加于空气弹簧上的承载受力与空气弹簧内部空气压力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将发生变化, 并且结构形式不同, 其有效承压面积随弹簧行程的变化也不一样。双曲囊型、配圆柱

基金项目:贵州省科技厅攻关项目(黔科合 NY[2009]3048)

作者简介:姚丽华(1976—), 女, 贵州岑巩人, 贵州大学讲师, 硕士, 从事汽车零部件 CAD/CAE 研究。



F 为弹簧受力; K 和 K' 分别表示不同气压和底座形状的刚度。

图 1 活塞底座形状对膜式空气弹簧刚度特性的影响
型底座和配夹持型底座的膜式空气弹簧在不同初始压力、3 个不同弹簧位置上有效承压面积的特性曲线如图 2 所示。

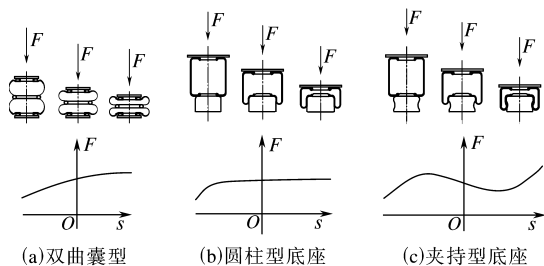


图 2 不同结构空气弹簧有效承压面积
对刚度特性的影响

1.2.3 辅助气室

根据式(1),空气弹簧在工作时,通过增大橡胶气囊的容积,即设置辅助气室,可以改善空气弹簧的刚度特性。对于膜式空气弹簧,可将底座制成空心形式,其内腔作为辅助气室,当主气室即橡胶气囊容积为 V_b 而辅助气室容积为 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,气体流经节流孔时由于阻力作用而吸收一部分能量,因此具有阻尼作用。节流孔的直径将影响空气弹簧的刚度特性,当节流孔直径足够大时,阻尼趋近于零,则膜式空气弹簧的刚度为

$$K = p_i \frac{\partial A_e}{\partial s} + m(p_a + p_i) \frac{A_e^2}{V_a + V_b} \quad (3)$$

当节流孔直径足够小时,阻尼趋于无穷大,即为无辅助气室时的特殊情况。

1.2.4 初始压力

空气弹簧的刚度可以通过调节橡胶气囊内气体的初始压力加以改变。由公式(1)可见,空气弹簧的刚度与其初始压力成正比。

当膜式空气弹簧采用圆柱型活塞底座时,由于其有效承压面积的变化率为零,则其刚度为

$$K = m(p_a + p_i) \frac{A_e^2}{V} \quad (4)$$

因此

$$\frac{K}{F} = \frac{K}{p_i A_e} = \frac{m(p_a + p_i)}{p_i} \cdot \frac{A_e}{V} = (1 + \frac{p_a}{p_i}) \frac{m}{h} \quad (5)$$

式中, h 为膜式空气弹簧的有效高度, $h = V/A_e$ 。

圆柱型底座膜式空气弹簧的固有频率(f)为

$$f = C \sqrt{1 + \frac{p_a}{p_i}} \quad (6)$$

式中, C 为常数, $C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mg}{h}}$ (m 为质量, g 为重力加速度)。

式(6)表明空气弹簧橡胶气囊内气体的初始压力与其固有频率有关,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。

