

随机振动下装配误差对液压导管疲劳寿命影响仿真分析

姜子晗¹, 王卓健¹, 鱼 欢², 李 园¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 95596 部队, 河南商丘, 476000)

摘要 在军事实战化训练强度全面提高的背景下, 战斗机液压导管频繁出现裂纹、漏油等严重威胁飞行安全的故障情况。针对后机身液压导管疲劳寿命与机体结构寿命不匹配的问题, 重点以装配误差作为液压导管疲劳寿命主要影响因素开展仿真分析研究。从随机振动载荷疲劳寿命分析入手, 运用数字建模方法绘制典型管路模型, 结合 Miner 线性累计损伤理论, 利用有限元分析软件设置疲劳计算程序对正常装配液压导管疲劳寿命进行仿真评估。根据管路不同装配误差情况调整模型设置, 基于结构动力学理论, 对不同装配误差下的液压导管进行疲劳寿命分析, 得到当装配误差大于 0.73 mm, 液压导管疲劳寿命将低于 3 000 飞行小时机体寿命的分析结果。研究成果为进一步开展航空液压导管装配理论研究提供了技术支撑和经验参考。

关键词 液压导管; 随机振动; 装配误差; Miner 累计损伤理论; 结构动力学理论; 疲劳寿命仿真分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.003

中图分类号 V215.5; V262.4 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2020)02-0024-05

Simulation Analysis of the Influence of Assembly Error on the Fatigue Life of Hydraulic Pipe under Random Vibration

JIANG Zihan¹, WANG Zhuojian¹, YU Huan², LI Yuan¹

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 95596, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract With military training intensity being comprehensively improved, there are dangerous oil leakage, and cracks in hydraulic duct of fighter jet, these phenomena threaten to flight safety. Aimed to the problems thatthere are some mismatches between the fatigue life on the rear fuselage hydraulic conduit and the life of the body structure, this research is focused on one main influence factor, the assembly error. At the start of the fatigue life analysis of random vibration load, applying digital modeling methodology to develop the typical pipeline model, based on the Miner linear cumulative damage theory, the fatigue calculation program is developed by finite element analysis software to simulate and evaluate the fatigue life of normal assembly hydraulic conduit. Based on the influence of assembly stress on fatigue life, the pipeline model is adjusted to simulate different assembly errors, and the fatigue life of hydraulic ducts with different assembly errors is analyzed by using structural dynamics theory and fatigue calculation program. It fol-

收稿日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(71501185)

作者简介: 姜子晗(1996—), 男, 山东烟台人, 硕士生, 主要从事装备可靠性研究。E-mail: jiangzihan96@sina.com

通信作者: 王卓健(1974—), 男, 湖北公安人, 副教授, 主要从事综合保障研究。E-mail: zhuojianw1974@sina.com

引用格式: 姜子晗, 王卓健, 鱼欢, 等. 随机振动下装配误差对液压导管疲劳寿命影响仿真分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(2): 24-28. JIANG Zihan, WANG Zhuojian, YU Huan, et al. A Simulation Analysis of the Influence of Assembly Error on the Fatigue Life of Hydraulic Pipe under Random Vibration[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(2): 24-28.

lows that when the assembly error is greater than 0.73 mm, the fatigue life of the hydraulic duct will be lower than the airframe life of 3000 flight hours, i.e. seriously threatening flight safety. The research results provide technical support and experience reference for the further research on the theory of aero-hydraulic pipe assembly.

Key words hydraulic conduit; random vibration; assembly error; miner cumulative damage theory; theory of structural dynamics; fatigue life simulation analysis

近年来,随着飞行训练时长、频次和强度的迅速增大,飞机后机身液压系统导管长期处于高压冲击脉动和发动机强烈振动至下,受导管材料和安装质量等多种因素影响,致使战斗机液压系统导管频繁出现裂纹渗漏故障,见图1。



图1 液压导管裂纹渗漏故障图

液压系统作为飞机各类作动舵面操纵动力来源,一旦故障不能及时发现和处理,势必会造成严重后果,直接影响飞行安全。经故障数据统计分析,在装配导管过程中,不合规程的装配造成的装配应力过大是导致液压导管在多源激励下快速出现故障的主要原因(图2)。因此,有必要对液压导管在随机振动情况下装配应力对疲劳寿命的影响进行仿真计算。

