

民用飞机机体连接结构动刚度计算 分析及试验验证

任永锋, 严玲

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: **目的** 通过分析和试验得到民用飞机机体连接结构动刚度。**方法** 通过理论分析, 得到动刚度的推导公式, 并运用有限元分析软件进行频响分析, 进而得到连接结构动刚度。运用锤击法得到动刚度试验数据, 并进行试验验证。**结果** 试验结果受信号衰减的影响, 低频范围内较难得到静刚度结果, 但可以通过分析模型得到。试验刚度结果开始波动较大, 但在高频范围趋于稳定, 最终稳定在分析刚度值左右。当动刚度分析结果受频率影响变化不大时, 可以采用动刚度分析均值来作为不同频率下的刚度值。**结论** 通过频响分析得到民用飞机某种结构的动刚度变化曲线, 并通过动刚度试验进行了试验验证, 分析对比结果表明, 有限元分析可以较为准确地得到机体支持结构动刚度, 并用于工程实际。

关键词: 动刚度理论分析; 动刚度有限元计算; 频响分析; 动刚度试验; 力锤试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.09.007

中图分类号: TB122

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)09-0032-05

Dynamic Stiffness Analysis and Test Validation on Connecting Structure of Civil Aircraft

REN Yong-feng, YAN Ling

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

ABSTRACT: Objective To get the dynamic stiffness of civil aircraft by analysis and test. **Methods** Theoretical method was used to get the derivation formula of dynamic stiffness and the FEM software was used to have frequency response analysis to get the dynamic stiffness of connecting structure. Hammer test was also carried out to get data on the dynamic stiffness test and carry out experimental verification. **Results** The test results were affected by signal attenuation. It was hard to get static stiffness under low frequency. But it could be obtained by model analysis. The test result of dynamic stiffness did not fluctuate greatly in the beginning, tending to be stable in the range of high frequency and was finally stabilized near to the stiffness value. When the dynamic stiffness was not affected much by frequency in analysis results, then the average dynamic stiffness in analysis result can be used as the finally stiffness for different frequency. **Conclusion** By frequency response analysis, the curve of dynamic stiffness for connecting structure of civil aircraft is get. The FEM method is confirmed by dynamic stiffness test. From the comparison, it can be seen that the FEM method can get the accurate dynamic stiffness and can be used in the engineering practice.

KEY WORDS: theoretical analysis on dynamic stiffness; fem analysis on dynamic stiffness; frequency response analysis; dynamic stiffness test; hammer test

民用飞机机载设备是飞机极其重要的一部分,而机载设备的连接结构对于机载设备强度而言,又是至关重要的。既不能设计得极其刚硬,导致增重,影响飞机经济性;又不能设计得较软,引起支持刚度不足,导致振动响应被放大或者整体模态不满足振动要求^[1]。

由于民机设计过程中,主制造商不可能将飞机连接部分全部提供给机载设备供应商,一是由于数模较大,不方便提供;二是由于知识产权及保密等;三是由于产品定义里只规定了界面及对应刚度值,结构多轮更改,只需保证连接界面和连接刚度一致就可以。因此提供准确的界面刚度对于飞机设计而言至关重要。

对于设备分析而言,振动分析又是其中至关重要的一部分,且振动分析受频率影响较大,不同频率下,结构的振动响应不一致,导致需要给出不同频率下的刚度,即动刚度。

随着 CAE 技术水平的发展,有限元分析技术已经得到了越来越多的应用,许多学者已将有限元分析应用到结构设计和动力学分析中^[2-5]。文中介绍了动刚度的计算方法,并运用有限元分析方法给出了民用飞机某种连接结构的有限元分析结果,同时给出了动刚度的试验方法和试验结果。对比表明,采用分析的方式可以较为准确地给出连接结构的动刚度。

