

中小型航空发动机稳态受感器振动校验方法研究

余柯锋 王志成 刘杰薇

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

摘要: 本文选取了多种在中小型航空发动机试验中常用的稳态受感器结构, 分别采用标准公式和有限元数值的计算方法, 对不同受感器的自振频率进行了计算。以受感器实物静频测试结果为基准, 比较了采用不同计算方法进行受感器振动校验结果的差异, 为后续设计人员选择受感器振动校验方法提供了指引。

关键词: 探针; 数值仿真; 静频试验

1 概述

在中小型航空发动机的研制过程中, 稳态受感器(以下简称“探针”)是获取发动机内流道参数的重要测试手段。为准确测得发动机内流道中不同径向高度的测试参数, 需要将相应的探针伸入流道内部, 具体如图 1 所示。

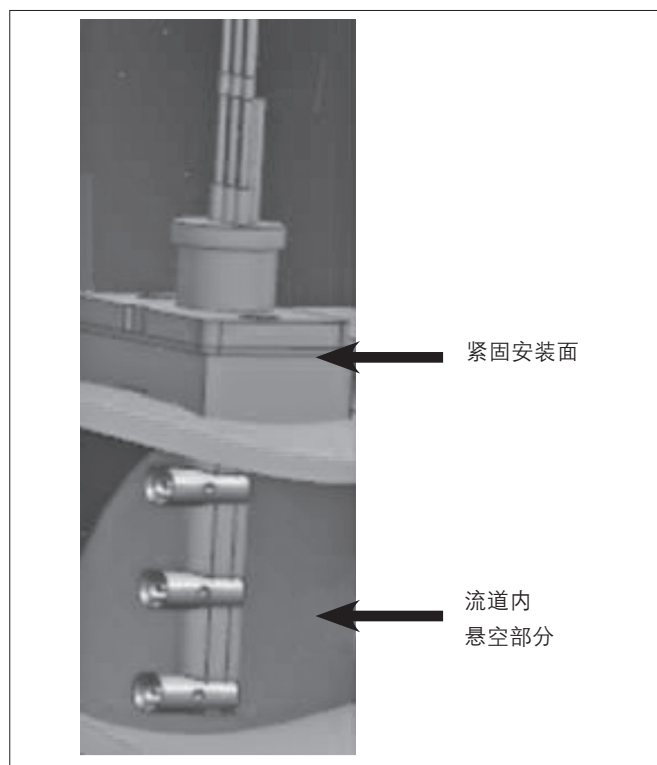


图 1 探针安装示意图

由于伸入流道内部, 因此探针在使用时会受到流道内气流的冲击。为保证试验安全, 在探针的设计过程中, 必须对探针结构进行强度校验和刚度校验, 当被测试件上带有转动件时, 还必须进行探针的振动校验。本文结合研发生产过程中的实际情况, 对探针的振动校

验方法开展了对比研究, 以期找出更为准确的探针振动校验方法, 提高研发生产效率。

2 研究思路

探针振动校验的主要目的是获得探针的自振频率, 确保该结构探针的自振频率(根据相关设计规范, 仅考虑 1 ~ 5 阶)与被测转动件稳定工作时的转频之间留有一定的安全裕度, 从而避免探针在试验过程中与转动件发生共振, 确保试验安全。

最准确获得探针自振频率的方法, 是对每一支探针进行振动测频试验, 通过试验获得每支探针的实测自振频率。但在实际研发生产过程中, 由于探针数量众多, 而振动试验资源有限, 对每支探针进行振动测频试验成本太高不可行。因此, 在实际的研发设计过程中, 探针进行振动校验的方法主要是通过对探针结构取相似几何体, 再利用标准公式进行计算。这种方法的优点在于较为简便快捷, 缺点在于只关注了探针的整体外形结构, 对结构进行大量近似简化, 且忽略了探针的安装固定等外部因素对振动产生的各种影响。

有限元数值计算是利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷工况)进行模拟的一种计算分析方法, 目前在实际工程设计中已得到广泛运用。该方法计算精度高, 且能够通过计算获得试验件在各种复杂工况下的强度、振动频率等信息。利用有限元数值计算方法, 可以将探针的具体结构和安装固定状态增加到计算过程中, 与标准公式相比, 其计算模型更贴近实际情况^[1]。

