

液压管路系统随机振动下疲劳分析

严文军*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要:

民用飞机液压管路系统受到飞机振动环境的影响,可能产生振动引发的管路及安装结构疲劳破坏。为了分析液压管路系统在飞机振动环境下的承受能力,参考 RTCA/DO-160G 中对于固定翼飞机振动环境的定义及要求,对某民用飞机液压管路进行振动模态和随机振动响应分析。通过有限元分析得出了液压管路及安装结构的随机振动 Von Mises 均方根应力,采用基于高斯分布和 Miner 线性累积损伤定律的三区间法,计算管路系统的随机振动疲劳损伤,得到了疲劳薄弱部位及疲劳分析结果,为民用飞机液压管路在随机振动环境下的疲劳分析提供参考。

关键词: 随机振动; 液压管路; 功率谱密度; 三区间法; 振动疲劳

中图分类号: V245.1

文献标识码: A



0 引言

民用飞机液压管路分布全机,为飞机飞控及增压装置提供液压动力,受到的飞机振动环境比较复杂。通过对航空液压管路系统振动故障的分析可知,其主要原因为:在机体环境振动载荷的作用下,管路产生大位移的强迫振动,特别是机体频率和液压管路系统固有频率接近时,会产生结构共振,由于高振动应力作用形成累积损伤,进而导致疲劳破坏^[1],因此需要进行必要的分析或试验来对液压管路的振动特性进行评估。

结构随机振动疲劳的分析方法主要有基于统计计数的时域分析方法和基于功率谱密度的频域分析方法,频域法计算相对简单,在结构分析中广泛采用。频域法的研究很多,Bendat 从应力功率谱出发,提出了窄带信号的疲劳损伤模型,Wirsching 等给出了窄带近似法的修正模型,Dirlik 建立了由两个 Rayleigh 分布和一个指数分布近似的幅值概率密度函数模型^[2],Steinberg 基于 Miner 线性累积损伤和高斯分布提出了三区间法,可对随机振动应力进行

简便处理^[3]。这些模型有的已经在 MSC/Fatigue 及 Abaqus/Fe-safe 等软件中集成。国内学者也对振动疲劳理论进行了深入研究,姚起杭等将疲劳分为静态疲劳和振动疲劳两类进行研究,并在结构振动疲劳方面取得很多科研成果,姚卫星和王明珠提出了结构随机振动疲劳寿命估算的样本法^[4]。

本文采用针对某民用飞机机翼的一段典型液压管路及其安装结构,进行有限元仿真分析,结合民机随机振动载荷谱,得出液压管路系统的随机响应均方根应力。利用三区间法对随机振动 Von Mises 应力进行处理,结合材料 S-N 曲线,利用 Miner 累积损伤理论得出结构在随机振动载荷下的疲劳损伤结果。本方法简单实用,可对管路和安装结构的设计和试验进行随机振动载荷下的疲劳评估。

1 随机振动疲劳计算方法

1.1 随机振动疲劳分析流程

随机振动载荷作用下,一般采用功率谱密度 (Power Spectral Density, 以下简称 PSD) 函数对随

* 通信作者. E-mail: yanwenjun@comac.cc

引用格式: 严文军. 液压管路系统随机振动下疲劳分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(1):1-5. YAN W J. Fatigue analysis of hydraulic pipeline system under random vibration loading[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(1):1-5 (in Chinese).

液压管路和安装支架使用的都为铝合金材料,零件厚度及材料力学性能^[8]见表2。

表2 液压管路系统材料的力学性能

结构	材料	零件厚度 /mm	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 (t/mm ³)
液压管路	6061-T6	0.889	68 211	0.33	2.72E-09
安装支架	2024-T42	1.27	73 723	0.33	2.82E-09

对管路系统进行有限元建模,对橡胶卡块进行简化,可将其简化为 MPC 单元来模拟管路在安装支架的连接,计算精度上也可接受^[9]。采用等效质量法对管路中的液压油进行简化,将油液质量以附加质量的形式等效到管路内壁上,不考虑油液和管路之间的耦合影响,且其振动仿真结果准确性较高^[10]。管路材料的密度使用等效密度替代,并在管路两端及支架与机翼结构连接位置施加简支约束。

3.2 模态分析

采用 NASTRAN 软件对有限元模型进行模态分析,可以得到管路系统的固有频率结果。液压管路系统的前4阶固有频率分别为199.9 Hz、221 Hz、244.1 Hz和270 Hz。

