

汽车复合材料制动缸的模态分析

孟春玲 张 力 田正兵 叶都长

(北京工商大学机械自动化学院,北京 100037)

摘要 结合现代测试手段和模态分析技术,以 EX1015 型汽车制动缸为例,对自行研制的 3 种汽车复合材料制动缸和金属制动缸进行了模态实验和有限元模态分析,得到了模态参数,研究结果为振动、疲劳和噪声等问题的进一步研究奠定基础,为汽车复合材料制动缸的工业化生产提供理论和实验基础。

关键词 汽车制动缸 复合材料 模态分析

为了适应汽车零部件向着轻量化、低成本、长寿命方向发展的需要,复合材料在汽车上的应用越来越广泛。各种轻、微型客货车均采用液压制动,制动缸是汽车液压制动系统采用的活塞式制动蹄的张开机构。随着我国汽车工业的不断迅猛发展,对制动缸的需求非常可观。目前国内生产的制动缸是用金属铸造成型,用复合材料代替金属制造制动缸具有减重、减振降噪、节约能源、保护环境等一系列的优点^[1]。汽车复合材料制动缸已经在国外得到了广泛的应用^[2],而国内汽车复合材料制动缸的研究还处于起步阶段,迄今为止尚未见到有关汽车复合材料制动缸生产工艺和工业化应用方面的相关报道。

汽车制动缸的结构较为简单,其缸筒为通孔,需搪磨。多数制动缸有 2 个等直径活塞,少数有 4 个等直径活塞。EX1015 型汽车制动缸见图 1,它有一个进油孔和一个出油孔,进油孔和出油孔相对制动缸轴线对称分布,两个用于安装的螺栓孔也呈对称分布。笔者根据汽车制动缸的使用性能要求,进行了汽车复合材料制动缸的材料设计和成型工艺研究,经过反复试验成功研制出了镁酚醛树脂/玻纤(GF)复合材料制动缸、环氧树脂(EP)/GF 复合材料制动缸、不饱和聚酯树脂(UP)/GF 复合材料制动缸。在此基础上,笔者通过实验模态分析和计算模态分析,对 3 种新型复合材料制动缸和传统金属制动缸进行了振动性能的对比研究。

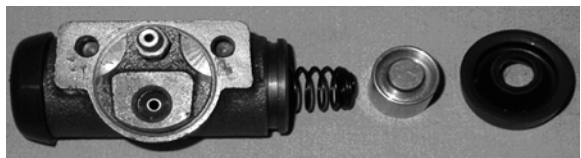


图 1 EX1015 制动缸

1 模态分析理论

模态分析是研究结构动力特性的一种近代方法,是系统辨别方法在工程振动领域中的应用。振

动模态是弹性结构的固有的、整体的特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以通过实验或计算取得。如果通过实验将采集的系统输入与输出信号经过参数识别获得模态参数,称为实验模态分析;如果模态参数是由有限元计算的方法取得的,称为计算模态分析。

模态分析实质是一种坐标变换的过程。它建立了从物理模型到模态模型之间的桥梁,建立了频率响应函数与系统的动态特性之间的关系。模态分析必须遵循以下几个基本假设:①线性假设;②时不变假设;③可观性假设;④互易性假设。

在上述假设条件下,弹性体结构动力学的振动方程为:

$$M \ddot{\delta} + K \dot{\delta} + C \delta = F(t) \quad (1)$$

式中: M 、 K 、 C 分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $F(t)$ 是随时间变化的载荷向量; $\ddot{\delta}$ 、 $\dot{\delta}$ 、 δ 分别是节点各自由度方向上的加速度、速度和位移向量^[3]。

当不受外载荷且忽略阻尼时,结构的无阻尼自由振动方程为: $M \ddot{\delta} + K \delta = 0$, 其解是一组简谐振动的叠加。设方程的解为: $\delta = X \cos \omega t$, 则可得齐次方程组: $(K - \omega^2 M) X = 0$ 。因自由振动时各自由度的振幅 X 不可能全部为 0, 因此要有非零解, 系数矩阵行列式的值必须为 0, 即: $|K - \lambda M| = 0$, 其中 $\lambda = \omega^2$ 。在 n 自由度系统中, 矩阵 K 和矩阵 M 均为 n 阶方阵, $|K - \lambda M| = 0$ 则为 λ 的 n 阶高次方程, 求 λ 值的问题也就是求广义特征值问题。在求得方程特征值和特征向量后, 就可以求得结构的各阶固有频率和振型。

