

航空航天用压力传感器动态测试方法

Dynamic test method of pressure transducers for aeronautic and
astronautic applications

2021-10-29 发布

2022-02-01 实施



上海市市场监督管理局 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测试内容和条件 2

 4.1 航空航天用压力传感器的测试内容 2

 4.2 航空航天用压力传感器的测试要求 3

5 测试设备和方法 3

 5.1 正弦压力标准装置 3

 5.2 阶跃压力标准装置 5

 5.3 动态压力测试的辅助设备 8

附录 A（规范性） 正弦压力信号的基频确定 9

附录 B（规范性） 正弦信号三参数 DFT 法计算正弦波幅值和相位 10

附录 C（规范性） 激波管阶跃压力信号数据处理方法 11

 C.1 简介 11

 C.2 参数计算方法 12

附录 D（资料性） 航空航天用压力传感器动态测试报告（格式样例） 14

参考文献 16

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由上海市市场监督管理局提出。

本文件由上海市航天工业标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：上海市计量测试技术研究院、上海飞机制造有限公司、中国航发上海商用航空发动机制造有限公司、昆山双桥传感器测控技术有限公司、上海精密计量测试研究所。

本文件主要起草人：张忠立、王灿、徐子翼、林正皓、王冰、孙波、翁俊、徐蓐、刘春光、张进明、任学弟。

航空航天用压力传感器动态测试方法

1 范围

本文件规定了航空航天用压力传感器动态测试的内容、测试要求、测试设备以及测试方法等。

本文件适用于航空航天领域压力传感器及压力测量系统的基于正弦压力标准装置的频率响应测试以及基于激波管标准装置的阶跃响应测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

JJG 624—2005 动态压力传感器

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

航空航天用压力传感器 **pressure transducer for aeronautic and astronautic applications**

在航空航天领域使用的一种能感受压力信号(包括但不限于高频高压压力信号),并能按照一定的规律将压力信号转换成可用的输出电信号的器件或装置。

3.2

动态测试 **dynamic test**

为确定被测量的瞬时值和(或)被测量的值,在测量期间随时间(或其他影响量)变化所进行的测试。

[来源:JJF 1008—2008,10.5,有修改]

3.3

动态压力 **dynamic pressure**

在所研究的领域内,随时间而变化的压力。

[来源:JJF 1008—2008,1.9]

3.4

正弦压力标准装置 **sinusoidal dynamic pressure standard**

能产生可控频率的正弦压力激励,对压力传感器或压力测量系统进行动态测试的装置。

3.5

幅值灵敏度 **range sensitivity**

在一确定频率的正弦压力激励下,压力传感器的响应变化量与激励变化量之比。

3.6

相移 **phase shift**

给定某一频率的正弦压力激励下,被测压力传感器的稳态响应与标准压力传感器信号之间的相位差。

[来源:JJF 1008—2008,10.11,有修改]

3.7

谐振频率 resonant frequency

压力传感器具有最大幅值响应时的激励信号频率,即压力传感器测得的固有频率值。

[来源:JJF 1008—2008,10.12,有修改]

3.8

上升时间 rise time

压力传感器被阶跃压力激励时,其输出值从阶跃响应幅度值的 10%过渡到 90%所需的时间。

[来源:JJF 1008—2008,10.16]

3.9

过冲量 overshoot

压力传感器被阶跃压力激励时,其输出响应中超出终值部分的最大值与阶跃响应幅度值的百分比。

[来源:JJF 1008—2008,10.18]

3.10

建立时间 settling time

压力传感器被阶跃压力激励时,其输出值从达到阶跃响应幅度值的 10%时刻起至与终止值之差进入终止值的 $\pm 5\%$ 范围以内时刻止所需的时间。

[来源:JJF 1008—2008,10.17]

3.11

平台压力持续时间 step pressure duration

阶跃压力幅值保持稳定的持续时间。

[来源:JJG 1142—2017,3.1.6]

4 测试内容和条件

4.1 航空航天用压力传感器的测试内容

航空航天用压力传感器的测试内容及相应要求应至少符合表 1 的规定。

表 1 航空航天用压力传感器的测试内容及相应要求

测试内容	首次测试	使用中测试
静态准确度	+	+
幅值灵敏度相对误差	+	+
相移	+	+
上升时间	+	+
谐振频率	+	+
过冲量	+	—
建立时间	+	—
注 1: 表中“+”表示应测试内容,“—”表示可不测试内容。 注 2: 本文件中不涉及静态准确度,其测试方法遵循 JJG 860 中的规定。 注 3: 幅值灵敏度相对误差、相移是采用正弦压力标准装置,按照附录 A 和附录 B 的方法进行测试;上升时间、谐振频率、过冲量和建立时间是采用激波管压力标准装置,按照附录 C 的方法进行测试。		

