

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.022

无摩擦气缸活塞的结构变形分析

徐新正, 孙建辉, 袁巧玲, 单晓杭

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘 要:针对超低频悬挂装置刚体往复运动的无摩擦要求,设计了一套新颖的无摩擦气缸-活塞结构。建立了无摩擦气缸-活塞应力计算模型,得到气缸和活塞结构应力计算公式。利用 ANSYS Workbench 建立无摩擦气缸-活塞的气膜仿真计算模型,计算得到气膜沿活塞轴向的压力分布情况,利用单向流固耦合模块将气膜压力加载到无摩擦气缸-活塞上,基于线性静力结构分析模块 Static Structural 计算无摩擦气缸-活塞应力和应变分布,对结果做出分析,对无摩擦气缸-活塞结构不合理之处提出了解决方案。

关 键 词:无摩擦气缸;活塞;结构变形;ANSYS Workbench 软件

中图分类号:TH138.51

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)02-0087-05

Structural Deformation Analysis of Frictionless Cylinder-Piston

XU Xinzheng, SUN Jianhui, YUAN Qiaoling, SHAN Xiaohang

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: For rigid body frictionless requirements of ultra-low frequency suspension reciprocating motion, an innovative frictionless cylinder-piston structure was presented. A stress calculation model of frictionless cylinder-piston was built. The stress calculation formula of cylinder and piston structure was made. A frictionless cylinder-piston of the air film modal was established by ANSYS Workbench. Air film pressure distribution along the axial piston was appeared after calculation, and the pressure was loaded into the frictionless cylinder piston by the fluid-structure coupling module. Stress and strain distribution of the results was obtained by linear static structure analysis module-Static Structural calculation. The results were analyzed, and solutions were put forward for unreasonable place of frictionless cylinder-piston structure.

Key words: frictionless cylinder-piston; piston; structural deformation; ANSYS Workbench software

随着航天技术的快速发展,对航天设备设计要求越来越高。模态分析是航天设备结构动态设计及设备故障诊断的重要方法。为了进行准确的模态分析,设计出了一套超低频模态测试悬挂系统^[1-2],该系统为气浮悬挂的方式模拟航天设备的失重环境。有些航天设备固有频率低至0.2 Hz,为了满足自由-自由^[3]边界条件,就要求悬挂系统频率更低。该套悬挂系统的技术指标之一为悬挂频率最低至0.03 Hz,即悬挂装置垂直方向刚体运动频率低至0.03 Hz(刚度极低),其核心部件为无摩擦气缸-活塞^[4]。无摩擦气缸-活塞提供了平衡吊挂试件产生重力之外,同时也需要尽可能的降低活塞在运动方向的摩擦力,使其接近于零,再配

合电磁控制子系统补偿活塞运动时引起的气压波动,使悬挂系统的等效刚度接近为零^{[5]934}。

1 无摩擦气缸-活塞工作原理

图1为无摩擦气缸-活塞剖面图。压缩气体从下端通入活塞内部,作用于活塞上端部,形成向上一定的悬挂力,用于平衡吊挂试件的重力,因而可以通过改变气压大小来调节悬挂力的大小,以适应不同重力的悬挂件。压缩空气经过节流孔流入气缸内壁与活塞外壁之间,形成了具有一定支撑力以及刚度的润滑气膜^[6],使气缸与活塞能够做无摩擦相对运动。压缩气体从活塞与气缸间隙上端部和下端部的卸压槽流出通往大气,节流孔两侧润滑气膜的边界均为大气,这样可

收稿日期:2013-10-09;修回日期:2013-10-11

作者简介:徐新正(1987),男,江西丰城人,硕士研究生,主要研究方向为机电一体化。E-mail:710663376@qq.com

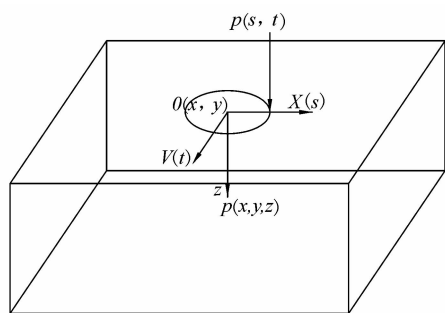


图3 半无限体应力计算模型

Figure 3 Stress calculation module

$$\begin{cases} \sigma_1 = \iint_{\Omega} \frac{P(s, t)}{2\pi R^2 r^2} M(x-s, y-t) ds dt \\ \sigma_2 = \iint_{\Omega} \frac{P(s, t)}{2\pi R^2 r^2} M(y-t, x-s) ds dt \\ \sigma_3 = \iint_{\Omega} \frac{3P(s, t)}{2\pi R^5} z^2 ds dt \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中函数 $M(x, y)$, R, r 分别为

$$M(x, y) = \frac{x^2 - y^2(1-2\nu)R}{R+z} + \frac{(1-2\nu)zy^2}{R} -$$

$$\frac{3x^2 r^2 z}{R^3},$$

$$R = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2 + z^2},$$

$$r = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2}.$$

等效应力 σ_e 为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[\sigma_1 - \sigma_2]^2 + [\sigma_2 - \sigma_3]^2 + [\sigma_3 - \sigma_1]^2} \quad (5)$$