1 动刚度分析

1.1 动刚度理论分析

材料学中,对结构施加一静态载荷,得到一静态位移,通过胡克定律,可以得到该方向的静刚度。

假如结构受到一动载荷,即大小或方向随时间变化的载荷,则结构的响应也呈现动态变化。动刚度就是结构所受的载荷幅值与结构响应幅值的比值,是载荷频率、系统质量、结构阻尼以及静刚度的函数。

假设一个单自由度的系统(仅由弹簧-质量-阻尼器构成),受到一正弦载荷 $F(t)$ 的作用, $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$, 系统的振动方程为^[6]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

可以得到:

$$x = \frac{F_0 / k}{\sqrt{(1 - (\omega / \omega_n)^2)^2 + (c\omega / k)^2}} \quad (2)$$

其中: k 为系统静刚度; c 为系统阻尼; m 为系统质量; ω 为系统激振频率; ω_n 为系统的固有频率, $\omega_n = k / m$; F_0 / k 为系统静态位移。

1.2 动刚度有限元分析结果

1.2.1 民用飞机某型连接结构介绍

民用飞机某型连接结构装配如图 1 所示,设备与主结构有 3 个连接点,分别是 Point 1、Point 2 和 Point

3,连接结构如图 2 所示。Point 3 为单双耳连接,Point 1 和 Point 2 通过一中心销轴连接。

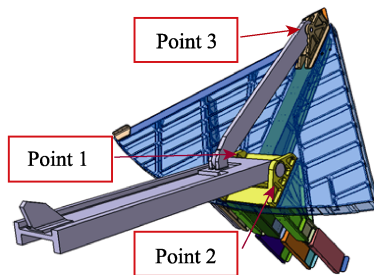


图 1 连接装配图

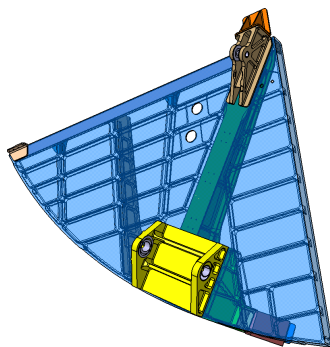


图 2 连接结构

1.2.2 动刚度有限元计算

针对图 2 的主要几何模型,采用 hypermesh 软件建立有限元模型。对其中三个连接点分别建立相应的局部坐标系,具体的有限元分析模型如图 3 所示。

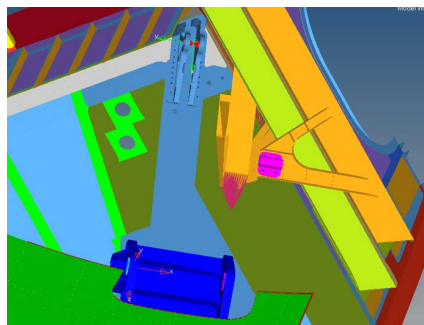


图 3 结构有限元模型

动刚度计算时采用频率响应分析^[7],定义 0~200 Hz 的动态激励载荷、响应频率范围、结构阻尼等。使用特征值分析的模态分析方法,通过 Nastran 软件的 111 求解器进行计算,得到随频率变化的各点、各自由度方向在局部坐标系下的位移响应,进而得到动刚度。

1 点 x 轴为 1 点和 2 点孔心的连线方向, y 轴为沿着底板平面法线方向。后续都将以 1 点为例进行分析和说明,最后得到的 1 点的动刚度曲线如图 4 所示。

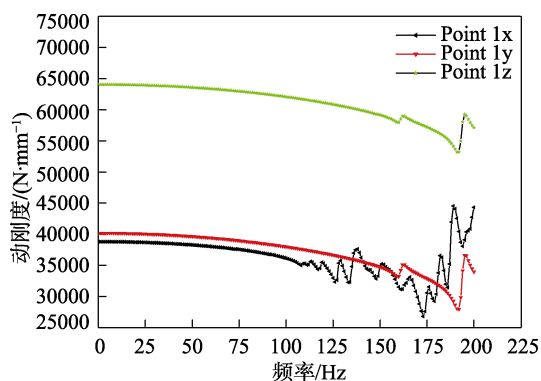


图4 Point 1的动刚度曲线

1.2.3 有限元计算结果分析说明

从动刚度的有限元分析结果可以看出:

- 1) 动刚度随着频率的变化而变化。
- 2) 当频率为0时的刚度即加静载荷时的静刚度。
- 3) 不同频率下的刚度不同, 关键频率下的振动分析可以选取相应频率下的刚度值进行使用。
- 4) 该结构的有限元分析结果表明, 低频下的刚度变化不太明显。
- 5) 动刚度分析结果由于和频率有关, 结构的固有频率对振动分析有较大影响。

2 动刚度试验

2.1 动刚度试验理论分析

动刚度的测试采用锤击法, 通过测得力的输入信号和输出信号, 进而通过转换关系得到动刚度^[8]。

假设一个单自由度系统, 受到一正弦载荷 $F(t)$ 的作用, $F(t)=F_0\cos(\omega t)$, 其位移为 $d(t)$, 加速度为 $a(t)$, 则:

$$d(t)=d_0\sin(2\pi ft) \quad (3)$$

对位移求二阶导则得到:

$$a(t)=-4\pi^2 f^2 d_0 \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

假设加速度的幅值为 A_0 , 则位移的幅值为:

$$d_0 = A_0 / (4\pi^2 f^2) \quad (5)$$

即可以通过加速度的幅值得到位移的幅值, 进而由载荷的幅值 F_0 以及位移的幅值 d_0 得到动刚度。

具体信号处理过程为:

1) 得到力的载荷信号 $F(t)$, 然后进行 FFT 变换得到 $F(f)$, 如图 5 所示。

2) 得到加速度传感器的信号 $a(t)$, 然后进行 FFT 变换得到 $a(f)$, 如图 6 所示。

3) 进而得到 $a(f)/F(f)$ 的比值, 如图 7 所示。

4) 最后通过式 (5) 可得到位移频响和载荷频响比值, 进而可以得到载荷频响和位移频响的比值, 即动刚度。

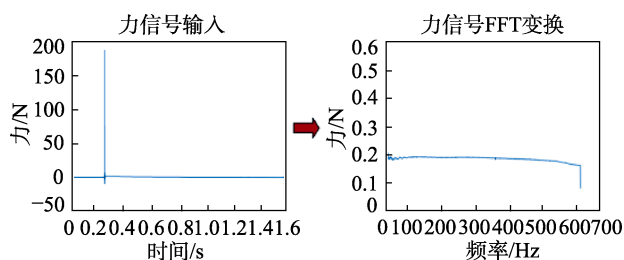


图5 载荷输入信号转换

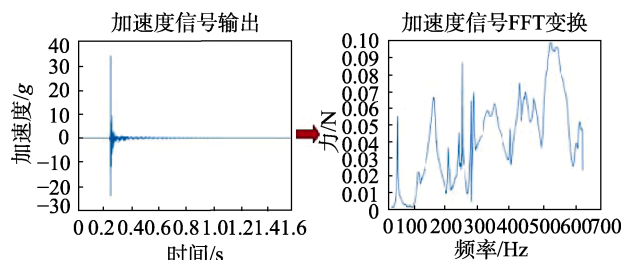


图6 加速度输出信号转换

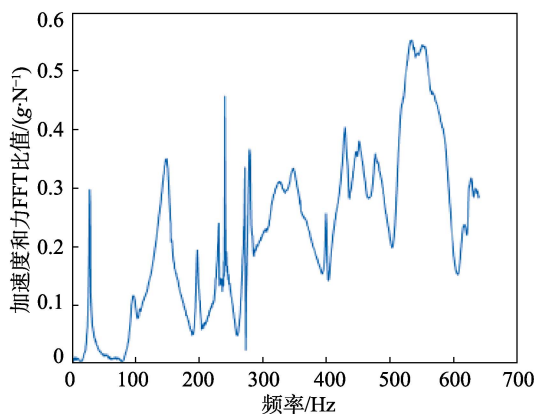


图7 加速度频响和载荷频响比值

2.2 动刚度试验

对该连接结构的各点粘接加速度传感器 (1 点的加速度传感器如图 8 所示), 并对 1 点采用锤击法^[9-10]。沿各个方向分别进行敲击, 敲击方向和坐标系方向一致, 采集输入和输出信号。每个方向 6 次, 重复 2 次试验, 并进行数据处理。1 点 x 向的试验数据结果如图 9 所示。

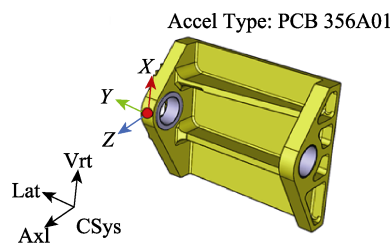


图8 1点传感器方向

2.3 动刚度试验结果分析

从动刚度的试验结果看出:

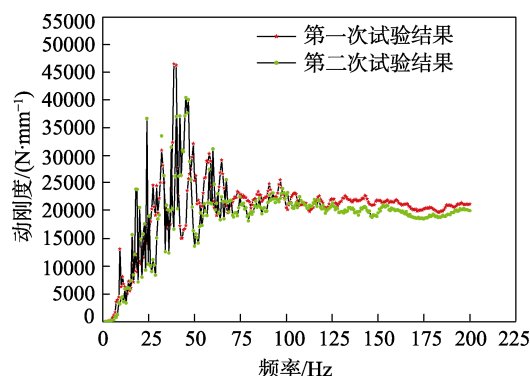


图 9 1 点 x 向动刚度试验结果

- 1) 动刚度随着频率的变化而变化。
- 2) 当频率为 0 时的, 信号衰减较多, 无法通过试验得到静刚度值。
- 3) 不同频率下的刚度不同, 关键频率下的振动分析可以选取相应频率下的刚度试验均值进行使用。
- 4) 动刚度和所含结构的固有频率有关, 另结构阻尼^[11]、锤击方向和传感器方向等也都对动刚度有较大影响。

3 动刚度分析和试验结果对比

通过有限元分析得到了频率响应, 进而得到了动刚度分析结果, 通过力锤试验测得的输入和输出信号得到了动刚度试验结果。

1 点的试验结果和分析结果对比如图 10 所示。

从对比结果可以看出:

- 1) 试验结果受信号衰减的影响, 低频范围内较难得到静刚度结果, 但可以通过分析模型得到。
- 2) 试验刚度结果开始波动较大, 但在高频范围趋于稳定, 最终稳定在分析刚度值左右。
- 3) 当动刚度分析结果受频率影响变化不大时, 可采用动刚度的分析均值作为不同频率下的刚度值。

部分分析模型和试验结果的差异, 可以从以下两方面进行说明:

1) 从刚度分析来讲, 分析模型准确程度受模型大小, 约束刚度程度, 实际阻尼大小等影响。实际模型分析时需要尽可能多地涵盖传力关键结构, 并采用试验测得的阻尼结果进行修正, 尽可能地模拟准确约束条件。

