

盘-盘螺栓连接结构模态频率分析

赵丹, 艾延廷, 翟学, 白彦

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学院, 沈阳 110136)



赵丹(1987), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为航空发动机强度、振动及噪声。

基金项目: 航空科学基金(2008B504)资助
收稿日期: 2011-12-27

摘要: 基于 ANSYS Workbench 软件, 采用层单元法和多点约束技术, 模拟了盘-盘螺栓连接结构的螺栓预紧力, 对其进行了模态分析, 并与试验结果进行了比较。研究表明: 采用层单元法模拟螺栓预紧力的模态结果与试验结果吻合较好, 为在预紧力作用下螺栓连接结构模态频率的有限元计算提供了 1 种有效方法。

关键词: 螺栓预紧力; 层单元; 螺栓连接; 多点约束; 模态分析

Analysis of Modal Frequencies for Bolted Plate-plate Structure

ZHAO Dan, AI Yan-ting, ZHAI Xue, BAI Yan

(Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Based on ANSYS Workbench software, the bolt preload of bolted plate-plate structure was simulated by cell elements and multi-point constraint technology. The modal analysis was conducted and compared with experimental results. The results show that the modal results agree well with the experiments. It provides an effective finite element method

to calculate bolted joint structure with preloads.

Key words: bolt preload; cell element; bolted joint; multiple point constraint; modal analysis

0 引言

螺栓连接是航空发动机多级压气机和涡轮中常见的连接方式。连接螺栓以布置灵活、连接刚性好、质量轻、结构简单和装拆方便等优点而被广泛地采用^[1-3]。随着发动机转子及其整机结构设计水平的提高, 在设计初期即进行转子和整机的有限元计算^[4]。在 1 个装配体中, 常常有多处采用螺栓连接结构, 如某型航空发动机转子 2 级盘-盘连接结构中有 50 多个螺栓, 如果对每个螺栓都进行有限元建模分析, 则需要很多计算机资源, 且非常耗时, 甚至导致计算机无法完成运算^[4-5]。

本文基于 ANSYS Workbench 软件, 通过在有限元模型接触面间加入实体单元层, 改变其弹性模量来模拟不同的螺栓预紧力下的法向接触刚度, 最后通过有限元方法对盘-盘螺栓连接结构进行模态频率计算分析^[6]。

1 计算理论

根据赫兹理论, 2 个弹性球体的接触, 可以转换

为具有当量曲率半径和当量弹性模量的球体与刚性光滑平面的接触。机械结合面实质上是由 2 个粗糙表面组成的, 为便于研究, 将其简化成光滑表面与粗糙弹性表面相接触。

由文献[7]的研究可知, 2 个实际表面的接触可以用 1 组沿实际接触表面均匀分布的弹簧束来表征, 每个弹簧的当量刚度为 k , 其大小在表面特征参数已知时, 只与螺栓预紧力有关, 即

$$k = C_f(F) \quad (1)$$

式中: C 为由表面特征参数确定的常数。

螺栓连接结构接触面间的法向接触刚度为

$$K_m = k \cdot A_c \quad (2)$$

式中: A_c 为接触表面积。

不考虑螺栓连接结构间的接触面积随螺栓预紧力的增大而减小这一影响因素, 则

$$A_c = A_0 \quad (3)$$

式中: A_0 为宏观接触面积, 即几何面积。可以用 1 个

单元层来等效代替螺栓连接结构的接触刚度的变化,如图1所示。

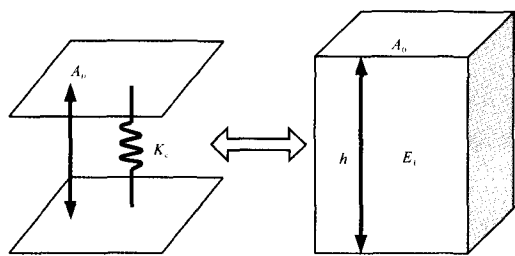


图1 层单元模拟法向接触刚度

弹性模量可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,指材料在外力作用下产生单位弹性变形所需要的应力,反映了材料抗弹性变形能力的指标,相当于普通弹簧中的刚度。因此运用厚度 h 、弹性模量 E_i 的单元层来模拟螺栓连接结构接触面间的法向接触刚度。