3 ANSYS Workbench 建模仿真计算

3.1 流固耦合仿真流程

对无摩擦气缸-活塞做变形分析,需要对模型做流固耦合^[9-11],流固耦合问题可以分为很多种。按耦合程度分类,可以分为弱耦合问题和强耦合问题。依据流体和固体之间相互影响的程度,如果固体运动很小

对流场的影响不大,则认为是弱耦合,比如金属管道内的水流引起的管壁运动;如果固体变形或运动比较大,其对流场的影响不可忽略,则属于强耦合,比如血液通过血管瓣膜。文中为气体流动对气缸-活塞的应变分析^[12],初步定性为弱耦合。气体对固体作用后,固体变形不大,即流体域的边界的运动很小,故只需做流体对固体的单向耦合。单向耦合求解过程描述如下:先解算出流体域,然后将其中的接触壁面压力作为载荷加载到固体域其具体流程如图4所示。

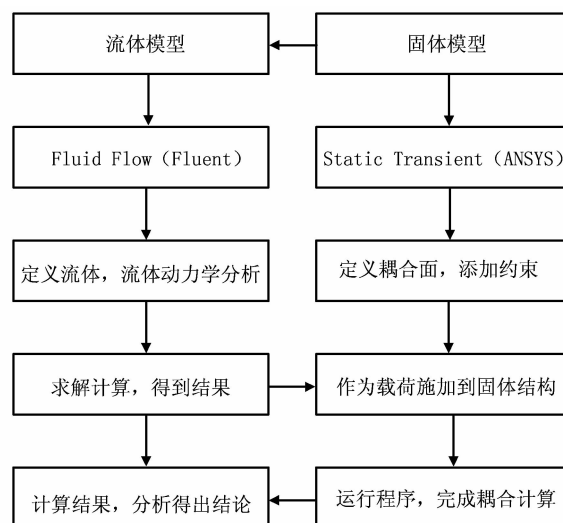


图4 单向流固耦合求解流程图

Figure 4 Fluid-structure coupling solving flow diagram

ANSYS Workbench 是一个非常优秀的工程仿真技术集成平台。首先利用三维建模软件建立气缸-活塞配合模型以及其间隙气膜三维模型,然后利用 ICEM CFD 对超薄气膜划分网格,将其导入到 CFD 仿真软件 Fluent,设定好边界条件,得到气压分布结果,最后对固体模型添加约束并定义耦合面,将求得的压力分布结果作为载荷加载到固体域,利用 Static Structural 模块求解出固体的应变分布。无摩擦气缸-活塞结构尺寸参数^{[5]935}如表1所示。

表1 无摩擦气缸-活塞结构仿真主要参数

Table 1 Simulation main parameters of cylinder-piston structure

气缸 外径 D_0/mm	活塞 直径 D/mm	活塞 长度 L/mm	卸压槽 槽宽 B/mm	卸压槽 槽深 h_2/mm	周向 节流孔 个数 n	轴向 节流孔 排数 m	节流孔 轴向定 位 L/mm	气膜平 均厚度 $h_0/\mu\text{m}$	节流孔 直径 d_0/mm	气腔 深度 h_1/mm	气腔 直径 d_1/mm	进气 气压 p_0/MPa	配合 偏心率 ε
58	40	7	5	1	6	2	12	30	0.3	0.2	3	0.5	0.2

