

# 飞机燃油管道卡箍有限元建模及疲劳寿命研究

赵紫豪<sup>1</sup> 陈果<sup>1</sup> 朱林峰<sup>2</sup> 单 单<sup>2</sup> 廖 桔<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 211000; 2. 成都飞机设计研究所, 四川 成都 610000)

**摘要:** 近年来,我国自主设计的某型飞机燃油系统屡次出现卡箍疲劳断裂的故障。针对某型飞机燃油系统管道卡箍,结合实际工况对卡箍模型进行了简化,研究了不同网格类型和不同网格疏密程度对卡箍精确度以及求解速度的影响。在对多种卡箍模型进行比较的基础上,实现了卡箍有限元建模优化,得到了最优的有限元模型。针对某故障燃油管道,利用 APDL 语言编制命令流,对所建立的最优卡箍模型进行疲劳寿命预测,并给出具体步骤。疲劳寿命与试验结果较为吻合,误差为 5.6%,验证了方法的正确性和有效性。

**关键词:** 飞机燃油管道; 卡箍; 有限元建模; 网格划分; 疲劳寿命

中图分类号: V228.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-654X(2021)04-0081-05

## Finite Element Modeling and Fatigue Life Analysis of Aircraft Fuel Pipeline Clamp

ZHAO Zi-hao<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>, ZHU Lin-feng<sup>2</sup>, SHAN Dan<sup>2</sup>, LIAO Ju<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211000, China;

2. Chengdu Aircraft Design Institute, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In recent years, a certain type of aircraft fuel system independently designed by our country has repeatedly experienced failures of clamp fatigue fracture. This article simplifies the clamp model based on a certain type of aircraft fuel system pipe clamp, combined with actual working conditions. And the influence of different mesh types and different mesh densities on the accuracy of the clamp and the solution speed are studied. Based on the comparison of various clamp models, the optimization of clamp finite element modeling was realized, and the optimal finite element model was obtained. Finally, for a certain faulty fuel pipeline, the APDL language is used to compile the command stream to predict the fatigue life of the established optimal clamp model. And specific steps are given. The fatigue life is more consistent with the test results, and the error is 5.6%. Results verify the correctness and efficiency of the proposed method.

**Key words:** aircraft fuel pipeline; clamp; finite element modeling; meshing; fatigue life

## 引言

近几年来,在某战机的使用中,多次发现燃油系统管路使用的卡箍出现疲劳裂纹、甚至断裂的现象,造成系统出现漏油故障。卡箍是飞机上常用的一种零件,通常用于各种管道以及发动机附件的安装和固定<sup>[1-2]</sup>。卡箍产生疲劳裂纹甚至断裂,会降低燃油管路产生固有频率,管道系统容易诱发低频共振,从而导致其疲劳寿命的降低以及由于过大的振动位移所产生的管路表面磨损。而随着飞机性能的逐步提升,整机管路系统设计理念的不断完善,对管道系统的卡箍性能也提出了更高的可靠性要求<sup>[3]</sup>,然而当前对卡箍的

分析主要还停留在疲劳试验观察破坏阶段<sup>[4-5]</sup>。基于此种情况,进行卡箍的应力分析,开展卡箍疲劳寿命预测研究,对解决飞机系统管路的可靠性设计问题至关重要。而卡箍模型的有效建立是卡箍应力分析的重要环节,因此,准确地建立卡箍模型对卡箍动力学分析尤为关键<sup>[6-7]</sup>。

目前关于有限元建模已有充分研究,然而国内外很少有学者对燃油管道卡箍的有限元建模方面进行研究。目前对卡箍的动力学分析主要采用线性弹簧对其进行离散化等效处理,基于有限元法建立卡箍-管路系统的动力学模型<sup>[8-10]</sup>,而未对卡箍模型本身进行有

收稿日期: 2021-04-15 修订日期: 2021-07-06

基金项目: 国家科技重大专项项目资助(J2019-IV-004-0071); 国家自然科学基金项目资助(51675263)

