

蚀能源模拟前封头绝热层在飞行过程中真实燃气烧蚀环境, 试验结果的精度和实际情况有一定的差距。本文用实际推进剂和烧蚀试验发动机研究了飞行加速度对前封头绝热层烧蚀特性影响, 以保证大型火箭发动机前封头绝热层飞行过程中的工作可靠。

2 离心点火试验台及烧蚀试验发动机

离心点火试验系统如图1所示, 试验台结构如图2所示。试验台主要由试验台体、传动部件、旋转臂、旋转盘、集流环、测速装置及数据测控系统组成。

烧蚀试验发动机结构如图3所示, 它由燃烧室、点火系统、试验腔、喷管、后堵盖组成。试验腔具有较大的空间, 燃气速度低 ($v \leq 4\text{m/s}$), 进入试验腔的燃气从喷管流出的同时充满绝热层试件所在的试验腔后部空间, 使得绝热层试件表面烧蚀环境和前封头绝热层在飞行过程中的烧蚀环境一致。烧蚀试验发动机烧蚀时间: $\geq 35\text{s}$ 、推进剂质量: $12\text{kg} \sim 18\text{kg}$ 、工作压强: $3.5\text{MPa} \sim 12\text{MPa}$, 每次均布安装4个 $\phi 50\text{mm} \times 45\text{mm}$ 圆柱型绝热层试件。

3 模拟烧蚀试验

3.1 烧蚀试验条件

旋转臂上对称安装2台烧蚀试验发动机, 如图2所示。绝热层试件烧蚀表面承受轴向向外的加速度载荷, 和前封头绝热层在飞行中加速度环境一致, 在 $0g$, $3g$, $6g$ 和 $10g$ 轴向加速度载荷条件下共进行8发烧蚀试验。烧蚀试验发动机装药全部采用丁羟推进剂, 使绝热层试件表面燃气烧蚀环境和实际发动机前封头绝热层一致。绝热层试件采用1[#], 2[#]NBR 及 EPDM 绝热层材料, 其中1[#], 2[#]NBR 绝热层主要成份丁腈橡胶和 SiO_2 含量相同, 石棉含量1[#]NBR 比2[#]NBR 小一倍; EPDM 绝热层为充填 SiO_2 和 APMOC 纤维的绝热材料。每台烧蚀试验发

