

运输机货物拦阻网冲击仿真研究

赵晓辉*

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 应用动力学方法对货物拦阻网冲击响应进行了研究。在深入分析拦阻网多种非线性特性的基础上, 推导货物拦阻网的冲击动力学方程, 通过PAM-CRASH软件对货物拦阻过程进行有限元仿真。动态模拟了货物对拦阻网的冲击过程, 给出了货物的动能变化曲线和拦阻网的动载荷曲线, 为拦阻网强度设计提供参考。

关键词: 运输机; 货物拦阻网; 冲击; 仿真

中图分类号: V245

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2014) 06-0018-04

随着飞机设计向轻质、精细设计方向发展,越来越多的飞机系统细节强度设计得到了更多的关注,运输机货运拦阻网这种柔性部件的研究得到了重视。

货物拦阻网是飞机货运系统 I 级限动装置。大型飞机如波音707、波音747-200F、麦道-11F、空客A300、空客A310、洛克希德L-100、A400M、C130等机种均采用了拦阻网作为 I 级限动装置。然而,关于货物拦阻网这种柔性结构的强度设计文献较少。目前,国内对于货物拦阻网的载荷缺少有效、精确的算法。一般情况下是采用工程算法,通过静力等效原则,将应急着陆时货物的冲击载荷等效为静载荷,计算货物 I 级限动传至接头及机体结构的载荷。但此种方法需要做过多假设,使得计算结果与实际值间存在较大误差。因此,这里针对具有多种非线性特性的纤维绳索编织而成的柔性拦阻网进行动态仿真研究。

1 货物拦阻网冲击响应特征

拦阻网由网带和接头缝制而成,网带由若干根横向和竖向非金属材料织带通过缝合与金属接头相连接,金属接头与钢带板、机身结构相连接,通过接头将载荷传到机身结构上,机身结构上的吊带(或绳),将拦阻网暂时固定,形成一个平面,见图1所示。

货物拦阻网本身是一个柔性结构,相对于刚性结构而言,此类结构依靠构件自身的弹性变形实现运动和力的传递,在受载之后有较大的变形,其内部各单元相对于受载之前的

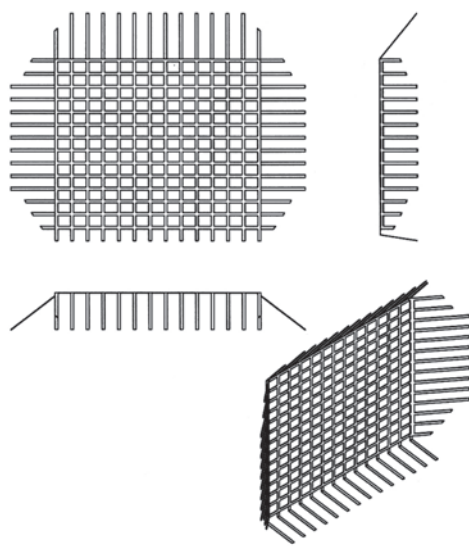


图1 货物拦阻网结构示意图

Fig.1 Structure diagram of cargo arresting net

自然状态有较大的线位移和角位移,且其载荷-位移曲线不是线性的,所以属于非线性结构。纤维绳也具备非线性结构的基本特征—变化的结构刚度,其最主要的力学性质是仅具备抵抗拉伸变形的能力,而不具备抗压性能。由纤维绳作为核心材料构成的柔性网的非线性主要体现在以下4个方面:

- 状态非线性 货物拦阻网展开过程中,构成货物拦阻网的纤维绳索在任一时刻处于不同状态而引起的非线性响应;
- 接触非线性 货物拦阻网展开过程中,其各个部分可能

收稿日期: 2013-11-27; 退修日期: 2014-04-08; 录用日期: 2014-05-10

*通讯作者. Tel.: 029-86832843 E-mail: vivian_zxh@sohu.com

引用格式: ZHAO Xiaohui. Simulation research of cargo arresting net impingement for the transport aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(06): 18-21. 赵晓辉. 运输机货物拦阻网冲击仿真研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(06): 18-21.