作者简介: 赵紫豪(1995-),男,满族,四川绵阳人,硕士研究生。

限元建模分析。在卡箍有限元建模中,不同的网格划分得到的结果是不一样的,其间的差距很大,有的结果甚至完全不可使用<sup>[11]</sup>。国内外学者对其进行了大量研究<sup>[12-14]</sup>,均认同只要无限细分网格,就可以得到真实位移解的下界。然而当网格加密时,节点数目以指数上升,简单的问题可以适用,但对复杂的三维模型来说,这种方法会使得节点数急剧上升,以致到微型计算机不可求解的地步。宋少云等<sup>[15]</sup>提出了有限元网格划分中的圣维南原理,该原理以为,某局部区域的网格疏密对其稍远处节点的计算精度影响很小,并使用实际算例对该原理进行了验证,但算例仅为简单平面模型,该原理是否适用于复杂三维模型有待验证。

本文为得到一个相对最优的卡箍有限元网格划分方式,采用一个典型燃油管道卡箍算例对不同网格类型和不同网格疏密程度对卡箍精确度以及求解速度的影响进行了比较,从而得出了针对于此类卡箍的最优建模方法。并针对某故障燃油管道,利用 APDL 语言编制命令流,计算此卡箍的疲劳应力谱,经雨流计数法统计处理后,进行卡箍疲劳寿命分析并通过试验验证此类卡箍最优建模的正确性和有效性。

### 1 不同网格划分对计算精度的影响

有限元模型用不同网格类型组成将会在一定程度上影响到有限元模型最终计算结果的精度和计算时间,所以采用不同网格划分方法,进行模态、疲劳破坏部位时间应力曲线及其计算时间的对比。

#### 1.1 卡箍四面体网格与六面体网格的模型

根据控制变量法,保证每个有限元单元的网格划分面积为  $0.35 \text{ mm}^2$ ,改变网格的类型,对疲劳破坏部位的局部网格加密处理,如表 1 所示。

表 1 卡箍模型四面体与六面体网格数目

	四面体 网格	四面体 局部加密	六面体 网格	六面体 局部加密
网格数量	71 740	74 081	12 942	13 866

#### 1.2 不同网格模型计算对比

##### 1.2.1 模态对比

由于卡箍固有频率较高而燃油管路系统固有频率较低,故将卡箍各种划分类型计算所得的一阶模态进行对比。通过频率对比发现四面体与六面体网格等四种模型各阶模态频率较为相近,且各阶振型相同。因此,这四种划分方法得到的模型在计算模态时所得结果相近。

##### 1.2.2 疲劳破坏部位应力时间曲线对比

对四种划分方法所得模型在输入随机载荷的情况

下进行动力学分析,对比算得的疲劳破坏部位应力时间曲线,如图 1 所示。通过对比发现,除去六面体网格局部加密,剩余三种网格划分方法得到的曲线重合度较高,所得的结果相近。故对于卡箍模型而言,六面体网格划分方式利用圣维南原理对其进行局部网格加密的方式会导致较大的计算误差。

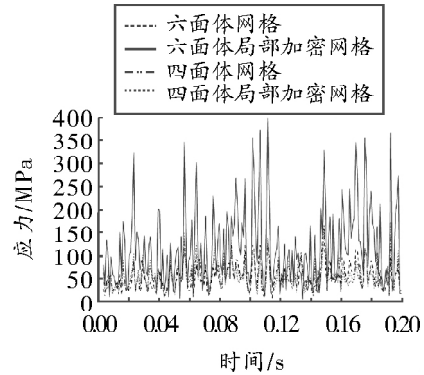


图 1 四面体与六面体网格模型  
疲劳破坏部位时间应力曲线对比图

#### 1.2.3 计算时间对比

在仿真过程中,计算时间也是一项不可忽略的参数,基于 ANSYS 的卡箍局部不同疏密程度的有限元模型应力曲线计算时间对比如表 2 所示,通过时间的对比,发现计算有限元模型的时间应力曲线所需的时间与网格单元数量成正比的关系,但由于在网格单元面积相同的情况下,四面体的数量远大于六面体,故计算时间远多于六面体。

