



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 624—2005

动态压力传感器

Dynamic Pressure Transducers

2005 - 12 - 20 发布

2006 - 06 - 20 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

动态压力传感器检定规程

Verification Regulation of
Dynamic Pressure Transducers

JJG 624—2005
代替 JJG 624—1989

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2005 年 12 月 20 日批准，并自 2006 年 6 月 20 日起施行。

归口单位： 全国压力计量技术委员会
起草单位： 北京长城计量测试技术研究所

本规程委托全国压力计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

- 张 力 （北京长城计量测试技术研究所）
- 李 程 （北京长城计量测试技术研究所）
- 刘 晶 （北京长城计量测试技术研究所）

参加起草人：

- 李 欣 （北京长城计量测试技术研究所）
- 盛晓岩 （北京长城计量测试技术研究所）
- 梁志国 （北京长城计量测试技术研究所）

目 录

1 范围..... (1)

2 引用文献..... (1)

3 术语和定义..... (1)

4 概述..... (2)

5 计量性能要求..... (2)

6 通用技术要求..... (2)

7 计量器具控制..... (3)

附录 A 单自由度二阶线性系统 (11)

附录 B 正弦压力标准 (14)

附录 C 激波管动态压力标准 (20)

附录 D 快开阀动态压力标准 (24)

附录 E 常用符号 (25)

附录 F 检定记录格式 (26)

附录 G 检定证书及检定结果通知书（内页）格式 (29)

动态压力传感器检定规程

1 范围

本规程适用于动态压力传感器（以下简称压力传感器）的首次检定、后续检定和使用中的检验。压力传感器及动态压力测量系统的校准可参照本规程。

2 引用文献

JJG 860—1994 《压力传感器（静态）检定规程》

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语和定义

3.1 动态测量（dynamic measurement）

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）变化所进行的测量。

3.2 动态压力（dynamic pressure）

在所研究的领域内，随时间变化的压力。

3.3 频率响应（frequency response）

压力传感器对正弦压力激励的稳态响应特性，由幅频特性和相频特性组成。

3.4 幅频特性（amplitude response） $K(f)$

在正弦激励下，压力传感器的稳态响应与激励间的幅值比和频率的关系，即压力传感器的幅值灵敏度与压力信号频率的关系。

3.5 相移（phase shift） ϕ

在正弦激励下，压力传感器的稳态响应与激励间的相位差。

3.6 相频特性（phase response） $\phi(f)$

相移与激励信号频率的关系。

3.7 谐振频率（resonant frequency） ω_r

压力传感器具有最大幅值响应时的激励信号的频率。

3.8 时域特性（properties in the time domain）

压力传感器对特定的激励（通常是阶跃压力）在时间域的响应特性。时域特性指标主要包括振铃频率、上升时间、建立时间以及过冲量等。

3.9 振铃频率（ringing frequency） ω_d

压力传感器阶跃响应中所含的自由振荡频率。

3.10 终值（final value）

压力传感器阶跃响应的最终稳定值。

3.11 上升时间（rise time） 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。

3.12 建立时间 (settling time) 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。

3.13 过冲量 (overshoot) 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。

3.14 灵敏度 (sensitivity)

压力传感器响应变化量与激励变化量之比。在规定的某激励值上通过一个小的激励变化 Δx ，得到相应的响应变化 Δy ，则比值 $K = \Delta y / \Delta x$ 即为压力传感器在该激励值处的灵敏度。

本规程定义两种灵敏度：

- a) 灵敏度 K_s ，采用静态压力检定得到的灵敏度，某些压力传感器对静态压力不响应，此时为采用阶跃压力检定得到的灵敏度。
- b) 幅值灵敏度 $K(f)$ ，压力传感器的灵敏度与压力信号频率的关系，即幅频特性。

4 概述

压力传感器是一种能够感受压力，并按照一定的规律将压力值转换成电信号或其他信号输出的器件，其工作原理如图 1 所示。其输出信号通常为电压、电流、电荷、频率或数据等。

压力传感器按照其敏感方式的不同可分为压电式、压阻式、应变式、电容式、电感式、光学式、谐振式等。

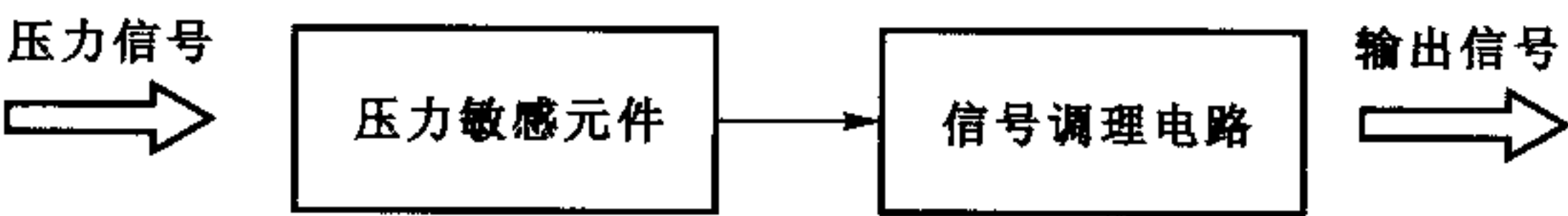


图 1 压力传感器工作原理

5 计量性能要求

压力传感器计量性能要求见表 1。

6 通用技术要求

- 6.1 新制造的压力传感器的结构应坚固，外露件的镀层、涂层应光洁，不应有剥脱、划痕。接插件应完好牢固。使用中和修理后的压力传感器不应有影响其计量性能的缺损。
- 6.2 压力传感器的铭牌上（或在其他位置）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。
- 6.3 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。

表 1

计量性能	幅值灵敏度允许误差	相移允许值	静态准确度等级
标准级压力传感器	$\pm 6\%$	$\pm 5^\circ$	1
普通级压力传感器	$\pm 15\%$	—	2.5
注： 1. 检定幅值灵敏度允许误差和相移允许值时最少选择以下频率点之一：8Hz，16Hz，80Hz，160Hz，1kHz。检定选用的频率点在检定证书中应注明。 2. 对静态激励无响应的压力传感器，静态准确度等级不作要求。 3. 幅值是指去掉直流分量后的正弦波幅值。			

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中的检验。

7.1 检定条件

7.1.1 标准器

标准器含正弦压力标准、激波管动态压力标准、快开阀动态压力标准。

7.1.1.1 正弦压力标准必须满足下列条件：

a) 正弦压力标准的性能指标应满足表 2 的要求。

表 2

计量性能	频率范围 /Hz	幅值灵敏度测量不确定度 ($k = 2$)	相移测量不确定度 ($k = 2$)
一等正弦压力标准	$0 < f \leq 200$	2%	1°
	$200 < f \leq 1000$	2%	1.5°
	$f > 1000$	5%	5°
二等正弦压力标准	$0 < f \leq 200$	5%	2°
	$200 < f \leq 1000$	5%	5°
	$f > 1000$	10%	10°
注： 1. 一等正弦压力标准检定标准级压力传感器，二等正弦压力标准用于检定普通级压力传感器。 2. 幅值是指去掉直流分量后的正弦波幅值。			

b) 所产生的压力幅值应能根据压力传感器的量程进行调节。

c) 检定频率范围根据压力传感器工作频率范围确定。

7.1.1.2 激波管动态压力标准必须满足表 3 的要求。

表 3

项目	指标
阶跃压力上升时间 t_{rp}	$< 1 \times 10^{-6} \text{ s}$
平台压力持续时间 τ	$> 4 \times 10^{-3} \text{ s}$
平台压力波形不平度	优于 $\pm 2\%$
阶跃压力幅值不确定度	$< 4\% \ (k = 2)$