由于发生接触而产生力的相互作用,其接触区域是不可预知且动态变化的;

c. 几何非线性 货物拦阻网由初始状态到完全展开是一个大变形、大应变的过程,随着位移的增长,一个有限单元坐标的移动可以以多种方式改变结构的刚度,需要多次迭代获得一个有效的解;

d. 材料非线性 货物拦阻网纤维绳承受的张力超出其弹性范围而引起的塑性形变以及由此引出的路径相关性等非线性分析。

货物对拦阻网的冲击属于非线性动力学问题,涉及材料动力学和结构动力学,具有瞬时强值动载荷、柔性撞击、大变形、高应变率等特点。

2 货物拦阻网冲击动力学方程

为了得到货物拦阻网的动力学方程,需首先通过柔性体虚位移原理和达朗伯原理得到拦阻网任一点的动力学方程。

拦阻网任一点 变形引起的弹性力的虚功,即虚应变能为

$$\delta U_i = -\mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i \delta \mathbf{q}_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{q}_i$ 为任一点的坐标向量,即描述物体变形的广义坐标; $\mathbf{K}_i$ 为任一点*i*的刚度矩阵; $\delta \mathbf{q}_i$ 为任一点*i*的虚位移矢量;角标^T,表示转置矩阵。

作用在拦阻网任一点*i*上全部外力的虚功,即外力虚功为

$$\delta W_{ei} = \mathbf{Q}_{ei}^T \delta \mathbf{q}_i \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Q}_{ei}$ 为作用在任一点*i*上除变形引起的弹性力以外的全部主动力的广义力。

拦阻网任一点*i*的动能为

$$T_i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{q}}_i \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}_i$ 为任一点*i*的质量; $\dot{\mathbf{q}}_i$ 为广义坐标对应的广义速度。

由(1)式和(2)式可得到作用在拦阻网上任一点*i*所有力的虚功

$$\delta W_i = \delta U_i + \delta W_{ei} = -\mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i \delta \mathbf{q}_i + \mathbf{Q}_{ei}^T \delta \mathbf{q}_i = \mathbf{Q}_i^T \delta \mathbf{q}_i$$

式中: $\mathbf{Q}_i = -\mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i + \mathbf{Q}_{ei}$ 为任一点*i*的广义坐标 $\mathbf{q}_i$ 相关的全部主动力对应的广义力矢量; $-\mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i$ 为任一点*i*上弹性力对应的广义力。

根据任一点*i*上的动能及广义力矢量,可得到它的拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} \right) - \left(\frac{\partial T_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right) = \mathbf{Q}_i \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得到

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} \right) - \left(\frac{\partial T_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right) = \mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i - \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_i} \left(-\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{q}}_i \right) \right]^T$$

式中: $\ddot{\mathbf{q}}_i$ 为广义坐标对应的广义加速度。

令 $\mathbf{Q}_{vi} = - \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_i} \left(-\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{q}}_i \right) \right]^T$ 为动能对时间和物体坐标取

导数得到的二次速度矢量。得到 $\mathbf{Q}_i = \mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{Q}_{vi}$, 即

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i = \mathbf{Q}_{vi} + \mathbf{Q}_{ei} \quad (5)$$

(5)式即为货物拦阻网任一点*i*的动力学方程。

约束方程写成紧凑的矢量形式为

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n, t) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = 0$$

式中: $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1(\mathbf{q}, t) \ \mathbf{C}_2(\mathbf{q}, t) \ \dots \ \mathbf{C}_{n_c}(\mathbf{q}, t)]^T$ 为线性独立的约束方程组, n_c 是约束方程数。

由于货物拦阻网是由n多个任一点 约束组成的,采用拉格朗日待定乘子法表示的约束方程为

$$\lambda^T \mathbf{C}_q \delta \mathbf{q} = 0 \quad (6)$$

式中: $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_{n_c}]^T$ 为拉格朗日乘子矢量; $\mathbf{C}_q$ 为约束方程的雅可比矩阵。

将(6)式代入(5)式,则可得到拦阻网的约束动力学方程

$$\begin{cases} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{q}^T \mathbf{K} + \mathbf{C}_q^T \lambda = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式可求解系统的广义坐标矢量 $\mathbf{q}$ 和拉格朗日乘子 λ ,同时可得到货物拦阻网上任意点在运动过程中任意时刻的位移、速度和加速度,从而推出货物拦阻网上的动载荷。由本小节推导出的动力学方程可以看出,想通过数值求解计算出货物拦阻网冲击动载荷计算量大,需要通过不断的循环迭代,人工计算难以实现,因此,可通过现有仿真软件,对货物拦阻网这样一个典型的大体积、大变形的柔性结构进行有限元建模仿真,计算出货物对拦阻网的冲击动载荷。

3 货物拦阻网有限元仿真建模

(1) 单元类型选取

有限元模型中,单元类型的选取直接决定位移函数的形式,并直接影响单元的特性、计算精度及计算效率。拦阻网纤维绳单元类型选取205(Nonlinear Tension-Only Bar Element)二维梁单元,此单元类型在压缩时不产生力,仅当受拉时才有力的传递。货物单元类型选取1(Elastic-Plastic for Solid Element)空间三维实体单元。地板单元类型选取100(Null-Material Shell Element)二维壳单元,此单元类型用于接触计算,仅关注接触面之间的力,对于自身变形及内力并不过多计算。