2 制动缸的实验模态分析

近十多年来,由于计算机技术、快速傅立叶变换(FFT)分析仪、高速数据采集系统以及振动传感器、

激励器等技术的发展,实验模态分析得到了很快的发展。实验模态分析大致可分为3个基本过程:①动态数据的采集及频响函数或脉冲响应函数分析;②建立结构数学模型;③模态参数识别。模态测试系统^[4]由激振系统、信号拾取系统、数据采集和数据处理系统三部分组成。激振系统为力锤,力传感器(测量激励信号)安装在力锤上;将加速度传感器(测量测点响应信号)用蜡粘于制动缸体的外表面。

在实验中要注意合理地选择激振点和拾振点的位置,这对于获得正确可靠的模态分析结果十分重要。选择激振点位置时,应尽可能避开各阶模态的节点和节线位置,以便能够激励出尽可能多的模态。同时应使测点响应信号的幅值足够大,使各测量信号有良好的信噪比^[5]。根据汽车制动缸体的形状结构特点以及考虑到传感器的安装等因素,在制动缸体的外表面上均匀对称地布置多个激振点。

由于制动缸的体积较小且材质较刚硬,采用单点激励法进行实验模态分析。实验过程中,制动缸处于自由状态,实验用到的仪器见表1,测力锤激励制动缸,力传感器拾取激励信号并转换为电荷信号,加速度传感器拾取制动缸的响应信号并转换为电荷信号,电荷放大器将电荷信号放大成为适合测量的电压信号,并口数据采集仪将采集的电压信号输入到计算机中,最后使用VibSYS软件对采集到的信号进行处理、分析,在0~20 000 Hz范围内识别出3种复合材料制动缸和金属制动缸的前2阶模态参数(固有频率、阻尼系数和振型系数),见表2。

表1 实验用仪器

名称	型号	生产厂家
测力锤(配5110型力传感器)	5201	北京测振仪器厂
加速度传感器(带CZ系列磁座)	YD-36	北京测振仪器厂
电荷放大器	DHF-4	北京测振仪器厂
并口数据采集仪	P602161	北京波谱世纪科技发展有限公司
VibSYS振动信号采集、处理和分析系统	For Windows V1.02	北京波谱世纪科技发展有限公司

表2 制动缸的实验模态参数

制动缸材料种类	1阶频率/Hz	1阶阻尼系数/%	1阶振型系数	2阶频率/Hz	2阶阻尼系数/%	2阶振型系数
金属	5 685	0.455	0.465	9 595	0.870	0.857
镁酞醛树脂/GF	3 205	0.837	0.583	7 550	1.779	0.742
EP/GF	3 340	0.823	0.589	7 585	1.758	0.767
UP/GF	2 797	0.810	0.561	6 248	1.742	0.715

3 制动缸的计算模态分析

在进行制动缸计算模态分析时假设其为无阻尼系统。对于制动缸这种小阻尼结构,在动力计算中忽略阻尼是允许的,因为就阻尼理论的发展程度及人们对阻尼问题掌握的知识而言,还很难在有限元模型当中较正确地处理阻尼和阻尼分布问题。因此,即使考虑阻尼的因素也很难避免由于阻尼假设引起的误差。

ANSYS 计算模态分析的步骤为:①建立结构有限元模型;②施加约束,定义分析类型、求解方法和输出结果控制;③扩展模态;④结果后处理。ANSYS 提供了7种模态提取方法,分别是Block-Lanczos法、Subspace法、PowerDynamics法、Reduced法、Unsymmetric法、Damped法、QR Damped法。通常模态分析使用前4种方法,其余3种方法只有在特殊情况下使用。在指定模态提取方法后,ANSYS会自动选择合适的方程求解器。

创建制动缸三维实体模型时,根据制动缸的特点,对计算结果影响不大的部分进行了适当的简化,省去了一些对计算结果精度影响不太大的细节,对某些部位作了近似处理,如简化了进油和出油孔局部复杂的接口,去掉了圆角和倒角。选用Solid 92-10node二次实体单元对制动缸的实体模型进行智能网格划分(Smart Size=6),得到制动缸的有限元模型,共有3 977个节点,30 949个单元,见图2。