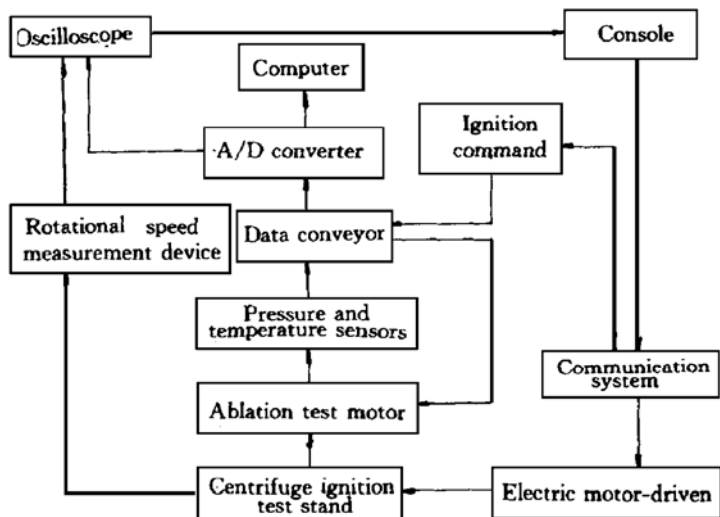


Fig. 1 Rotating ablation test system

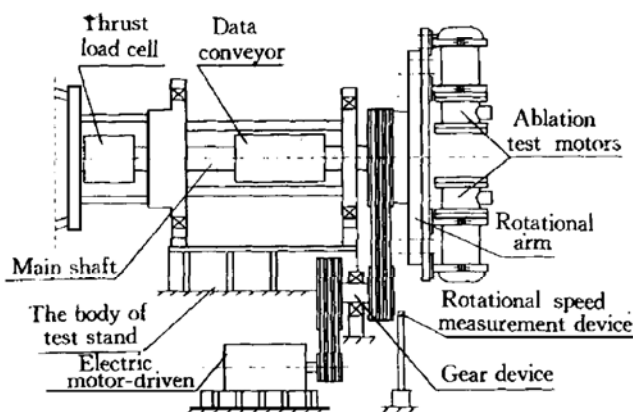


Fig. 2 Centrifuge ignition test stand

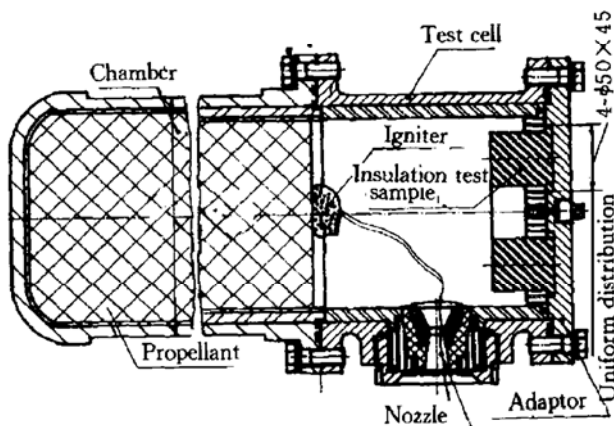


Fig. 3 Ablation test motor structure

动机安装4个绝热层试件, 其中2个1[#]NBR 试件, 1个2[#]NBR 试件和1个 EPDM 试件。

3.2 绝热层试件炭化烧蚀率

每个绝热层试件烧蚀表面均布划分13个测点, 采用万能工具显微镜(测量精度为1 μ m)测量烧蚀前后的厚度, 获得每个试件平均炭化烧蚀厚度。根据每台烧蚀试验发动机烧蚀时间及所测得的每个绝热层试件的平均炭化烧蚀厚度则可获得其炭化烧蚀率。对32个试件的416个炭化层烧蚀厚度数据进行最小二乘法拟合, 得到1[#]NBR, 2[#]NBR 和 EPDM 绝热层试件炭化烧蚀率与加速度变化关系曲线如图4~6所示。可以看出, 加速度对 EPDM 绝热层试件炭化烧蚀率没有影响, 二者不存在相关关系。对1[#]NBR 和2[#]NBR 绝热层试件炭化烧蚀率数据进行回归分析, 得关系式:

$$1^{\#}\text{NBR: } \dot{r}_c = 0.10892 + 0.006886\alpha - 0.0002276\alpha^2$$

其相关系数为0.9835, 在 $\alpha=0.01$ 水平上显著。

$$2^{\#}\text{NBR: } \dot{r}_c = 0.09485 + 0.007266\alpha - 0.0001341\alpha^2$$

其相关系数为0.9999, 在 $\alpha=0.01$ 水平上显著。

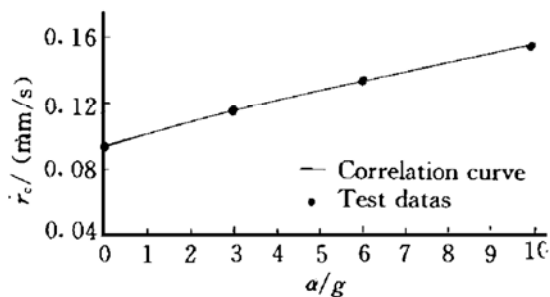


Fig. 5 The ablation rate of 2[#]NBR insulation vs. acceleration

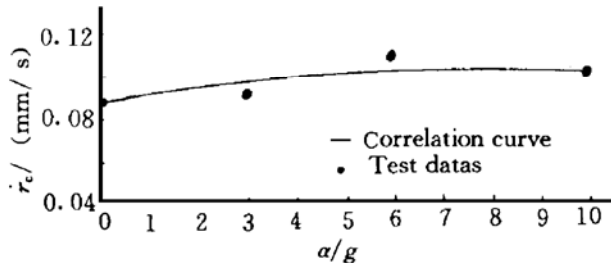


Fig. 6 The ablation rate of EPDM insulation vs. acceleration

3.3 烧蚀试验结果分析

a. 加速度对1[#]NBR, 2[#]NBR 绝热层试件炭化烧蚀率有明显影响, 绝热层试件在3g, 6g, 10g 加速度下的炭化烧蚀率分别是0g 加速度条件下的1.113, 1.3213, 1.3937倍及1.2105, 1.4105, 1.6210倍。加速度越大, 绝热层试件炭化烧蚀率越大, 并随加速度增大基本呈线性增大;

b. 加速度对 EPDM 绝热层试件炭化烧蚀率无明显影响, 绝热层试件在3g, 6g, 10g 加速度下的炭化烧蚀率是0g 加速度条件下的0.9995, 1.1845, 1.0799倍。加速度增大, 绝热层试件炭化烧蚀率并无明显增加;

c. 静止状态(0g 条件), 1[#]NBR 绝热层试件炭化烧蚀率较2[#]NBR 大, EPDM 绝热层试件的炭化烧蚀率最小, 这 and 实际发动机地面静止试车后前封头绝热层解剖结果、氧乙炔焰烧蚀结果是一致的;

d. 1[#]NBR、2[#]NBR 为充填石棉、SiO₂填料的丁腈橡胶绝热层材料, 在烧蚀后炭化层结构

(下转第34页)