4.2 航空航天用压力传感器的测试要求

4.2.1 压力传感器的铭牌上(或其他位置)应标明产品名称、型号、规格、测量范围、准确度等级、制造单位(商标)、出厂编号、制造年月等信息,并清晰可辨,且应有技术文件或说明书明确压力传感器的激励电压。

4.2.2 用于差压测量的压力传感器压力输入端口处应有能区分高压(H)和低压(L)的标志。

4.2.3 压力传感器固有频率应不小于实际或设计使用工况环境的压力变化频率的 10 倍,若为压阻式压力传感器,则其固有频率应不小于实际或设计使用工况环境的压力变化频率的 5 倍。

注:实际或设计使用工况环境的压力变化频率是指根据实际或设计工况得到的预估频率。

4.2.4 压力传感器的正常工作压力量程应至少覆盖其实际使用工况环境的压力变化范围,其最大耐压值应至少为量程上限的 2 倍。

4.2.5 标准测试环境条件:温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\leq 75\%$,大气压力 $90\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$,测试设备周围应无振动、强电磁场、放射性源等影响测试结果的外界干扰。

5 测试设备和方法

5.1 正弦压力标准装置

5.1.1 技术要求

航空航天用压力传感器动态测试的正弦压力标准装置应满足表 2 中的要求。

表 2 正弦压力标准装置的技术要求

频率范围 f /Hz	幅值灵敏度测量不确定 度 $U_{rel}(k=2)$	相移测量不确定度 U ($k=2$)	正弦压力波失真度
$0 < f \leq 200$	2%	1°	5%
$200 < f \leq 1\ 000$	2%	1.5°	10%
$1\ 000 < f \leq 5\ 000$	5%	5°	10%
$5\ 000 < f \leq 20\ 000$	10%	10°	15%
注 1: 幅值是指去除直流分量后的正弦波幅值。			
注 2: 正弦压力标准装置的正弦频率和压力范围应根据被测压力传感器进行调节。			

5.1.2 频率响应测试的测试要求、测试步骤及计算方法

5.1.2.1 测试要求

频率响应测试的测试要求包括以下几点:

- 压力传感器的安装。安装被测压力传感器与标准压力传感器应对称安装,使其感受相同的压力变化,做完所有的测试频率点后将标准压力传感器和压力传感器对换安装位置进行第二次测试,以两次测试数据的平均值作为最终测试结果。
- 标准装置的检查。正弦压力标准装置内腔应清洁,无杂物。若有,可用清洁的气体吹扫。
- 测试频率点的选取。测试频率点可根据实际使用工况指定,当被测压力传感器量程覆盖 $0\text{ Hz} \sim 5\ 000\text{ Hz}$ 时,一般在 $0\text{ Hz} \sim 200\text{ Hz}$ 、 $200\text{ Hz} \sim 1\ 000\text{ Hz}$ 、 $1\ 000\text{ Hz} \sim 5\ 000\text{ Hz}$ 、 $5\ 000\text{ Hz}$ 以上,这 4 个范围段内各选择至少 1 个频率点;当被测压力传感器量程未覆盖 $0\text{ Hz} \sim 5\ 000\text{ Hz}$ 时,在量程

范围内均匀选择 6 个或更多点,对每个频率点的测量次数不少于 12 次(即首次安装后测量不少于 6 次,对换安装位置后再测量不少于 6 次)。

- d) 工作介质的选取。测试时的工作介质宜为清洁的空气或无毒、无害和化学性能稳定的气体。
- e) 采样频率的选取。采样频率宜为当前测试频率点的 500 倍以上。
- f) 预热。测试前,压力传感器、测试仪器应根据仪器厂家说明书中的要求进行预热,或至少通电预热 30 min。

5.1.2.2 测试步骤

5.1.2.2.1 安装压力传感器。接通压力源,检查系统密封状况。调整压力值,使得测试压力的最大值小于压力传感器的量程上限值。

5.1.2.2.2 调整信号调理器及数据采集系统,使其处于最佳工作状态。

5.1.2.2.3 将正弦压力标准装置调至选定的测试频率点。

5.1.2.2.4 采集标准压力传感器和被测压力传感器的响应,得到时域信号序列为 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} , 重复测量 m 次。若测试频率大于 1 000 Hz,则需要进行低通滤波。为了保证滤波器的截止频率高于基频,先按照附录 A 的方法确定正弦压力信号的基波频率 f_0 ,之后按附录 B 的方法计算如下参数:

- C_{Aj} 、 C_{Bj} :分别对应于某一测试频率下标准压力传感器和被测压力传感器输出的正弦压力的幅值($j = 1, 2, \dots, m$);
- θ_{Aj} 、 θ_{Bj} :分别对应于某一测试频率下标准压力传感器和被测压力传感器输出的压力相位($j = 1, 2, \dots, m$)。

注:下标 A、B 分别代表标准压力传感器和被测压力传感器, j 为重复测量次数。

将计算结果以数据文件形式保存在计算机中。

5.1.2.2.5 重复 5.1.2.2.3~5.1.2.2.4 步骤,直到完成全部选定频率点的测试。

5.1.2.2.6 对换标准压力传感器和被测压力传感器的安装位置,重复 5.1.2.2.1~5.1.2.2.5 步骤。

5.1.2.2.7 采集保存数据波形并进行分析处理,处理后的结果可参考附录 D 记录。

5.1.2.3 测试结果的计算方法

正弦压力标准装置测试结果的计算主要为以下参数:

a) 幅值灵敏度相对误差:

对于所选定的一系列测试频率点 f_i ,根据 5.1.2.2 得到 C_{Aij} 、 C_{Bij} 值,按公式(1)计算各频率点处压力传感器的幅值灵敏度平均值:

$$K(f_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{C_{Bij}}{P_{Aij}} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

P_{Aij} ——标准压力传感器所测的压力的幅值,可以通过标准压力传感器的静态灵敏度 K_{As} 和截距 a_A 按公式(2)进行计算:

$$P_{Aij} = \frac{C_{Aij} - a_A}{K_{As}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

最后幅值灵敏度相对误差由公式(3)计算得到:

$$\delta_K(f_i) = \frac{K(f_i) - K_{Bs}}{K_{Bs}} \times 100\% (i = 1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

K_{Bs} ——待测压力传感器的静态灵敏度。

注：下标 i 代表测试频率点序号。

b) 相移：

对于所选定的一系列测试频率点 f_i ，根据 5.1.2.2 得到 θ_{Aij} 、 θ_{Bij} 值，按公式(4)计算压力传感器的相移平均值：

$$\varphi(f_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_{Bij} - \theta_{Aij}) (^\circ) (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (4)$$

5.2 阶跃压力标准装置

5.2.1 适用装置

阶跃压力标准装置根据发生原理的不同可分为激波管压力标准装置和快开阀压力标准装置。快开阀压力标准装置的阶跃压力上升时间比激波管长，更适于低频特性的测试。为满足航空航天用压力传感器高频特性的测试，本文件的测试方法采用激波管压力标准装置。

5.2.2 技术要求

航空航天用压力传感器动态测试的激波管动态压力标准装置应满足表 3 中的要求。

表 3 激波管动态压力标准技术要求

项目	指标
阶跃压力上升时间	$\leq 1 \mu\text{s}$
平台压力持续时间	$\geq 4 \text{ ms}$
平台压力波形不平度	优于 $\pm 2\%$
阶跃压力幅值不确定度	$< 4\% (k=2)$
注：激波管动态压力标准技术要求参考了 JJG 1142—2017 动态压力标准器中的技术指标。	

5.2.3 阶跃响应测试的测试要求、测试步骤及计算方法

5.2.3.1 测试要求

阶跃响应测试的测试要求包括以下几点：

- 压力传感器的安装。安装被测压力传感器至激波管动态压力标准装置时，应使压力传感器的感压面与周围平面齐平。若无法齐平安装，则应符合 JJG 624—2005 7.3.4.1 h) 的要求。
- 标准装置的检查。激波管动态压力标准装置内腔应清洁，无杂物。若有，可用适当的方式清理，不应磨损激波管的内腔表面。
- 工作介质的选取。测试时的工作介质宜为清洁的空气或无毒、无害和化学性能稳定的气体。
- 采样频率的选取。采样频率应为被测压力传感器谐振频率的 50 倍以上。
- 预热。测试前，被测压力传感器和激波管动态压力标准装置应在测试环境条件下放置 2 h 以上，且整个测试系统应至少通电预热 30 min，或根据仪器厂家说明书中的要求进行预热。
- 连续测试的要求。相邻两次测试之间至少有 5 min 的间隔，以消除上次测试中膜片破膜带来的温度影响。
- 其他附加设备。若航空航天用压力传感器在实际工况中带有管路和腔室，宜连同腔室或管路一起测试。

