

离散求和法应用于空气弹簧 ANSYS 多步分析

李锋祥 丁玉梅 杨卫民*

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 列举了空气弹簧 ANSYS 仿真过程中存在的一些问题和难点。介绍了 EQ6111 空气弹簧的结构和材料特点,并针对性地建立了空气弹簧的有限元模型。针对空气弹簧分析过程中所存在的气压载荷问题,采取了多步分析的思路。在此思路的基础之上,采用离散求和法编写胶囊容积计算宏,应用于空气弹簧的垂向和横向静态力学性能分析,并将分析结果与试验结果和前人分析结果进行了比较,取得了较高的模拟分析精度,并且大大提高了仿真过程的连续性和可控制性。

关键词: 空气弹簧; ANSYS; 气压载荷; 多步分析; 离散求和法

中图分类号: TP391.9

引言

空气弹簧是一种新型弹性隔振元件,它具有可调非线性静、动态刚度及阻尼特性。由其组成的隔振系统的固有频率在载荷变化时几乎不变,且该系统能够自动避开共振,从而起到抑制共振振幅的作用^[1]。空气弹簧广泛应用于汽车、铁道车辆以及舰船、航空等领域的动力机械、电子设备、仪器仪表、化工机械等设备。目前针对空气弹簧的研究主要靠理论分析、试验测定和有限元分析三种方法,而有限元分析方法可以缩短产品开发周期,降低费用,从而对空气弹簧的研发有利。前人在此领域做了大量的研究^[2-3]。

目前空气弹簧有限元分析可用的软件主要有 ANSYS、ABAQUS、MARC 等等。ANSYS 具有多种有限元分析的功能,从简单静态分析到复杂非线性动态分析,可用于解决许多工程领域的问题。该程序在求解中允许非线性因素的影响,如塑性、大应变、高弹性、大变形、接触、应力硬化、材料各向异性等^[4],适用于空气弹簧的有限元分析。

由于在利用 ANSYS 软件对空气弹簧进行仿真的过程中,存在诸多的问题和限制。比如 ANSYS 程序本身还无法有效地进行复杂结构的气固耦合模拟分析,而这种耦合在理论上也很难解决,是当今一般力学领域的难题之一^[5]。因此在空气弹簧 AN-

SYS 仿真中,将胶囊中的气体等效为气压载荷并采取多步分析成为当今空气弹簧分析的一个主要思路。胶囊容积的计算也就成为了仿真过程中的一个关键所在。

1 有限元模型

1.1 EQ6111 空气弹簧结构和材料特点

EQ6111 空气弹簧结构与无内胎轮胎相似,胶囊以帘布层为主要受力部分,内有气密型橡胶层,外有耐老化橡胶保护层。另外,为了将帘布层固定并将胶囊与其他部件装配,在胶囊的子口部位装有钢丝圈。空气弹簧胶囊由里层胶、帘布层、外层胶和子口钢丝圈四个部分构成,如图 1 所示。其中里层胶和外层胶属于超弹性材料,帘布层是帘线橡胶复合材料,属于各项异性材料。且空气弹簧胶囊的变形表现出了显著的大变形特性和几何非线性。不仅如此,空气弹簧胶囊和上下盖板之间的约束为接触行为。因此空气弹簧的变形过程伴随着显著的状态非线性。从 EQ6111 空气弹簧结构和材料特点看来,其中包涵了几何非线性、材料非线性和接触非线性等诸多非线性因素。

利用 ANSYS 对 EQ6111 空气弹簧进行仿真,要使得仿真过程尽可能逼近其试验工况。但是由于空气弹簧结构的不规则性和材料的复杂多样性,不得不对其模型采取一些假设和近似:假设在空气弹簧的变形过程中,帘线角和帘线间距保持不变,帘线在胶囊的任何地方相对于纬线的布置角度都相同,因此可以选用 Solid46 层单元描述帘布层;空气弹簧在 ANSYS 中的建模采用由节点生成单元的模式,

