

# 汽车用空气弹簧横向刚度的静态有限元分析

任彦莎 杨卫民\*

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 文中建立了空气弹簧的静态有限元模型。运用有限元分析软件在充分考虑材料非线性、几何非线性和状态非线性的条件下, 分析了在不同情况下空气弹簧的变形情况以及静刚度等性能的变化。得到了空气弹簧横向刚度特性的曲线图。由模拟刚度特性曲线可知, 空气弹簧的横向刚度随着帘线角和压力的增大而增大, 呈非线性特征, 且随着帘线角的增大, 横向刚度趋于线性。

**关键词:** 空气弹簧; 非线性; 有限元法; 横向刚度

**中图分类号:** TQ317.2

空气弹簧广泛地应用于汽车、铁道车辆以及舰船、航空等领域, 是各种高速车辆和城市轻轨车辆普遍采用的关键部件。空气弹簧技术是弹簧技术领域中的一个重要分支。国外应用空气弹簧已有半个世纪的历史, 目前在发达国家, 已获得普遍的应用。在国内, 对空气弹簧的研究在 60 年代就已经开始了, 但未能取得应有的进展<sup>[1]</sup>。近几年来随着各种车辆性能要求的不断提高, 空气弹簧正被愈来愈广泛地应用在各种高速车辆上。空气弹簧的横向刚度特性对车辆的运行品质具有重要的影响<sup>[2]</sup>。对空气弹簧刚度特性进行有效的研究, 可不断地对其进行改进和优化, 进一步提高车辆的各项性能指标。本研究中所采用的有限元分析软件在分析此例过程中具有其他分析软件不具备的优点, 软件可依据材料的属性, 分别定义各材料, 如定义气囊的各组成材料、钢丝圈、帘布层以及内外橡胶层, 分别对每一种材料进行分析, 而不必将气囊简化为单一性质的材料, 进而对在工作过程中起重要作用的部位通过改变其参数就能进行重点分析。本文应用有限元分析软件, 在充分考虑材料非线性、几何非线性以及状态非线性的基础上, 得出了在不同工况下一种空气弹簧的刚度特性曲线, 以及变形和应力变化趋势。

空气弹簧的品种很多, 但结构大体相同, 主要由三部分组成: 上盖板、气囊和下盖板。不同的空气弹

簧只是在局部有所不同<sup>[3]</sup>。本课题所研究的模型由上盖板、橡胶气囊、应急橡胶挡与下底座(兼做辅助气室)构成, 如图 1 所示。

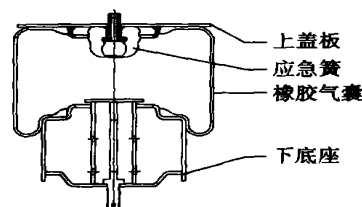


图 1 空气弹簧装配图

Fig. 1 Assembly diagram of air spring

## 1 空气弹簧有限元模型的建立

在建模过程中要充分考虑空气弹簧在材料组成及运动状态上的特殊性。

### 1) 材料非线性

空气弹簧气囊是由帘线层与硫化橡胶复合而成。因为气囊是超弹性材料, 这种材料承受大应变和大位移, 所以要考虑材料非线性。

### 2) 几何非线性

当结构经受大变形时, 其变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。空气弹簧气囊在受力作用下的位移和变形关系已远超过线性理论的范畴, 而属于几何非线性。

### 3) 状态非线性

由接触引起的状态变化是一种很普遍的非线性行为。本文研究的空气弹簧在运动过程中上、下盖板与橡胶气囊的接触状态随时改变。因为属于刚体-柔性面接触, 上、下盖板又是同种材料, 在有限元分

收稿日期: 2004-04-18

第一作者: 女, 1974 年生, 硕士生

\*通讯联系人

E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn

析中可设定为同一个目标实常数,胶囊与上、下盖板的已接触面与即将发生接触的面为同一接触面实常数。

### 1.1 节点的建立

对结构或材料特性简单的物体,建模时可先生成几何实体,再定义单元尺寸,然后进行自动网格划分,按总体坐标定义材料特性,这样就可得到正确的有限元模型。空气弹簧结构复杂,用单一的总体坐标不便模拟,而要借助于每个单元的局部坐标来定义材料特性。故本模型先建立节点再生成单元,其步骤如下。