5.2.3.2 测试步骤

5.2.3.2.1 安装被测压力传感器,连接放大器和数据采集系统。完成预热,使全套装置处于正常工作状态。

5.2.3.2.2 安装激波管膜片,膜片厚度和类型根据被测压力传感器的量程选取。

5.2.3.2.3 向激波管加压,采用人工或自然破膜方式产生激波。

5.2.3.2.4 采集保存数据波形并进行分析处理,处理后的结果可参考附录 D 记录。

5.2.3.3 测试结果的计算方法

激波管动态压力标准装置计算结果主要为以下参数:

a) 阶跃响应幅度 \bar{u}

压力传感器受到阶跃压力激励后的响应如图 1 所示,对于传感器采集到的阶跃信号序列,从阶跃响应的峰值开始,取一段信号序列 $\{y_i\} (i=n_{\max}, \dots, n_{\max}+l-1)$, 计算其均值 Σy_i 。

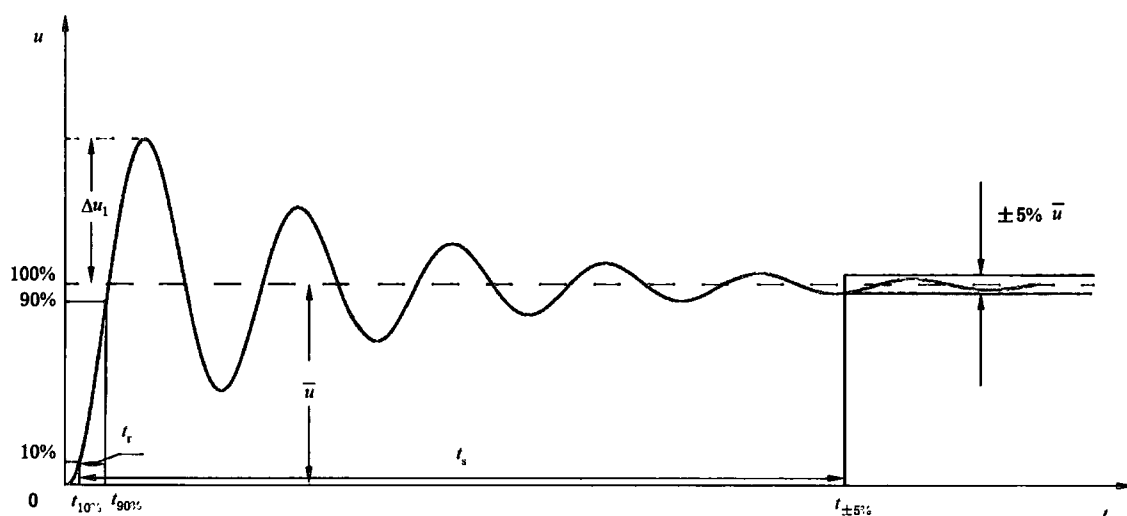


图 1 二阶系统阶跃响应图

随着信号序列的长度 l 增加,均值 Σy_i 会逐渐稳定并趋于阶跃响应幅度 \bar{u} 。信号序列的长度 l 可以根据所需的有效数字来决定,压力信号均值 Σy_i 随选取的信号序列长度 l 变化如图 2 所示。一般而言,阻尼比越小的传感器需要更长的信号序列,信号序列不应少于 20 个自振周期的数据。再求得阶跃响应幅度 \bar{u} 后,易求得上升时间、过冲量和建立时间计算中的必需参数 $t_{10\%}$ 、 $t_{90\%}$ 、 Δu_1 和 $t_{\pm 5\%}$ 。



图 2 压力信号均值随信号序列长度变化图

b) 上升时间 t_r

压力传感器被阶跃压力激励时,其响应值从阶跃响应幅度的 10%过渡到 90%所需的时间。由压力传感器对阶跃压力激励的响应曲线直接计算得出,即:

$$t_r = t_{90\%} - t_{10\%} \dots\dots\dots (5)$$

其中,以 $t_{10\%}$ 为例,先计算阶跃响应幅度 \bar{u} 大小的 10% 的压力值,并在被测压力传感器的压力信号数据点中寻找覆盖该压力值的最短数据区间,然后对该压力数据区间所对应的时间区间进行线性插值,得到阶跃响应幅度 \bar{u} 的 10% 压力值所对应的时间值 $t_{10\%}$, $t_{90\%}$ 可用相同方式获得。