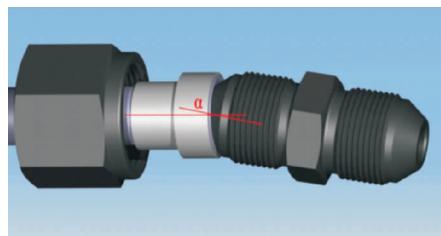


图2 液压导管装配误差图

戚刚^[1]利用强迫位移法对增压器涡轮叶片组装进行了有限元分析;张松^[2]利用轴对称基础单元法对高速旋转主轴过盈配合进行了研究;王乐勤^[3]利用三维接触单元法对管道系统振动进行了分析。经过对比发现,强迫位移法具有求解精度高,计算适用范围广,计算效率高的特点,因此,本文选用强迫位移法进行分析装配应力的仿真分析。在随机振动方面,国内学者从20世纪70年代开始相关研究,姚起航^[4]首先论述了结构振动疲劳的概念,其团队在近40年内深入开展了大量随机振动疲劳分析。周敏亮^[5]系统地整理归纳了振动疲劳分析方法,为开展航空构件振动疲劳分析提供了方法依据。本文主要采用有限元法计算在支撑激励下的多自由度系统振

动问题的求解方法,理论推导较为简单,适用于复杂管道系统的振动问题。

1 随机振动液压导管疲劳分析

1.1 液压管路随机振动响应分析

飞机的激振源有多种,主要包括发动机振动、机动过载引发振动、飞行气流噪声振动。液压管路的损伤是以上多种激励共同作用的结果,它们具有复杂性,振动的发生时间、振动的频率等都是不可预测的、不规律的,因此飞机液压导管受到的振动具有很强的随机性,在进行仿真计算时可视为随机振动,可借助仿真软件对液压导管设置支撑激励,计算随机振动仿真下液压导管的动力响应。

现假设支撑激励为一种平稳随机载荷^[6],令:

$$-M\ddot{z}(t) \stackrel{\triangle}{=} P(t) \quad (1)$$

式中: $-M\ddot{z}(t)$ 为支撑激励引发的作用于体系上的等效载荷; $P(t)$ 为一种平稳随机载荷。

运用阵型解耦以及Duhamel积分^[7]可以求得响应系统的相对位移量 $u(t)$:

$$u(t) = \int \Phi h(\tau) \Phi^T P(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

式中: Φ 为体系的阵型矩阵; $h(\tau)$ 为体系的脉冲响应函数矩阵。

因此可以求得体系位移反应相关函数矩阵^[8]:

$$R_u(\epsilon) = E(u(t)u(t + \epsilon)^T) =$$

$$\int_0^t \int_0^t \Phi h(t) \Phi^T R_p(\tau - \tau_1 + \epsilon) \Phi h(\tau_1)^T \Phi^T d\tau d\tau_1 \quad (3)$$

式中: $R_p(\tau - \tau_1 + \epsilon)$ 为载荷 $\{P(t)\}$ 的相关函数矩阵。

对矩阵进行傅里叶变换得到位移反应功率密度函数矩阵 $S_u(\omega)$:

$$S_u(\omega) = F(R_u(\epsilon)) = \Phi H(\omega) \Phi^T S_p(\omega) \Phi H^*(\omega) \Phi^T \quad (4)$$

式中: ω 为随机载荷的干扰频率; $H(\omega)$ 为系统的频率响应函数矩阵; $H^*(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的共轭矩阵。

将 $S_u(\omega)$ 在频域 $0, \omega_c$ 上积分,进而可得到体系的位移反应均方值矩阵为:

$$\Psi_u^2 = \int_0^{\omega_c} S_u(\omega) d\omega \quad (5)$$

设置液压导管扩口式连接组件连接接触方式为 bonded^[13],两端为固定约束,P形卡箍传递效率设置为固定端的1/2,液压加载处理采用等效质量法,并将液压导管三维模型进行自动网格划分,得到具有80 503个节点,39 732个六面体单元的有限元模型。

3.2 液压导管无装配误差随机振动仿真分析

根据以上预处理参数选择设置边界条件后,对液压导管进行无装配误差条件下的模态响应分析,得到前6阶固有频率表3和液压导管局部各阶模态响应图(见图4)。

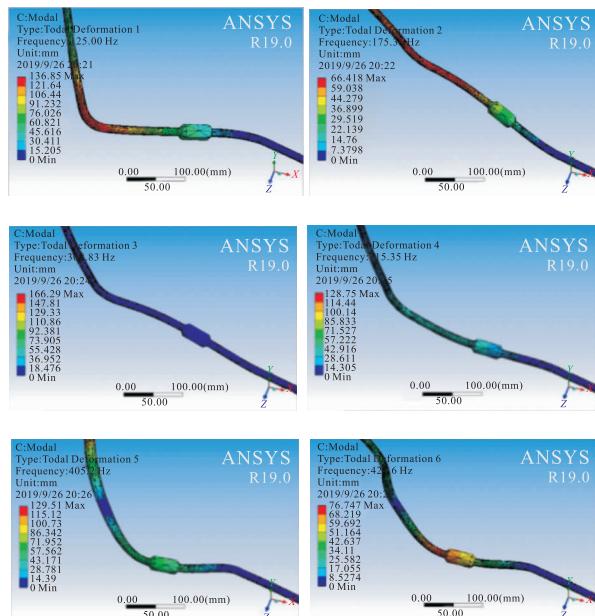


图4 液压导管各阶模态响应图

表3 液压导管前6阶固有频率

阶次	固有频率/Hz	阶次	固有频率/Hz
1阶	125.09	4阶	315.35
2阶	175.36	5阶	405.20
3阶	308.83	6阶	424.60

