

技术专论

多轴蠕变-疲劳寿命预测系统软件开发

郭振坤¹, 张成成², 尚德广¹, 方磊²

(1. 北京工业大学 机电学院, 北京 100124;

2. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

摘要: 目的 开发多轴-蠕变疲劳寿命预测系统软件。方法 采用 Visual Studio 2010, 编程语言用 C++/CLI, WinForm 开发方式, 通过编制三维载荷下的临界面确定, 多轴循环计数, 多轴蠕变损伤, 多轴疲劳损伤, 蠕变-疲劳交互作用计算等各种程序, 开发高温环境下的多轴蠕变-疲劳寿命预测系统软件。结果 所开发的专用寿命预测软件, 程序运行环境为 Windows 操作系统, 需要 NET4.0 环境支持。数据采用 MicroSoft Access2010, 数据库管理采用了 ADO.NET 技术。结论 软件系统适用于随机多轴载荷下高温环境中热端机械零部件的损伤状态评估和寿命预测。

关键词: 多轴疲劳; 蠕变损伤; 复杂载荷; 寿命预测; 软件开发

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.026

中图分类号: TJ01; TP311.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0137-05

Development of Software System of Multiaxial Creep-Fatigue Life Prediction under Complex Loading at High Temperature

GUO Zhen-kun¹, ZHANG Cheng-cheng², SHANG De-guang¹, FANG Lei²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. AVIC Commercial Aircraft Engine CO., LTD, Shanghai 201108, China)

ABSTRACT: Objective To develop a software system for multiaxial creep-fatigue life prediction. **Methods** This system used for high-temperature environment was developed using C++/CLI programming language based on Windows Form. The program modules mainly included the determination of the critical plane under three dimensional stress/strain states, the multiaxial cycle counting, the multiaxial fatigue damage, the multiaxial creep damage, and the creep-fatigue interaction. **Results** The operating environment for the developed special software of life prediction needed the Windows operating system with the support of .NET Framework4.0. The software used Microsoft Access 2010 to design the database and used ADO.NET as the method of database access. **Conclusion** The developed software system is suitable for the damage assessment and life prediction for mechanical components under random multiaxial loading at

收稿日期: 2015-03-09; 修订日期: 2015-04-15

Received: 2015-03-09; Revised: 2015-04-15

作者简介: 郭振坤(1988—),男,山东人,硕士研究生,主要研究方向为多轴疲劳、高温疲劳。

Biography: GUO Zhen-kun(1988—), Male, from Shandong, Master, Research focus: multiaxial fatigue and creep-fatigue.

通讯作者: 尚德广(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为机械结构耐久性设计、多轴疲劳强度、有限元。

Corresponding Author: SHANG De-guang(1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: fatigue, fracture, and durability of structures.

high temperature.

KEY WORDS: multiaxial fatigue; creep damage; complex loading; life prediction; software development

随着计算机技术的发展,结构疲劳分析方法在各种机械结构强度评估与耐久性设计中得到了广泛的应用。目前国外开发了多种疲劳分析软件,FE-Fatigue,FE-safe,MSC-Fatigue,FEMFAT等。以上软件只适用于常温下的结构疲劳分析,而实际运行中重要设备的关键零部件常在高温复杂载荷下服役,如航空发动机的热端零部件(涡轮盘和涡轮叶片)通常在变幅多轴载荷和高温蠕变-疲劳交互作用下服役,蠕变与疲劳是其主要失效破坏形式^[1-3]。国内外很多学者对常温多轴疲劳进行了研究^[3-13],但在高温变幅多轴载荷下,由于会产生高温蠕变损伤,且蠕变损伤与疲劳损伤可能会产生交互作用,导致损伤计算和寿命评估变得更为复杂。尤其在非比例变幅加载下,进行多轴疲劳损伤与寿命预测变得更加繁琐,不利于工程结构强度设计计算。高温结构的疲劳强度评估与寿命预测是航空发动机、汽轮机等结构关键零部件进行结构抗疲劳设计的重要内容。研究开发出高温环境下能够同时分析蠕变和疲劳损伤及其交互作用的分析软件对工程设计人员设计手段的提高具有重要的实际意义。

文中在随机多轴疲劳和蠕变损伤理论研究的基础上,系统采用Visual Studio 2010开发,编程语言采用C++/CLI,WinForm开发模式,数据库管理采用了ADO.NET技术,开发了多轴蠕变-疲劳寿命预测系统软件,为工程设计人员简化了高温多轴蠕变-疲劳损伤和寿命评估中较为繁琐的理论计算步骤,从而提高了结构强度分析与设计的工作效率。

