

轮盘疲劳寿命的参量敏度分析*

Parametric Sensitivity Analysis of Fatigue Life of Compressor Disk

东北大学机械工程与自动化学院 赵秀荣 钱文学 谢里阳

[摘要] 低周多轴疲劳失效是航空发动机压气机盘失效的主要形式。轮盘的失效往往导致极其严重的后果。本文采用差分法就轮盘疲劳寿命对各相关参量的敏度进行了分析,确定了寿命对各相关参量的敏度,并用参量敏度曲线图进行了直观表示。

关键词: 压气机轮盘 敏度分析 临界平面法 差分法

[ABSTRACT] Low cycle multi-axial fatigue failure is a main fail form of aeroengine compressor disks. Failure of compressor disk often causes serious consequence. The sensitivities of fatigue life to relative parameters are analyzed by means of difference method and the sensitivity of relative parameters is determined and expressed by parametric sensitivity curves.

Keywords: Compressor disk Sensitivity analysis Critical plane method Difference method

航空发动机的可靠性对于飞机的可靠飞行至关重要,而轮盘是发动机的关键转动部件之一。据统计我国航空发动机所发生的各类机械断裂失效事件中,转动部件失效所占比例高达 80%,其中盘类部件的失效占很大的比例^[1]。轮盘的失效往往导致极其严重的后果,引起重大事故。随着航空发动机推重比的不断提高,其工作条件更加恶劣。影响轮盘疲劳寿命的因素有很多,包括结构、载荷、材料特性等,充分考虑各种因素的随机特性,进而确定各相关参量对轮盘疲劳寿命的影响具有重要的工程意义。

在结构优化设计中,结构敏度分析(SA)受到人们越来越多的重视。通过结构敏度分析,可以就各参量的扰动对系统响应的影响进行准确评估,了解哪些参量的变化对系统响应的影响较大,哪些参量的变化对系统响应的影响较小,进而在产品的设计和制造过程中严格控制对结构响应影响较大的参量。然而,敏度分析常需要进行大量的运算,我们利用 VC++ 开发了航空发动机压气机盘疲劳寿命的敏度分析软件,该软

件使用效果良好,对于产品的设计改进以及加工工艺的规划具有一定的指导意义。

1 轮盘疲劳寿命模型

在轮盘工作过程中,榫槽受到很大的应力,而且呈现多轴的应力状态。采用传统的名义应力寿命模型及应变寿命模型对榫槽进行寿命评估时,通常都按照单轴的方法来计算。然而,单轴疲劳和多轴疲劳有着很大的不同。因此,我们认为综合考虑榫槽的应力状态,采用临界平面法中的 SWT 模型进行寿命评估比较合适。裂纹的早期扩展被控制在与最大主应力和应变垂直的平面上,如图 1 所示。最大主应变范围及最大主应力是影响疲劳寿命的重要参量^[2]。

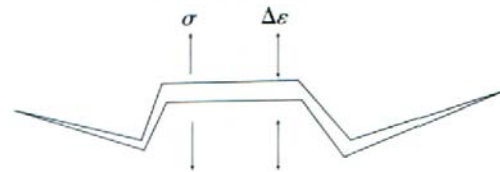


图 1 拉伸裂纹扩展

Fig.1 Tensile crack growth

SWT 模型可用下式表示:

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{f}{E} (2N_f)^{2b} + f_f \cdot f_f (2N_f)^{b+c}$$

式中, σ_{\max} 代表最大主应变范围, σ_{\max} 为最大主应变范围平面上的最大主应力, N_f 为疲劳寿命, f 为疲劳强度系数, E 为弹性模量, b 为疲劳强度指数, f_f 为疲劳延性系数, c 为疲劳延性指数。

2 敏度分析的方法

结构的敏度分析主要有解析法、差分法、Monte-Carlo 模拟法等方法。

设有结构响应函数 $F(x) = g(X)$, $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 定义响应函数对设计变量 x_i 的偏导数为响应函数对设计变量 x_i 的敏度,即

$$S_i = \partial F / \partial x_i$$

* 高等学校博士学科点专项科研基金(20070145083)资助项目。

当 $S_i > 0$ 时, $F(x)$ 随 x_i 的增大而增大; $S_i < 0$ 时, $F(x)$ 随 x_i 的增大而减小; $S_i = 0$ 时, $F(x)$ 不随 x_i 的变化而变化。 S_i 绝对值的大小反映了 $F(x)$ 随 x_i 变化快慢的程度, 即函数 $F(x)$ 对设计变量 x_i 的敏感程度^[3]。