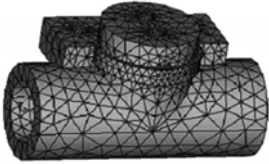
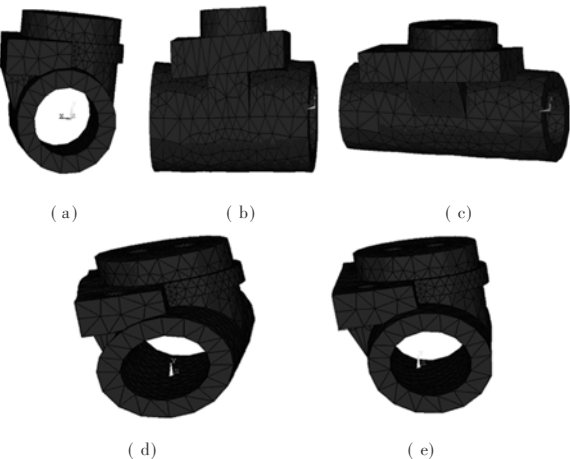


图2 制动缸的有限元模型

笔者选用子空间法^[6]对制动缸进行计算模态分析,提取出了3种复合材料制动缸和金属制动缸的前5阶模态参数,见表3。不同材料制动缸具有基本相同的振型,制动缸的前5阶振型示意图见图3。

表3 制动缸的计算模态参数

阶次	金属缸		镁酞醛树脂/GF缸		EP/GF缸		UP/GF缸	
	频率/Hz	振型系数	频率	振型系数	频率/Hz	振型系数	频率/Hz	振型系数
1	5 898	0.564 5	3 289	0.323 3	3 201	0.619 4	2 883	0.654
2	8 991	0.865 2	7 530	0.413 1	7 439	0.794 3	6 535	0.838 8
3	10 513	0.359 8	8 334	0.460 3	8 775	0.878 9	7 875	0.933 0
4	14 283	0.434 4	10 515	0.279 0	11 687	0.536 9	10 289	0.570 5
5	20 187	0.564 1	14 248	0.386 3	16 779	0.742 2	14 785	0.776 6



a—1 阶振型图, 绕 Z 轴转动; b—2 阶振型图, 绕 X 轴转动;
c—3 阶振型图, 水平摆动; d—4 阶振型图, 垂直摆动;
e—5 阶振型图, 绕 X 轴转动

图 3 振型示意图

4 结论

通过实验模态分析和计算模态分析得到了传统金属制动缸和 3 种新型复合材料制动缸的固有频率、振型等模态参数。从复合材料制动缸和金属制

动缸的模态对比分析中可以看出, 复合材料制动缸的固有频率低于金属制动缸, 模态阻尼高于金属制动缸。这是因为复合材料是由基体相、增强相和界相组成的, 增强体(增强相)与基体树脂(基体相)的粘结界面(界相)具有很好的吸振能力, 使复合材料制动缸具有较高的阻尼系数。阻尼系数是衡量材料减振降噪能力的重要指标, 因此复合材料制动缸比金属制动缸具有更好的减振降噪性能。

参考文献

[1] 张力, 张恒. 制造汽车制动缸的新型复合材料[J]. 汽车工艺与材料, 2004 (2): 31 - 33.
[2] 燕战秋. 未来汽车材料和我国新材料研究课题[J]. 汽车工程, 1993, 15 (3): 180 - 188.
[3] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
[4] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
[5] 林阳, 严明, 饶柱石, 等. 轿车副车架模态试验与分析[J]. 噪声与振动控制, 2003 (1): 12 - 14.
[6] 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.

MODE ANALYSIS OF COMPOSITE AUTOMOBILE BRAKE CYLINDER

Meng Chunling, Zhang Li, Tian Zhengbing, Ye Duchang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

ABSTRACT Integrating modern testing means with mode analysis technique and taking the EX1015 type automobile brake cylinder as an example, mode experiments on metal automobile brake cylinder and three kinds of self-made composite automobile brake cylinder and finite element mode analysis of them were done. Mode parameters were acquired. The research provided the foundation for vibration, fatigue and noise analysis, and provided the theoretical and experimental foundation for industrial production of composite automobile brake cylinder.

KEYWORDS automobile brake cylinder, composite, mode analysis

欢迎查询有关广告

对于在我刊刊登的所有广告, 如读者需要查询更详细的资料或了解情况, 请填好《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料, 以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品, 我社将帮助您联系, 以保证产品质量, 争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No. _____

读者姓名 _____ 单位 _____

通讯地址 _____ 电话 _____ 邮政编码 _____

欲获得《工程塑料应用》 _____ 年第 _____ 期第 _____ 页 _____

广告中有关 _____ 的详细资料。

如空位不够, 请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市 108 信箱杂志社

邮政编码: 250031