#### 1) 绘制空气弹簧断面材料分布图

2) 建立数字化的空气弹簧断面节点图 应用 AUTOCAD 软件,在空气弹簧断面材料分布图中,按照材料的不同并依据一定的顺序划分节点,如图 2 所示。

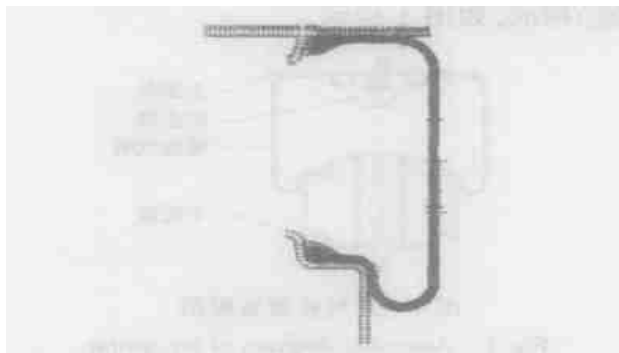


图 2 空气弹簧数字化轮廓图

Fig. 2 Digitized layout of air spring

#### 3) 单元节点的生成

通过 AUTOLISP 程序将数字化轮廓信息节点转化成有限元程序能读取的命令流,并在 ANSYS 程序中运行生成空气弹簧一个断面上的节点,如图 3 所示。将该组节点按照空气弹簧结构周期性,绕



图 3 整体有限元模型

Fig. 3 Whole finite element model

空气弹簧中心轴线沿周向旋转  $5^\circ$ ,拷贝生成另一截面上的一组节点,至此生成空气弹簧一片模型单元的全部节点。

### 1.2 单元的建立

建立模型时按周期性并结合选用单元的特点逐一建立单元。在此基础上,根据空气弹簧模型的对称性,通过旋转拷贝生成整体模型,这样建立了整体三维非线性有限元模型如图 3,整体有限元模型共有单元 91 872 个。上、下盖板的接触状态单元如图 4 所示。



图 4 气囊-上下盖板接触单元模型

Fig. 4 Air-pocket-cover board contact element model

在构建模型时,上、下盖板采用实体单元,胶囊的橡胶层采用高弹单元,帘线层采用层单元。在层单元中,可确定各层的取向角度(其中包括帘线层的帘线角)和厚度等参数。

## 2 横向刚度的有限元分析

在计算横向刚度时,考虑到橡胶气囊中的帘布层是交织排列的,所以必须用弹性力学的方法来解决由帘线交织而成的橡胶气囊端面的横向剪切变形问题。

在计算横向刚度时,一般作如下假设<sup>[4]</sup>:

1) 在横向切变形时,变形前后空气弹簧的高度保持不变,其内容积也不变。

2) 在横向剪切变形时,每个水平断面都是互相平行的,所以可认为水平断面在变形后的截面面积保持不变。

3) 帘线在橡胶气囊的任何地方相对于纬线的布置角度都相同。

4) 在纬线断面处帘线的总根数,在橡胶气囊的任何地方也都是有一定的。

5) 空气弹簧的横向刚度与内压有关,但主要还是取决于帘布层的弹性。内压力对弹簧横向刚度的影响比帘布层弹性的影响小得多,所以在计算中内压力的影响可忽略不计。

### 2.1 边界条件

空气弹簧在垂直方向上保持标准高度不变,以 10 mm 为增量,在上盖板施加横向位移至 50 mm。下盖板受全约束。胶囊内表面施加气压载荷。

## 2.2 结果与分析

帘线角、帘布层数、帘布层厚度及胶囊内压都对空气弹簧的横向刚度有影响<sup>[5]</sup>。在本文中主要考虑帘线角度及胶囊内压对横向刚度的影响。如图5所示为内压相同、帘线角分别为65°和55°时的外压