收稿日期: 2005-10-18

第一作者: 男,1982 年生,硕士生

*通讯联系人

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

采用低次单元描述模型(考虑计算的代价),则空气弹簧胶囊内外表面曲线由一系列折线近似代替。

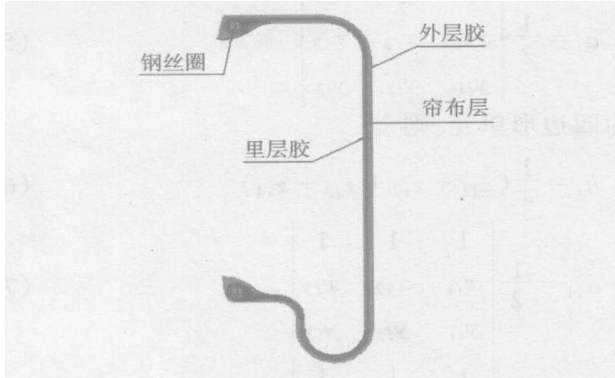


图 1 空气弹簧胶囊结构图

Fig. 1 Capsule Configuration of an air spring

1.2 模型及边界条件

根据空气弹簧结构和材料特点,采取节点生成单元的模式在 ANSYS 中生成 EQ6111 空气弹簧的有限元模型^[6]。上下盖板和钢丝圈视为刚性实体,采用 Solid45 实体单元进行模拟;外层胶和里层胶为橡胶超弹性材料,采用 Hyper58 单元进行模拟;帘布层为各向异性复合材料,采用 Solid46 层单元进行模拟;上下盖板和胶囊之间为面-面接触,视上下盖板为刚性的,采用 Target170 模拟盖板侧刚性目标单元,采用 Conta173 模拟胶囊侧柔性接触单元。

为了使空气弹簧仿真过程尽可能逼近其试验工况,边界条件的确定具有非常重要的意义。由于空气弹簧的变形过程是一个几何非线性过程,因此按照试验的次序施加约束和载荷。对空气弹簧上下盖板施加全约束,内壁施加均布内压载荷,外壁无接触区域施加均布大气压力载荷,求解模拟空气弹簧的充气保压阶段。然后于上盖板上施加渐进的位移载荷,求解分析其加载过程。EQ6111 空气弹簧的整体有限元模型和载荷边界条件如图 2 所示。

2 多步分析和离散求和法

2.1 多步分析思路

空气弹簧胶囊中的气体是仿真过程中的一个难点,ANSYS 的 FSI 分析模式虽然支持结构-流体耦合的分析计算,但它受到结构复杂性和规则性的限制。因此只能将胶囊中的气体以气压载荷的形式作用在胶囊内壁上,在作用过程中,气压载荷随空气弹簧胶囊的变形而变化,气压的变化过程与胶囊容积有关。视胶囊中的气体为理想气体,遵循方程:

$$PV_n = P_0 V_0^n \quad (1)$$

其中, P 为胶囊变形后内压; V 为胶囊变形后容积; P_0 为胶囊初始内压; V_0 为胶囊初始容积; n 为多变指数。

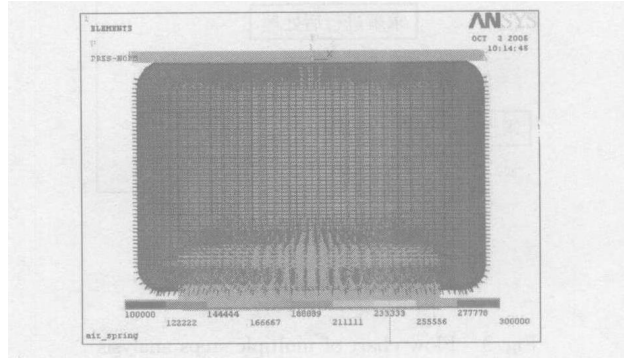


图 2 EQ6111 空气弹簧整体有限元模型及边界条件

Fig. 2 Global finite element model and boundary conditions of EQ6111 air spring

在(1)式中, n 的取值与过程有关,对于静态过程,认为气体状态变化为等温过程,取方程的多变指数 $n = 1$;对于动态过程,认为气体的变化为绝热过程,取方程的多变指数 $n = 1.4$ 。