7.1.1.3 快开阀动态压力标准必须满足表 4 的要求。

表 4

项目	指标
阶跃压力上升时间 t_{rp}	$< 5 \times 10^{-3} \text{ s}$
平台压力持续时间 τ	$> 1 \text{ s}$
平台压力波形不平度	优于 $\pm 0.5\%$
阶跃压力幅值不确定度	$< 1\% \ (k = 2)$

7.1.2 辅助设备

与标准配套的测量系统，其工作频率范围必须覆盖压力传感器的工作频率。检定时用到的信号调理器和记录分析仪器应满足下列条件：

- a) 电荷放大器误差优于 $\pm 1\%$ 。
- b) 电压及应变放大器误差优于 $\pm 0.5\%$ 。
- c) A/D 转换器位数 $\geq 12\text{bits}$ ，最高采样频率 $\geq 1\text{MHz}$ ，线性度优于 $\pm 0.2\%$ 。
- d) 测量电路的信噪比大于 40dB。

7.1.3 其他仪器设备

激波速度测量系统、气源及控制系统、频率计、示波器、气压计、温度计、湿度计、扭矩扳手等，可根据检定工作需要配套。

7.1.4 检定环境条件

- 7.1.4.1 温度： $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 7.1.4.2 相对湿度：不大于 75%。
- 7.1.4.3 大气压力： $(90 \sim 106) \text{ kPa}$ 。
- 7.1.4.4 检定设备周围应无振动、强电磁场、放射性源等影响检定的外界干扰。

7.2 检定项目

首次检定、后续检定和使用中检验项目见表 5。

7.3 检定方法

7.3.1 外观检查

用目视方法检查，外观应符合 6.1~6.3 的要求。

7.3.2 静态准确度等级及灵敏度 K_s 检定

表 5

检定项目	首次检定	后续检定	使用中检验
6.1 外观	+	+	+
表 1, 静态准确度等级	+	+	+
表 1, 幅值灵敏度允许误差	+	+	+
表 1, 相移允许值	△	△	△
上升时间	+	-	-
振铃频率	+	-	-
过冲量	+	-	-
建立时间	+	-	-
注：“+”表示应检项目；“-”表示可不检项目；“△”表示标准级压力传感器需检的项目，普通级压力传感器不作要求。			

按 JJG 860—1994《压力传感器（静态）检定规程》执行。

7.3.3 用正弦压力标准进行检定的一般要求、检定步骤和计算方法

正弦压力标准见附录 B。

7.3.3.1 一般要求

- a) 使用标准压力传感器时，压力传感器和标准压力传感器应对称安装，使两只压力传感器感受相同的压力变化。不能采用对称安装方式的，如仅进行幅频特性检定，其感压面中心距要小于压力波波长的 1/10；如进行相频特性检定，其感压面中心距要小于压力波波长的 1/100。检定标准级压力传感器时，应将标准压力传感器和压力传感器对换安装位置分两次进行检定，以两次检定数据的平均值作为最终检定结果；检定普通级压力传感器时不作此要求。
- b) 检定标准级压力传感器时，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）；检定普通级压力传感器时，对每个频率点的测量次数不少于 6 次。
- c) 有冷却装置的压力传感器，检定时冷却装置应处于工作状态。压力传感器在使用中需考虑腔室或管路响应时，应连同腔室或管路一起检定。
- d) 检定时的工作介质为气体或液体。
- e) 检定前，压力传感器、测试仪器至少通电预热 30min。

- 7.3.3.2 检定步骤
- a) 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，使得检定压力的最大值小于压力传感器的量程上限值。
- b) 调整信号调理器及数据采集系统，使其处于最佳工作状态。
- c) 调整正弦压力标准产生频率为 f_i 的正弦压力。
- d) 采集标准压力传感器和压力传感器的响应，按 7.3.3.1 的要求重复测量 m 次。

采用附录 B 的方法计算如下参数：

A_{dij} ：对应于检定频率 f_i 标准压力传感器输出的正弦压力的幅值 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

B_{dij} ：对应于检定频率 f_i 压力传感器输出的正弦信号的幅值 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

θ_{Aij} ：对应于检定频率 f_i 标准压力传感器测量的压力相位 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

θ_{Bij} ：对应于检定频率 f_i 压力传感器输出信号的相位 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

将计算结果以数据文件形式保存在计算机中。

e) 重复 c) ~ d) 步骤，直到完成全部选定频率点的检定。

f) 如检定标准级压力传感器，需对换标准压力传感器和压力传感器安装位置，重复 a) ~ e) 步骤。

7.3.3.3 正弦压力标准检定结果计算方法

a) 幅值灵敏度相对误差

对于所选定的一系列检定频率点 f_i ，根据以上 A_{dij} 、 B_{dij} 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：

$$K(f_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{B_{dij}}{A_{dij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

幅值灵敏度相对误差按公式 (2) 计算：

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

式中： K_s ——静态灵敏度。

b) 相移

根据上述 θ_{Ai} 、 θ_{Bi} 值，按公式 (3) 计算压力传感器的相移平均值：

$$\phi(f_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_{Bij} - \theta_{Aij})(^\circ) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

7.3.4 用激波管动态压力标准进行检定的一般要求、检定步骤和计算方法

激波管动态压力标准见附录 C。

7.3.4.1 一般要求

a) 压力传感器应齐平安装在激波管的末端法兰或侧壁上，齐平安装指压力传感器的最前端在安装后应与周围的平面齐平，没有影响压力传感器响应的沟槽、洞穴、缝隙、小腔室或管路等 (图 2)。检定时，压力传感器应按规定的安装条件和安装力矩安装，避免产生安装频率响应和安装应变响应。

b) 进行检定工作前要清理激波管内腔，保持清洁，激波管内腔应没有油气、水气、膜片碎屑和其他杂物。在两次检定之间要有 5min 以上的间隔时间，以消除膜片破膜时产生温度变化的影响，使之恢复到室温状态。