本文选取多种不同结构的单支点探针(因双支点探针在工程实际中应用很少, 故本文仅考虑单支点结构), 采用对比研究的方法, 以振动测频试验的实测结果为基准值, 通过对比标准计算公式和有限元数值计算获得的探针自振频率结果与基准值之间的差距, 评判两种振动校验方法的优劣。

为保证计算时一些基本条件的一致性, 探针采用的

表1 材料特性表

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比
0Cr18Ni10Ti	7900	2.06×10^{11}	0.3
T2M	8900	1.28×10^{11}	0.32

材料(0Cr18Ni10Ti和T2M)特性如表1所示。

3 标准公式计算方法进行振动校验

根据标准公式可知,单支点总压受传感器的k阶弯曲自振频率标准计算公式为:

$$f_k = \frac{C}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}}$$

式中: C —自由振荡固有模态常数,1~5阶的数值分别为0.56、3.51、9.82、19.2和31.8;

L —探针伸入流道中的长度;

E —探针支杆材料的弹性模量;

J —支杆结构的抗弯截面系数;

ρ —支杆材料的密度;

F —探针在流道中承受的气动力。

3.1 标准公式计算简化方法

采用标准公式计算时,需根据探针结构,对其模型做如图2所示的简化。

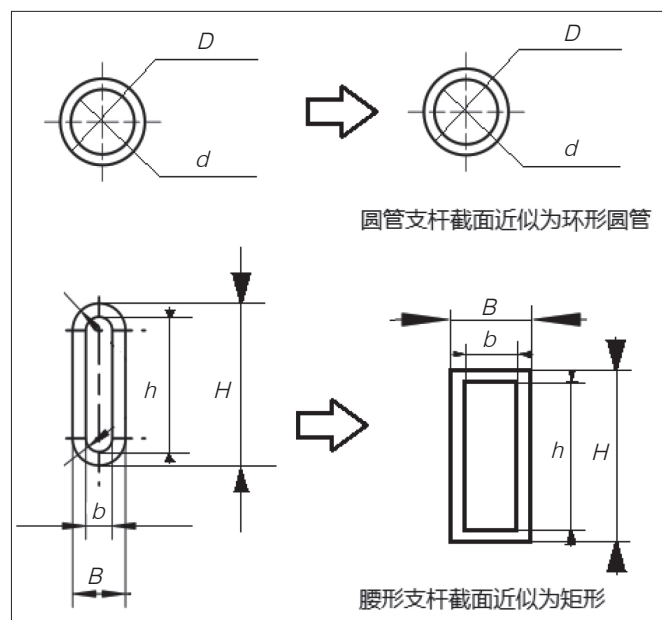


图2 常用支杆公式计算近似图

由图2可知,对于常用的圆管形支杆,在使用标准公式计算时,取其截面近似为环形圆柱管;对于常用的腰形支杆,在使用标准公式计算时,取其截面近似为双层矩形。

根据材料力学原理,对于环形圆管支杆,其支杆抗弯截面系数 J 的计算公式为:

$$J = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$$

对于近似矩形支杆,其支杆抗弯截面系数 J 的计算公式为:

$$J = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$$

在计算出支杆惯性矩 J 后,即可根据标准公式计算出该探针的各阶自振频率。

3.2 标准公式计算方法振动校验结果

采用标准公式计算本次研究的不同结构探针所得到的自振频率如表2所示。

表2 标准公式计算振动校验结果

序号	探针编号	公式计算一阶/Hz	公式计算二阶/Hz	公式计算三阶/Hz	公式计算四阶/Hz	公式计算五阶/Hz
1	T0001-0	90.1	564.7	1579.9	3088.9	5116.1
2	T0002-0	47.4	297	831	1624.8	2691.1
3	T0003-0	248.6	1558.2	4359.3	8523.2	14116.6
4	T0004-0	44.9	281.4	787.4	1539.4	2549.7
5	T0005-0	223	1397.9	3910.9	7646.6	12664.7
6	T0006-0	155.9	977.5	2734.7	5346.8	8855.7
7	T0007-0	24.9	155.9	436.1	852.6	1412.2
8	T0008-0	273.7	1715.3	4799.1	9383.1	15540.7

4 有限元数值计算方法进行振动校验

在有限元数值计算方法研究过程中,本文采用ANSYS商业软件,对所有探针单独建模,计算了各型探针在安装状态下(模拟安装螺钉紧固后的状态)的自振频率。计算时,边界条件的设置与后续振动测频试验时的环境条件(常温常压)保持一致。