根据模态分析结果,对液压导管开展随机振动响应分析,创建加速度PSD幅值,建立加速度基础运动边界条件对液压导管的两端固定约束和卡箍半固定约束进行激励,通过XYZ3个方向激励加载,得到液压导管随机振动响应图,局部图见图5。

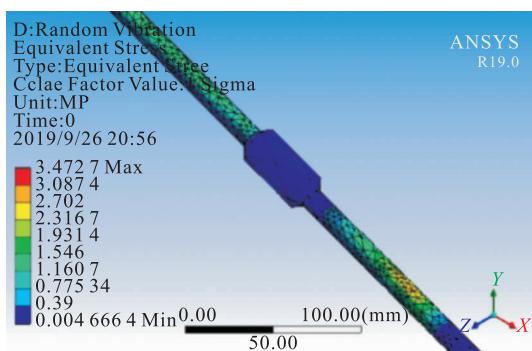


图5 液压导管局部随机振动响应图

根据疲劳寿命分析原理,构件应力集中处为的疲劳寿命即为该段液压导管的疲劳寿命。从随机振动响应图中可以看出,在随机振动激励下液压导管应力集中处位于导管连接组件右端,由此依据Miner线性损伤累计理论,并通过MATLAB软件编写随机振动疲劳寿命计算程序,带入ANSYS组件进行计算,计算流程框图见图6。

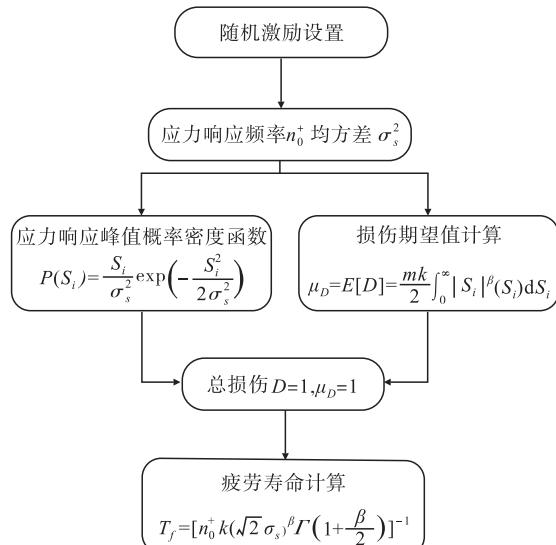


图6 随机振动疲劳寿命计算流程框图

管路材料1Cr18Ni9Ti的S-N曲线^[14]如图7所示,通过仿真计算得到液压导管在正常装配下随机振动疲劳寿命为5 836 h,远高于3 000飞行小时典型战斗机机体寿命标准和600飞行小时定检标准,表明该液压导管在正常装配下疲劳寿命的安全裕度较大,可以保证飞行安全。同时,计算结果与工厂生产的液压导管规定6 000 h寿命相近,说明仿真计算模型及疲劳寿命计算程序较为合理可信,具有可行性。

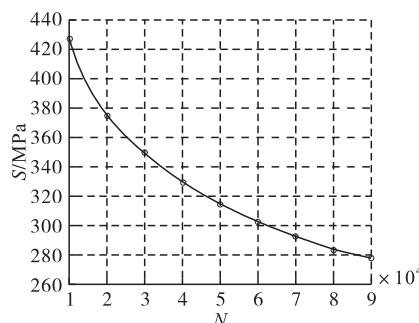


图7 1Cr18Ni9Ti的S-N曲线图

3.3 装配误差对液压导管疲劳寿命影响分析

当液压导管装配误差过大时,安装连接处会产生局部塑性变形或者产生材料裂纹,导致液压导管局部弹性模量变化,疲劳寿命迅速减少至检修间隔时间以下^[15]。因此,本节仅研究装配应力中等、弹性模量不变情况下液压导管疲劳寿命的