2 盘-盘螺栓连接结构的有限元计算

2.1 螺栓连接结构模型

盘-盘螺栓连接结构(材料为铝)如图2所示。盘外径为 356 mm,内径为 138 mm,厚度为 3 mm,在半径为 79 mm 的圆周上均布 12 个 M6 × 40 的螺栓;连接的法兰外径为 178 mm,内径为 138 mm,厚度为 5 mm;2 盘之间连接的垫片外径为 178 mm,内径为 138 mm,厚度为 10 mm。螺栓为 M6 × 40 的标准件。

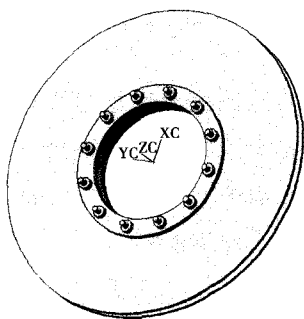


图2 盘-盘螺栓连接实际模型

2.2 刚性简化的螺栓连接结构模态计算

对如图2所示结构进行完全刚性简化,并基于 ANSYS Workbench 软件对其进行模态分析^[8]。

在保证计算精度的前提下,模型中略去螺纹结构,采用 8 节点单元划分网格,划分的网格单元为 1249 个。仿真模型的材料特性:盘材料弹性模量取 71 GPa,泊松比取 0.33,密度取 2770 kg/m³。

计算得到前 4 阶固有频率见表 1。

2.3 基于层单元的螺栓连接结构模态计算

本文基于 ANSYS Workbench 软件,应用层单元法^[9]和 MPC 多点约束技术对盘-盘螺栓连接结构进

行模态分析。

表1 刚性简化模型前4阶固有频率

	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶
固有频率/Hz	312.02	420.37	586.50	823.42

在 ANSYS Workbench 软件中,采用层单元法模拟螺栓预紧力只需在模型中直接进行单元层的建立。为了简化计算,本文使用 UG6.0 软件进行建模,把 2 个盘与中间的垫片设置成一体,直接在法兰与盘之间建立厚度为 0.1 mm 的实

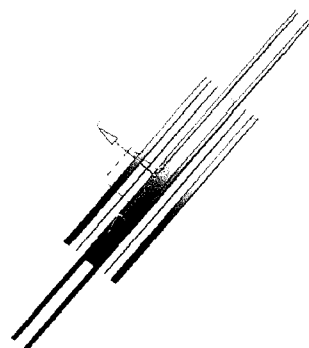


图3 层单元结构

体,来作为有限元分析的层单元。层单元结构如图3所示。

将建好的有限元模型导入 ANSYS Workbench 软件中进行模态分析。选择模态分析模块,并对接触面进行绑定设置。采用 8 节点单元划分网格,单元数为 5245 个。本文采用层单元法模拟螺栓预紧力,接触面共为 4 个,分别在单元层的侧面,使用 MPC 多点约束算法进行求解分析^[10]。MPC 方法施加约束方程把接触面间的位移绑定在一起,不需要手动定义 MPC 方程,用户只需将连接视为绑定接触,ANSYS Workbench 软件即自动生成 MPC。