1 系统功能及模块的编制

1.1 系统功能模块

所开发的高温多轴蠕变-疲劳损伤评估系统可以对材料或部件在高温环境下的多轴低周疲劳损伤和蠕变损伤进行评估,获得所要评估机械零部件危险部位的裂纹萌生寿命。该软件系统包含了三个功能模块:多轴疲劳损伤估算模块、多轴蠕变疲劳模块、数据库管理模块。多轴疲劳损伤估算模块是基于多轴疲劳基础理论开发的,计算需要的材料常数为材料低周疲劳参数。多轴蠕变疲劳模块基于多轴

疲劳理论和高温持久损伤计算理论开发,需要包括材料的低周疲劳参数和持久热强参数综合曲线参数。两者的区别在于后台计算中有没有考虑持久损伤,前者采用对应温度的低周疲劳曲线计算疲劳损伤,后者则依据蠕变-疲劳理论计算,损伤为疲劳损伤和蠕变损伤之和。材料数据库管理模块可以完成增加、删除、修改材料参数的功能,从而可以扩展数据库,对其他材料进行损伤评估。

1.2 功能模块的算法

软件计算过程包含读取载荷历程、载荷历程整理、多轴载荷反复计数、临界面确定及临界面损伤参量求解、确定反复的疲劳损伤、求持久(蠕变)损伤、求交互损伤、损伤累积及寿命预测等过程。

多轴循环计数模块程序中采用了Wang-Brown多轴循环计数方法^[6-7]。依据临界面法基础理论形成临界面及损伤参量计算程序模块。疲劳损伤计算模块采用统一型拉伸型^[14]和剪切型多轴疲劳损伤模型^[16]分别计算每个反复产生的疲劳损伤。持久(蠕变)损伤计算模块通过热强参数综合方程计算持久损伤,目前程序支持曼森-索克普(M-S)和拉森-米勒(L-M)方程两种方程形式。蠕变-疲劳交互作用模块采用Lagneberg^[15]提出的交互损伤模型来确定每个反复中的交互损伤。损伤累积模块采用线性损伤累计方法。最终得到4个蠕变-疲劳损伤计算结果,即拉伸模型蠕变-疲劳损伤及寿命、剪切模型蠕变-疲劳损伤及寿命、考虑交互作用的拉伸模型-疲劳损伤及寿命、考虑交互作用的剪切模型-疲劳损伤及寿命。

2 程序数据流图(DFD)

程序主要通过用户选择实际环境温度及载荷历程数据,并从数据库获取材料参数,计算损伤和寿命,并将结果返回给用户,其顶层数据流如图1所示。其中圆形为加工,平行四边形框图表示数据存储,矩形框图为外部数据,箭头为数据流。

系统程序的主要计算功能模块为:多轴疲劳寿命计算模块、高温多轴疲劳寿命计算模块、材料参数管理模块三个部分。多轴疲劳寿命计算模块从数据读

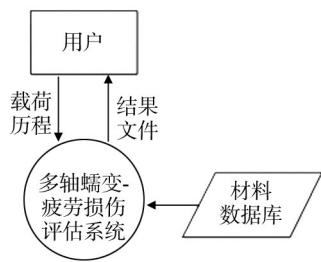


图1 软件系统顶层数据流

Fig.1 The top level of DFD

取材料的低周疲劳参数,高温多轴疲劳寿命计算模块从数据库读取材料低周疲劳参数和材料持久热强参数综合方程参数,数据库管理模块通过和用户交互,实现数据库读取及修改操作。其数据流如图2所示。