4.1 有限元数值计算模型处理及边界条件设置

本次研究采用的软件为ANSYS19.2,采用的控件为Modal。该控件可以对物体进行模态分析,计算其固有频率。

由于探针的物理模型与实物存在一些细微区别,为了简化计算,对部分不影响探针固有频率的细节进行了处理,比如去除不必要的倒角、圆角;同时,原物理模型为了加工、焊接方便,采用了公差,使各零件分离,与实物焊接在一起的事实不符,所以对公差进行了处理,使各零件贴合,成为一体,更加便于后续的网络绘制(图3)。

在开始网络绘制前,需要先在SCDM中处理模型,简化不必要的特征,并将模型各零件贴合,通过布尔运算将零件组合,由于需要在A4-Modal模块赋予材料,铜管与其他零件不组合。之后进入DM中将各个实体Form New Part,保证交界面能够共网格,数据顺利传递。

在绘制网格时,将网格Sizing设置为1mm,其他设置采用默认参数,得到探针网格图如图4所示。

根据探针在安装使用时的固定状态，对紧固面施加固定约束，如图 5 所示。

设置相关边界条件（图 6），开展有限元数值计算。

4.2 有限元数值计算方法振动校验结果

利用有限元数值计算方法对本次研究中的各型探针

进行振动校验，所得到的自振频率结果如表 3 所示。

采用有限元数值计算方法，在得到探针各阶自振频率的同时，还可以获得其模态振型图（图 7），为设计人员判断其具体的振动情况提供参考。

5 振动测频试验

为获得本次研究各项探针的自振频率基准值，对每支探针实物都进行了静频测试试验。试验时，用专用转接段将探针安装在试验平台上，使其模拟在发动机上的实际安装状态（紧固面一致、悬空及自由部位也保持一致）。用 ICP 传感器做拾振元件。用小钢棒轻敲试验件时，试验件将在脉冲力的作用下振动，此时 ICP 传感器拾到的振动信号经电荷放大器放大，送至频谱分析系统进行 FFT 分析，得到频谱图，读取谱图上各谱峰的频率值，即得到探针在测试频率范围内的频率值。

试验流程如图 8 所示。

振动测频试验的结果如表 4 所示。

由于部分探针的高阶振动频率值超出了本次测频试验预设的频率范围上限（10000Hz），因此没有采集到相应的实测频率^[2]。

与模型不同，同个编号的同一批次探针实物之间，由于组装焊接手法、零部件加工精度和堆料填充等实际因素的影响会存在一些差异，这种差异对探针的实际自振频率也存在一定影响。为了能够更准确地获得该型探针的静频实测结果，对本次研究中的各型探针都取了至少 2 支实物试样进行试验，并对测频结果取均值，去掉

