

浅谈吊挂结构振动机理与改进

李杰

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

【摘要】：发动机是整个飞机的动力来源，发动机吊挂是固定发动机与机体结构的关键部件，吊挂的振动性能对飞机飞行性能有很大影响。本文针对飞机吊挂系统振动超标问题，通过研究振动系统模态，分析吊挂振动超标机理，制定减振方案，进行试飞验证，最终解决了故障，提升了飞机结构可靠性。

【关键词】：发动机；吊挂结构；振动模态分析；减振方案

1.引言

作为连接发动机与机体结构的关键部件，发动机吊挂一般分为翼吊式、尾吊式、机身侧壁式等类型。根据《飞机结构设计手册》第10分册要求，吊挂系统在设计过程中不仅要满足结构维修性、可靠性要求，满足防火、隔热、防腐排水要求，还应当保证在发动机各种工况下不发生超出许可范围的有害振动。据统计，发动机吊挂维护案例中，由于吊挂振动造成的，占据其中绝大多数。

本文对飞机吊挂振动超标问题进行分析研究，根据分析结果提出减振方案，旨在提升故障飞机结构可靠性，同时为后续飞机吊挂振动问题的处理提供思路。

2.技术背景

飞机发动机吊挂采用双梁式结构，前、后吊挂梁与发动机吊点连接，实现发动机姿态控制。前后吊挂梁与机身侧壁板固连，将发动机推力传导至机体结构，为飞机提供前进动力。用户反馈飞机在起飞滑跑阶段，发动机油门推到起飞状态时，后吊挂梁振动值超出许可范围，且每次起飞滑跑均有不同程度的超出。

3.机理分析

为分析吊挂振动超标的原因，首先进行了制造符合性复查。经复查，发动机本身功能正常、吊挂结构装配满足设计要求，因此振动值超标与制造无关。为进一步分析原因，需要研究后吊挂结构振动机理。

在起飞滑跑阶段，造成发动机吊挂振动的外界激励来源于发动机的工作振动。飞机采用涡扇发动机，在产生推力过程中，低压压气机转子、高压压气机转子和涡轮转子的高速运转，都会造成发动机结构的振动，发动机将燃烧室产生的推力传递给吊挂结构的同时也将发动机本身振动传递给吊挂结构，引起吊挂结构的受迫振动。

为探究发动机吊挂振动机理，对吊挂结构进行振动模态

分析。模态是系统的固有振动特性，每个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态模型。在分析过程中，将发动机后吊挂梁视为连续弹性体，且质量、刚度、阻尼等连续分布，可以简化为线性系统进行分析。线性系统自由振动可以视为 n 个正交的单自由度振动系统，进而求解出系统的 n 阶模态。

根据达朗贝尔原理，具有 n 阶自由度的黏滞阻尼系统用运动微分方程描述如下：

$$[m]\{\ddot{x}(t)\}+[c]\{\dot{x}(t)\}+[k]\{x(t)\}=\{F(t)\} \quad (1-1)$$

其中， $[m]$ 为 n 阶质量矩阵， $[c]$ 为 n 阶阻尼矩阵， $[k]$ 为 n 阶刚度矩阵；

$\{x(t)\}$ 、 $\{\dot{x}(t)\}$ 、 $\{\ddot{x}(t)\}$ 为系统的 n 维广义位移、速度、加速度列矢量

$\{F(t)\}$ 为系统 n 维激励力列矢量

分析发动机后吊挂结构的固有模态时，将吊挂结构视为自由振动系统，无外力作用，即 $\{F(t)\}=0$ ；阻尼系统对吊挂结构自由振动的频率影响不大，可以忽略阻尼系统项，即 $[c]\{\dot{x}(t)\}$ 。那么系统的微分方程可以简化如下：

$$[m]\{\ddot{x}(t)\}+[k]\{x(t)\}=0 \quad (1-2)$$

进而可以求得系统特征方程：

$$([k]-\omega^2[m])\{x\}=\{0\} \quad (1-3)$$

其中， ω^2 为系统固有频率的平方， $\{x\}$ 为特征向量

若刚度矩阵 $[k]$ 和质量矩阵 $[m]$ 为正定实对称阵，则求得的特征值数量与矩阵阶数相同，即系统的 n 个自然频率为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 。

根据上述理论求解发动机吊挂固有模态，通过 NASTRAN 软件仿真计算出后吊挂梁的三阶模态。为进一步进行验证仿真计算结果置信度，通过锤击法对后吊挂梁进行地面振动模态试验：在后吊梁主体上布置 3 个水平传感器和 3 个垂直传

感器,通过锤击后吊挂梁测出后吊挂梁输入信号与输出响应信号,对信号进行传函分析得出后吊挂梁的固有模态。将仿真计算结果与试验测得的数据进行对比,得出发动机吊挂的固有模态数据。

后吊挂梁是在发动机振动的激励发生受迫振动,根据振动理论的研究结果,受迫振动的振幅与外界驱动力频率关系如下图所示:

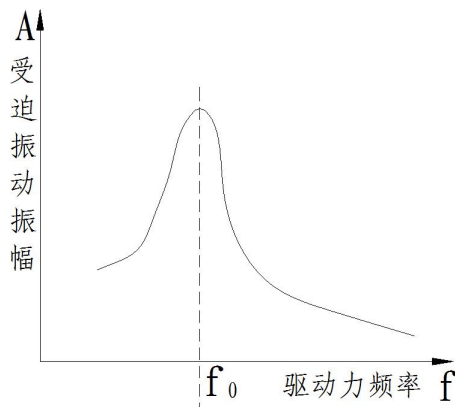


图2 受迫振动共振曲线

从图2可以得出结论:当驱动力频率与系统的固有频率(f_0)相等时,受迫振动的振幅达到最大。因此,后吊挂梁振动超标问题的根本原因是梁本身垂直弯曲振型整体模态频率与发动机振动频率接近,从而引发共振。

4.改进方案

振动理论表明:外部激励频率与结构自身固有频率相同时,受迫振动的振幅将达到最大。若改进方案能让发动机振动频率与后吊挂梁固有频率相差较大,就可以避免产生共振,减小振幅,解决后吊挂梁振动值超标问题。

发动机受自身功能限制,无法改变频率,为避免后吊挂梁固有振动模态与发动机振动频率耦合,需要改变后吊挂梁固有频率,由式(1-3)可以看出系统的自振频率与系统的质量分布和刚度分布相关。系统在特定频率下的自振频率又受结构阻尼特性影响,因此也可以通过增加阻尼系数减小振动幅值。

综合考虑以上因素,提出如下减振方法:

1.提高固有频率

根据式(1-3)可以看出,系统的自振频率与系统的质量分布呈负相关,与系统的刚度分布呈正相关,可以从这两方面进行改进。

方法1:增强系统连接刚度。在现有后吊挂梁结构中部

增加连接杆,组成超静定连接结构以增强后吊挂梁系统整体刚度。现场试验表明:执行本方法后,后吊挂梁在发动机起飞状态时,振动值降为原来的一半以下。本方法可以有效减小振动值超标问题。

方法2:减小后吊挂梁结构重量。现有后吊挂梁采用钢制合金材料,结构重量较大;可选择刚度质量比更大的材料进行改进。目前,钛合金广泛应用于飞机重要受力结构,与钢合金相比,钛合金强度高、密度小、耐热性能好。若采用航空钛合金代替现有材料,并进行结构优化,初步计算表明钛合金后吊挂梁减重将近一半,可大幅度提高结构固有频率,有效避免工作条件下吊挂结构与发动机发生共振。

2.降低固有频率

根据上述分析,若要降低结构固有频率,需要减小刚度或者增大重量。减小结构刚度分布显著影响吊挂结构可靠性,在工程中不可采用,只能通过增加结构重量将低固有频率。软件模拟分析表明,在结构振动响应幅值较大的部位增加配重对降低固有频率具有明显效果。现场试验表明:执行本方案后,后吊挂梁在起飞阶段不再发生振动超标现象。

3.增加结构阻尼

在不改变后吊挂梁固有频率的前提下,也可以通过在后吊挂梁上增加隔、吸振装置的方法减轻共振。目前工程应用中实现隔、吸振功能技术路径的方法是利用橡胶阻尼层或阻尼块减小振动幅值。橡胶材料弹性范围大、可自由选择几何形状、容易得到非线性效应,目前已广泛应用于航空领域。研究表明激励频率在吸振器固有频率附近一定范围内漂移时,安装吸振器后减振效果明显;外界激励与吸振器发生共振时,吸振效果最为明显。

上述方法是最常见振动控制方法,在应用中要考虑工程实际进行取舍:全新设计钛合金设计吊挂机构,更改周期长,成本费用高,难以满足互换性要求;吊挂梁位于发动机热影响区,使用橡胶材料阻尼装置存在失火风险,且增加结构阻尼需要改变连接结构,对阻尼装置的安装位置、安装角度以及后续维护有较多要求,实施较为困难;因此排除这两种方法。相比之下,后吊挂梁增加配重容易实施;后吊挂梁增加拉杆改装方便,且减振效果好。因此考虑通过增加拉杆和增加配重两方案并行的方法降低振动值。

改进方案实施后效果良好,后吊挂梁振动不再超标,获得了用户的好评。

5.结语

本文研究了发动机吊挂结构振动超标问题,通过分析发动机振动超标的机理,给出基于不同原理的解决方法;根据现有结构的工程实际,提出可行性建议,进行了理论和试验

验证;试验结果表明改进方法效果显著,可以有效解决振动超标问题;改进方案的执行提高了机体的结构可靠性。

本文提出的结构减振方法为飞机吊挂结构减振设计提供了经验。

参考文献:

- [1] 朱石坚等编著.振动理论与隔振技术[M].国防工业出版社, 2008
- [2] 李明怡.航空用钛合金结构材料[J].世界有色金属, 2000 年第 6 期: 17-20
- [3] 芮亚年.民航发动机吊点减振措施分析研究[D].中国民航大学, 2016
- [4] 王宝忠.飞机设计手册 10 结构设计[M].航空工业出版社, 2000