表 2 卡箍模型动力学分析计算时间

	四面体网格	四面体网格局部加密	六面体网格
时间/s	465	475	145

### 2 不同密度的六面体网格对计算精度的影响

根据模态、疲劳破坏部位时间应力曲线、计算时间等方面的对比,选择六面体网格作为卡箍模型的划分类型,从而对卡箍不同疏密度的六面体网格对其计算精度的影响进行研究。

#### 2.1 卡箍不同密度六面体网格的模型

由于卡箍疲劳破坏在实际中主要出现在卡箍系带处,故通过卡箍系带划分的层数来体现网格整体的疏密程度,分为五类,具体参数如表 3 所示。

表 3 卡箍不同密度六面体网格数目

	两层网格	三层网格	四层网格	五层网格	六层网格
网格总数	12 942	25 380	33 118	61 955	112 650

## 2.2 不同密度六面体网格的计算对比

### 2.2.1 模态对比

由于卡箍固有频率较高而燃油管路系统固有频率较低,故将卡箍的五种不同疏密度六面体网格计算所得到的一阶模态进行对比。通过频率对比发现六面体网格不同疏密程度模型各阶模态频率较为相近,并且各阶振型相同。因此,这五种划分方法得到的模型在计算模态时所得结果相近。

### 2.2.2 疲劳破坏部位应力时间曲线对比

对五种划分方法所得模型在输入随机载荷的情况下进行动力学分析,对比算得的疲劳破坏部位应力时间曲线如图2所示。通过对比发现,各曲线的走势基本一致,但两层的曲线在峰值处差异较大且可发现三四五六层应力时间曲线较为一致,并当层数逐渐增加时,计算出的应力结果也趋于收敛。故对于卡箍模型而言,若划分层数过低会导致计算有较大误差。

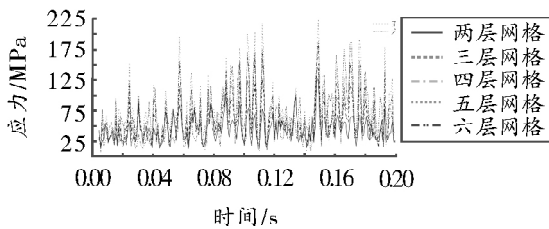


图2 卡箍不同疏密度六面体网格疲劳破坏部位时间应力曲线

### 2.2.3 计算时间对比

在仿真过程中,计算时间也是一项不可忽略的参数。各种不同层数六面体网格模型计算时间应力曲线所用时间与网格的数据如表4所示。通过时间的比较,网格数量与计算所用的时间大致成正比关系,当网格划分到六层时,有限元单元数量已是三层的4倍之多,计算时间也是三层的四倍之多。故应在保证相对精确的前提下,选取计算时间较短的网格划分方式,能得到更广泛的工程应用。所以不使用最为稀疏的两层网络,选择六面体三层网格作为卡箍有限元模型的网格划分方式,此种划分方式既高效又相对准确。

表4 计算时间应力曲线所用时间

	六面体三层	六面体四层	六面体五层	六面体六层
时间/s	282	362	680	1 240

## 3 模型验证

### 3.1 卡箍疲劳试验

#### 3.1.1 试验装置

为验证仿真建模的有效性,利用了如图3所示的

卡箍疲劳振动试验台。1#~4#为卡箍位置,试验件通过夹具安装在振动台上,加速度监测点为a5~a6。

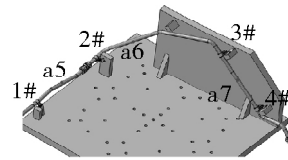


图3 卡箍疲劳振动试验台模型图

#### 3.1.2 试验原理

振动试验在电磁振动台上进行,将试验件和夹具整体固定在振动台上。将振动试验的控制谱图设置于振动控制仪,由振动控制仪输出的电压信号输至功率放大器放大之后,驱动振动台进行振动试验。由安装在振动台上的加速度传感器测得的振动信号输至电荷放大器放大后反馈到振动控制仪进行闭环控制。试验原理框图见图4。