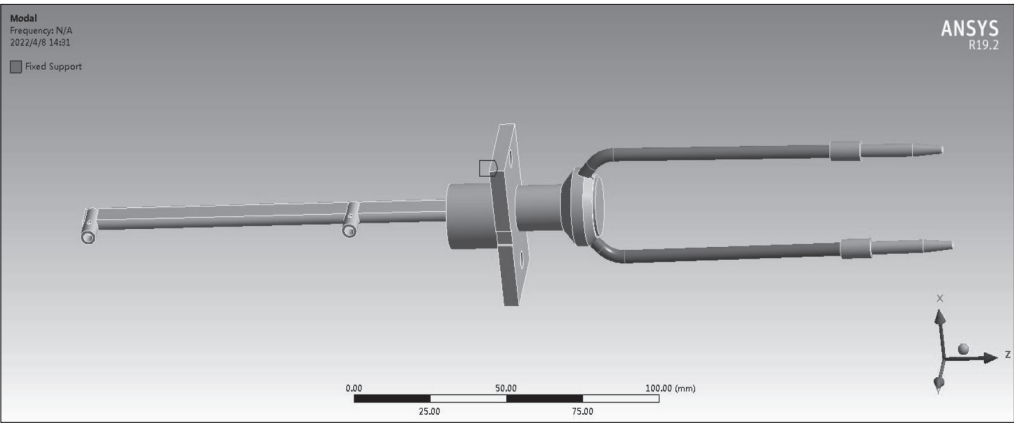


图 3 处理后的探针模型图

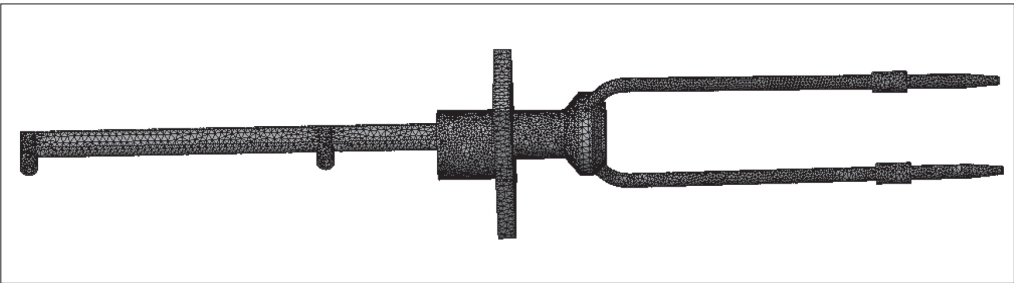


图 4 探针网格图

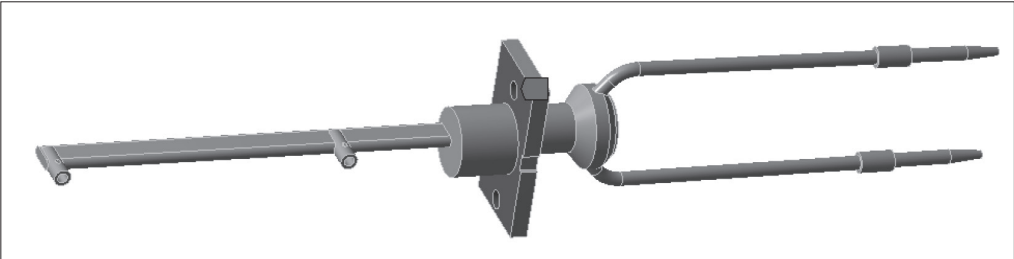


图 5 紧固面

Options	
Max Modes to Find	30
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 6 边界条件设置示例