c) 谐振频率 f_d

由阶跃压力激励的时域响应曲线做傅里叶变换至频域后获得,单位阶跃响应的频谱图如图 3 所示,其最高峰值即对应压力传感器的谐振频率。

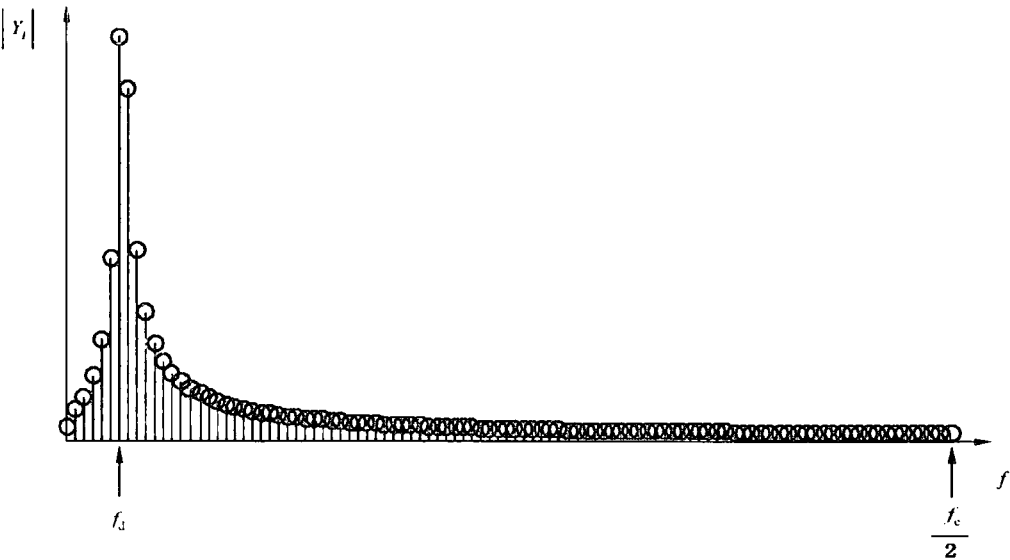


图 3 阶跃响应频谱图

d) 过冲量 δ

压力传感器被阶跃压力激励时,其响应中超出终值部分的最大值与阶跃响应幅度之比,即:

$$\delta = \frac{\Delta u_1}{u} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

e) 建立时间 t_s

压力传感器被阶跃压力激励时,其响应值从阶跃响应幅度的 10% 时刻起至与终值之差进入阶跃响应幅度的 $\pm 5\%$ 范围以内时刻止所需的时间。建立时间由压力传感器对阶跃压力激励的响应曲线直接计算得出,见式(7)。

$$t_s = t_{\pm 5\%} - t_{10\%} \quad \dots\dots\dots (7)$$

f) 灵敏度 K_s

灵敏度 K_s 可以由静态检定得到。阶跃压力激励时,压力传感器的灵敏度 K_s 按式(8)计算。

$$K_s = \frac{\bar{u}}{\Delta p} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

\bar{u} ——压力传感器受阶跃压力激励后的阶跃响应幅度;

Δp ——为阶跃压力值,按照附录 C 的方法计算。

5.3 动态压力测试的辅助设备

动态压力测试的辅助设备及相应的技术要求包括:

- a) 电荷放大器。其级别应为二级或以上。
- b) 电压及应变放大器。其误差应在 $\pm 0.2\%$ 以内。
- c) 数据采集卡。需要满足以下几点:
 - A/D 转换位数不应少于 14 bits;
 - 最高采样频率不应小于 20 MHz;
 - 线性度应优于 $\pm 0.2\%$ 。
- d) 其他附加设备。若航空航天用压力传感器使用时配套了相应信号调理器及记录分析仪器等,宜要求压力传感器连同其配套设备同时进行动态压力测试。

附录 A

(规范性)

正弦压力信号的基频确定

采集得到的标准传感器的时域信号序列为 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} , 对应时间序列为 t_0, t_1, \dots, t_{n-1} , 长度为 n 点。为确定基波频率 f_0 , 首先对 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} 按式(A.1)做 DFT 变换:

$$Y_i = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k e^{-j\frac{2\pi}{n}ik} & (i=0) \\ \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k e^{-j\frac{2\pi}{n}ik} & (i>0) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

得到其频域信号序列 Y_0, Y_1, \dots, Y_{n-1} , 其中 Y_0 为直流分量, 对 Y_1, \dots, Y_{n-1} 的前半部分取模, 得到 $|Y_1|, \dots, |Y_M|$, 对应的频率序列为 f_1, \dots, f_M 。其中,

$$M = \begin{cases} \frac{n}{2} + 1 & n \text{ 为偶数} \\ \frac{n+1}{2} & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

找到 $|Y_1|, \dots, |Y_M|$ 中的最大值, 记为 $|Y|_{\text{Max}}$, 见式(A.3):

$$|Y_N| = |Y|_{\text{Max}} \quad (\text{A.3})$$

其中 N 为正整数 ($0 < N \leq M$), 则 Y_N 对应的频率 f_N 即为基波频率 f_0 , 见式(A.4):

$$f_0 = f_N = N \Delta f = N \frac{1}{n \Delta t} \quad (\text{A.4})$$

其中, Δf 为频率序列 $0, f_1, \dots, f_M$ 对应的频率间隔, Δt 为时间序列 t_0, t_1, \dots, t_{n-1} 对应的时间间隔。

