

一种基于 SFEM 的构件振动疲劳强度可靠性的分析方法*

南京航空航天大学 崔海涛** 温卫东

【摘要】 由于构件的材料参数、几何参数及所受的载荷等均为随机变量,所以构件振动时的疲劳强度应通过随机参数来进行分析。振动构件疲劳强度的可靠度计算的随机有限元法可以有效地分析振动构件的疲劳强度可靠性,为提高构件疲劳强度的可靠性提供了理论依据。以悬臂梁为例进行了分析,通过实验验证了所给出方法的正确性。

主题词: 随机振动 可靠性 疲劳强度 随机有限元法

分类号: TB114.3

1 引言

用安全系数法校核交变应力作用下构件的疲劳强度有许多不足之处,因此出现了基于结构可靠度理论的设计规范。文献[1,2]给出了当应力比为常量和变量时转轴类构件疲劳强度的可靠性分析方法。该计算方法对于非转轴类构件且其应力比为随机变量时已不能适用。文献[3]给出了悬臂梁振动的可靠性分析方法,但在计算时需采用作图法来确定等效复合疲劳应力和等效复合疲劳强度,而作图法的精度较低,通用性较差。文献[4]给出了振动构件强度可靠性分析的解析方法,但该方法仅适用于简单的构件,对大型复杂构件则显得无能为力。本文提出了用于计算振动构件强度可靠性的随机有限元法。该方法不仅克服了计算振动构件疲劳强度可靠性时必须绘制疲劳极限图的缺点,而且适合于计算大型复杂构件的疲劳强度可靠性。

2 振动构件疲劳强度的可靠性分析

由于构件材料特性、几何尺寸及加工质量等参数的随机性,使得构件的最大应力 $\sigma_{\max}$ 及疲劳极限 σ_{-1} 也具有一定的离散性。仿照应力-强度干涉模型,可以定义对称循环时振动构件疲劳强度的可靠度系数 β 为:

$$\beta = (\sigma_{-1} - \sigma_{\max}) \sqrt{S_{\sigma_{-1}}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2} \quad (1)$$

式中: $S_{\sigma_{-1}}$ 和 $S_{\sigma_{\max}}$ 分别为疲劳极限及最大应力的离差。当 σ_{-1} 和 $\sigma_{\max}$ 独立地服从正态分布时,利用标准正态分布积分表可得振动构件疲劳强度的可靠度 R 。若 σ_{-1} 和 $\sigma_{\max}$ 为非正态分布时,则将其用当量正态分布来代替。对于所代替的当量正态分布函数,要求其在设计验算点处的积

1998 年 10 月第九届航空发动机结构强度振动学术会议推荐; 1999 年 3 月收到修改稿。

* 本文系江苏省博士后基金资助项目, 编号: 98018

** 男 28 岁 博士 南京航空航天大学动力工程系 210016

累概率分布函数值和概率密度函数值与原来的相应函数值相等即可^[5]。对于非对称循环情形, 则可以将其转化为等效对称循环的疲劳极限, 然后计算构件疲劳强度的可靠度^[6]。

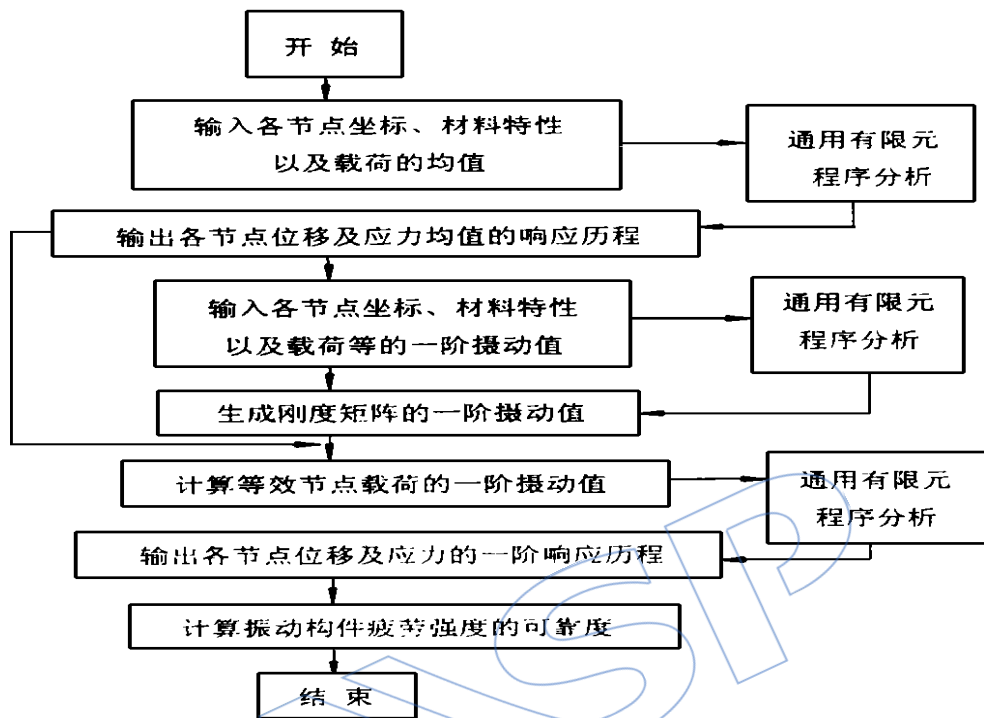


图 1 计算振动构件强度可靠度的程序流程图

由于标准试件疲劳极限的均值和离差可通过材料手册得到, 进一步考虑到构件的尺寸系数、表面加工质量系数和应力集中系数等的影响, 便可以获得构件疲劳极限的均值和离差。因此, 构件疲劳强度的可靠度的获得主要在于如何计算构件振动时的最大应力的均值和离差。工程实际中的许多构件结构比较复杂, 振动所产生的最大应力的均值和离差用材料力学或结构力学的方法不易求得, 而随机有限元法则可以有效地解决这一难点, 尤其对大型复杂构件, 更能显出其优越性。用随机有限元法计算时, 往往需要自编程序, 不仅工作量大, 而且通用性也受到一定的限制。为此本文提出采用部分自编程序与通用有限元程序相结合的方法(见图 1)。在该方法中, 仅需编制与通用有限元程序的接口程序及用摄动法确定所选取随机变量的一阶摄动值程序, 即可计算构件疲劳强度的可靠度。由此可见, 其通用性和限制条件主要取决于通用的有限元分析程序。