2) 从试验角度来讲, 结构的实际形状导致敲击方向有限, 和理论建模分析的点存在差异, 传感器的采集方向偏差也会导致试验结果的差异。

4 结语

文中通过频响分析得到民用飞机某种结构的动

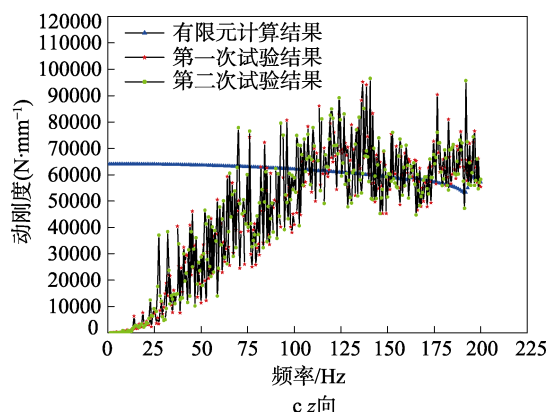
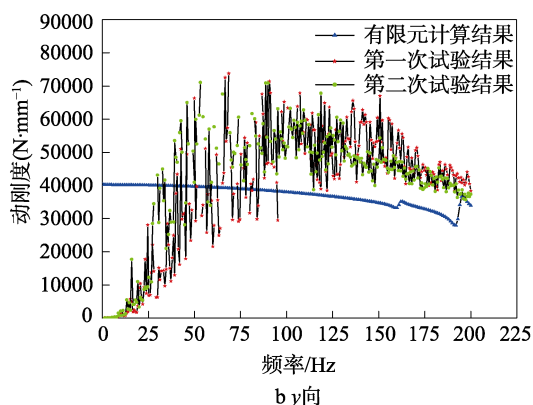
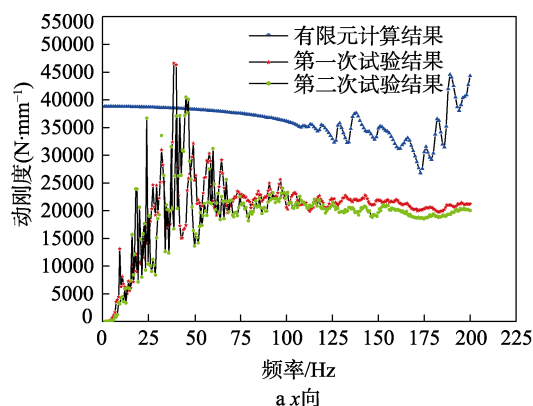


图 10 1 点动刚度试验结果对比

刚度变化曲线, 并通过动刚度试验进行了试验验证。分析对比结果表明, 可以通过分析的方式较为准确地得到机体支持结构的动刚度以用于工程实际, 并对动刚度分析和试验分析进行了详细的介绍和说明, 对存在的偏差进行了较为合理的解释, 可用于工程实际。

参考文献:

- [1] 符芳涌. 民用液压舵机动刚度仿真与分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(b11): 131-132.
- [2] 李玲玲, 王克明. 某型航空发动机后支撑动刚度的有限元计算[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(3): 5-7.
- [3] HOU Yu-lei, YAO Jian-tao, ZENG Da-xing. Development

- and Calibration of a Hyperstatic Six-component Force/Torque Sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 505-513.
- [4] 姚利锋, 周海亭, 陶杰. 有限元在大载荷橡胶隔振器设计中的应用研究[J]. 噪音与振动控制, 2006(6): 16-18.
- [5] 张俊, 宋轶民, 张策. 少齿差环板式减速器的弹性动力学分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 118-123.
- [6] 刘建军. 动力机器基础的动刚度研究[D]. 湖南: 南华大学, 2015.
- [7] 王志亮, 刘波. 动刚度分析在汽车车身结构设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2008(2): 34-35.
- [8] 和法家, 卢曦. 某直升机橡胶减震器动刚度特性试验[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(3): 41-44.
- [9] 王宇, 潘鹏. 动刚度分析在车身 NVH 性能方面的研究与应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(4): 34-38.
- [10] 李晓彤, 杜志鹏. 某舰尾轴架结构动刚度的实验研究[J]. 船舶工程, 2005, 27(6): 41-44.
- [11] LIN Jaw-Ren. Dynamic Stiffness and Damping Characteristics of a Sine Film Thrust Bearing[C]// 2016 International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application(AMTIA 2016). Shang Hai: [s.n.], 2016 .