3.3 随机振动响应分析

模态分析以后,采用在模型约束处施加单位载荷随机振动激励,采用模态分析法对模型进行随机响应分析,得出振动响应传递函数,结合随机振动载荷 PSD 量值,就可计算得到结构的振动响应应力值。按照上节中确定的随机振动载荷 PSD 量值,分别对 X、Y、Z 三个方向进行随机振动响应计算,得出了液压管路及安装结构的最大 Von Mises 应力均方根(RMS)值。表3为三方向随机振动载荷下液压管路和安装支架的最大应力结果。以 Y 方向为例,随机振动载荷下管路和安装支架的最大应力均方根云图分别见图4和图5。

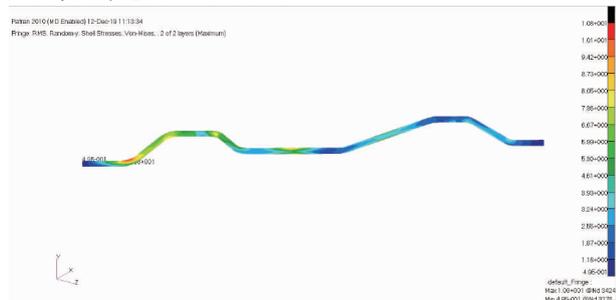


图4 Y方向载荷下的管路最大应力云图

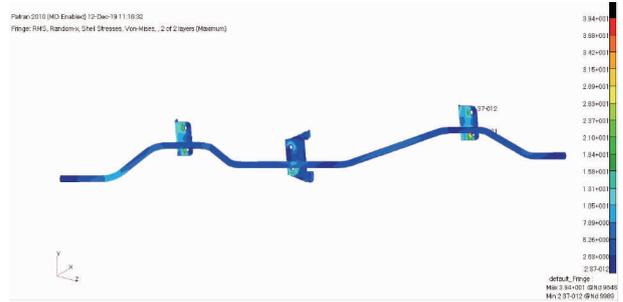


图5 Y方向载荷下的安装支架最大应力云图

表3 液压管路系统随机振动响应最大应力结果

部位	X/MPa	Y/MPa	Z/MPa
液压管路	10.8	11.3	8.41
安装支架	28.2	39.4	17.8

从应力云图中可以看出,液压管路随机振动响应应力最大的部位位于管路安装间距中间或者块卡安装处,支架最大响应应力位于块卡安装位置。因此,设计中需要重点关注液压管路系统的中部及连接位置结构,管路中部由于振动变形较大,需着重考虑管路安装间距的影响。

4 振动疲劳分析

4.1 材料 S-N 曲线

材料疲劳寿命曲线是通过大量试验总结得出的,描述 S-N 曲线的经验公式有很多,本文采用的管路材料 S-N 曲线定义^[8]如下:

$$\text{Log}N_f = 20.68 - 9.84\text{Log}(S_{eq}) \quad (2)$$

$$S_{eq} = S_{\max}(1 - R)^{0.63} \quad (3)$$

式中, N_f 为材料在等效应力作用下的许用循环次数, R 为疲劳循环应力比, S_{eq} 为应力比 R 下的等效应力, S_{\max} 为结构最大应力值,式中参数对应的均为英制单位。

同样,安装支架结构的材料 S-N 曲线定义如下:

$$\text{Log}N_f = 20.83 - 9.09\text{Log}(S_{eq}) \quad (4)$$

$$S_{eq} = S_{\max}(1 - R)^{0.52} \quad (5)$$

通过最大应力和 S-N 曲线可以计算得出在最大应力作用下液压管路和安装支架对应的许用循环次数。

以液压管路 X 向为例,随机振动最大应力为 10.8 Mpa,应力比 R 为 -1,根据式(3)计算得到 1σ 应力下的等效应力为 15.92 Mpa。根据式(2)计算 1σ 应力下的的许用循环次数为 $1.269\ 09E17$,由于