3 算 例

一悬臂梁如图 2 所示。自由端下固定一电机, 电机的输出轴上联结一带有偏心质量的圆盘。结构参数: $AC = 760 \text{ mm}$, $BC = 300 \text{ mm}$, $DB = 293 \text{ mm}$, 悬臂梁自由端宽 20 mm , 固定端宽 50 mm , 厚 9.56 mm 。悬臂梁的材料为 Q235, 调质处理。其弹性

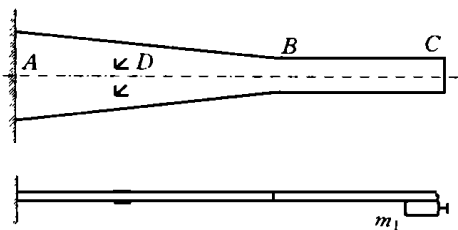


图 2 变截面悬臂梁示意图

模量均值为 196130 MPa, 离差为 5883.9 MPa。电机及圆盘总质量的均值和离差分别为 4.3 kg 和 0.1 kg, 圆盘上的偏心质量为 0.12 kg, 其偏心距离为 0.047 mm。由文献[6]可查得标准试样的疲劳强度、尺寸系数、表面加工质量系数和应力集中系数的均值和离差, 进一步计算出悬臂梁交变应力下的疲劳极限(见表 1)。经计算, 悬臂梁 D 处最大应力的均值和离差分别为 77.512 MPa 和 5.625 MPa, 相应的等效对称循环时的最大应力的均值和离差分别为 96.285 MPa 和 6.698 MPa, 悬臂梁疲劳强度的可靠度系数为 4.721。

表 1 悬臂梁交变应力下的疲劳极限

	标准试样的疲 劳极限 σ_{-1}	尺 寸 系 数	表面加工 质量系数	应力集中 系 数	悬臂梁的疲 劳极限 σ_{-1}
均值(MPa)	279.5	0.73	1.0	1.3	156.95
离差(MPa)	8.169	0.04188	0.0221	0.02	10.954

4 实验验证

实验原理图见图 3。经过标定, 测得悬臂梁动应力的最大值为 75.517 MPa。与计算出的最

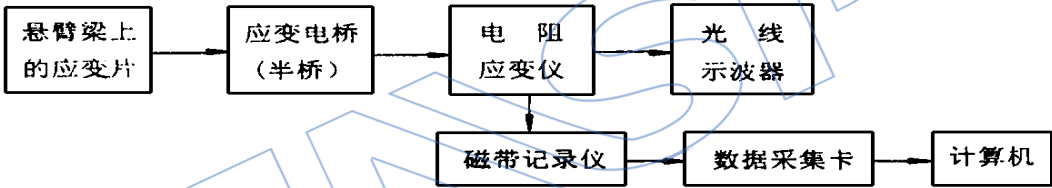


图 3 实验原理图

大动应力的均值 77.512 MPa 相比, 其相对误差为 2.64%。通过该实验验证了所给出的方法的正确性。

参 考 文 献

1 Keceioglu D, Lamarre G. Prediction of the Reliability of Mechanical Components Subjected to Combined Alternating and Mean Stress with Non- Constant Stress Ratio. Microelectronics and Reliability, 1980, 20: 45- 54

2 豪根 E B. 著, 汪一麟等译. 机械概率设计. 北京: 机械工业出版社, 1985

3 史进渊. 悬臂梁振动可靠性分析的研究. 应用力学学报, 1995, 2: 111- 114

4 崔海涛. 随机有限元法及其在结构强度可靠性分析中应用的研究: [博士学位论文]. 东北大学, 1997

5 吕泰仁, 吴世伟. 用几何法求构件的可靠指标. 河海大学学报, 1998, 5: 86- 93

6 徐灏. 新编机械设计师手册. 北京: 机械工业出版社, 1995

(责任编辑 王震华)

PRELIMINARY RESEARCH ON RELIABILITY DESIGN METHOD OF MECHANICAL COMPONENT VIBRATION

Tian Aimei and Wang Yanrong

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A method is presented to evaluate the reliability of a mechanical component vibration. An interference reliability model for the exciting frequency and the natural frequency of the component has been established. The reliability computation formula has been deduced by use of Goodman curve and its application conditions for the forced resonant response that can damage the component. In general, this method can be applied to the components, for which the modal frequencies can be separated, such as the turbine blades.

Key Words Mechanical component Vibration Reliability Design

A SFEM FOR ANALYZING RELIABILITY OF VIBRATING STRUCTURAL COMPONENTS

Cui Haitao and Wen Weidong

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT

Material characteristics, geometrical properties of structural components and loads are variables. As a result, the fatigue strength is analyzed by means of random variables. A stochastic FEM for analyzing the reliability of vibrating structural components is proposed. The theoretical basis for increasing the fatigue strength is provided. A cantilever beam has been taken as a numerical example. The correctness of this method is verified by an experiment.

Key Words Random vibration Reliability Fatigue strength
Finite Element Method (FEM)