

航空发动机外部管路调频的 有限元计算方法

冯 凯, 郝 勇, 廉正彬
(沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



冯凯(1981),男,硕士,从事航空发动机总体结构设计。

收稿日期:2009-09-04

摘要: 利用有限元方法对航空发动机外部管路模态进行了计算,得到了管路的固有频率及模态振型;通过计算,分析了安装不同数量、位置的卡箍对管路固有频率的影响,以此为依据进行了管路调频,避免了管路共振的发生。

关键词: 管路模态;调频;卡箍;航空发动机

Finite Element Analysis Method of Frequency Modulation for Aeroengine External lines

FENG Kai, HAO Yong, LIAN Zheng-bin

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The external lines mode of an aeroengine was calculated by the Finite Element Analysis (FEA) method. The natural frequency and modal shape of the lines were also obtained. The effects of different number and different position hoops on the line natural frequency were analyzed by the calculation. According to the analysis, the line resonance could be avoided by the line frequency modulation.

Key words: inee mode; frequency modulation; hoop; aeroengine

1 引言

航空发动机外部管路主要用于输送燃油、滑油和空气等介质,是发动机附件系统的重要组成部分,在发动机使用过程中常常发生断裂、漏油、渗油故障。据有关资料介绍,在中国目前的成熟发动机(如 WP6、WP7)中,外部导管断裂故障占全部空中飞行结构故障总数的52%^[1],高居结构故障之首。受外部管路局部设计不合理、工艺不规范以及工作温度、管路振动频率和应力的影响而发生的

各种故障,在中外航空史上也不乏其例。因此,开展管路振动研究对提高管路的安全可靠性,保证发动机正常运行具有非常重要的意义。

本文利用有限元方法对航空发动机外部管路模态作了计算,分析了安装不同数量、位置的卡箍对管路固有频率的影响。

2 管路振动控制途径

引起管路断裂的原因有加

工、装配、温度和振动等,其中振动常常成为管路断裂的主要原因和诱导因素。

发动机管路振动,按激励的性质,可以分为强迫振动和自激振动。强迫振动是指管路在外界或内部的周期性(或随机性)机械载荷、流体载荷作用下产生的振动,自激振动是指管路内部介质运动与管路振动耦合形成振荡激励所产生的振动。振动的最主要来源是转子不平衡或不对中等原

因引起的振动通过机匣、卡箍作用于管路。

控制和降低发动机管路振动的途径主要有以下几种^[2]。

(1) 激振力水平控制

无论是共振还是其它类型的强迫振动, 管路的响应水平均与管路承受的激振力大小直接相关。

(2) 响应水平控制

管路振动响应控制途径包括调整频率和增加阻尼 2 种。

a. 调整频率

调整频率的主要目的是把管路的固有频率调到发动机工作转速频率之外, 避免在发动机工作过程中出现管路共振。因为在共振条件下, 即使是较小的激振力也可能产生很大的振动应力。

调整频率的基本原则是把管路的 1 阶固有频率调到发动机工作转速频率的 1.25 倍以上^[2]。根据管路频率调整的需要, 适当配置固定卡箍的数量和位置或增大管路直径等。

b. 增加阻尼

增加管路系统中的结构阻尼是减小管路振动响应的 1 个有效途径, 可通过在卡箍与管路接触面之间安装氟塑料衬套或金属橡胶衬套等减振材料来实现。

(3) 控制管路的装配应力

装配应力的存在将影响管路承受振动疲劳的能力。

(4) 加工装配损伤控制

加工装配造成的损伤直接影响管路的疲劳极限, 故应尽量避免和控制。

3 管路调频仿真计算

目前, 中国还没有实现在航空发动机设计阶段对管路振动进

行分析计算, 仅在少数管路排故中采用有限元仿真对管路振动进行分析。

在管路设计阶段, 应用 NX/Nastran 软件分别对在卡箍的数量和位置不同时的管路振动进行了仿真计算, 并对该管路进行了调频处理, 旨在避免发生管路共振。

根据管路调频方法, 可以通过配置固定卡箍的数量和位置或增大管路直径来调整管路的固有频率。但对于有固定用途的管路, 一般不允许改动其直径, 因此, 分别计算了在单根管路上的卡箍数量和位置不同时该管路的固有频率及其振型, 得到该管路的最佳卡箍数量和位置分布。从模态振型上可以看出, 管路发生最大变形的位罝也就是容易发生管路断裂的位置, 这为以后的管路调频指明了方向。

3.1 管路模态计算

3.1.1 结构简介

对某型发动机某段管路进行计算, 管路两端采取固定连接的约束方式。管路结构如图 1 所示。



图 1 管路结构

3.1.2 材料数据

在分析模型中, 材料力学性能数据取常温下的数据^[3], 见表 1。

3.1.3 有限元模型

管路有限元模型如图 2 所示。

表 1 材料力学性能数据

材料 牌号	$E/\times 10^3$ MPa	μ	$\rho/\times 10^3$ (kg/m ³)	σ_b / MPa
0Cr18Ni9	1.99	0.30	7.85	200
GH1139	1.77	0.34	7.83	785
TC6	1.13	0.30	4.50	980