c) 根据压力传感器的量程，确定检定时其所承受的最大压力 p_s (见附录 C) 的取

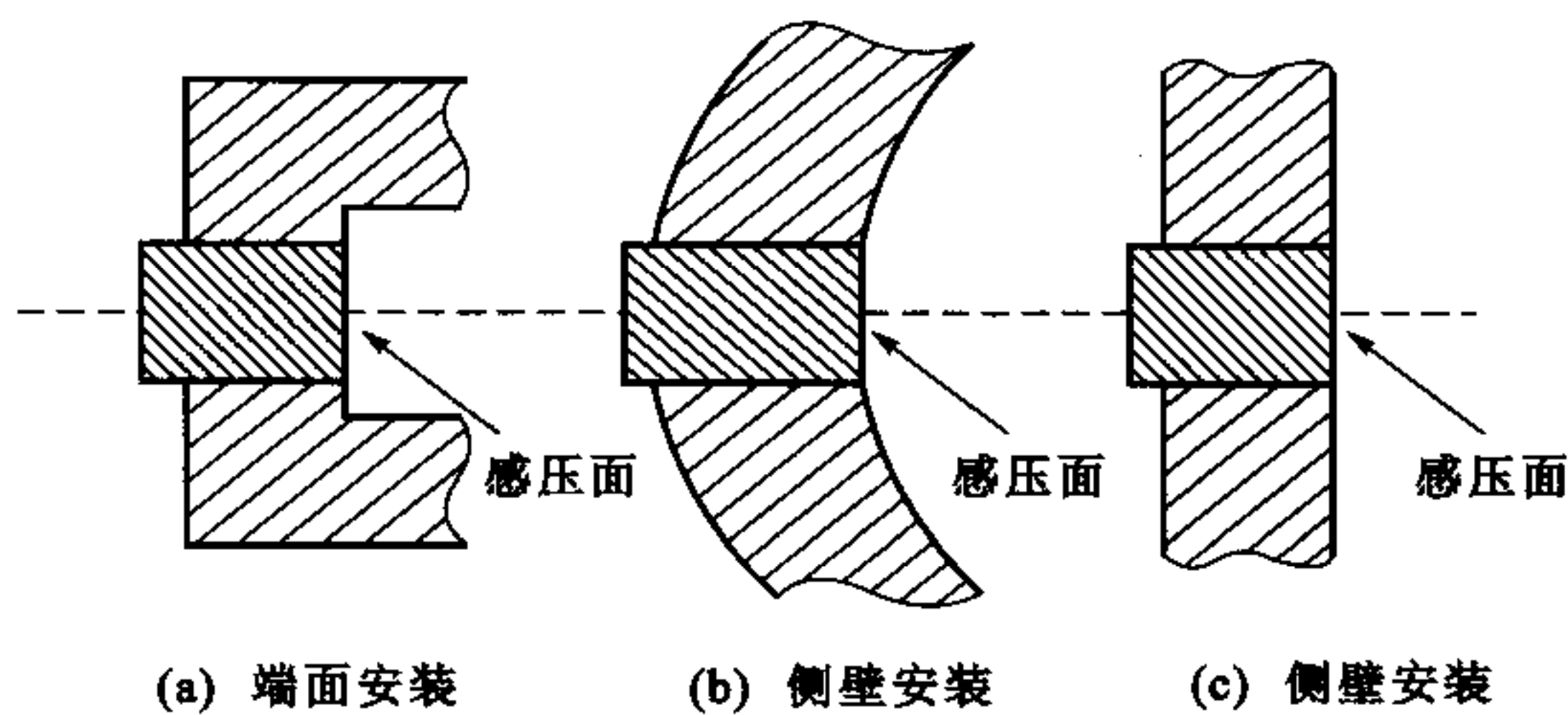


图2 压力传感器齐平安装示意

值范围。应考虑压力传感器在阶跃压力作用下可能产生过冲，应使 p_5 与过冲量的和小于压力传感器的量程上限值。

d) 根据 p_5 的取值范围，选择 p_1 ， p_4 ，控制激波马赫数 M_s 使激波管产生较好的阶跃压力波形，各参数的关系按附录 C 计算。

e) 在检定时，采用端面安装，反射激波阶跃压力 Δp_5 按公式 (C9) 计算；采用侧壁安装，入射激波阶跃压力 Δp_2 按公式 (C5) 计算。

f) 在检定时应考虑与阶跃压力同时产生的阶跃温升以及破膜和激波带来的冲击加速度对压力传感器的影响。

g) 有冷却装置的压力传感器，检定时冷却装置应处于工作状态。压力传感器在使用中需考虑腔室或管路响应时，应连同腔室或管路一起检定。

h) 如因故无法齐平安装，压力传感器的感压面有小腔室或管路出现，则需考虑管路容腔效应的影响，管路最低谐振频率应 10 倍于压力传感器的谐振频率。在直管时，管路谐振频率可按公式 (4) 估算：

$$f = \frac{a}{4L} \tag{4}$$

式中： a ——管路内流体的音速，m/s；

L ——管路长度，m。

如果压力传感器的感压面前端带有腔室，且通过小孔径管路与被测点相连，当腔室的容积大于小孔径管路的容积时，可按公式 (5) 估算管腔的谐振频率：

$$f = \frac{ad}{7.09 \sqrt{(L + 0.85d)V}} \tag{5}$$

式中： d ——小孔径管路内径，m；

V ——腔室容积， m^3 。

i) 进行幅频特性检定时，采样频率应为压力传感器谐振频率（或振铃频率）的 10 倍以上；进行相频特性检定时，采样频率应为压力传感器谐振频率（或振铃频率）的 50 倍以上。在进行数据处理时，所用数据应不少于 20 个自振波的数据量。

j) 压力传感器、测试仪器至少预热 30min。

7.3.4.2 检定步骤

- a) 安装压力传感器。
- b) 安装激波管膜片。
- c) 向激波管加压，采用人工或自然破膜方式产生激波。
- d) 将试验原始数据以数据文件的方式保存在计算机中。

7.3.4.3 激波管动态压力标准检定结果计算方法

a) 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（图 3）。 t_r 由压力传感器对阶跃压力激励的响应曲线直接计算得出。