但是, 工程上各种结构的响应函数往往十分复杂, 且是设计变量的隐函数, 其偏导数不易求出, 这时可以用差分法来求结构的灵敏度, 即

$$S_i = \frac{F(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i}$$

当响应函数对设计变量十分敏感时, 可以使用 Monte-Carlo 模拟法进行灵敏度分析。 Monte-Carlo 法是复杂结构灵敏度分析的较好方法, 可以应用于各种形式的结构, 适应性强, 具有较高的分析精度^[4]。

3 差分法灵敏度分析

压气机盘的主要失效模式是低周多轴疲劳失效, 应用临界平面法中的 SWT 模型进行疲劳寿命评估时, 主要参数有疲劳强度系数 σ_f 、疲劳强度指数 b 、疲劳延性系数 σ_{f0} 、疲劳延性指数 c 、材料弹性模量 E 和等效应变能 $(\sigma_{max})/2$ 等。寿命是设计变量的隐函数, 故采用差分法求解轮盘对各参数的灵敏度, 在以下对某参数的灵敏度分析中, 保持其他参数值不变, 依次改变该参数的值, 计算相应的疲劳寿命及灵敏度^[5]。

3.1 疲劳强度系数

图 2 为 $\sigma_f - N_f - S$ 关系曲线。从图中可以看出, 疲劳寿命 N_f 对疲劳强度 σ_f 的灵敏度总是大于零。疲劳寿命

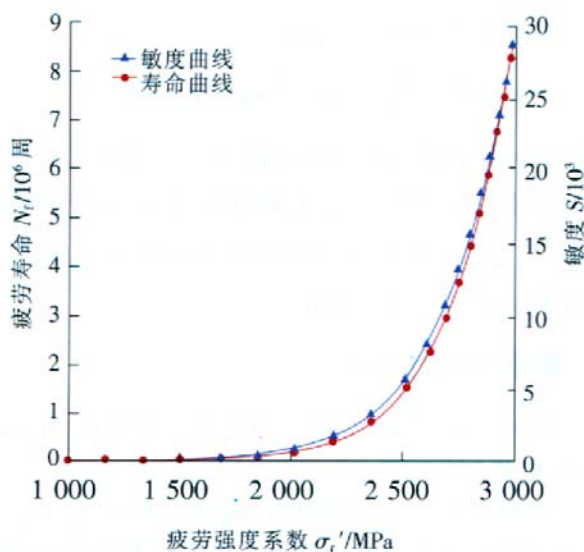


图 2 $\sigma_f - N_f - S$ 关系曲线

Fig.2 $\sigma_f - N_f - S$ relationship curves

N_f 随疲劳强度系数 σ_f 的增大而增大, 疲劳寿命 N_f 对疲劳强度系数 σ_f 的灵敏度也随着 σ_f 的增大而增大。当疲劳强度系数 σ_f 小于 1 800MPa 时, σ_f 的变化对疲劳寿命的影响较小, 灵敏度较低; 但当 σ_f 大于 1 800MPa 时, σ_f 的较小变化将对疲劳寿命产生很大的影响, 当 σ_f 由 2 200MPa 增加到 2 800MPa 的过程中, 疲劳寿命由 4×10^5 周增加到了 4.5×10^6 周。由于实际盘体材料的 σ_f 值都较高, 因此应该 σ_f 进行严格控制。

3.2 疲劳强度指数

由图 3 可以看出, 疲劳寿命 N_f 对疲劳强度指数 b 的灵敏度大于零且灵敏度随着疲劳强度指数 b 的增大而增大。疲劳寿命 N_f 也随疲劳强度指数 b 的增大而增大, 疲劳强度指数 b 在 -0.1 ~ -0.08 之间变化时, 相应的灵敏度变化较缓慢; 当 b 值大于 -0.08 时, b 的增大将引起灵敏度的快速增加, b 的微小变化都会引起灵敏度值的很大变化。