(2) 接触类型选取

货物与拦阻网的接触为柔性接触,选用43号接触—(Edge-to-Edge Master-Slave Contact),不能互相穿透的边接触。货物与地板之间的接触为有摩擦的刚性接触,选用33号接触

(Symmetric Node-to-Segment Contact with Edge Treatment),不能互相穿透的面接触。

(3) 载荷施加

通过Acceleration field card建立货物过载曲线,模拟货物I级限动对拦阻网的冲击动载荷。严重载荷情况为货物向前9g过载。

(4) 模型约束

对拦阻网纤维绳边界节点及地板进行固支约束。

选取货物尺寸为 $4.012\text{m} \times 2.438\text{m} \times 2.438\text{m}$,货物质量 20000kg 。设定货物拦阻网尺寸为 $4\text{m} \times 3.88\text{m}$,拦阻网网格大小为 $0.16\text{m} \times 0.20\text{m}$,地板尺寸 $8.0\text{m} \times 3.7\text{m}$,货物距离拦阻网 0.6025m 。拦阻网纤维绳材料选取48-6000芳纶带,其拉伸性能如图2所示。建立的货物对拦阻网冲击响应仿真有限元模型如图3所示,整个模型共有50个壳单元,2786个体单元,371个梁单元,3590个节点。