不仅如此,空气弹簧胶囊的变形还表现出显著的大变形特性和几何非线性。为解决气压载荷问题和几何非线性问题,采取多步分析的思路,即将加载过程离散为足够多的载荷步。由于每一载荷步,胶囊的变形都很小,气压载荷可近似认为不变,利用 ANSYS 分析计算出空气弹簧的变形情况,进而通过胶囊容积计算宏确定胶囊变形后容积 V 的大小,利用(1)式求出 P 。进而改变施加在胶囊内壁的气压载荷,同时外载荷增加一个载荷步长,进行下一载荷步的分析计算^[7]。分析者可以根据自己所要求的精度和时间代价划分步长。多步分析思路流程图如图 3 所示。以这种思路为前提,在节点生成单元的有限元模型基础之上,针对如何在每一载荷步结束后求解胶囊变形后容积 V ,采用离散求和法。下面将对离散求和法作详细介绍。

2.2 离散求和法

采用多步分析思路对空气弹簧进行分析,如何计算每一个载荷步胶囊变形后的容积成为关键所在。本文在节点生成单元的有限元模型基础之上,采用离散求和法计算胶囊变形后的容积。

离散求和法的基础是二重积分的数学思想。让空气弹簧内壁上的各个单元统一向某一坐标平面(假设为面)投影,则囊内容积为

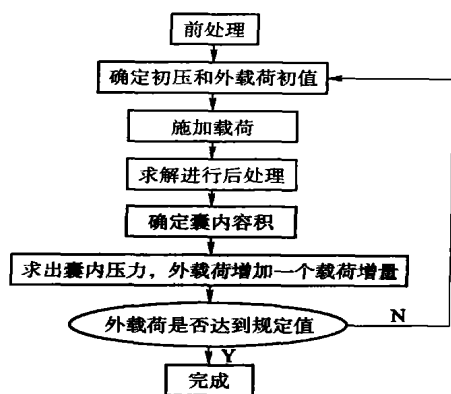


图 3 多步分析流程图

图 3 多步分析流程图

Fig. 3 Flow chart of multiple steps analysis

$$V = \iint z(x, y) dx dy \quad (2)$$

其中 V 为胶囊容积, $z = z(x, y)$ 为空气弹簧内壁的数学方程。

在有限元分析中, ANSYS 程序已经将内壁单元离散化, 而且内壁上各个节点的坐标是确定的(在 ANSYS 可以用 UPCOORD 命令更新任意一个变形时刻的节点坐标值), 从而囊内容积的求解可在这一基础上进行, 则(2)式可转化为

$$V = \sum V_i \quad (3)$$

其中: $V_i = a_i h_i$; a_i 为单元的投影面积; h_i 是单元的平均高度。若为三角形单元, 则

$$h_i = \frac{1}{3} (z_{i1} + z_{i2} + z_{i3}) \quad (4)$$

$$a_i = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} \\ y_{i1} & y_{i2} & y_{i3} \end{vmatrix} \quad (5)$$

若为四边形单元, 则

$$h_i = \frac{1}{4} (z_{i1} + z_{i2} + z_{i3} + z_{i4}) \quad (6)$$

$$a_{i1} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} \\ y_{i1} & y_{i2} & y_{i3} \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$a_{i2} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{i1} & x_{i3} & x_{i4} \\ y_{i1} & y_{i3} & y_{i4} \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$a_i = a_{i1} + a_{i2} \quad (9)$$

只要单元划分较细, 用离散求和法求出的容积与实际容积相差很小。

3 结果及比较

3.1 分析结果与试验结果比较

基于离散求和法编写胶囊容积计算宏, 应用于空气弹簧静态试验仿真。以汽车用空气弹簧 EQ6111 作为研究对象, 将初始内压为 0.3 MPa, 帘线角为 65°, 附加容积为 0 时的垂向静态分析结果和垂向静态试验结果进行比较如表 1。