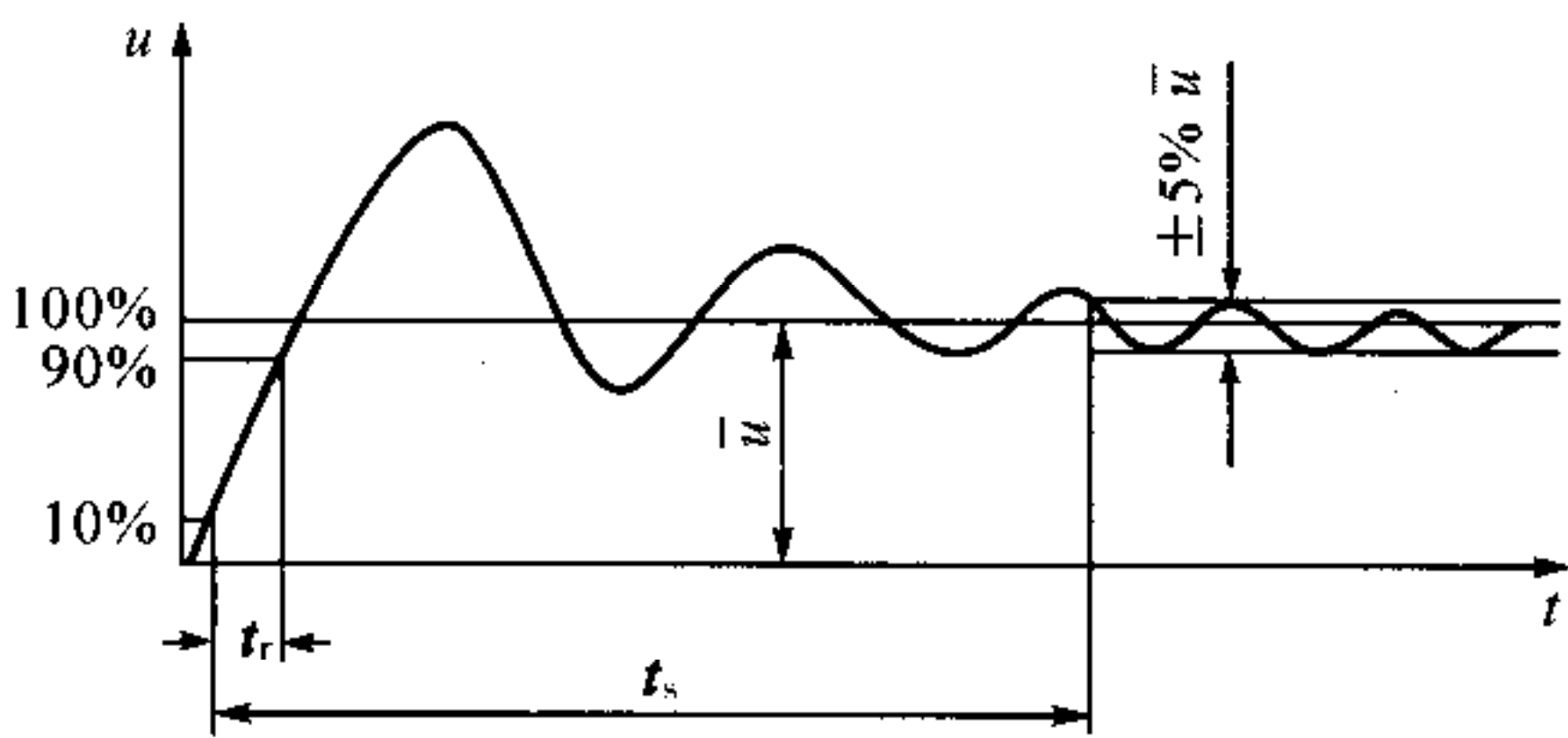


图 3 压力传感器对阶跃压力激励的响应

b) 振铃频率 ω_d

用单位时间内的振荡波数来表示（图 4），按公式（6）计算：

$$\omega_d = \frac{2\pi N}{t} \tag{6}$$

式中： t —— N 个振荡波所需的时间。

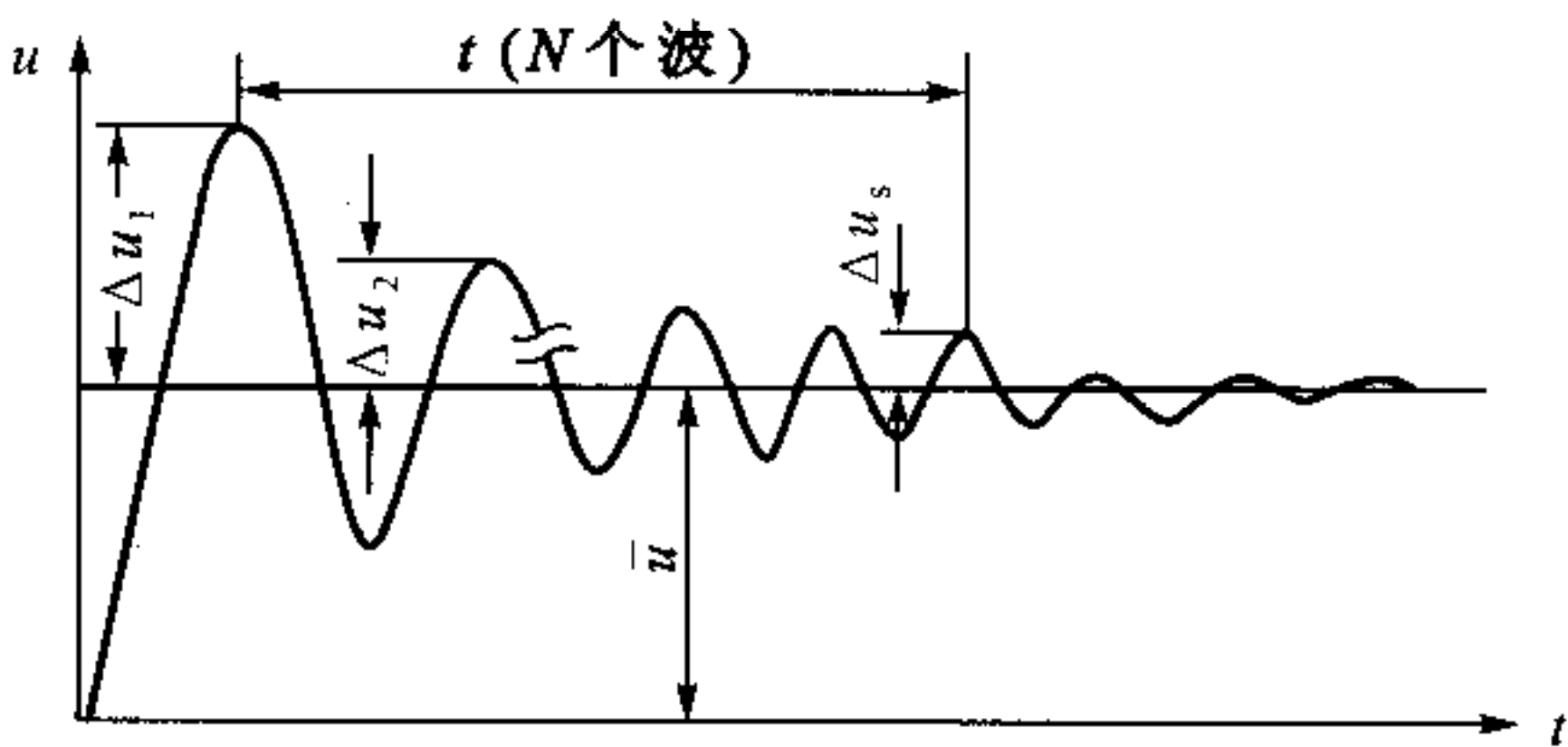


图 4 由时域波形计算振铃频率

c) 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（图 4）。

$$\delta = \frac{\Delta u_1}{\bar{u}} \times 100\% \quad (7)$$

式中： Δu_1 ——响应中超出终值部分的最大值；

$\bar{u}$ ——阶跃响应幅值。

d) 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（图 3）。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。

e) 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 按公式（8）计算：

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

式中： $\bar{u}$ ——压力传感器被阶跃压力激励后，其阶跃响应幅度值（图 3）；

Δp ——阶跃压力值，根据使用的压力标准按附录 C 或附录 D 计算。

7.3.5 用快开阀动态压力标准进行检定的一般要求、检定步骤和计算方法

快开阀动态压力标准见附录 D。

7.3.5.1 一般要求

a) 根据压力传感器的量程，确定快开阀动态压力标准所产生的阶跃压力幅值范围。应考虑压力传感器在阶跃压力作用下可能产生过冲，使阶跃压力与过冲量之和小于压力传感器的量程上限值。检定所用的介质（气体或液体）应尽量与压力传感器在使用中要用的一致；所产生的压力阶跃方向应尽量与压力传感器在使用中遇到的压力方向相同。

b) 压力发生装置的阀门（或膜片）与压力传感器最前端安装平面之间的容积应最小，距离应最短，该腔室的谐振频率尽可能为压力传感器谐振频率的 10 倍以上。要考虑温度、振动及冲击加速度、安装等各因素对检定的影响。