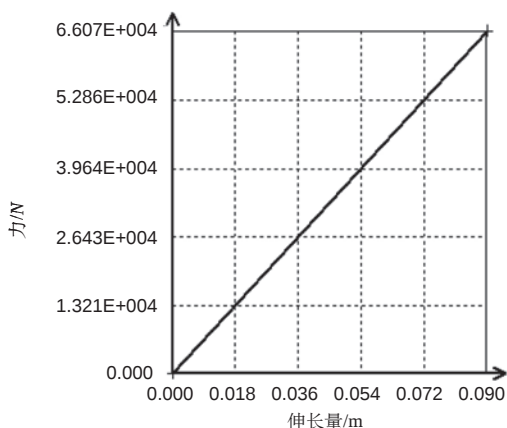


图2 拦阻网纤维绳力-伸长量曲线

Fig.2 Force-tensile curve of cargo arresting net fibre

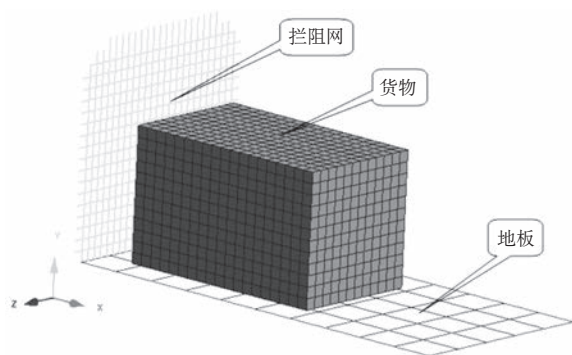


图3 有限元模型示意图

Fig.3 Finite element model diagram

4 货物对拦阻网冲击仿真结果

应用冲击碰撞分析有限元程序PAM-CRASH2G2006仿真货物对拦阻网的冲击过程,计算的时间为1s。仿真结果如图4

所示,货物动能变化曲线如图5所示。

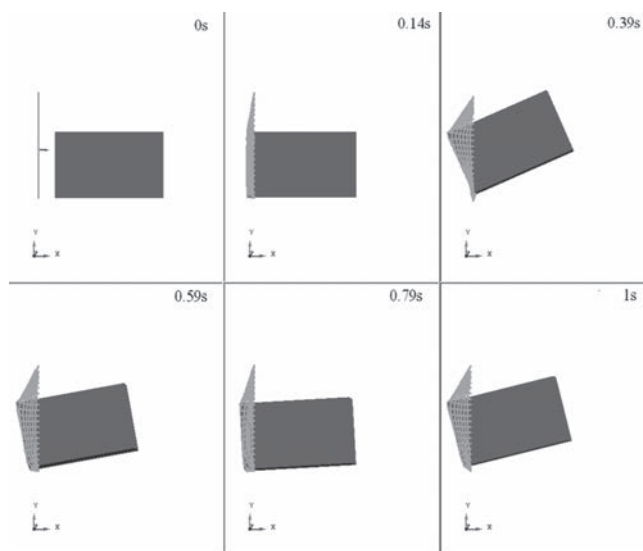


图4 拦阻网对货物拦阻仿真示意图

Fig.4 Arresting process diagram

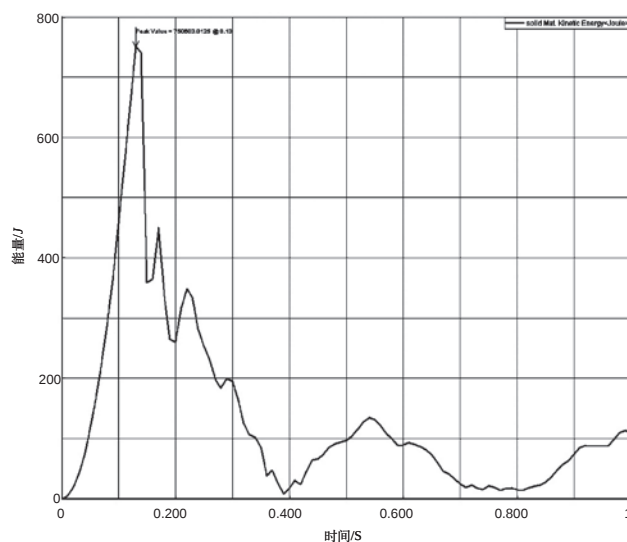


图5 货物动能变化曲线

Fig.5 Energy changing curve for cargo

货物拦阻网在初始状态时在一垂直平面内,随着货物的碰撞,货物拦阻网的四个顶角沿货物冲击面形状被拉开(如图6所示),通过网内部力的传递,网由外及内逐渐被拉紧。随着货物的不断冲击,在阻力与内应力的作用下拦阻网对货物进行拦阻,形成一个阻隔面。货物拦阻网的动态过程体现了自身特有的良好柔性以及整体的非线性特性,货物对拦阻网载荷-时间历程曲线如图7所示,第一次冲击力较大,冲击力轨迹为减幅振荡且幅值逐渐降低。

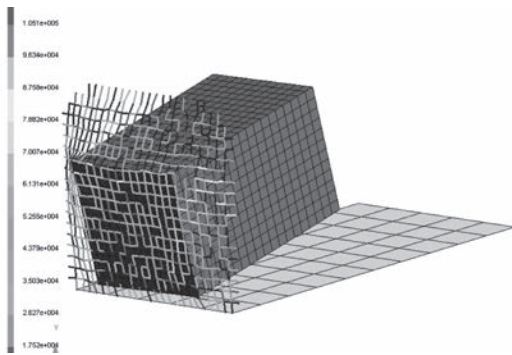


图6 货物拦阻网展开示意图

Fig.6 Outspread diagram for cargo arresting net

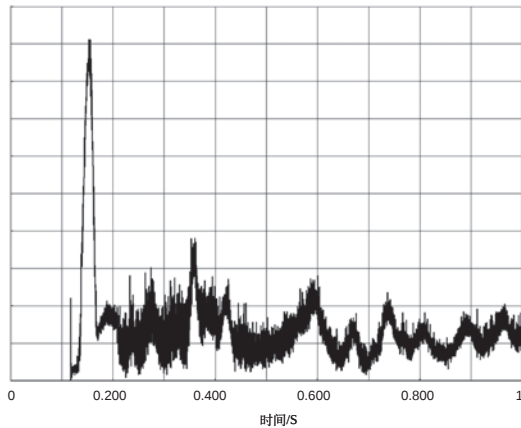


图7 货物对拦阻网的动载荷曲线

Fig.7 Dynamic load curve for arresting net

5 结束语

通过PAM-CRASH软件对货物拦阻过程进行有限元仿真,可以动态模拟货物对拦阻网的冲击过程,得到货物的动能变化曲线和拦阻网的动载荷曲线,给出了货物拦阻网强度设计的新思路,为货物拦阻网强度设计的理论与仿真分析提供了有效的支持。

AST

参考文献

- [1] 中国航空工业总公司.货运飞机专用技术设计指南[M].北京:航空工业出版社,1996.
Aviation Industry corporation of china. Special Technology Design Guide For Cargo Aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press,1996. (in Chinese)
- [2] 余同希,邱信明.冲击动力学[M].北京:清华大学出版社,2011.
YU Xitong, QIU Xinming. Impact Dynamics[M]. Beijing: QINGHUA University Press,2011.(in Chinese)

作者简介

赵晓辉(1981—)女,学士,工程师。主要研究方向:飞机系统强度设计。

Tel:029-86832843 E-mail:vivian_zxh@sohu.com

Simulation Research of Cargo Arresting Net Impingement for the Transport Aircraft

ZHAO Xiaohui*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Based on the dynamic method, the cargo arresting net impingement response is studied, on the basis of analyzing the cargo arresting net with a variety of non-linear features, the dynamic equation is deduced. The finite element simulation model of arresting process is built by using PAM-CRASH software. The impingement process of cargo to arresting net is dynamically simulated, The energy changing curve for the cargo and the dynamic load curve for the arresting net are obtained, for providing reference to the strength design of the arresting net.

Key Words: transport aircraft; cargo arresting net; impingement; simulation

Received: 2013-11-27; Revised: 2014-04-08; Accepted: 2014-05-10

* Corresponding author. Tel: 029-86832843 E-mail: vivian_zxh@sohu.com