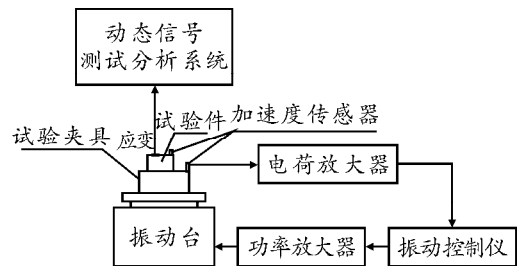


图4 振动试验原理框图

#### 3.1.3 试验条件

根据模态测试结果并经设计确认,试验载荷谱起止频率分别为: $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 450 \text{ Hz}$ ;试验方向为X向。坐标系采用局部坐标系:原点位于夹具底板顶点O处;沿试验件夹具两边分别为X向和Y向。振动试验时管路为充液状态。振动量级和对应时间表如表5所示。

表5 振动量级和对应时间表

功率谱密度/ $g^2/\text{Hz}$	振动时间/min
0.02	10
0.04	30
0.08	30
0.1	30
0.125	30
0.156	30
0.195	30
0.244	30
0.305	30
0.381	30
0.477	12

### 3.1.4 试验结果

振动试验 2 750.25 h 后 3#卡箍发生断裂如图 5 所示。

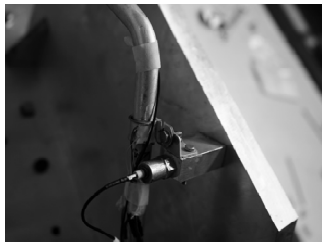


图 5 3#卡箍断裂照片

### 3.2 时域法疲劳寿命预测

#### 3.2.1 疲劳寿命估算步骤

为了精确估算卡箍的疲劳寿命,采用雨流计数法,对疲劳破坏部位的应力时间谱进行统计处理,再用有限寿命设计法进行疲劳寿命估算,该过程用 APDL 语

言编制程序,具体过程见图 6 分析步骤如下:

Step 1: 将卡箍处理为管道与基础连接的线性弹簧,建立管道系统耦合动力学模型,利用时域数值积分法,在时域求出卡箍与管道连接处的相对位移时间历程,得到卡箍振动环境。

Step 2: 通过 ANSYS 的模态分析确定卡箍的危险部位,导入 Step 1 得到的卡箍与管道的相对振动位移时间历程数据,利用瞬态动力学方法在时域仿真随机载荷下的卡箍疲劳破坏部位应力,求出卡箍疲劳破坏部位应力时间历程。