3 盘-盘螺栓连接结构的模态试验

运用 LMS SCADAS III 型振动测量和分析系统及其配套的 TestLab 软件进行振动测试与分析。试验设备与系统分别如图4、5所示。

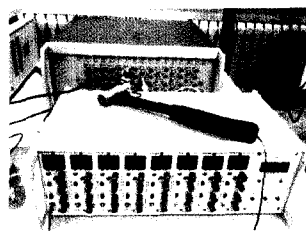


图4 LMS 测试系统

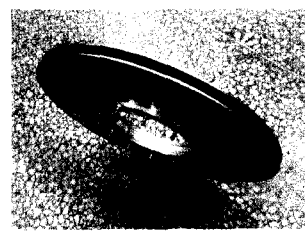


图5 试验件

测量时仪器的设定频率测量范围为 0 ~ 1024 Hz,由于要测量盘-盘螺栓连接系统的自由振动模态,所以用橡皮绳将该连接系统悬于模态试验挂架,用锤击法激振。在 TestLab 软件中采用圆柱坐标进行建模,输入 192 个测点的坐标,再将各点连线、连成面,即可

得到模态分析所需的模型。其中点线模型如图 6 所示。

在试验中,12 个螺栓的拧紧顺序依次为 0°, 90°,120°,⋯,每次相距 180°的 2 个螺栓同时被拧紧。

在 1 个盘上安质量较轻的加速度传感器 (3 g)。试验中测得装在拧紧力矩分别为 1、2、3、4 和 5 N·m 下盘 - 盘螺栓连接结构的前 4 阶固有频率。

4 结果分析

改变层单元的弹性模量会对结构的固有频率产生很大影响。本文层单元的弹性模量设为变化参数,程序优化中的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^5 W_i (w_i^a / w_i^e - 1)^2 \tag{2}$$

式中: w_i^a 为有限元计算并优化后而得到的各阶固有频率值; w_i^e 为试验测得的各阶固有频率值; W_i 为平衡因子,在 0 与 1 之间取值。

采用 ANSYS Workbench 软件计算出盘 - 盘螺栓连接结构的固有频率值,带到优化目标函数式(2)中,得到优化解见表 2~6。

表 2 拧紧力矩为 1 N·m 时的结构固有频率 Hz			
阶数	计算值	试验值	误差 /%
1	279.9	275.1	1.74
2	344.7	342.9	0.52
3	494.6	492.4	0.45
4	694.3	707.9	1.92

表 3 拧紧力矩为 2 N·m 时的结构固有频率 Hz			
阶数	计算值	试验值	误差 /%
1	289.6	284.1	1.94
2	351.8	352.6	0.23
3	502.1	499.6	0.30
4	698.4	703.0	0.65

表 4 拧紧力矩为 3 N·m 时的结构固有频率 Hz			
阶数	计算值	试验值	误差 /%
1	291.3	286.2	1.78
2	353.7	354.9	0.34
3	503.4	501.3	0.42
4	703.9	700.7	0.46

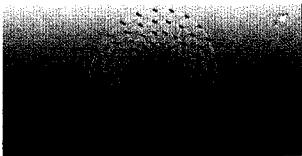


图 6 点线模型

表 5 拧紧力矩为 4 N·m 时的结构固有频率 Hz			
阶数	计算值	试验值	误差 /%
1	292.1	286.9	1.81
2	354.1	355.6	0.42
3	504.6	502.1	0.50
4	704.3	702.2	0.30

表 6 拧紧力矩为 5 N·m 时的结构固有频率 Hz			
阶数	计算值	试验值	误差 /%
1	292.6	287.1	1.92
2	354.8	355.9	0.31
3	504.9	502.7	0.44
4	706.0	700.9	0.73

从表 2~6 中可见,螺栓预紧力对结构的模态参数有很大的影响:预紧力越大,对应的固有频率越高,整体模型的计算值与试验值的误差越大。由此说明,在对螺栓连接结构进行动力学特性仿真时,需要考虑螺栓预紧力的影响。

采用层单元法和多点约束技术来模拟螺栓预紧力时,通过优化层单元的弹性模量,得到的有限元计算值与试验值误差较小,对工程应用有一定的参考价值。

4 结束语

本文基于 ANSYS Workbench 软件,采用层单元法和多点约束技术建立有限元模型,对盘 - 盘螺栓连接结构进行了模态分析,并与模态试验结果进行比较,得到以下结论。