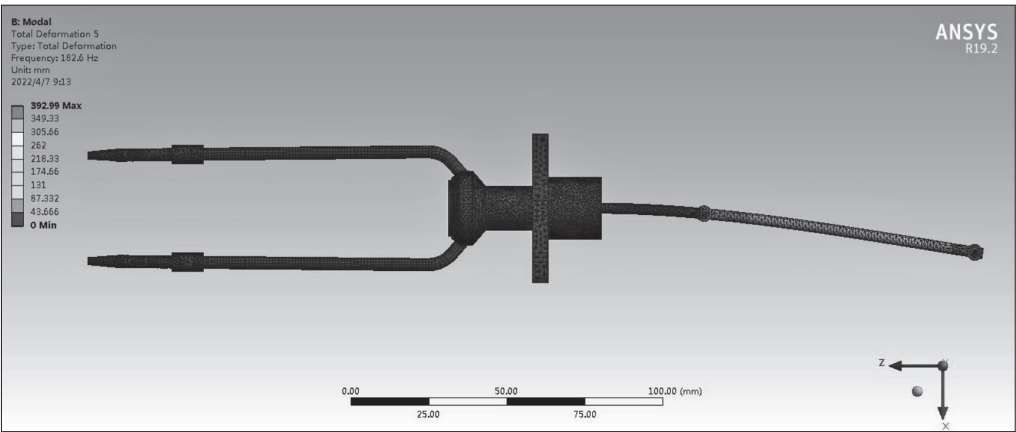


图 7 探针模态振型图

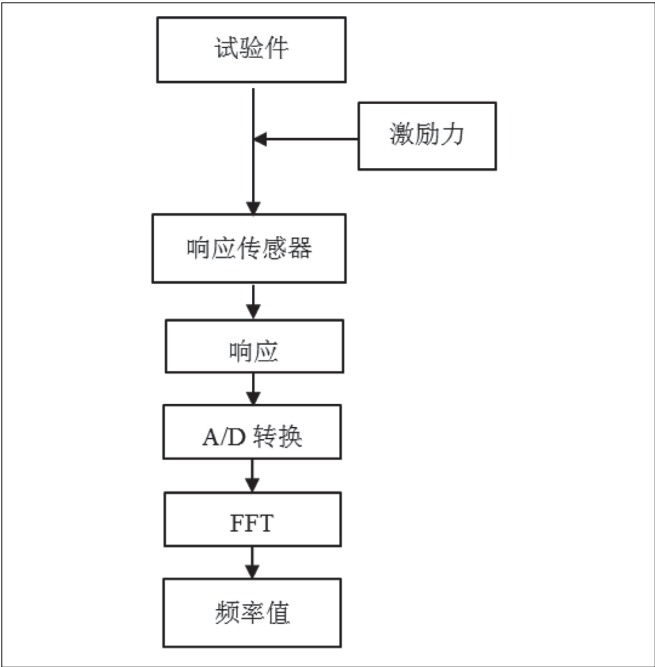


图 8 试验流程图

表 3 有限元数值计算方法振动校验结果

序号	探针编号	有限元一阶 /Hz	有限元二阶 /Hz	有限元三阶 /Hz	有限元四阶 /Hz	有限元五阶 /Hz
1	T0001-0	463.3	1225.1	1902.7	3216.6	3471.8
2	T0002-0	182.57	1125.3	2973.2	3541.6	6045.8
3	T0003-0	636.25	3788.7	5021.4	9934	14161
4	T0004-0	469.91	1955.3	3440.4	4541.7	7121.9
5	T0005-0	655.27	1527.6	2326.7	2981.8	3259.4
6	T0006-0	524.16	1936.7	3973.3	6633	8639.3
7	T0007-0	147.14	617.95	1401.8	1683.5	2853.7
8	T0008-0	1078.8	2416.7	3099	4249.6	5189.8

表 4 振动测频试验的结果

序号	探针编号	振动测频一阶 /Hz	振动测频二阶 /Hz	振动测频三阶 /Hz	振动测频四阶 /Hz	振动测频五阶 /Hz
1	T0001-0	569	1274	1966.5	2992	3758
2	T0002-0	167	1032	2788	3319	4890
3	T0003-0	619	3608	4788	9403	—
4	T0004-0	567	2039	3742	4614.3	6805.8
5	T0005-0	845	1644	2325	3101	3655
6	T0006-0	617	1810	3723	—	—
7	T0007-0	160	602	1340	1773	2746
8	T0008-0	1285	2027	3052	4072	5216

表 5 不同方法振动校验计算结果对比

序号	探针编号	标准公式计算方法的相对误差				
		一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
1	T0001-0	84.2%	55.7%	19.7%	3.2%	36.1%
2	T0002-0	71.6%	71.2%	70.2%	51.0%	45.0%
3	T0003-0	59.8%	56.8%	9.0%	9.4%	—
4	T0004-0	92.1%	86.2%	79.0%	66.6%	62.5%
5	T0005-0	73.6%	15.0%	68.2%	146.6%	246.5%
6	T0006-0	74.7%	46.0%	26.5%	—	—
7	T0007-0	84.4%	74.1%	67.5%	51.9%	48.6%
8	T0008-0	78.7%	15.4%	57.2%	130.4%	197.9%
序号	探针编号	有限元计算方法的相对误差				
		一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
1	T0001-0	18.6%	3.8%	3.2%	7.5%	7.6%
2	T0002-0	9.3%	9.0%	6.6%	6.7%	23.6%
3	T0003-0	2.8%	5.0%	4.9%	5.6%	—
4	T0004-0	17.1%	4.1%	8.1%	1.6%	4.6%
5	T0005-0	22.5%	7.1%	0.1%	3.8%	10.8%
6	T0006-0	15.0%	7.0%	6.7%	—	—
7	T0007-0	8.0%	2.6%	4.6%	5.0%	3.9%
8	T0008-0	16.0%	19.2%	1.5%	4.4%	0.5%