也可以写成角频率 ω_0 的形式, 见式(A.5):

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (\text{A.5})$$

可将此频率作为待测传感器的已知正弦压力激励频率。

附录 B

(规范性)

正弦信号三参数 DFT 法计算正弦波幅值和相位

设理想正弦信号为: $y(t) = C \cos(\omega_0 t + \theta) + D$

采集的时域信号序列为 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} , 长度为 n 点, 其对应的时间序列为 t_0, t_1, \dots, t_{n-1} 。为保证在进行离散傅里叶变换(DFT)时不出现频谱泄露的问题, 此处时域信号序列 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} 应当恰好包含整数个周期的正弦信号。一般在数据处理时使用快速傅里叶变换(FFT), 得到的结果与 DFT 是相同的。

对 n 点时域信号序列做 DFT, 频域信号序列 Y_0, Y_1, \dots, Y_{n-1} 可以按式(B.1)得到:

$$Y_i = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k e^{-j\frac{2\pi}{n}ik} & (i=0) \\ \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k e^{-j\frac{2\pi}{n}ik} & (i>0) \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

其中, Y_0 为实数, Y_1, \dots, Y_{n-1} 为复数序列, 满足 $Y_i = Y_{n-i}^*$, 上标*表示共轭, 故频域信号序列的有效部分只有 Y_0, Y_1, \dots, Y_M , 其中:

$$M = \begin{cases} \frac{n}{2} + 1 & n \text{ 为偶数} \\ \frac{n+1}{2} & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

其对应的有效频率序列为 $f_0, f_1, \dots, f_M (f_0=0)$ 。

在激励正弦信号角频率 ω_0 已知的情况下, 其频率 f_0 , 见式(B.3):

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (\text{B.3})$$

如果 f_0 能够表示为式(B.4):

$$f_0 = N \Delta f = N \frac{1}{n \Delta t} \quad (\text{B.4})$$

其中, Δt 为时间序列 t_1, t_2, \dots, t_n 的时间间隔, Δf 是频率序列 f_0, f_1, \dots, f_M 的频率间隔, N 为正整数 ($0 < N \leq M$)。那么, 复数 Y_N 即对应正弦信号角频率 ω_0 , 可以将 Y_N 写成实部和虚部的形式, 见式(B.5):

$$Y_N = A + Bj \quad (\text{B.5})$$

其中, A 为复数 Y_N 的实部, B 为复数 Y_N 的虚部。

则正弦信号的三个参数可由下式得到:

$$\begin{aligned} C &= \sqrt{A^2 + B^2} \\ \theta &= \begin{cases} \arctan\left[\frac{B}{A}\right] & (A \geq 0) \\ \arctan\left[\frac{B}{A}\right] + \pi & (A < 0) \end{cases} \\ D &= Y_0 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

附录 C
(规范性)

激波管阶跃压力信号数据处理方法

C.1 简介

激波管动态压力标准采用阶跃压力对压力传感器进行检定,它可以产生上升时间为纳秒级的阶跃压力。激波管动态压力标准主要由激波管本体、压力源(压缩气体或真空泵)及控制台、激波速度及其他气动参数测量系统、数据采集及分析控制系统等组成。

简单型激波管为恒定截面的细长管,由膜片分成两部分,具有较高压力的称高压室,具有较低压力的称低压室。两室压差达到某一定值时,膜片爆破,高压室的气体冲向低压室形成入射激波,激波后阵面压力突变形成一个正的阶跃压力,阶跃压力保持恒定的时间称恒压时间。入射波到达低压室端面后被反射,形成反射激波和反射激波阶跃压力。