变化,以确定液压导管装配误差影响飞行安全的上限阈值。

当导管连接装置存在装配误差、装配应力中等情况,导管仍处于弹性形变,弹性模量基本不变^[16],通过改变连接装置一侧的接口坐标点模拟出装配误差现象。分别设置误差偏移量为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm 进行模态分析,得到装配误差下液压导管固有频率变化图 8。

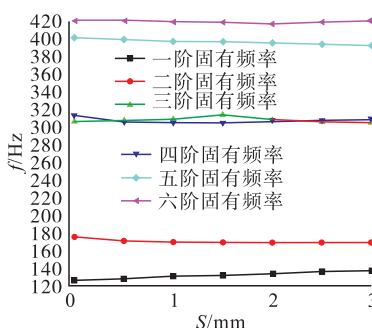


图 8 装配误差下液压导管固有频率变化图

代入随机振动疲劳寿命计算程序进行仿真,得装配误差下液压导管随机振动疲劳寿命图 9。

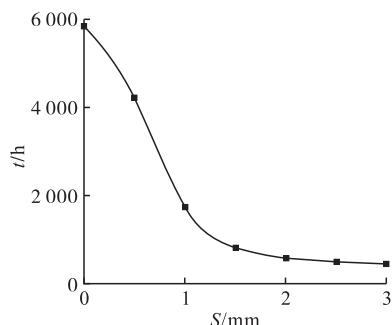


图 9 装配误差下液压导管随机振动疲劳寿命图

对装配误差下液压导管随机振动疲劳寿命图进行拟合处理,可以得知当装配误差大于 0.73 mm,液压导管疲劳寿命将低于 3 000 飞行小时机体寿命,严重威胁飞行安全。

4 结论

1) 针对某型战斗机液压导管故障频发现象,选取典型液压导管进行有限元建模,基于 PSD 功率谱加载模拟随机振动激励,运用 ANSYS 有限元振动仿真进行液压导管模态分析,发现液压导管故障危险点多位于管路连接装置附近,

2) 运用 MATLAB 编写基于 Miner 线性损伤累计理论的随机振动疲劳寿命计算程序,针对危险点进行疲劳寿命仿真计算,对液压导管设计分析具有

一定参考实践价值。

3) 针对装配误差情况下液压导管疲劳寿命减小、危及飞行安全,运用有限元建模对导管连接装置进行装配误差模拟,通过振动模态分析、疲劳寿命计算,得到装配误差的上限阈值为 0.73 mm,对进一步开展航空液压导管装配理论研究提供了技术支撑和经验参考,具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 戚刚,吴昌华,张南林. 增压器涡轮叶片和轮盘组装结构的三维接触精细有限元分析[J]. 中国造船, 2000, 41(3): 69-73.
- [2] 张松,艾兴,刘战强. 基于有限元的高速旋转主轴过盈配合研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(1): 15-17.
- [3] 王乐勤,何秋良. 管道系统振动分析与工程应用 [J]. 流体机械, 2002, 30(10): 28-31.
- [4] 姚军,姚起杭. 结构随机振动响应的工程简化分析 [J]. 应用力学学报, 2002, 19(1): 103-105.
- [5] 周敏亮,陈忠明. 飞机结构的随机振动疲劳分析方法 [J]. 飞机设计, 2008, 28(2): 46-49.
- [6] 程小勇,陈果,刘明华,等. 初始安装应力对管道固有频率的影响分析及试验验证 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(4): 512-517.
- [7] 李桂青,曹宏. 动力可靠性述评[J]. 地震工程与工程振动, 1983, 3(3): 42-61.
- [8] 欧进萍,翟伟廉. 多自由度体系在随机动力载荷作用下的动力可靠性分析[J]. 固体力学学报, 1986(3): 267-271.
- [9] 刘祁,何琳,束立红. 随机载荷下疲劳寿命预估计算方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(2): 31-33.
- [10] MADHAVAN PILLAI T M, MEHER PRASAD A. Fatigue Reliability Analysis in Time Domain for Inspection Strategy of Fixed Offshore Structures[J]. Ocean Engineering, 2000, 27(2): 167-186.
- [11] 邹晓军. 梁桥结构损伤识别的曲率模态技术[D]. 武汉:武汉理工大学, 2003.
- [12] 刘伟,刘永寿,李宝辉,等. 飞机管道系统动强度可靠性分析与优化设计[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [13] 王晶,陈果,郑其辉,等. 飞机液压管道初始装配应力仿真[J]. 航空计算技术, 2012, 42(6): 54-57.
- [14] 李振水. 飞机液压系统管路解析[M]. 北京:航空工业出版社, 2018.
- [15] 权凌霄,赵文俊,于辉,等. 随机振动载荷作用下航空液压管路疲劳寿命数值预估[J]. 液压与气动, 2017(6): 43-48.

(编辑:姚树峰)