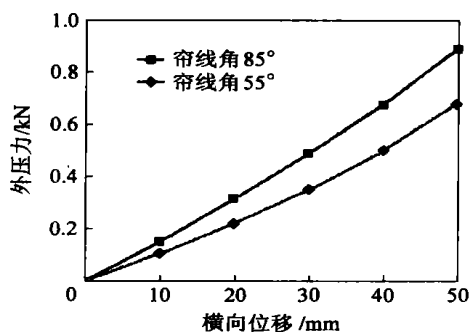


图5 内压相同、帘线角不同时载荷-位移曲线图

Fig. 5 Force-displacement curves for the same pressure and various fabric cords

力-位移曲线。由图可知,空气弹簧的横向刚度随帘线角的增大而增大。曲线呈非线性,但趋近于线性。图6所示曲线的分析条件为帘线角65°,初始内压为0.3、0.4 MPa时的分析结果。如图6所示,可知胶囊内压对空气弹簧的横向刚度有着重要的影响。空气弹簧的横向刚度随着内压的升高而增大。曲线也呈非线性,但随着压力的增大,该曲线趋于线性。

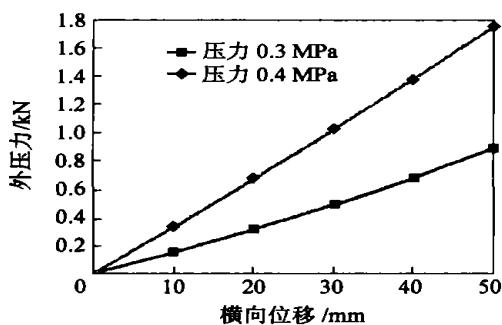


图6 内压不同、帘线角相同时载荷-位移曲线图

Fig. 6 Force-displacement curves for the same fabric cord and various pressure

空气弹簧的变形如图7所示,图7为帘线角为65°,横向位移为40 mm,内压为0.3 MPa时变形图。当外压力和内压不变,帘线角减小为55°时,空气弹簧的最大变形量变小,一侧受拉,一侧受压的效果与帘线角为65°时相比较不显著。而当外压力和帘线角不变,而内压为0.4 MPa时,最大变形量增大,变形效果与0.3 MPa时相比较较显著。在不同情况时的最大变形曲线如图8所示。

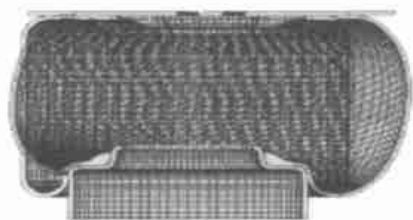


图7 内压0.3 MPa帘线角65°变形图

Fig. 7 Deformation pattern at pressure 0.3 MPa and fabric cord 65°

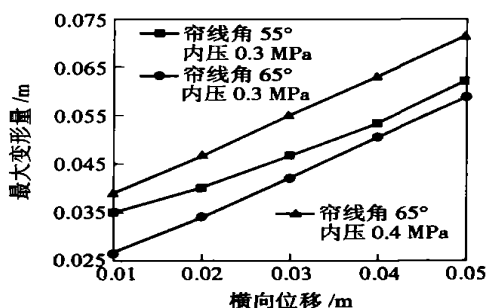


图8 不同工况时最大变形量图

Fig. 8 Max-deformation for various work conditions

由图8可知,当施加横向位移时,空气弹簧一侧受拉,一侧受压;当位移相同,内压相同时,变形随帘线角的增大而减小;当位移相同,帘线角不变时,变形随压力的增加而增大。

如图9所示为内压为0.3 MPa,帘线角为65°,

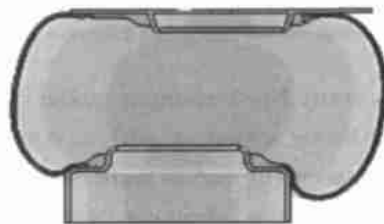


图9 内压0.3 MPa帘线角65°应力图

Fig. 9 Stress diagram at pressure 0.3 MPa and fabric cord 65°

横向位移为40 mm时的应力图。当位移与内压不变,帘线角为55°时,最大应力值变小,出现的位置在帘布层上。而当位移与帘线角不变,内压增大到0.4 MPa时,最大应力值变大,出现最大应力值的位置也在帘布层上。图10中所示为不同工况条件下最大应力值。