图 2 管路有限元模型

3.2 计算结果及结果分析

3.2.1 无卡箍时计算结果及分析

该管路没有安装卡箍时的前 4 阶固有频率值见表 2。图 3~6 给出了该管路前 4 阶固有频率对应的模态振型, 从模态振型可以看出每阶固有频率所对应的最大变形位置。

表 2 无卡箍时管路的固有频率

阶次	固有频率 /Hz
1	121.5
2	150.7
3	290.4
4	443.1

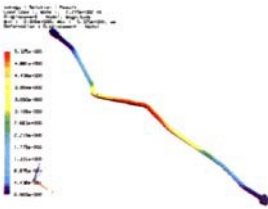


图 3 第 1 阶振型

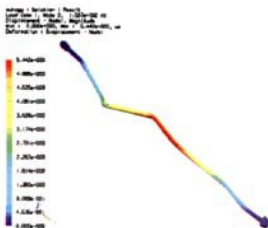


图 4 第 2 阶振型

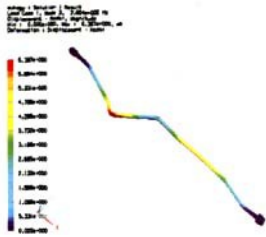


图5 第3阶振型

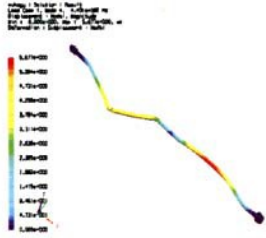


图6 第4阶振型

发动机高压转子极限转速取为 15000 r/min, 则发动机最大工作转速频率为 250 Hz。根据调整管路频率的基本原则(把管路的第 1 阶固有频率调到发动机工作转速频率的 1.25 倍以上), 管路的第 1 阶固有频率应在 312.5 Hz 以上。由表 2 可知, 该管路在不加卡箍状态前, 3 阶固有频率未满足管路设计要求, 因此需要对管路进行调频处理, 由于不允许改变管路直径, 采用了增加卡箍和调整卡箍位置的方法。

3.2.2 装 1 个卡箍的计算结果分析

计算时, 选取该管路的直线段作为卡箍的可能安装位置, 分别计算卡箍在不同位置(1~6)时对管路固有频率的影响。

卡箍的位置分布如图 7 所示。

在不同位置安装卡箍时, 该管路前 3 阶固有频率见表 3。

从表 2 与表 3 可以看出, 在管路上增加 1 个卡箍后, 管路的固有频率发生改变, 固有频率值

变大。其中, 在 1、6 位置增加卡箍时, 管路固有频率增大值最小, 效果最差; 在 3、4 位置增加卡箍, 管路固有频率增大值最大, 效果最好, 但其固有频率的数值与要求的频率(312.5 Hz)比较接近, 考虑到存在计算误差, 在该管路上只增加 1 个卡箍不能满足避免共振的要求。

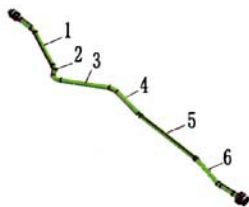


图7 卡箍位置

表 3 装 1 个卡箍时管路前 3 阶固有频率 Hz

卡箍位置	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
1	153.8	198.2	386.5
2	196.5	307.3	540.0
3	323.9	389.9	635.9
4	333.9	504.9	591.8
5	211.0	307.9	529.3
6	149.4	192.3	359.4

3.2.3 装 2 个卡箍的计算结果分析

计算时, 仍选取该管路的直线段作为卡箍的可能安装位置, 分别计算将 2 个卡箍安装在如图 6 中所示的不同位置(1~6)时对管路固有频率的影响。此时, 该管路前 3 阶的固有频率见表 4。

在表 4 中, 1-2 代表在图 6 中的 1、2 位置各安装 1 个固定卡箍, 其余类似。根据表中数据, 考虑到一定的计算误差, 可以看出该管路在位置 1-4、2-4、2-5、3-4、3-5、3-6 位置安装 2 个卡

箍能满足避免共振的要求。在其他位置安装 2 个卡箍, 管路的第 1 阶固有频率均在发动机工作转速频率范围内, 不能满足设计要求。故应在可满足选取安装卡箍要求的位置敷设该段管路, 以收到较好的避免共振效果。

表 4 装 2 个卡箍时管路

前 3 阶固有频率		Hz	
卡箍位置	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
1-2	204.1	320.7	545.5
1-3	328.1	391.9	861.3
1-4	463.8	524.9	615.4
1-5	287.1	467.3	707.7
1-6	195.7	260.5	472.9
2-3	326.1	391.0	859.8
2-4	507.0	618.0	1067.0
2-5	466.9	755.0	1107.0
2-6	270.1	400.2	746.4
3-4	518.2	630.6	711.2
3-5	698.9	892.0	1103.0
3-6	481.3	603.5	706.0
4-5	324.5	585.3	891.5
4-6	319.2	567.9	818.0
5-6	211.9	309.0	529.7