了分散度较大的特殊情况，从而确保试验结果具有一定的准确性和代表性。

6 对比与分析

对比三种不同方法的探针自振频率结果如表 5 所示。不同方法的振动校验计算结果相对误差见图 8。

因缺少振动实测频率，

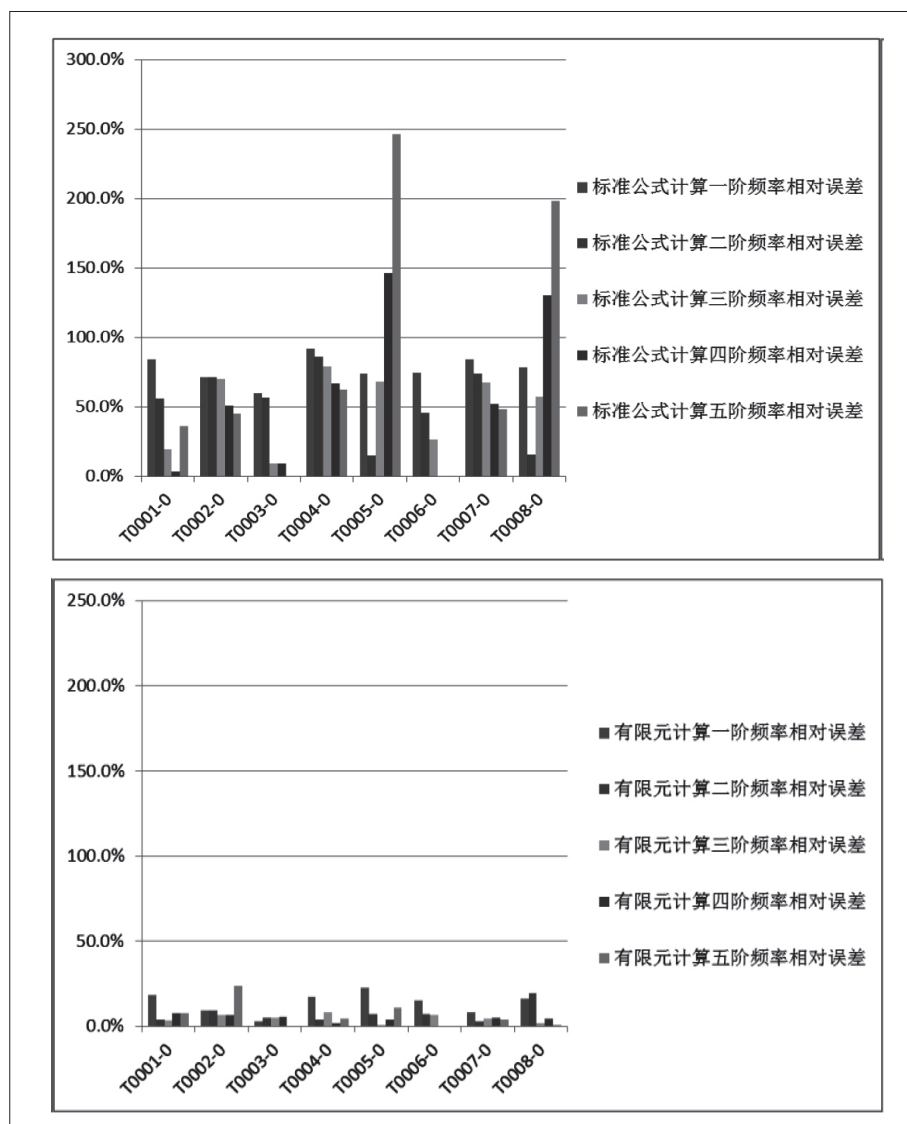


图9 不同方法振动校验计算结果相对误差

有个别探针的高阶相对误差无法计算,但基本不影响整体的数据趋势^[3]。

从表5和图8可以看出,当采用标准公式计算方法进行振动校验时,探针的各阶自振频率计算结果均与实测值的偏差较大,相对误差超过10%的项占全体数据的95%,基本无法采信,部分偏差甚至高达近200%。当采用有限元计算方法进行振动校验时,探针的各阶自振频率

计算结果与实测值较为接近,相对误差在10%以内的项占全体数据的80%以上,计算结果与试验实测值吻合性较好。

有限元数值计算方法进行振动校验时,结果与试验实测值的误差远低于采用标准公式计算的方法。

7 结语

本文基于振动测频试验实测结果,对标准公式和有限元数值两种计算方法的准确性进行了对比分析,确定了数值模拟计算方法的有效性,在后续的探针设计振动校验过程中,应采用数值模拟计算的方法来获取其自振频率。

从本次研究还可以看出,由于仍然存在一定的模拟近似,因此数值模拟的计算方法与实测结果也存在一定的误差,且误差较大的部分主要集中在计算第一阶自振频率时,计算第二阶至第四阶频率时的精度明显提高,说明本次研究中对于有限元数值计算方法进行振动校验的设置和数据后处理仍然存在一定的不足,有必要继续展开相关研究,进一步改进模型设置和网格绘制方法,优化边界条件,提高采用有限元数值计算方法进行探针振动校验的准确性。

参考文献:

- [1] 尹泽勇. 大力加强我国中小型航空发动机技术的发展[R]. 北京: 中国工程院. 2002.
- [2] 经留洋, 范秀杰, 刘套. 航空发动机叶片静频测试技术研究[J]. 科技创新与应用, 2017(15): 22.
- [3] 刘鸿文. 材料力学 I: 第4版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.