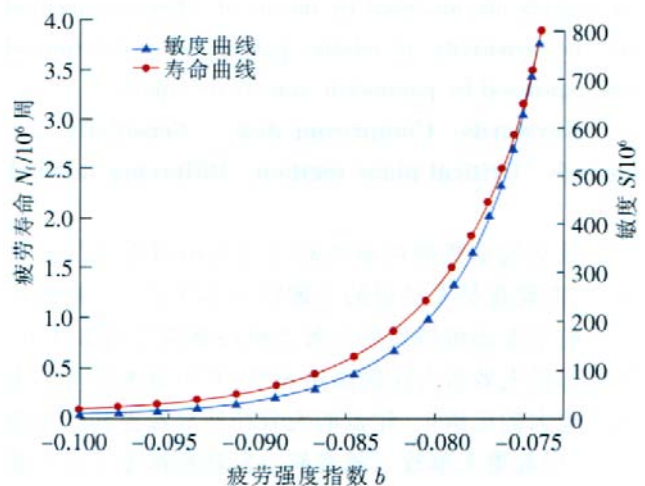


图 3 $b - N_f - S$ 关系曲线

Fig.3 $b - N_f - S$ relationship curves

3.3 疲劳延性系数

由图 4 可以看出, 疲劳寿命 N_f 对疲劳延性系数 σ_{f0} 的灵敏度为正值, 但疲劳寿命 N_f 对疲劳延性系数 σ_{f0} 的灵敏度是非单调的。从图中可以看出疲劳寿命对疲劳延性系数 σ_{f0} 的灵敏度, 当 σ_{f0} 在 0~1.1 之间灵敏度是单调减的, 当 σ_{f0} 在 1.1~8.0 之间则是单调增的, 且灵敏度曲线近似为一条直线。