Step 3: 利用雨流计数法,将 Step 2 中计算得到的卡箍疲劳破坏部位的应力时间历程数据进行载荷谱编制,得到卡箍疲劳破坏部位载荷谱。

Step 4: 结合材料的疲劳性能与 Miner 线性累积损伤理论,将 Step 3 计算得到的危险部位应力载荷谱进行疲劳寿命预测,得到卡箍的疲劳寿命。

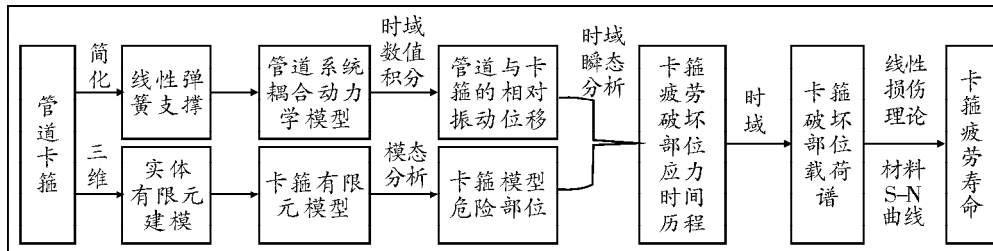


图 6 基于时域法的卡箍疲劳寿命估算过程

#### 3.2.2 雨流计数法

雨流计数法适用于比例加载情况,载荷随时间变化,且为单一载荷,例如机械载荷、热载荷、应力或应变等,其主要功能是对载荷历程数据进行二次处理,把经过峰值检测 and 无效幅值去除后的实测载荷历程数据以离散载荷循环的形式表示出来,其在实际工作中使用最为广泛<sup>[16-18]</sup>。

编制雨流计数法程序根据其计算规则如下:

- 1) 选取由最大峰或谷处起起的典型段,按载荷谱顺序输入各峰、谷值,直至数据完毕。
- 2) 读入下一峰、谷值,若数据完毕,则停止。
- 3) 若数据点数少于 3,则返回 2); 若数据点数大于等于 3,则由最后读入的 3 个峰、谷值,计算变程 X 和 Y。这三点中,第一点与第二点之差的绝对值为 Y; 第二点与第三点之差的绝对值为 X。
- 4) 比较 X 和 Y 的大小。若 X < Y,则返回 2); 若 X ≥ Y,则进行 5)。
- 5) 将变程 Y 记作一个循环,删除与 Y 相应的峰、谷值,返回 3)。

#### 3.2.3 Miner 线性累积损伤理论

有限寿命设计法允许构件的应力集中处存在大于疲劳极限的应力,然而当构件承受大于疲劳极限的应力时,会使材料产生一定量的损伤,这种损伤能够累积,当累积到某一临界值时,构件就会发生疲劳破坏,这就是疲劳累积损伤理论。本文选用 Miner 线性疲劳累积损伤理论,对各级应力循环造成的损伤进行累加,利用破坏准则得到接触线各单元的疲劳寿命值。根据 Miner 线性累积损伤理论<sup>[19]</sup>有:

$$B_j \sum_{i=1}^{k_j} \frac{n_{ij}}{N_{ij}} = 1 \tag{1}$$

式中  $k_j$  为疲劳破坏单元 j 的应力水平级数;  $n_{ij}$  为单元 j 的第 i 级应力循环  $S_{ij}$  在应力谱一个循环中发生的次数,由雨流计数法得到;  $N_{ij}$  为单元 j 在第 i 级载荷  $S_{ij}$  单独作用下的破坏循环数,由 S-N 曲线得到;  $B_i$  为单元 j 在应力载荷谱作用下达达到疲劳破坏所需的载荷谱块数。

#### 3.3 验证结果

利用雨流计数法对疲劳破坏部位应力时间历程进行载荷谱编制后,基于 Miner 线性累积损伤理论得到的疲劳寿命为 2 905 h。疲劳预测寿命结果与试验结果

较为吻合,验证了该种卡箍最优有限元建模方式的正确性和有效性。

#### 4 结论

本文针对某型飞机燃油系统管道卡箍,结合实际工况对卡箍模型进行了简化,研究了不同网格类型和不同网格疏密程度对卡箍精确度以及求解速度的影响。其难点主要为建立相对精准的卡箍有限元模型,并能在计算精确度以及求解速度之间找到平衡,研究取得以下结论:

1) 针对于卡箍模型,六面体网格划分方式利用圣维南原理对其进行局部网格加密的方式会导致较大的计算误差,且划分为四面体网格时的计算时间远高于六面体网格的计算时间。

2) 经过对比仿真发现,对于卡箍模型而言,若划分层数过低会导致计算有较大误差;而层数过多则会使计算时间大大延长,计算结果误差较小且趋于收敛,故选择三层网格划分较为合适。