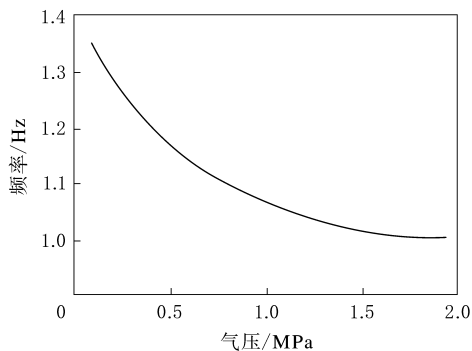


图 3 橡胶气囊内气体初始压力对固有频率的影响

2 空气弹簧有限元模型的建立

空气弹簧的有限元计算模型是涉及固体力学中的非线性及流-固耦合的复杂模型,必须选择能够很好地处理各类非线性问题的有限元分析软件进行模拟计算。

基于膜式空气弹簧所具有的大变形、材料非线性、几何非线性和边界条件非线性等特点,选用 ABAQUS 软件进行有限元分析^[3]。

2.1 非线性分析

在空气弹簧建模过程中,要充分考虑弹簧在大变形位移中存在橡胶材料非线性等非线性问题,具体如下^[4]。

(1)采用非线性特性材料模型描述空气弹簧橡胶气囊的橡胶和帘线层。

(2)对于橡胶气囊发生大位移、大变形的几何非线性,采用大变形理论对空气弹簧大变形量进行描述。

(3)采用非线性边界条件对上盖板与橡胶气囊的接触面积变化进行描述。

(4)橡胶气囊内部气压变化大,应用流体力学对空气弹簧压力变化进行描述。

2.2 空气弹簧囊体模拟

空气弹簧橡胶气囊是由橡胶和帘线组成的复合材料,根据帘线层的层数可将橡胶气囊分为若干铺层,各铺层互成一定角度布置,帘线层是主要的承载部件,呈现出各向异性的特点。橡胶材料属于超弹性材料,表现出近似体积不可压缩性和高度非线性,通常用应变势能(U)来表示其应力-应变关系。其中 Yeoh 模型因能较好地模拟橡胶材料大变形时的应力-应变关系而得到广泛使用,其本构方程为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J - 1)^6 \quad (7)$$

式中 J ——弹性体积比;

I_1 ——扭曲度量;

$C_{i0}, D_i (i=1, 2, 3)$ ——Yeoh 模型参数。

橡胶材料力学特性的表征效果不仅与材料本构模型有关,而且受变形范围影响^[5]。利用同一材料模型,选取不同变形范围的试验数据进行拟合得到的材料参数也不同,考虑到空气弹簧刚度试验中橡胶材料的最大应变均不超过 100%,因此本研究选取最大应变 100% 的单轴拉伸应力-应变数据拟合 Yeoh 模型材料参数^[6]。

空气弹簧囊体的帘线-橡胶复合材料具有明显的各向异性。ABAQUS 软件提供的加强筋(Rebar)模型能较好地模拟这种材料^[4]。具体方法是先将 Rebar 单元定义在面单元上,再将该面

单元嵌入到相应的橡胶实体单元内。同时,还需定义 Rebar 层的参考面、法线方向以及偏离参考轴的初始角度、单根加强筋的横截面积和加强筋间距 3 个 Rebar 特性参数。这种方法不仅可以准确模拟帘线在橡胶实体单元网格划分中的位置,而且模型中橡胶基体和帘线的材料参数可以分别定义,从而避免复杂的复合材料参数计算问题^[6]。

经过网格划分、装配、定义载荷和边界条件等步骤建立有限元模型,模拟空气弹簧发生垂向和横向位移。本研究采用 ABAQUS 软件中的流体单元来定义空腔并施加空腔的压力载荷。考虑到模型的轴对称性以及垂直刚度的轴对称性,本研究取空气弹簧的 1/2 建立模型。空气弹簧的有限元变形模型如图 4 所示。

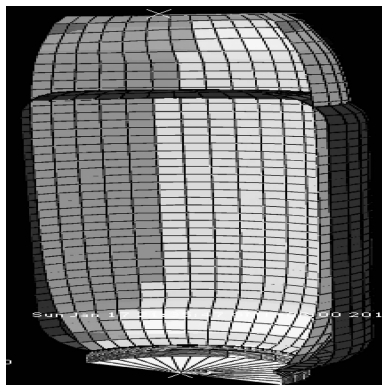


图 4 空气弹簧有限元变形模型

3 气压对空气弹簧刚度特性的影响

3.1 垂向刚度

橡胶气囊内气体的初始压力对空气弹簧的特性有较大影响。空气弹簧在垂向压缩 120 mm、拉伸 140 mm,初始压力分别为 0.3、0.5 和 0.7 MPa 时计算垂向载荷-位移数据,由此所得空气弹簧垂向刚度特性曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,气压对空气弹簧垂向承载能力有较大的影响,随着气压的提高,垂向承载能力逐渐增大。