3.4 疲劳延性指数

疲劳寿命 N_f 对疲劳延性指数 c 的灵敏度曲线如图 5 所示。由图可以看出, 疲劳寿命对疲劳延性指数 c

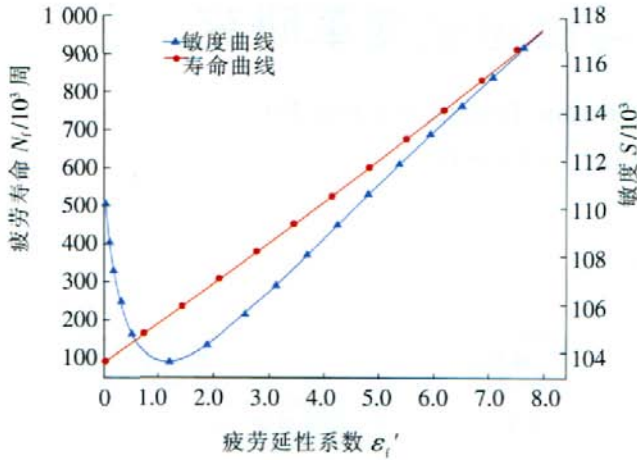


图4 $\epsilon_f'-N_f-S$ 关系曲线
Fig.4 $\epsilon_f'-N_f-S$ relationship curves

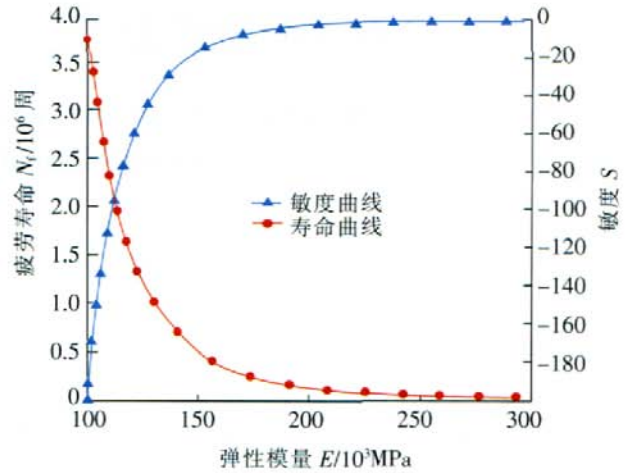


图6 $E-N_f-S$ 关系曲线
Fig.6 $E-N_f-S$ relationship curves

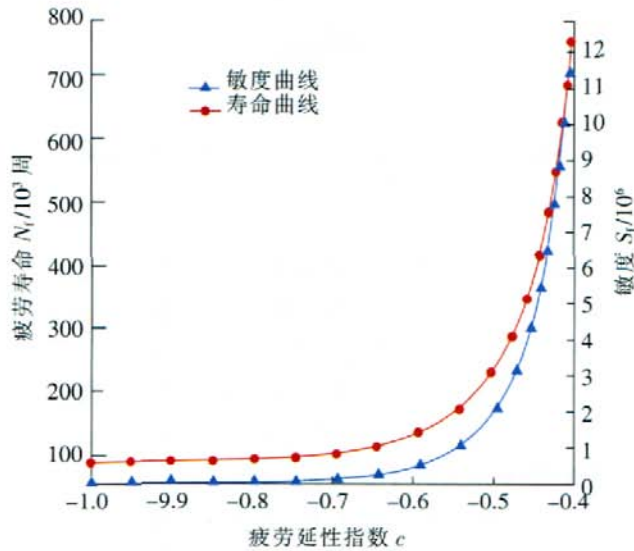


图5 $c-N_f-S$ 关系曲线
Fig.5 $c-N_f-S$ relationship curves

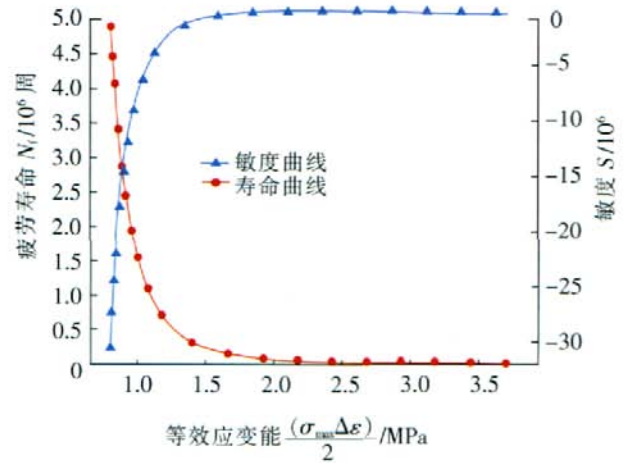


图7 $(\sigma_{\max}\Delta\varepsilon)/2-N_f-S$ 关系曲线
Fig.7 $(\sigma_{\max}\Delta\varepsilon)/2-N_f-S$ relationship curves

的灵敏度随着疲劳延性指数 c 的增大而逐渐增大,且灵敏度的变化率也越来越快,这说明疲劳延性指数 c 的值越大,它的变化对疲劳寿命的影响也越大。

3.5 弹性模量

疲劳寿命 N_f 对弹性模量 E 的灵敏度曲线如图 6 所示。由图可以看出,疲劳寿命 N_f 随弹性模量 E 的增大而减小。疲劳寿命 N_f 对弹性模量 E 的灵敏度总小于零,且灵敏度曲线是单调递增的。弹性模量 E 的值越大,其变化对疲劳寿命的影响越小。弹性模量 E 的值较小时,其值的变化对疲劳寿命影响较大。

3.6 等效应变能

疲劳寿命 N_f 对等效应变能 $(\sigma_{\max})/2$ 的灵敏度曲线如图 7 所示。由图可以看出疲劳寿命 N_f 随等效应变能 $(\sigma_{\max})/2$ 的增大而减小。疲劳寿命 N_f 对等效应变能 $(\sigma_{\max})/2$ 的灵敏度为负值,且灵敏度曲线是单调递增的。等效应变能 $(\sigma_{\max})/2$ 的值越大,它的变化对疲劳寿命的影响越小。等效应变能 $(\sigma_{\max})/2$ 的值较小时,其值的较小扰动会引起疲劳寿命的较大变化,即对应的灵敏度很大。

4 结论

本课题用临界平面法中的 SWT 模型对航空发动机压气机盘的疲劳寿命作了评估时,分析了疲劳寿命对各参量的灵敏度,得到以下结论: (下转第 95 页)

很好应用。

同时,信息化过程中关键的两个问题一直没有得到解决,即由于国内产品数字化定义中缺乏工艺信息,造成飞机数字化产品数据没有能真正传递到制造域,这是导致后续MES系统总是不能有效发挥作用的关键问题。研究波音公司的发放数据集可知,其产品数字化定义包含了支持后续制造过程的大部分内容,当然,有效发挥这样的数据集的作用还大大依赖于畅通的企业内部及外部的数字化协同工作环境(Global Collaborative Environment, GCE)。这也是我国面临的重大建设问题。