(1)螺栓预紧力对结构振动特性有较大影响:预紧力越大,螺栓连接结构固有频率就越大。将螺栓与连接结构作为整体进行模态分析时,其结果与模态试验结果的误差较大,由此说明,在对螺栓连接结构进行动力学特性仿真时,需要考虑螺栓预紧力的影响。

(2)改变层单元的弹性模量,可以模拟不同的螺栓预紧力。层单元的弹性模量越小,结构的固有频率越低,采用优化计算结果的方法可以保证有限元计算结果与试验结果误差相对较小。

(3)对于不同的螺栓连接结构,可确定出合理的层单元材料参数,使得所模拟结构的理论计算值与实际情况相吻合。这说明通过大量试验,建立丰富的层单元数据库,可以为应用层单元法模拟螺栓预紧力提供更好地保证。

(下转第 62 页)

随着气压的增大, D_{SM} 逐渐减小, n 增大。当气压小于 0.2 MPa 时, D_{SM} 基本都大于 25 μm , 无法满足需求。

从以上结果可以总结出, 影响雾化性能的主要影响因素是气油比, D_{SM} 随气油比的增大而减小。在油压和气压固定的情况下, 则体现为 t_1 、 t_3 对雾化性能的影响。

参考文献:

- [1] 谢昆. 以煤油为燃料的内燃机气助雾化喷嘴方案研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 20-21.
- [2] Boretti A A, Jin S H, Zakis G. Experimental and numerical study of an air assisted fuel injector for a D.I.S.I. engine[R]. SAE 2007-01-1415.
- [3] Jin S H, Brear M, Watson H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector [J]. Department of Mechanical Engineering, 2008, 222 (10): 1883-1894.
- [4] Cathcart G, Tubb J. Application of air assisted direct fuel injection to pressure charged gasoline engines [R]. SAE 2002-01-0705.
- [5] Boretti A, Jin S H, Brear M, et al. Experimental and numerical study of a spark ignition engine with air-assisted direct injection[J]. Department of Mechanical Engineering, 2007, 222 (6): 1103-1119.
- [6] 曾卓雄, 姜培正, 谢蔚明. 喷嘴雾化粒径的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2000(34): 75-77.
- [7] 甘晓华著. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 173-199.
- [8] Sampson M J, Heywood J B. Analysis of fuel behaviour in the spark-ignition engine start-up process[R]. SAE 950678, 1995.
- [9] Lefebvre A H. Energy considerations in twin-fluid atomization [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1992, 114(1): 89-97.
- [10] LeGal P, Farrugia N, Greenhalgh D A. Laser sheet dropsizing of dense sprays [J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31(1): 75-83.
- [11] Cathcart G, Houston R, Ahern S. The potential of gasoline direct injection for small displacement 4-stroke motorcycle applications[R]. SAE 2004-32-0098.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 61-70.
- [2] 赵猛, 张以都, 马良文, 等. 装配结构模态仿真与实验对比研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 28-30.
- [3] 陈果. 双转子航空发动机整机振动建模与分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(6): 619-632.
- [4] 王海涛. 带预紧力螺栓连接的机匣刚度分析 [J]. 航空发动机, 2010, 36(3): 33-35.
- [5] 王有智, 贺红兵. 发动机连杆的瞬态响应计算[J]. 内燃机学报, 1998(3): 105-110.
- [6] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, et al. Thin-layer elements for numerical and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods of Geomechanics, 1984, 8 (1): 19-43.
- [7] 饶柱石. 栏杆组合式特种转子动力学特性及其接触刚度的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
- [8] 赵丹, 艾延廷, 翟学, 等. 法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 54-57.
- [9] Ahmadian H, Ebrahimi M, Mottershead J E, et al. Identification of bolted joints interface models [C]// Proceedings of ISMA 2002: Noise and Vibration Engineering conference. Leuven: Katholieke University, 2002: 1741-1747.
- [10] 苏春峰, 艾延廷, 娄小宝. 接触非线性仿真中接触刚度因子选取的方法研究 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(3): 5-9.