3) 采用雨流计数法,对疲劳破坏部位的应力时间谱进行统计处理,再用有限寿命设计法进行疲劳寿命估算而预测得到的2 905 h疲劳寿命与卡箍疲劳振动试验中3#卡箍2 750.25 h发生断裂较为吻合,误差为5.6%,验证了此种燃油管道卡箍有限元建模的正确性和有效性。

由于飞机性能的提升,飞机系统向着高压化、大功率的方向发展,从仿真以及疲劳试验的结果来看,卡箍在2 800 h左右发生断裂。可通过增加卡箍数目、更改卡箍材料,如将在容易发生疲劳断裂处的卡箍由铝质更换为更为坚固的钢制卡箍,以及在管道表面涂敷一层减振涂层材料等方式来增大卡箍疲劳寿命。

#### 参考文献:

- [1] Gao P X, Yu T, Zhang Y L, et al. Vibration Analysis and Control Technologies of Hydraulic Pipeline System in Aircraft: A Review—science Direct [J]. Chinese Journal of Aeronautics 2020 34(4): 1–34.
- [2] 刘晓兵, 魏艳松, 邵杰, 等. 卡箍夹紧变形过程及力学性能分析 [J]. 精密成形工程 2020 12(6): 175–180.
- [3] 张振. 飞机管路系统连接卡箍可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2016.
- [4] 刘卫东, 张俊. 1Cr18Ni9Ti 卡箍的断裂分析 [J]. 热加工工艺 2021(8): 160–162.
- [5] 刘中华, 贾铎, 刘鑫. 某航空发动机卡箍断裂故障分析 [J]. 航空发动机 2019 45(3): 77–81.
- [6] 权凌霄, 赵文俊, 付旭鹏. 飞机液压管路支撑的 2 自由度动力学模型研究 [J]. 噪声与振动控制 2019 39(2): 76–81 86.
- [7] 王晶, 陈果, 郑其辉, 等. 卡箍对飞机液压管道动态应力的影响分析 [J]. 航空计算技术 2014 44(1): 64–67 72.
- [8] Elfelsoufi Z, Azrar L. Mathematical Modeling of the Dynamic Stability of Fluid Conveying Pipe Based on Integral Equation Formulations [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping 2016 146: 135–150.
- [9] Ding H, Ji J, Chen L Q. Nonlinear Vibration Isolation for Fluid-conveying Pipes using Quasi-zero Stiffness Characteristics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2019 121: 675–688.
- [10] Arndt D, Kanschat G. A Differentiable Mapping of Mesh Cells Based on Finite Elements on Quadrilateral and Hexahedral Meshes [J]. Computational Methods in Applied Mathematics 2020 21(1): 1–11.
- [11] 张俊. 有限元网格划分和收敛性(一) [J]. CAD/CAM 与制造业信息化 2010(4): 99–103.
- [12] Johansson A, Larson M G, Logg A. Multimesh Finite Elements with Flexible Mesh Sizes [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2020 372: 113420.
- [13] Xiao Z, Wei B, Ge D. A Hybrid Mesh DGTD Algorithm Based on Virtual Element for Tetrahedron and Hexahedron [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 2020 69(4): 2242–2248.
- [14] 胡季, 刘春艳, 杨玥. 基于 ANSYS 子模型的网格收敛尺寸快速分析方法 [J]. 大连交通大学学报 2019 40(2): 57–60.
- [15] 宋少云, 尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用 [J]. 机械设计与制造 2012(8): 63–65.
- [16] Gadolina I, Zayne T I R. Advantages of the Rain-flow Method at the Post-processing Stage in Comparison with the Spectral Approach [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 2019 481: 012005.
- [17] 高云飞, 张秀芬, 薛俊芳, 等. 基于雨流计数法的齿轮程序载荷谱研究 [J]. 机床与液压 2020 48(7): 11–15.
- [18] Bi J H, Chen H L, Ren H P. Analysis on Fatigue Life of Contact Wire Based on Rain-flow Counting Method [J]. Journal of the China Railway Society 2012 34(6): 34–39.
- [19] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.