因此,生产系统的信息化依赖于数字化管理环境中逻辑相关的单一产品数据源,其支持产品数据集从工程域向制造域转移,并基于数字化质量监控体系在制造过程中有效控制产品制造构型。没有这个单一数据源环境,即使拥有ERP、MES等系统,企业的数字化改进也只是貌合神离,总是关注外围的产供销而无法继续深入开发企业的核心竞争能力及基于知识的创新能力。

4 结束语

国内航空制造业的生产现状及其问题根源是组织建设及信息管理两个方面。这两方面的变革必然会给企业带来较长期的适应性变化,因此企业变革必须作为企业管理中的重要环节。变革必然是从生产组织和信息系统的精益化、信息化基础环境变革开始,进而推动生产流程重组,最终完成企业精益化与信息化目标,这个过程是个循环改进过程。改进内容分别对应着生产组织改进、信息系统架构和企业文化。生产组织需要适应新时代要求,既可应对多样化产品制造需求,又可支持批量生产,将模块化思想应用于生产系统中的精益模块化生产系统可以满足航空制造业要求,其中逻辑相关的单一产品数据源连接了工程域和制造域,是数字化企业得以实现的基础。

参 考 文 献

[1] Joachin Benz. Modularization of ecological models [EB/OL]. 2004 [2004-8-4]. <http://www.wiz.uni-kassel.de/ecolas/intro/modularization.pdf>.

[2] 陈国权. 中国企业实施并行工程的若干特点、问题及解决方法. 高技术通讯, 1999(1):7-12.

[3] Victor Chiron, Michel Pimenta. Production Management. Consolidation Project, Activity PM02-C1. NC Machining, 2002, 9.

(责编 金卯)

(上接第 89 页)

(1) 疲劳寿命 N_f 随疲劳强度系数 σ 的增大而增大。敏度 S 是疲劳强度系数 σ 的单调增函数,在 σ 大于 1 800MPa 时,敏度迅速增加,这时应严格控制 σ 的值。疲劳寿命 N_f 对疲劳强度指数 b 的敏度很大,当 b 的值大于 -0.08 时, b 的微小变化将引起 N_f 值的很大变化。

(2) 疲劳寿命 N_f 对疲劳延性系数 ϵ 的敏度是非单调的,但敏度的值变化不大,可以近似认为是一个常数。疲劳寿命对疲劳延性指数 c 的敏度较大,在 c 大于 -0.6 时, c 的变化对疲劳寿命 N_f 的影响十分明显。

(3) 疲劳寿命对于材料的弹性模量 E 是单调减函数,当弹性模量 E 小于 1.5×10^6 MPa 时,寿命对 E 的敏度的绝对值较大,实际压气机盘材料的 E 值一般都在 1.5×10^6 MPa 以上,这时寿命对 E 的敏度很小。

(4) 疲劳寿命对等效应变能的敏度为负,在 0.8 ~ 1.5 范围内,敏度的绝对值迅速减小,当等效应变能大于 1.5 时,敏度值将降到相对较低的水平且趋于稳定。

参 考 文 献

[1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等. 航空发动机转动部件的失效与预防. 北京:国防工业出版社,2000. 102-163.

[2] Socie D F, Marquis Gray B. Multiaxial fatigue. Warrendale, Pa: SAE International, 1999. 171-189.

[3] Hakan Ersoy. Design sensitivity analysis of structures based upon the singular value decomposition. Comput. Methods Appl. Mech Engrg. 2002, 191: 3 459-3 476.

[4] Lataillate A de, Blanco S. Monte Carlo method and sensitivity estimations. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2002, 75: 529-538.

[5] Langelaan J W, Livne E. Analytic sensitivities and design oriented structural analysis for airplane fuselage shape synthesis. Computers & Structures. 1997, 62(3): 505-519.

(责编 晓霏)

齐二机床参展产品获得好评

CCMT2008 展览会上,齐二机床集团公司自主研发的、拥完全自主知识产权的 XK2130 型数控动梁龙门镗铣床引起业内人士的关注。展会期间,齐二机床集团分别与中信重工机械有限责任公司、韩国 KKC 公司分别签订了数款高档机床产品订购合同,合同金额达 4 亿元。XK2130 型数控动梁龙门镗铣床、FA-B160/L80 型落地铣镗加工中心获第五届中国数控机床展览会最高奖——“春燕”奖。(本刊记者 晓霏)