由图10可知,当内压相同、位移相同时,帘线层所受的最大应力值随帘线角的增大而增大;当位移相同、帘线角相同时,帘线层所受的最大应力值随胶

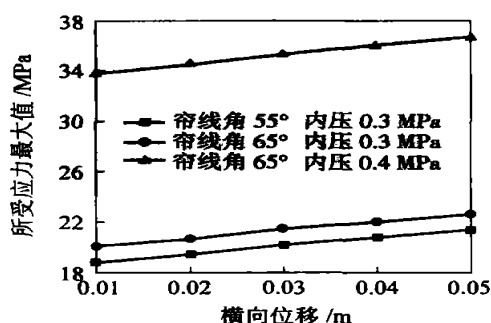


图 10 不同工况时最大应力图

Fig. 10 Max-stress for various work conditions

囊所受内压力的增大而增大。

### 3 结束语

1) 研究中运用了多种非线性有限元方法包括材料非线性、几何非线性和状态非线性分析技术,模拟了自由膜式汽车用空气弹簧的刚度特性,并取得与传统计算公式所得出的空气弹簧的横向刚度随帘线角的增大而增大,随内压的增大而增大相一致的结论,说明此模型的建立是正确的,使用此有限元分

析软件进行分析是可行的,使设计人员在开发阶段就对产品的各项参数有了深入的了解,并为空气弹簧性能的研究及新产品开发提供了一种较好的、经济可行的途径。

2) 本研究表明空气弹簧的非线性特性对其静态刚度性能有显著影响。

3) 本研究表明帘线角是空气弹簧的重要参数之一,可以借助 CAE 仿真分析工具对帘线角进行设计,以满足具体需要。

### 参 考 文 献

- [1] 朱德库, 刘晓杰, 马平. 空气弹簧及其控制系统[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1997
- [2] 赵洪伦, 张广世. 高速客车空气弹簧非线性横向刚度特性研究[J]. 铁道学报, 1999(6): 23 - 25
- [3] 王延. SYS 系列空气弹簧的结构与检修[J]. 运用检修, 1999(12): 4 - 6
- [4] 张英会. 弹簧[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [5] 张广世. 有限元法研究空气弹簧参数对横向特性的影响[J]. 铁道车辆, 2000(9): 56 - 59

## Static finite element analysis of transverse stiffness of air spring used in a car

REN Yan-sha YANG Wei-min

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A static finite element model of an air spring was given. The deformation and the change of the performance of the air spring on various conditions were analyzed by application of the finite element method. The force and displacement curves were obtained. From these curves, the stiffness of the transverse direction increases with increase in the fabric cord and the pressure.

**Key words:** air spring; non-linear; finite element method; transverse stiffness

(责任编辑 刘同帅)

## 2004 年度国家科技奖励大会在北京人民大会堂举行

3 月 28 日上午, 2004 年度国家科技奖励大会在北京人民大会堂举行, 党和国家领导人出席了会议, 并为获奖者颁奖。2004 年度共有 300 个项目获奖, 国家最高科学技术奖首次出现了空缺。连续空缺六年的国家技术发明奖一等奖首次产生, 两个项目获一等奖, 26 个项目获二等奖; 国家自然科学基金一等奖再度空缺, 28 个项目获二等奖; 16 个项目获国家科学技术进步奖一等奖, 228 个项目获二等奖。5 名外籍科学家分享了本年度的国际科技合作奖。我校段雪教授等完成的“系列新型结构镁基无卤高抑烟无机阻燃剂”项目荣获国家技术发明二等奖, 李群生教授等完成的“高粘度、高自聚等特殊物系精馏新技术的研究开发与应用”项目荣获国家技术发明二等奖。