c) 有冷却装置的压力传感器，检定时冷却装置应处于工作状态。压力传感器在使用中需考虑腔室或管路响应时，应连同腔室或管路一起检定。

d) 对灵敏度 K_s 以外的项目进行检定时，快开阀动态压力标准所产生的阶跃压力上升时间应不大于压力传感器上升时间的 1/3。

7.3.5.2 检定步骤

a) 安装压力传感器。

b) 启动系统，使其产生阶跃压力。

c) 将试验原始数据以数据文件的方式保存在计算机中。

7.3.5.3 快开阀动态压力标准检定结果计算方法

与 7.3.4.3 方法相同。

7.4 检定结果处理

按本规程要求检定合格的压力传感器，出具检定证书，检定证书内页格式见附录 G.1。检定不合格的压力传感器，出具检定结果通知书，并注明不合格项目和内容，检

定结果通知书内页格式见附录 G.2。

7.5 检定周期

压力传感器检定周期一般不超过 1 年。在恶劣条件下使用的压力传感器，建议在使用前和使用后分别进行检定。

附录 A

单自由度二阶线性系统

压力传感器的动态特性比较复杂，不同的压力传感器其数学模型的阶次和自由度可能是不同的。为简化起见，描述压力传感器动态特性时，通常将其数学模型近似为单自由度二阶线性系统（以下简称二阶系统）。在多数场合，这种近似是有其合理性的。

压力传感器可以用如图 A1 所示的典型质量 - 弹簧系统来表述。

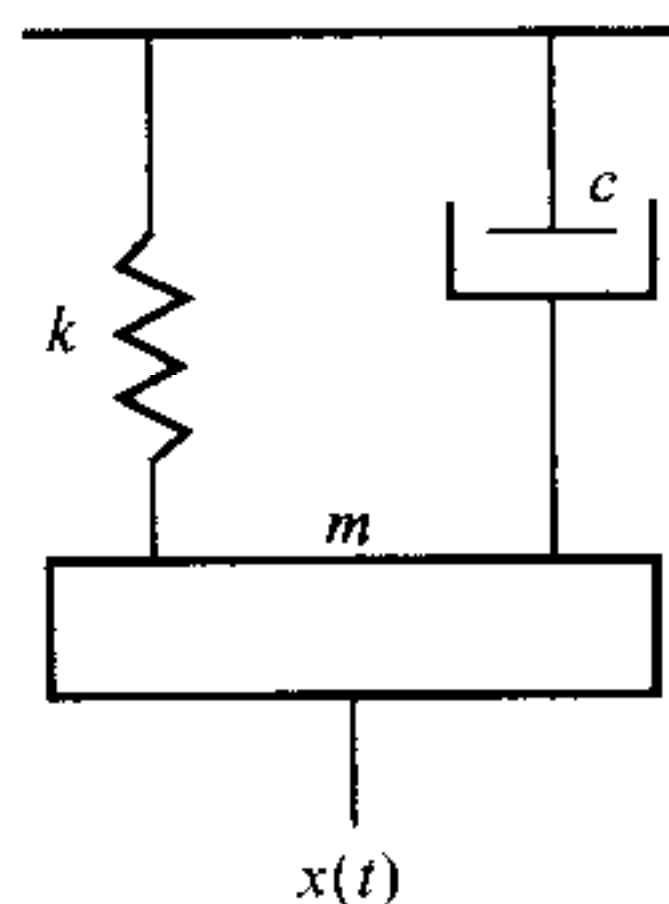


图 A1 有阻尼的质量 - 弹簧系统

其运动方程可以用二阶微分方程来描述：

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y = \frac{x(t)}{m} \quad (A1)$$

式中： c ——阻尼；

k ——弹性系数；

m ——质量；

$x(t)$ ——作用力函数（由压力产生）。

对式（A1）进行拉氏变换，经整理得到系统的传递函数：

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (A2)$$

式中： $Y(s)$ ——响应函数的拉氏变换；

$X(s)$ ——激励函数的拉氏变换；

K ——静态灵敏度， $K = k$ ；

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ——系统的固有频率，rad/s；

$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ ——系统的阻尼比。

固有频率是压力传感器在无阻尼（ $c = 0$ ）时，敏感元件的自由振荡频率，此时，响应信号对激励信号有 90° 的相移。 s 为复变量。 ξ 为阻尼比，它是实际阻尼与临界阻尼之比。

式（A2）表述的模型是假定压力传感器能以灵敏度 K 来响应静态压力 [即 $s = 0$

时，式（A2）中灵敏度为 K]。通常，以电荷量为响应的压力传感器对静态压力是不响应的。此时，可引入高通 RC 滤波器来修正。例如，压电式传感器就可以用这种传递函数来逼近：

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{s}{s + 1/RC} \tag{A3}$$

此时 $s = 0$ ，则响应为零。

式(A2)和式(A3)是用变量 s 写出来的。它在频率域上描述了系统的特性。给定了激励函数，就可用拉氏反变换导出函数在时间域上的方程。假定有幅值为 A 的阶跃压力作用到式(A2)表述的传感器上，那么，信号的时域响应即为

$$y(t) = A \{ 1 - (1/\beta) \cdot e^{-(\xi\omega_d t/\beta)} \cdot \sin[\omega_d t + \arctan(\beta/\xi)] \} \tag{A4}$$

式中： $\beta = (1 - \xi^2)^{1/2}$;
 $\omega_d = \omega_n (1 - \xi^2)^{1/2}$, 为振铃频率, rad/s。