应力小于疲劳极限, 单次循环损伤为 0。2σ、3σ 应力分别为 21.6 Mpa 和 32.4 MPa, 其许用循环次数也可求出。

4.2 累积损伤计算

按照 Miner 线性累积损伤理论, 多个循环载荷下的损伤通过线性相加可得到总的损伤。结构应力均方根值最大处的单次损伤最大, 因此需要计算应力最大处的载荷循环次数。管路系统结构的一阶固有频率为 199.9 Hz, 将其作为最大应力循环作用的平均频率计算载荷循环次数^[11], 随机振动的振动时间是 3 h, 可得出液压管路系统在 1σ、2σ、3σ 应力的循环次数:

$$n_{1\sigma} = 0.683 * 199.9 * 10\ 800 = 1\ 474\ 572$$

$$n_{2\sigma} = 0.271 * 199.9 * 10\ 800 = 585\ 067$$

$$n_{3\sigma} = 0.044 * 199.9 * 10\ 800 = 95\ 640$$

因此, 可计算得出液压管路系统在随机振动下的疲劳损伤, 各方向下的损伤及总损伤结果见表 4。

表 4 液压管路系统随机振动疲劳损伤计算

结构	X	Y	Z	总损伤
液压管路	6.49E-08	4.16E-08	3.55E-09	1.1E-07 < 1
安装支架	9.18E-04	4.39E-05	6.7E-07	9.63E-04 < 1

从表 4 可以看出, 液压管路及其安装支架在随机振动载荷的作用下, 疲劳损伤小于 1, 结构疲劳寿命满足要求。

5 结论

1) 采用等效质量法进行液压管路有限元建模, 利用有限元法进行液压管路系统的振动响应分析, 得到结构在随机振动载荷下的应力响应, 并结合三区法进行振动疲劳分析, 得出了疲劳分析结果, 为液压管路及其安装结构的随机振动疲劳分析提供了工程实用的方法。

2) 参考民机行业规范, 确定了液压管路系统的随机振动载荷谱及试验要求, 并对试验要求进行了

仿真分析。

3) 得出了随机振动载荷下液压管路系统的疲劳危险部位主要为管路间距中间或者与安装结构连接部位, 设计时需关注管路安装间距的影响。

参考文献:

- [1] 高培鑫. 多源激励下航空液压管路系统振动分析及其约束层阻尼减振技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 3-4.
- [2] 袁毅. 基于应力功率谱的结构振动疲劳寿命预测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 3-4.
- [3] 孟凡涛, 胡愉愉. 基于频域法的随机振动载荷下飞机结构疲劳分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 32-36.
- [4] 胡磊. 一种随机振动疲劳寿命分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 2-3.
- [5] 曹立帅, 付春艳, 李焕. 机载设备随机振动疲劳寿命仿真分析[J]. 装备制造技术, 2018(5): 42-44.
- [6] 祝耀昌, 李韻, 徐俊, 等. 民用飞机机载设备振动试验要求和应用分析(一)[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 54-61.
- [7] RTCA. Environment Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment: DO-160G[S]. Washington, DC: RTCA, 2010: 77-94.
- [8] Federal Aviation Administration. Metallic Material Properties Development and Standardization: MMPDS-07[S]. USA: FAA, 2012.
- [9] 周艳丽, 陆波. 飞机液压管路支撑的有限元建模方式对应力分析的影响[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(2): 84-87.
- [10] 钟林林. 飞机液压管路系统振动仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018: 15-16, 55-56.
- [11] 代锋, 唐德效, 付永辉, 等. 航天器电子元器件疲劳寿命分析[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(2): 56-59.

作者简介

严文军 男, 工学硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机结构的强度分析。E-mail: yanwenjun@comac.cc

Fatigue analysis of hydraulic pipeline system under random vibration loading

YAN Wenjun *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The hydraulic pipeline system of civil aircraft is affected by the vibration environment of the aircraft, which may lead to fatigue damage of pipelines and installation structures caused by vibration. In order to analyze the bearing capacity of hydraulic pipeline system under the vibration environment, the vibration modes and random vibration responses of hydraulic pipelines for a civil aircraft are analyzed by making reference to the definition and requirements of fixed wing aircraft in RTCA/DO-160G. Von Mises stresses of hydraulic pipeline and installation structures under random vibration are obtained through finite element analysis. Based on Gaussian distribution and Miner's linear cumulative damage law, the random vibration fatigue damage of pipeline system is calculated using three interval method to get the weak location of hydraulic pipeline system under random vibration loads. The results show that the paper can provide reference to the fatigue analysis of civil aircraft hydraulic pipeline under random vibration environment.

Keywords: random vibration; hydraulic pipeline; power spectral density; three interval method; vibration fatigue

* Corresponding author. E-mail: yanwenjun@comac.cc