表 1 本文分析结果与前人分析结果比较

Table 1 Comparison with other researcher's simulation results

位移/mm	文献[8]分析结果			本文分析结果		
	模拟值/N	试验值/N	相对误差/%	模拟值/kN	试验值/kN	相对误差/%
-40	9980.0343	12290.7489	18.80	11.97473	11.234	6.59
-30	10672.2371	12863.4361	17.03	12.6343	11.894	6.22
-20	11131.6000	13325.9912	16.47	13.32236	12.582	5.88
-10	12019.5241	13722.4670	12.41	14.02258	13.282	5.58
0	12221.3000	14207.0485	13.98	14.69794	13.959	5.29
10	12421.5787	14559.4714	14.68	15.37564	14.634	5.07
20	13353.6000	14933.9207	10.58	16.1489	15.408	4.81
30	13834.7000	15682.8194	11.78	16.94095	16.2	4.57
40	14647.0000	16343.6123	10.38	17.75604	17.015	4.36

由表 1 可见, 空气弹簧支反力的模拟结果与试验结果符合良好, 在所有关注点的误差都控制在 10% 以内。而且相对误差值波动较小, 从 4.36% 到 6.59%。这为空气弹簧静态试验仿真总体精度的进一步提高提供了可能空间。

3.2 分析结果与前人分析结果比较

前人曾以 EQ6111 空气弹簧作为研究对象, 对其静态垂向和横向力学性能进行了有限元分析^[8]。现将初始内压为 0.3 MPa, 帘线角为 65°, 附加容积为 0 时, 本文的分析结果与前人的分析结果进行对

比,如表 1 所示。

由表 1 可见,本文的模拟分析结果所取得的模拟精度较前人有了很大提高。主要在于本文在分析过程中采取了较前人更小的载荷步长(5 mm),而恰恰是由于将胶囊容积计算宏嵌入了 APDL 命令流,保证了整个分析过程的连续性和步长的可控制性。下面将多步分析思路和基于离散求和法的胶囊容积计算宏应用于 EQ6111 空气弹簧横向静态试验仿真分析过程,以说明这种方法的通用性。

3.3 离散求和法应用于横向静态分析

基于离散求和法,编写胶囊容积计算宏,应用于初始内压为 0.3 MPa,帘线角为 65°,附加容积为 0 时,空气弹簧横向静态试验仿真分析。分别将内压位移曲线和支反力位移曲线表示如图 4 和图 5 所示。

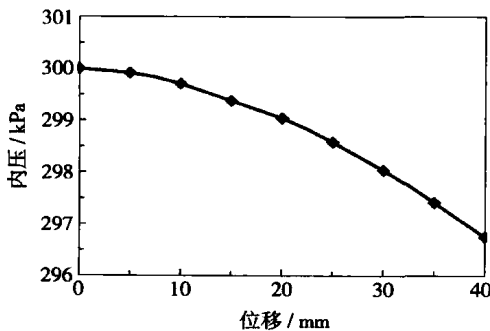


图 4 基于离散求和法的横向静态内压位移曲线

Fig. 4 Transverse static inner pressure-displacement curve based on scatter sum method

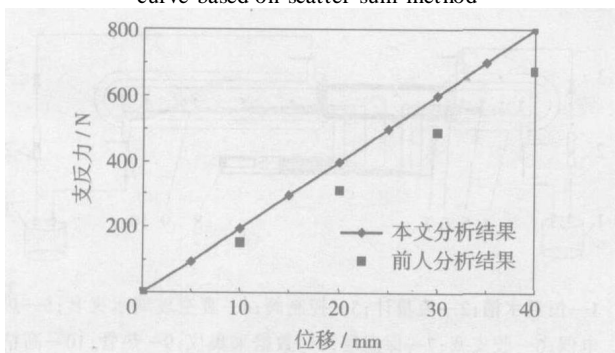


图 5 基于离散求和法的横向静态支反力位移曲线

Fig. 5 Transverse static reaction force-displacement curve based on scatter sum method

由图 4 可见,空气弹簧在横向变形过程中,内压变化甚微,最大变化幅度仅为 3500 Pa,与最初的 300000 Pa 相比仅变化了 1.167%。这也验证了前人的横向变形内压不变的假设^[9]。由图 5 可见, EQ6111 空气弹簧具有很低的横向刚度,且其横向刚度在小变位情况下(位移小于等于 40 mm)基本上

是线性变化的。

4 结论和意义

将基于离散求和法的胶囊容积计算宏应用于 EQ6111 空气弹簧垂向静态试验仿真分析过程,取得了满意的模拟精度。与前人的研究结果进行了比较,在模拟精度、分析过程连续性和分析过程的可控制性方面都大大提高。分析过程一气呵成,减少了人机互动操作,节省了人力和时间。分析者可以根据自己的精度要求和时间代价选择合适的载荷步长,这体现了分析过程的可控制性。