激波管工作时的压力和波动情况及符号标志如图 C.1 所示。

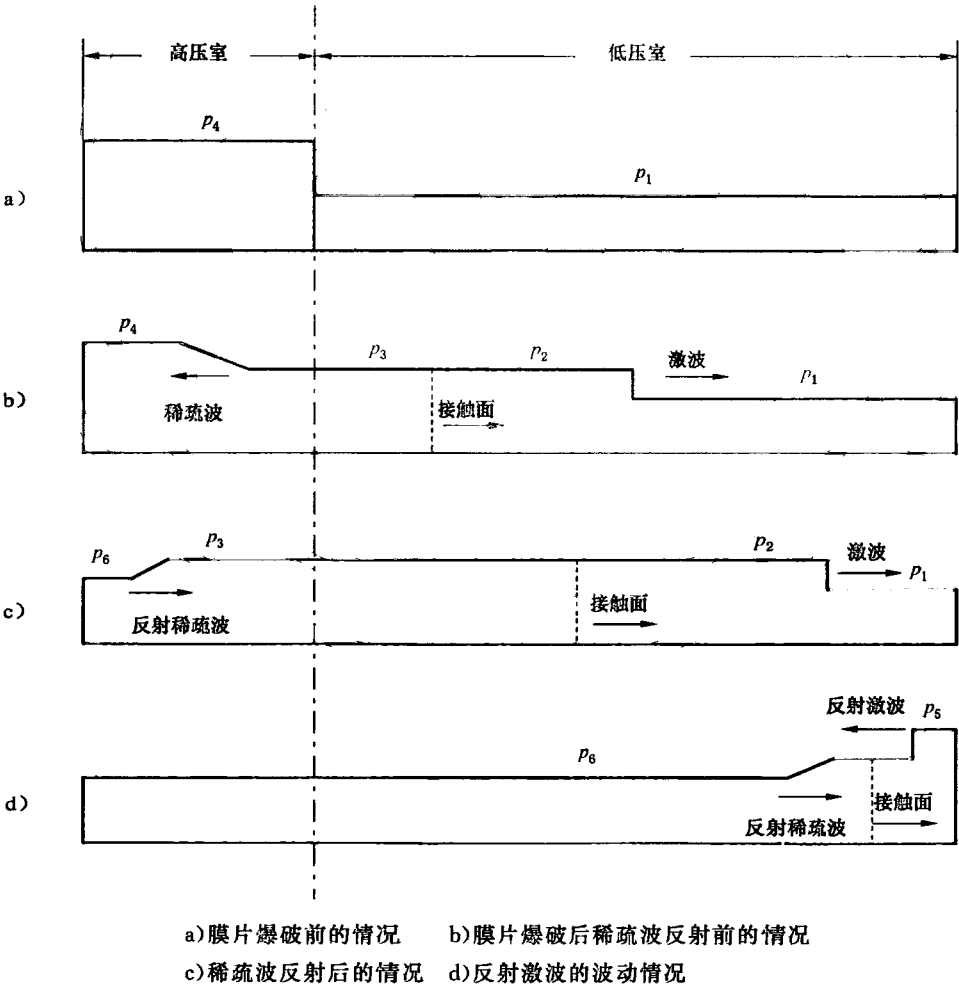


图 C.1 激波管中压力与波动情况示意图

图中, p_4 是膜片爆破前的高压腔压力, p_1 是膜片爆破前的低压腔压力; p_2 是膜片爆破后产生的激波压力, p_3 是高压腔爆破后形成的压力, p_2 与 p_3 的接触面称为温度分界面。虽然 p_2 与 p_3 所在区域

的温度不同,但它们的压力值相同。膜片爆破后,高压腔内形成稀疏波,稀疏波波头传播到高压腔端面后反射,称为反射稀疏波,其压力减小为 p_6 。当激波到达低压腔端面反射后,压力增大为 p_5 ,称为反射激波。 p_2 和 p_5 是再标定时用到的压力,视传感器的安装位置而定,当被标定的传感器安装在侧面时,用到 p_2 ,当被标定的传感器安装在端面时,用到 p_5 ,两者的关系是 $p_2 < p_5$ 。

C.2 参数计算方法

当激波管的工作介质为空气时,其参数均可由低压腔压力 p_1 和入射激波马赫数 M_s 按下述公式计算(以下除注明外,压力为绝对压力,单位 MPa,温度单位 K):

初始压力比:

$$\begin{aligned} p_{41} &= p_4 / p_1 \\ &= p_{21} \{1 - (p_{21} - 1) [7(6p_{21} + 1)]^{-1/2}\}^7 \\ &= (1/6) (7M_s^2 - 1) \{1 - (1/6) (M_s^2 - 1/M_s^2)\}^{-7} \end{aligned} \quad (\text{C.1})$$

入射激波压力比:

$$p_{21} = p_2 / p_1 = (1/6) (7M_s^2 - 1) \quad (\text{C.2})$$

入射激波阶跃压力:

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= p_2 - p_1 \\ &= (p_{21} - 1) p_1 = (7/6) (M_s^2 - 1) p_1 \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

入射激波温升比:

$$\begin{aligned} T_{21} &= T_2 / T_1 \\ &= p_{21} (p_{21} + 6) / (6p_{21} + 1) \\ &= (7M_s^2 - 1) (M_s^2 + 5) / (36M_s^2) \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

其中, T_1 为低压腔内的初始温度, T_2 为入射激波扫掠后的温度。

入射激波阶跃温升:

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= T_2 - T_1 \\ &= (T_{21} - 1) T_1 \\ &= [(p_{21}^2 - 1) / (6p_{21} + 1)] T_1 \\ &= [(M_s^2 - 1) (7M_s^2 + 5) / (36M_s^2)] T_1 \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

反射激波压力比:

$$\begin{aligned} p_{51} &= p_5 / p_1 \\ &= p_{21} [(8p_{21} - 1) / (p_{21} + 6)] \\ &= (1/3) (7M_s^2 - 1) [(4M_s^2 - 1) / (M_s^2 + 5)] \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

反射激波阶跃压力:

$$\begin{aligned} \Delta p_5 &= p_5 - p_1 \\ &= (p_{51} - 1) p_1 \\ &= 2[(4p_{21} + 3)(p_{21} - 1) / (p_{21} + 6)] p_1 \\ &= (7/3) (M_s^2 - 1) [(4M_s^2 + 2) / (M_s^2 + 5)] p_1 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

反射激波温升比:

$$\begin{aligned} T_{51} &= T_5 / T_1 \\ &= (2p_{21} + 5) (8p_{21} - 1) / [7(6p_{21} + 1)] \\ &= [(4M_s^2 - 1) (M_s^2 + 2) / (9M_s^2)] \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

其中, T_5 为反射激波扫掠后的温度。

反射激波阶跃温升:

$$\begin{aligned}
\Delta T_5 &= T_5 - T_1 \\
&= (T_{51} - 1) T_1 \\
&= \{ [4(4p_{21} + 3)(p_{21} - 1)] / [7(6p_{21} + 1)] \} T_1 \\
&= \{ [2(M_s^2 - 1)(2M_s^2 + 1)] / (9M_s^2) \} T_1
\end{aligned} \tag{C.9}$$

p_1 可事先给定, 一般采用当地大气压; M_s 由测速系统决定。

测速系统由两个安装在激波管侧面的测速压力传感器、相应的电荷放大器和电子计数器组成。入射激波的速度为:

$$v = \frac{l}{t} \tag{C.10}$$

其中, l 为两个测速传感器之间的距离, t 为激波通过两个传感器间距所需的时间, 可以按下式计算:

$$t = n \Delta t \tag{C.11}$$

其中, n 为电子计数器所记录的脉冲个数, Δt 为脉冲的周期。

当速度 v 已知时, 马赫数可以如下式计算:

$$M_s = \frac{v}{a_T} \tag{C.12}$$

其中, a_T 为低压腔内的音速, 可以根据下式得到:

$$a_T = 331.45 \sqrt{\frac{T_1}{273.15}} \tag{C.13}$$

其中, T_1 为实验时低压腔的初始温度。

附 录 D

(资料性)

航空航天用压力传感器动态测试报告(格式样例)

表 D.1 航空航天用压力传感器动态测试报告

传感器信息				测试信息			
送检单位:				测试报告编号:			
制造单位:				测试日期:			
名称:				环境温度:			
型号:				相对湿度:			
编号:				测试员:			
测试范围				核验员:			
测试项目		<input type="checkbox"/> 正弦压力测试		<input type="checkbox"/> 阶跃压力测试			
正弦压力测试数据记录							
频率/Hz	标准压力 幅值/MPa	传感器响应 幅值/MPa	标准压力 相位/°	被测压力传 感器相位/°	幅值灵敏度 $K(f_i)$ (V/MPa)	幅值灵敏度相 对误差 $\delta_K(f_i)$	相移 $\varphi(f_i)/^\circ$
正弦压力信号时域图				正弦压力信号频谱图			

阶跃压力测试数据记录												
测试 编号	大气压力 p_1 /MPa	膜片厚度 /mm	激波速度 v /(m/s)	低压腔 温度 T_1	马赫数 M_0	入射激波 阶跃压力 Δp_2 /MPa	反射激波 阶跃压力 Δp_3 /MPa	灵敏度 K_0 (V/MPa)	上升时间 t_r /s	谐振频率 f_d /Hz	过冲量 δ	建立时间 t_s /s
阶跃压力信号时域图						阶跃压力信号频谱图						
测试结论：												
日期： 年 月 日												

参 考 文 献

- [1] GB/T 26807—2011 硅压阻式动态压力传感器
 - [2] JJF 1008—2008 压力计量名词术语及定义
 - [3] JJG 624—2005 动态压力传感器
 - [4] JJG 860 压力传感器(静态)
 - [5] JJG 1142—2017 动态压力标准器
-

上海市地方标准
航空航天用压力传感器动态测试方法
DB31/T 1323—2021

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 30 千字
2021年11月第一版 2021年11月第一次印刷

*

书号: 155066·5-3742 定价 24.00 元



DB31/T 1323-2021



码上扫一扫 正版服务到

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107