图 A2 所示为不同阻尼比（ ξ ）的二阶系统对单位阶跃激励的时域响应。

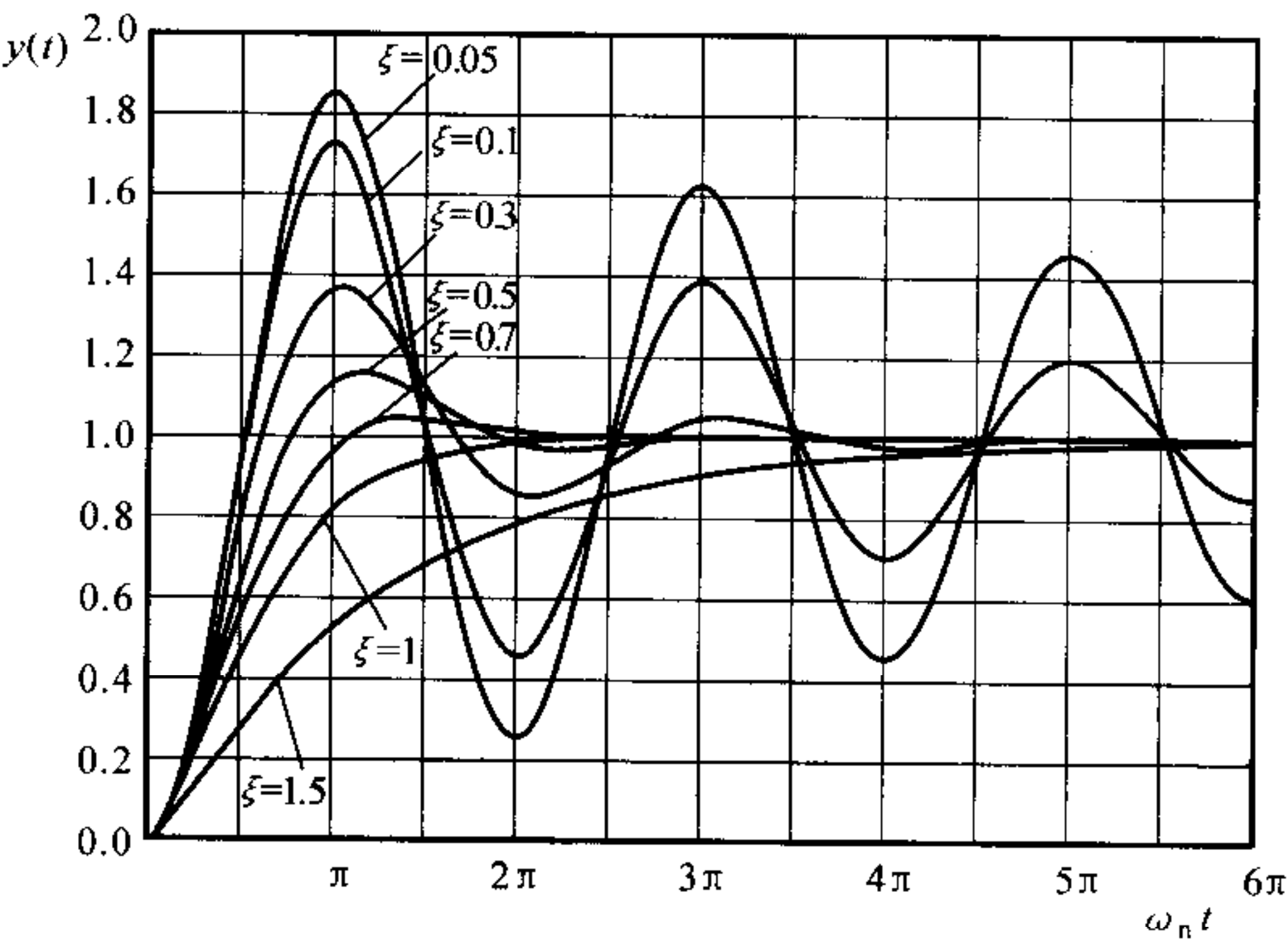


图 A2 不同阻尼比（ ξ ）的二阶系统对单位阶跃激励的时域响应

图 A3 所示为二阶系统的幅频特性曲线，计算公式为

$$A(\omega) = \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(\frac{2\xi\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^{1/2}} \tag{A5}$$

式中： ω ——激励频率， rad/s；
 ω_n ——固有频率， rad/s；
 ξ ——阻尼比。

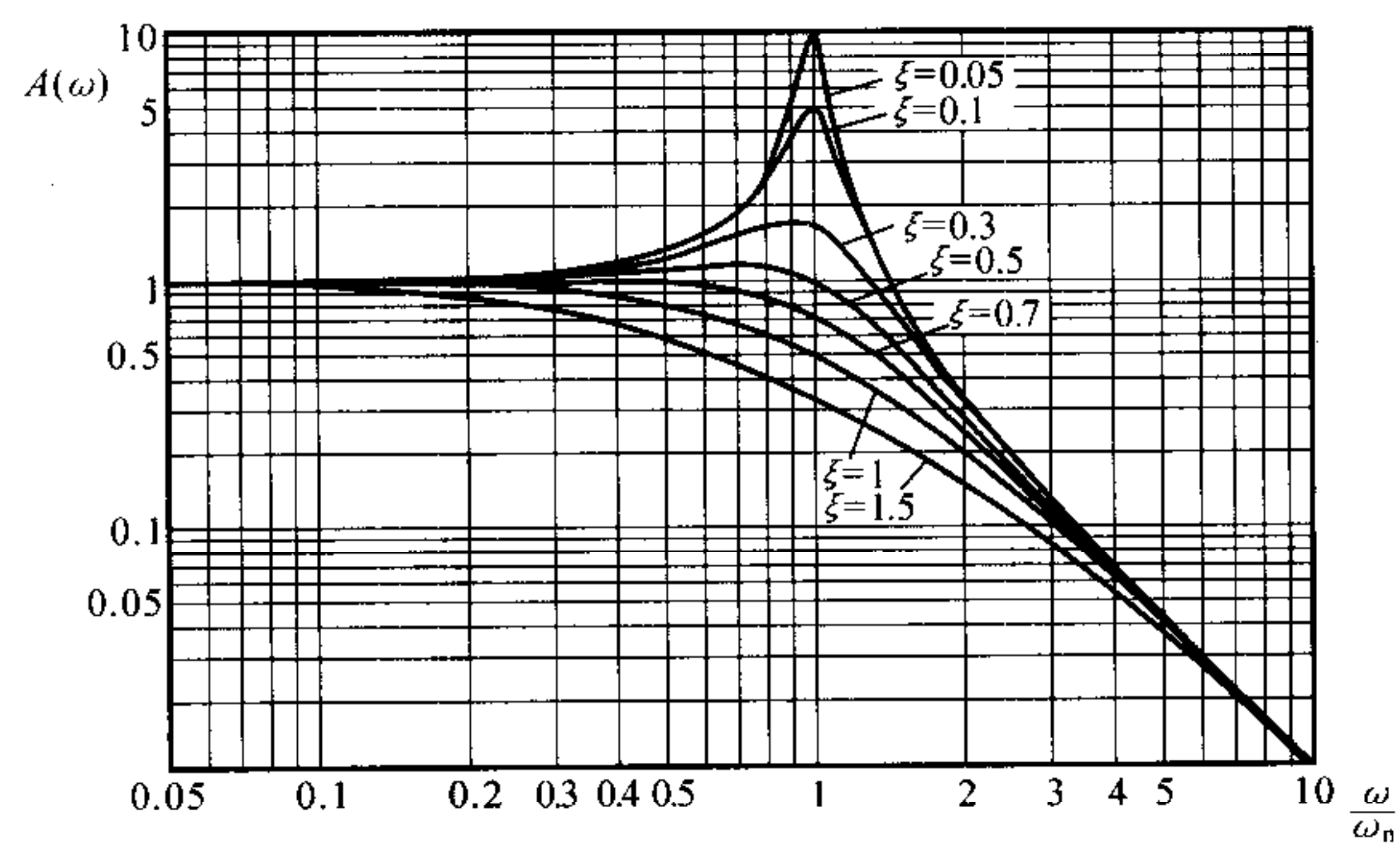


图 A3 二阶系统的幅频特性

图 A4 所示为二阶系统的相频特性曲线，计算公式为

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{-2\xi\omega/\omega_n}{1 - \omega^2/\omega_n^2}\right)$$

(A6)