转子越过临界转速的振动特性试验研究^{*}

杨伸记 赵 明 杨秉玉 戚先萍 任平珍

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 以盘偏置单盘双简支试验器转子为对象, 由加速与减速的幅频特性曲线确定转子的临界转速。以幅频特性曲线模态计算方法确定盘处的偏心距和阻尼比, 用弯、扭耦合传递矩阵法计算临界转速及稳态不平衡响应, 同时分析了偏心距及初始弯曲按一阶振型分配时, 转子越过临界之振动特性。由试验与理论分析结果表明, 加速度对振动特性有明显的影响。

主题词: 转子速度, 加速度, 临界转速, 模态振动试验

分类号: V231.96

EXPERIMENTAL STUDY OF VIBRATION CHARACTERISTIC OF ROTOR PASSING THROUGH CRITICAL SPEED

Yang Shenji Zhao Ming Yang Bingyu Qi Xianping Ren Pingzhen

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: For a single disc double-point support testing rotor with offset disc, the critical speed was obtained by characteristic curve of acceleration and deceleration amplitude frequency, the offset centre distance and damping ratio of disc was computed by using the modal computer method of amplitude frequency characteristic curve and the transfer matrixes of lateral/torsional coupling was used to calculate critical speed and static unbalance response. The aim of experimental study is to analyse acceleration effect on vibration characteristic and to analyse vibration characteristic of rotor passing through critical speed while offset centre distance and initial twisting are allocated according to one order mode of vibration.

Subject terms: Rotor speed, Acceleration, Critical velocity, Modal vibration test

1 引 言

转子临界转速试验确定方法及加速度对 Jeffcott 转子振动特性影响方面的研究已有文献报道^[1,2], 用微分方程数值解的方法求解计及加速度影响的不平衡响应时, 在峰值转速下往往有较大的误差, 对于一般的转子采用上述方法是十分复杂的。本文以盘偏置的双简支转子为对象, 采用幅频特性曲线模态计算方法确定模态参数^[3], 用传递矩阵法计算不平衡响应, 将计算值与试验所提的幅频特性曲线比较, 研究加速度对转子临界转速及不平衡响应的影响。分析结果表明, 采用这种方法比较简单, 在峰值转速及其邻近区域不平衡响应计算值与试验值吻合较好, 由这种方法取得较合理的模态参数有助于研究初始弯曲响应和动平衡。

^{*} 收稿日期: 1997-06-02, 修回日期: 1997-08-25

Neumann 随机有限元法计算 涡轮叶片的可靠度^{*}

南宫自军 汪 亮 张 铎

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 推导了具有随机性时 Neumann 随机有限元法的基本方程, 用级数来拟合结构响应的概率密度函数, 并通过数值积分计算结构的可靠度。对涡轮叶片的可靠度分析表明, 该方法可利用较小的样本容量获得较高的计算精度, 并具有较高的计算效率。

主题词: 涡轮叶片, 结构可靠性, 诺曼问题, 有限元法, 概率密度函数

分类号: V235.11

RELIABILITY ANALYSIS OF BLADE WITH NEUMANN SFEM

Nangong Zijun Wang Liang Zhang Duo

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: An extended Neumann Stochastic Finite Element Method (NSFEM) has been derived. Probability Density Function (PDF) of blade displacement and stress can be obtained by applying series fitting. Then the numerical integral method is used to compute the reliability of structure. The analysis of two numerical examples shows that the proposed approach is of good computational accuracy and efficiency with a small capacity for samples.

Subject terms: Turbine blade, Structural reliability, Neumann problem, Finite element method, Probability density function

1 引 言

随机有限元法是在传统的有限元方法基础上发展起来的数值方法, 它是有限元法和随机分析方法相结合的产物。作为结构可靠性分析方法, 日益受到人们的重视。摄动随机有限元法和泰勒展开随机有限元法在求解过程中只需一次性地形成和分裂解刚度矩阵, 因而计算效率较高。但此法要求随机变量的变异系数不能大于 $0.2^{[1]}$, 不能获得结构响应量的高阶统计值, 导致计算得到的结构可靠度偏于保守, 从而限制了其在结构可靠性分析中的应用。近几年发展起来的 Neumann 随机有限元法^[2]可对复杂结构进行随机分析, 获得响应量较为精确的各阶矩, 且计算效率较高。但现有的 Neumann 随机有限元法在基本方程的推导过程中未能全面考虑结构各方面参数的随机分布性, 因而只能对较简单的问题进行可靠性分析。鉴此, 本文推导了结构材料、几何形状和载荷同时具有随机性时 Neumann 随机有限元法的基本方程, 根据计算得到的均值、方差及高阶矩, 采用级数来拟

* 收稿日期: 1997-06-28, 修回日期: 1997-09-01