基于离散求和法的胶囊容积计算宏和多步分析思路不仅适用于空气弹簧的静态垂向和横向力学性能模拟分析,也同样适用于其动力学性能模拟分析。本文的研究为空气弹簧乃至其他柔性充气装备的模拟分析提供了一种通用的分析思路。将本文的研究方法全面应用于空气弹簧的静态力学性能模拟分析过程,可考查出帘线角、初始内压和附加容积等主要参数对空气弹簧静态力学性能的影响。这也将是本文的后续研究工作。

参考文献:

- [1] 楼京俊,朱石坚. 长方体形空气弹簧刚度计算[J]. 噪声与振动控制, 2001, 21(4): 22 - 26.
- [2] TOYOFU KU K, YAMADA C, KAGAWA T, et al. Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber[J]. JSAE Review, 1999(20): 349 - 355.
- [3] OU YANG Qing, SHI Yin. The nonlinear mechanical properties of an air spring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003(17): 705 - 711.
- [4] 叶先磊,史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [5] 黄文虎,陈滨,王照林. 一般力学(动力学、振动与控制)最新进展[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- [6] 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, 21(6): 30 - 33.
- [7] 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, 13(6): 94 - 98.
- [8] 杨卫民,陈灿辉,陈亚玲,任彦莎. 汽车减振用空气弹簧的有限元分析[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(3): 105 - 109.
- [9] 任彦莎,杨卫民. 汽车用空气弹簧横向刚度的静态有限元分析[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(3): 95 - 98.

- stress at the liquid-vapor interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(18): 3397 - 3412.
- [10] LIN L C, FAGHRI A. Heat transfer in micro region of a rotating miniature heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(8): 1363 - 1369.
- [11] SUNGJ K, JOUNG K S, KYU H D. Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and the thermal optimization of a miniature heat pipe with a grooved wick structure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(11): 2051 - 2063.

Experimental investigation of heat transfer characteristics inside a flattened mini-axial grooved heat pipe

TAO HanZhong ZHANG Hong ZHUANG Jun

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: An experimental study of heat transfer characteristics in a flattened copper-water mini-axial grooved heat pipe (AGHP) using a round AGHP with an outer diameter of 6 mm and length of 210 mm as the base case is reported. This AGHP was subsequently flattened to heights of 3.5, 3, 2.5 and 2 mm. The temperature distribution along the axial distance, maximum heat transfer rate (MHTR), thermal resistance and evaporation heat transfer coefficient were experimentally determined for both AGHP and flattened AGHPs with different flattening height at several saturated vapor temperatures. The MHTR was found to decrease by 75% when the AGHP was flattened from a height of 6 mm to 2 mm. The thermal resistance was 0.08 /W for both the round AGHP and flattened AGHP when the flattening height was greater than 2.5 mm. When the AGHP was flattened to a height of 2 mm, a significantly higher thermal resistance was observed. The evaporation heat transfer coefficient at the same saturated vapor temperature increased as the AGHP was flattened from 6 mm to 3.5 mm. However, when the AGHP was flattened in the range 3.5 mm to 2 mm, the evaporation heat transfer coefficient decreased.

Key words: grooved axial heat pipe; degree of flattening; thermal resistance; heat transfer limit

(上接第 61 页)

Apply scatter sum method to multiple steps analysis of an air spring by ANSYS

LI FengXiang DING YuMei YANG WeiMin

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract: Some problems and difficulties encountered during the ANSYS simulation analysis process were listed. An introduction into the structural and material characteristics of EQ6111 air spring was given and finite element model was built in consequence. Multiple-step analysis ideology was adapted according to the air pressure problem. Based on the multiple-step analysis ideology, scatter sum method was utilized to compile the capsule volume calculating macro. Finally, capsule volume calculating macro was applied to static vertical analysis and static transverse analysis, leading to much more approving results and a much more successive and controllable simulation process.

Key words: air spring; ANSYS; air pressure load; multiple steps analysis; scatter sum method