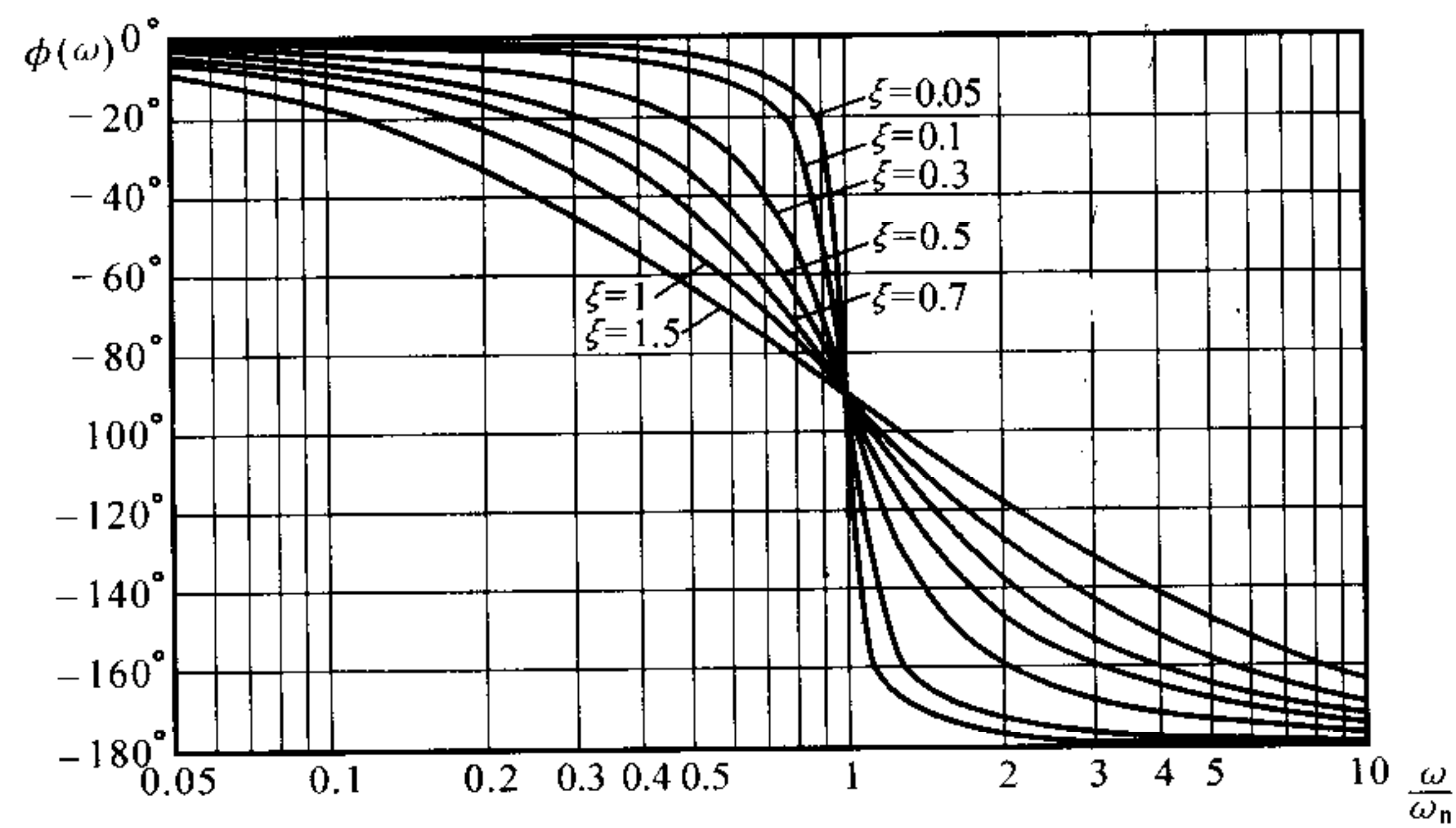


图 A4 二阶系统的相频特性

附录 B

正弦压力标准

B.1 概述

正弦压力标准采用正弦压力发生器作为激励源，用正弦压力对压力传感器进行检定。正弦压力发生器的种类繁多，依工作原理分类有谐振式、调制式、汽缸－活塞式等。其工作介质有气体和液体两种，工作频率范围各不相同，目前各种正弦压力发生器的总体工作频率范围可覆盖（0～20）kHz。正弦压力标准一般采用比较法原理，即采用标准压力传感器测量激励信号，与压力传感器的响应进行比较的方法进行检定。图 B1 所示为一种采用正弦压力标准检定压力传感器的原理。当正弦压力发生器对两只传感器施加频率为 f_i 的相同的正弦压力激励时，两只传感器的响应经过信号调理器后被数据采集系统同时采集，得到两个离散电压序列。采用 B.2 或 B.3 的方法进行计算，就可以求出标准压力传感器测量到的正弦压力幅值 A_{di} （等于标准压力传感器响应电压幅值与标准压力传感器幅值灵敏度的乘积）和相位 θ_{Ai} ，以及压力传感器的响应正弦信号的幅值 B_{di} 和相位 θ_{Bi} 。按规程的 7.3.3.3 可计算出压力传感器的幅值灵敏度误差和相移。