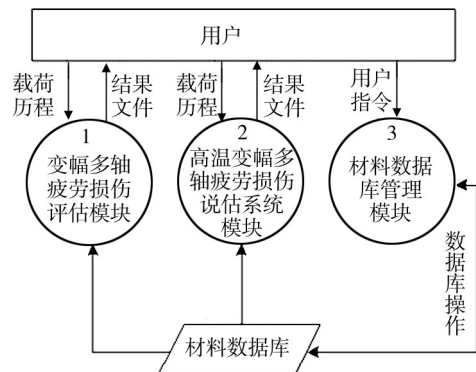


图2 功能层数据流

Fig.2 The context level of DFD

多轴疲劳损伤层数据流如图3所示,该模块从外部获取历程数据,从数据库读取材料疲劳参数,完成损伤估算后将结果输出到结果文件和屏幕。

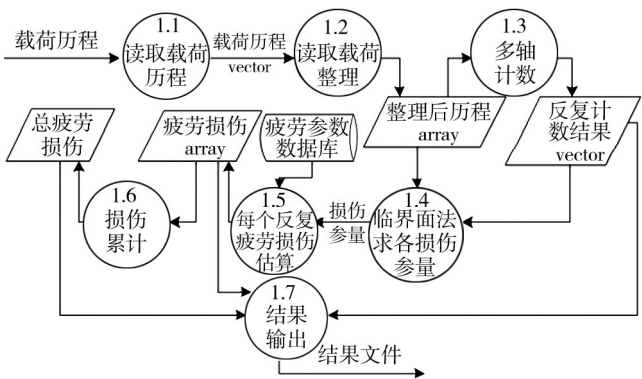


图3 多轴疲劳部分计算层数据流

Fig.3 DFD of multiaxial fatigue

计算模块是从外部读取载荷历程数据,从数据库获取材料疲劳参数和持久热强综合曲线参数,估算损伤之后将计算结果输出到结果文件和屏幕,其数据流如图4所示。

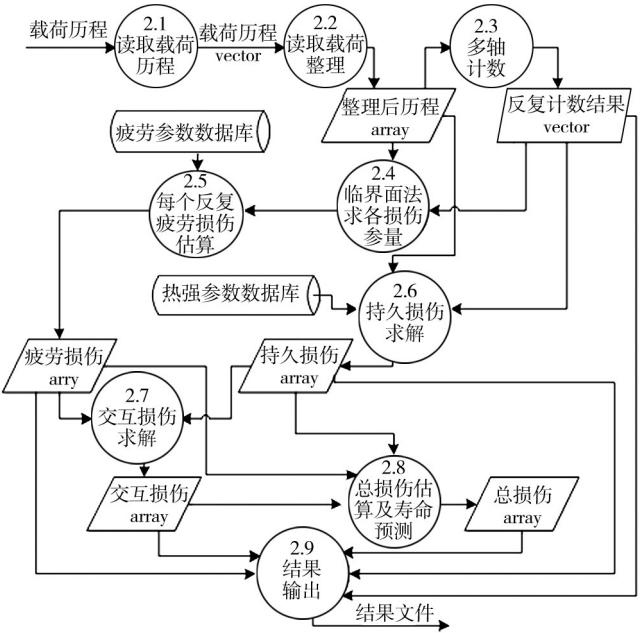


图4 高温蠕变-疲劳计算数据流

Fig.4 DFD of creep-fatigue

材料数据库管理模块依据用户发出的指令完成对数据库的相应操作,包括材料数据表中增加删除材料、增加删除存活率、对材料疲劳参数和热强参数的添加删除修改等,其数据流如图5所示。

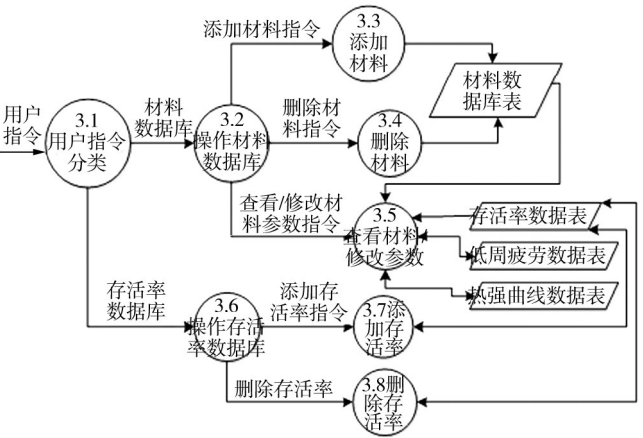


图5 数据库管理数据流

Fig.5 DFD of DBM

3 程序需求环境及软件操作

考虑高温蠕变作用和蠕变-疲劳交互作用的损伤

操作系统需要 Windows 操作系统,编译工具要求

测软件。

2) 所开发的专用寿命预测软件,程序运行环境为Windows操作系统,需要.NET4.0环境支持,数据采用MicroSoft Access2010,数据库访问与管理采用了ADO.NET技术。

3) 软件适用于随机多轴载荷下的疲劳寿命预测以及高温环境下多轴蠕变-疲劳损伤评估,具有用户操作界面好,实用性强,数据库可扩展的特点。

4) 可结合有限元分析结果或实测应力应变时间历程对高温结构件危险部位进行损伤与寿命评估。

致谢:感谢中航商用航空发动机有限责任公司的资助。

参考文献:

- [1] 郭敏骁,封志华,徐伟,等.环境因素与飞机结构寿命[J].环境装备工程,2004,1(2):73—77.
GUO Min-xiao, FENG Zhi-hua, XU Wei, JIANG Yun-Chun, et al. Environmental Factors and the Life of Airplane Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(2): 73—77.
- [2] 马楠楠,陶春虎,何玉怀,等.航空发动机叶片多轴疲劳试验研究进展[J].航空材料学报,2012,32(6):44—48.
MA Nan-nan, TAO Chun-hu, HE Yu-huai, et al. Research Progress of Multiaxial Fatigue Test Methods on Blades of Aviation Engine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(6): 44—48.
- [3] 黄新越,胡本润,陈新文,等.航空材料的力学行为[M].北京.国防工业出版社,2012.
HUANG Xin-Yue, HU Ben-run, CHEN Xin-wen, et al. Mechanical Behavior of Aeronautical Materials[M]. Beijing. National Defense Industry Press, 2012.
- [4] CHEN Hong, SHANG De-guang. An On-line Algorithm of Fatigue Damage Evaluation under Multiaxial Random Loading[J]. Int J Fatigue, 2011, 33(2): 250—254.
- [5] CHEN Hong, SHANG De-guang, LIU En-tao. Multiaxial Fatigue Life Prediction Method Based on Path-dependent Cycle Counting under Tension/Torsion Random Loading[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2011, 34(10): 782—791.
- [6] 王梦魁.多维振动环境试验的实践[J].环境装备工程, 2005, 2(3): 22—25.
WANG Meng-kui. Multi-dimensional Vibration Testing Practice[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(3): 22—25.
- [7] WANG C H, BROWN M W. Life Prediction Techniques for Variable Amplitude Multiaxial Fatigue—Part 1: Theories[J]. ASME Trans J Engng Mater Tech, 1996, 16(3): 367—370.
- [8] WANG C H, BROWN M W. Life Prediction Techniques for Variable Amplitude Multiaxial Fatigue—Part 2: Comparison with Experience Results[J]. ASME Trans J Engng Mater Tech, 1996, 16(3): 371—374.
- [9] WANG C H, BROWN M W. On Plastic Deformation and Fatigue under Multiaxial Loading[J]. Nucl Eng Des, 1995, 162(1): 75—84.
- [10] KIM K S, PARK J C, LEE J W. Multiaxial Fatigue under Variable Amplitude Loads[J]. ASME Trans J Engng Mater Tech, 1999, 121(3): 286—293.
- [11] KIM K S, PARK J C. Shear Strain Based Multiaxial Fatigue Parameters Applied to Variable Amplitude Loading[J]. Int J Fatigue, 1999, 21(5): 475—483.
- [12] MOREL F. A Critical Plane Approach for Life Prediction of High Cycle Fatigue under Multiaxial Variable Amplitude Loading[J]. Int J Fatigue, 2000, 22(2): 101—119.
- [13] LEE B L, KIM K S, NAM K M. Fatigue Analysis under Variable Amplitude Loading Using an Energy Parameter[J]. Int J Fatigue, 2003, 25(7): 621—631.
- [14] SHANG D G, SUN G Q, Deng J, et al. Multiaxial Fatigue Damage Parameter and Life Prediction for Medium-carbon Steel Based on the Critical Plane Approach[J]. Int J Fatigue, 2007, 29(12): 2200—2207.
- [15] LAGNEBERG R, ATTERNO R. The Effect of Combined Low-cycle Fatigue and Creep on the Life of Austenitic Stainless Steels[J]. Metallurgical Trans, 1971(7): 1821—1827.
- [16] SHANG D G, CHEN J H, SUN G Q, et al. Fatigue Characteristics for GH4169 Superalloy under Uniaxial/Multiaxial Loading at High Temperature[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(8): 785—790.
- [57] LEONARD K C, BARD A J. The Study of Multireactional Electrochemical Interfaces Via a Tip Generation/Substrate Collection Mode of Scanning Electrochemical Microscopy: the Hydrogen Evolution Reaction for Mn in Acidic Solution[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(42): 15890—15896.

(上接第136页)

ing the Corrosion Behaviour of Magnesium Alloy in Simulated Biological Fluid by Using SECM to Detect Hydrogen Evolution[J]. Electrochimica Acta, 2015, 152: 294—301.

- [56] DAUPHIN-DUCHARME P, MATTHEW A R, TEFASHE U M, et al. Local Hydrogen Fluxes Correlated to Microstructural Features of a Corroding Sand Cast AM50 Magnesium Alloy[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2014, 161(12): C557—C564.