3.2 横向刚度

空气弹簧在横向拉伸 12 mm、初始压力分别为 0.3、0.5 和 0.7 MPa 时计算横向载荷-位移数据,由此所得空气弹簧的横向刚度特性曲线如图 6 所示。

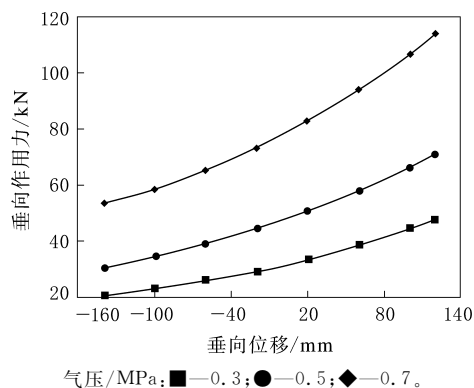
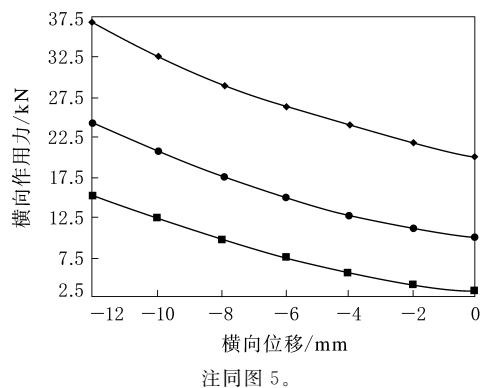


图5 气压对空气弹簧垂向刚度的影响



注同图5。

图6 气压对空气弹簧横向刚度的影响

从图6可以看出,气压对空气弹簧横向承载能力有较大的影响,随着气压的提高,横向承载能力逐渐增大。

4 结语

分析了空气弹簧刚度特性的影响因素,并利用 ABAQUS 非线性有限元分析软件建立膜式空气弹簧有限元模型,分析气压对空气弹簧刚度特性的影响。结果表明,气压对空气弹簧的垂向和

横向刚度有较大影响,是影响空气弹簧刚度特性的重要因素,为今后空气弹簧数字化设计提供了参考,并为分析空气弹簧附加气室、节流孔等参数对空气弹簧刚度特性的影响打下了基础。

参考文献:

- [1] 朱德库. 空气弹簧及其控制系统[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989: 18-49.
- [2] 杨贵春. 商用车空气弹簧结构分析及参数化设计[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [3] 庄茁, 张帆, 岑松, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 187-205.
- [4] 刘文波. 空气弹簧力学特性的有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [5] 应世洲, 陈方, 王国林. 基于 rebar 单元的载重子午线轮胎模型建立及验证[J]. 轮胎工业, 2007, 27(8): 462-465.
- [6] 臧孟炎, 许玉文, 周涛. 三维非线性轮胎的五刚度特性仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 27(8): 129-133.
- [7] 郝玉密. 低频高载荷空气弹簧研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [8] 王家胜, 朱思洪. 带附加气室空气弹簧动刚度的线性化模型研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 72-76.
- [9] 郑明军, 张伟, 冯国胜. 空气弹簧弹性特性及容积特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2010, 10(5): 177-180.
- [10] 顾太平, 何琳, 赵应龙. 一种囊式空气弹簧动刚度混合有限元计算方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 221-223.
- [11] 姜莞, 黄颖, 史文库, 等. 帘层参数对空气弹簧性能的灵敏度分析[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 131-136.
- [12] 陈灿辉, 谢建潘, 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(4): 468-471.
- [13] 周孔亢, 牛光, 吴琳琪. 膜式空气弹簧动态特性有限元分析及试验研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(3): 81-83.
- [14] 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.

收稿日期: 2012-01-25

Study on Influencing Factors of Stiffness Characteristics of Rolling Lobe Air Springs

YAO Li-hua¹, CAI Yong-zhou²

(1. Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The influencing factors of stiffness characteristics of air spring were introduced, and finite element model of rolling lobe air spring was established using ABAQUS to analyze the influence of pressure on the stiffness characteristics of the spring. The results showed that the pressure was the key factor, and vertical and lateral loading capacity of the spring increased with the pressure increasing.

Key words: air spring; stiffness characteristics; pressure