4 结束语

本文以对单根管路进行调频时避免其共振为目标, 从调整卡箍的数量和位置入手, 分别计算了在不同位置, 安装 1、2 个卡箍对该管路固有频率的影响, 得出了该段管路在敷设时卡箍的最佳安装位置和数量。

目前, 大多数管路彼此相连(直接或通过卡箍), 形成复杂的管路系统, 因此在实际敷设中需要考虑管系的振动。管系的模态计算应考虑管路上的卡箍、支架及管路与管路之间的相互影响, 然后在此基础上进行整个管路系统的避免共振设计(下转第 19 页)

气)时温度场的差异,如图 12 所示。在这 2 种燃料情况下燃烧室出口温度场基本类似,导致 OTDF 超标的主要原因均是由于中心热区没有被有效掺混,而四周的温度分布虽然存在差异(从表象看主要差异是二者的高、低温区有一定角度的旋转),但这个差异对 OTDF 影响不大。为此在后续的温度场调试试验中采用天然气掺混氮气为燃料,认为其调试结果可以代表燃烧 CO 时的真实结果。

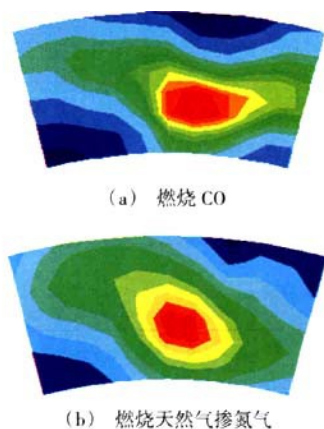


图 12 目标燃烧室燃烧 2 种燃料时出口温度场对比

为避免在温度场调节阶段影响燃烧效率而颠覆已有的成果,温度场调节仅仅从改变掺混气流的位置与深度着手,而没有试图去改变火焰筒头部油气分布。具体采用的调节手段有 2 种:1 种是

保持掺混气相对流量不变,通过改变掺混孔在火焰筒周向的布局来导引部分掺混气流对冲燃烧室出口高温区,由于头部旋流器进气带动整个火焰筒内气流产生旋转,在确定导引对冲冷流的掺混孔具体位置时考虑了气流旋转的影响;另 1 种通过改变掺混孔的直径大小及采用掺混管来提高冷流穿透深度,使冷流在有限的轴向路程内能尽量穿透到火焰筒中心冲散高温区。经过数次调整后,最终使燃烧室出口温度分布达标。

3.4 其它

结合研制过程中的调试试验,采用喷涂示温漆的方式对火焰筒壁温进行了 2 次测量,主要目的是在调整喷嘴喷射角度的过程中考察有无燃料贴壁面燃烧,由于状态未达到设计点,测量的火焰筒壁温偏低,最高温度不超过 610 ℃。测量结果仅表明未出现贴壁燃烧的情况,不作为壁温指标,但根据每次试验后对火焰筒的外观检查可初步判定火焰筒壁温不高。

研制过程中也考核了燃烧室冷态流阻,RF031 燃机燃烧室设计点下总压恢复系数约 0.91,略高于 WP6G 发动机设计点下燃烧室总压恢复系数,与之前的理论分析吻合。

为减少发电机组自耗,降低

燃料压降、减少燃料压缩功也是燃烧室研制过程中的一个努力方向,由于燃烧室研制不牵扯外部燃料管路设计,降低燃料压力主要从改进喷嘴压降的角度着手,经过对喷嘴进行优化设计,最终将喷嘴压降控制在 0.2 MPa 以内。

4 结论

(1)燃烧室主要性能参数:燃烧效率为 0.97,总压恢复系数为 0.91,OTDF 为 0.43,点火余气系数为 1.8,喷嘴燃料压降为 0.2 MPa,壁温在材料允许范围内。

(2)在同样热值、不同燃料成分下燃烧室燃烧性能差异很大。

该燃烧室距离工程应用还有较大差距,可靠性、寿命及整台燃烧室联焰等问题还未涉及,性能方面还存在进一步优化及开展真实成分验证的需求。

参考文献

- [1]朱世澜.燃气轮机技术:国外中、低热值气体燃料开发及应用于燃气轮机的概况[M].北京:中国电力出版社,1991.
 - [2]Norman Z.the Impact of Fuel Flexible Gas Turbine Control Systems on Integrated Gasification Combined Cycle Performance[C].Atlanta,June 16,2003.
 - [3]Rainer Kurz.Gas Turbine Fuel Considerations[C].ASME,2004.
- 发动机结构强度振动学术会议论文集,1994:287-297.
- [2]张洪魁主编.航空发动机设计手册(第 19 册)[M].北京:航空工业出版社,2000.

(上接第 33 页)计。管路调频对航空发动机管路设计具有重大的指导作用,能够及早发现设计缺陷,提高管路设计工作效率,降低发动机使用过程中的管路故障率。复杂的管路系统调频是今后

管路调频仿真计算工作的重点和难点。

参考文献

- [1]许锬俊.航空发动机导管结构完整性要求的初步研究[C].中国航空学会第七届