3.2 流体域仿真计算

三维气膜模型的平均厚度 h_0 为 $30 \mu\text{m}$, 将其导入 ICEM CFD 中,对模型进行划分网格。网格划分好后,

导入 Fluent 中,需要选择模型材料、设置网格的边界条件、选择计算求解器、初始化流场等。然后设置迭代次数,进行计算,观察迭代的残差曲线,当残差曲线逐渐

减小并平稳后,计算趋于收敛。设置进口压力为 0.5 MPa,出口压力为大气压力,通过后处理软件 CFD-Post 得到气膜压力分布结果,如图 5 所示。

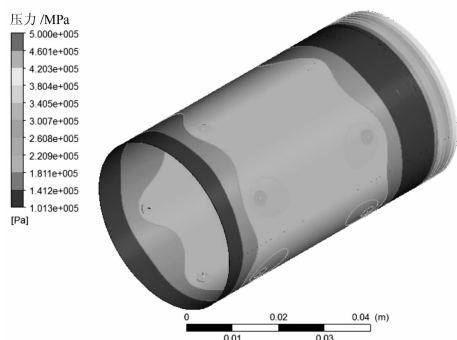


图 5 气膜压力分布图

Figure 5 Pressure distribution diagram

可以看出压力分布基本吻合了式(2)中计算出的压力分布情况。证实了 ANSYS Workbench Fluent 计算结果在一定范围内真实可靠。

3.3 固体域仿真计算

将固体模型其导入到线性静力结构分析模块 Static Structural, 在 Engineering Data 中选择材料并设置材料属性,材料为铝合金 6061,弹性系数为 68.9 GPa,泊松比为 0.33。通过 Model 进入 Mechanical 并对模型自动划分网格,气缸外表面和活塞内表面施加圆柱约束,将上节求得的流体域的压力分析结果施加到无摩擦气缸-活塞上,最后进行求解得到应力结果和变形结果,见图 6-8。

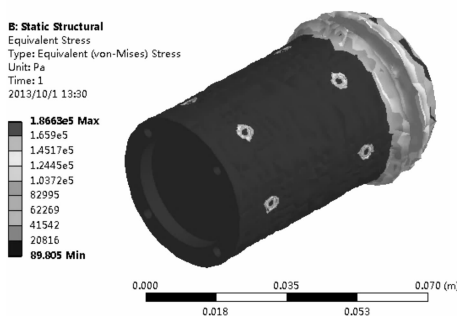


图 6 活塞的应力分析云图

Figure 6 Piston stress analysis diagram

图 6 和图 7 进行对比可以看出,活塞的应力分析云图和应变分析云图一致,即其应力与变形之间保持线性函数关系,即服从胡克定律。由于气缸直径一致,应力分布均匀并且数值较小,所以气缸的变形量很小。活塞在卸压槽处直径为 38 mm,形成台阶结构,在卸压槽的两端形成内应力集中,产生的最大应变 ε_{MAX} 为 2.6285×10^{-6} 。活塞直径 D 为 40 mm,径向最大应变

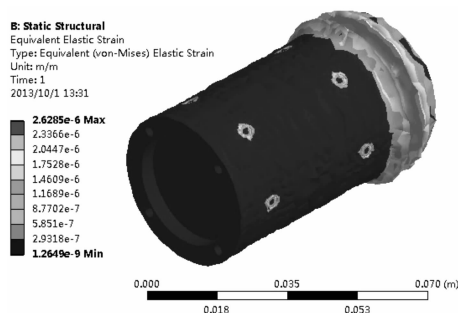


图 7 活塞的应变分析云图

Figure 7 Piston strain analysis diagram

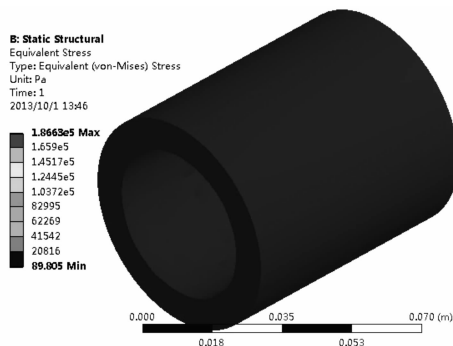


图 8 气缸的应力分析云图

Figure 8 Cylinder stress analysis diagram

变量 $U_{\text{MAX}} = D \times \varepsilon_{\text{MAX}} = 0.10514 \mu\text{m}$ 。

4 结语

迄今为止,无摩擦气缸结构设计还未成熟,本研究特别之处在于从气体压力对无摩擦气缸-活塞变形的角度来设计无摩擦气缸-活塞结构,在卸压槽两端产生了应力集中,解决方法为在该位置倒角或者加大卸压槽位置的直径。文中通过建立模型计算得气体对活塞表面压力分布仿真气膜压力分布进行对比,证实了 ANSYS Workbench Fluent 计算结果在一定范围内真实可靠,另外利用 ANSYS Workbench 求解无摩擦气缸-活塞的变形,可以将我们从繁琐的有限元法编程解方程中解脱出来,将更多时间考虑实际工程问题。研究不足之处为计算和仿真都理想的假定气流为层流,得到气膜的气压分布具有一定的误差。本文完善了无摩擦气缸-活塞结构设计,给出其应力计算模型,这将对无摩擦气缸-活塞结构设计乃至航天设备模态分析都具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 孙建辉,谢明峰,单晓杭,等. 基于 ANSYS 软件的模式测试悬挂系统随动部件有限元分析[J]. 轻工机械, 2009, 27(5): 96-99.
- [2] 孙建辉,王时杰,单晓杭,等. 模态实验悬挂系统附加质量惯性力抑制效果检验技术研究[J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 87-90.

(下转第 94 页)