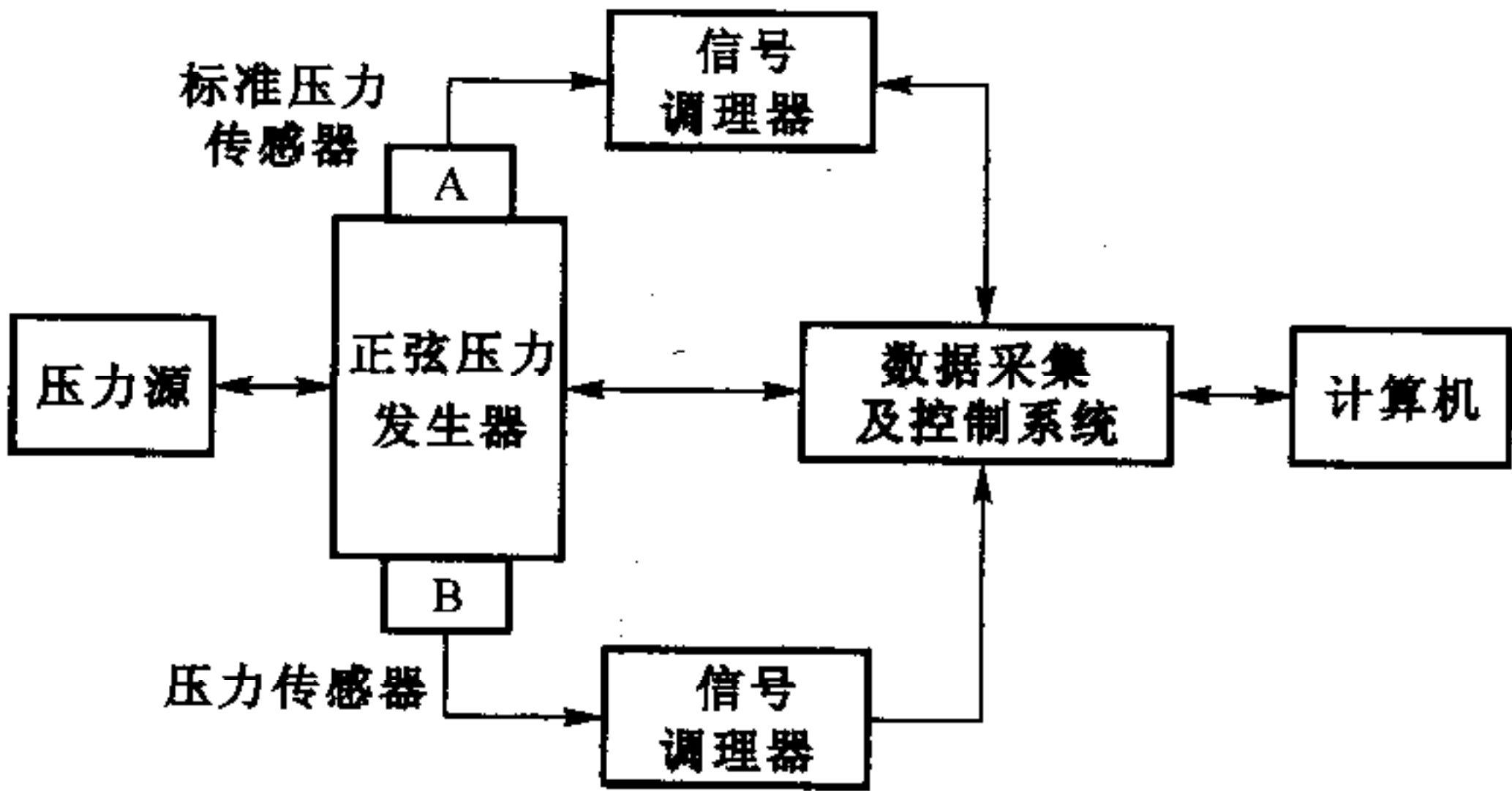


图 B1 正弦压力标准检定压力传感器原理

虽然数字电压表和相位计可以分别测量正弦信号的幅值和相位，然而本规程使用数据采集系统同步采集标准压力传感器和压力传感器的响应，采用 DFT 法（B.2）或最小二乘拟合法（B.3）计算正弦信号的幅值和相位，以减少正弦信号的失真对测量结果的影响。

B.2 离散傅立叶变换（DFT）法计算正弦波幅值和相位

理想正弦信号可用下述四参数表达式表示：

$$y(t) = C\cos(\omega_0 t + \theta) + D$$

- 式中：
- C ——正弦信号的幅值；
 - ω_0 ——正弦信号角频率；
 - θ ——正弦信号的相位；
 - D ——正弦信号的直流分量。

信号的角频率与频率的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。以时间间隔 Δt 进行离散化抽样后, 在采样点上获得的离散时域信号序列可相应表述为

$$y(i\Delta t) = C\cos(\omega_0 i + \theta) + D$$

式中: $\omega_0 = \overline{\omega_0} \Delta t$

数据采集系统记录数据序列为时刻 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ 的采集样本 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$, 即序列 $y[i] (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$, 其离散傅立叶变换 (DFT) 为

$$Y[i] = \sum_{k=0}^{n-1} y_k e^{-j2\pi ik/n} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (B1)$$

时域信号 y 和频域序列 Y 的点数都为 n 。对应于时域采集到的信号 y 的时间间隔 Δt , 频域序列 Y 的频率间隔为

$$\Delta f = \frac{1}{(n-1) \Delta t} \quad (B2)$$

$Y[i]$ 为频率间隔为 Δf 的 n 点复数序列, 包含幅值和相位两方面信息。如果采样间隔为 Δt , 而且第一个采样点 ($i = 0$) 位于 0, 那么第 i 个数据就是在 $i\Delta t$ 采样的。同样, 如果频率间隔为 Δf , 那么第 i 个 DFT 样本就发生在频率为 $i\Delta f$ 处。因此, 如果正弦信号频率可以表示为

$$\bar{f}_0 = N\Delta f \quad (B3)$$

式中: N ——整数, 且 $0 < N < n$ 。

DFT 的结果的复数序列中, 频率为 $\bar{f}_0$ 的谱线值为

$$Y[N] = A + Bj \quad (B4)$$

式中: A, B ——第 N 点 DFT 的实部和虚部。

则频率为 $\bar{f}_0$ 的正弦信号, 其幅值和相位分别为

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (B5)$$

$$\theta = \arctan(B/A) \quad (B6)$$

推荐在已知正弦信号频率的条件下采用本方法, 并且时域信号序列 $y[i] (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$ 应包含整数个周期的正弦波, 以避免进行 DFT 运算时由于频谱泄漏影响计算结果的准确度。

B.3 最小二乘拟合法计算正弦波幅值和相位

理想正弦信号可用下述四参数表达式表示:

$$y(t) = A\cos(\overline{\omega_0} t) + B\sin(\overline{\omega_0} t) + D$$

或

$$y(t) = C\cos(\overline{\omega_0} t + \theta) + D$$

以时间间隔 Δt 进行离散化抽样后, 在采样点上获得的离散序列可相应表述为

$$y(i\Delta t) = A\cos(\omega_0 i) + B\sin(\omega_0 i) + D$$

或

$$y(i\Delta t) = C\cos(\omega_0 i + \theta) + D$$

式中: $\omega_0 = \overline{\omega_0} \cdot \Delta t$

数据采集系统记录时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的采集样本 $y_1, y_2, \dots, y_n$, 可以采用数据拟合的方法, 计算出正弦波的四个参数。这里提供两种正弦拟合方法: 一种用于采样频率和被测信号激励频率均已知时; 另一种用于信号频率未知时。每一个途径包括两种算法: 一种通过矩阵运算; 另一种通过迭代过程。对于已知信号频率的情况, 当初始条件相同时, 上述两个算法结果一致。但两者的收敛性不一样, 使用矩阵算法的收敛速度比不使用矩阵的快, 特别是信号周期数小于 5 个时。

B.3.1 正弦波三参数 (已知频率) 最小二乘拟合算法

B.3.1.1 矩阵算法

设理想正弦信号为

$$y(t) = A \cos(\bar{\omega}_0 t) + B \sin(\bar{\omega}_0 t) + D$$

数据记录序列为时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的采集样本 $y_1, y_2, \dots, y_n$, 拟合过程即为选取或寻找 A, B, D , 使下式所述残差平方和最小:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - A \cos(\bar{\omega}_0 t_i) - B \sin(\bar{\omega}_0 t_i) - D]^2 \quad (\text{B7})$$

这里, $\bar{\omega}_0$ 是激励正弦信号频率。

为了找出合适的 A, B, D 值, 首先构造下列矩阵:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \cos(\bar{\omega}_0 t_1) & \sin(\bar{\omega}_0 t_1) & 1 \\ \cos(\bar{\omega}_0 t_2) & \sin(\bar{\omega}_0 t_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\bar{\omega}_0 t_n) & \sin(\bar{\omega}_0 t_n) & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix}$$

公式(B7)可用下列矩阵方式表示:

$$(\mathbf{y} - \Psi \mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \Psi \mathbf{x}) \quad (\text{B8})$$

这里, $(*)^T$ 表示 $(*)$ 的转置。

可以得出公式(B8)最小时的最小二乘解 $\hat{x}$:

$$\hat{x} = (\Psi^T \Psi)^{-1} (\Psi^T \mathbf{y})$$

拟合函数为

$$\hat{y}_i = A \cos(\bar{\omega}_0 t_i) + B \sin(\bar{\omega}_0 t_i) + D$$

将其转换为幅值和相位表达形式:

$$\hat{y}_i = C \cos(\bar{\omega}_0 t_i + \theta) + D$$

其中:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left[\frac{-B_0}{A_0}\right] & (A_0 \geq 0) \\ \arctan\left[\frac{-B_0}{A_0}\right] + \pi & (A_0 < 0) \end{cases}$$

拟合残差 r_i 为

$$r_i = y_i - A \cos(\bar{\omega}_0 t_i) - B \sin(\bar{\omega}_0 t_i) - D$$

拟合残差有效值为

$$\rho = \varepsilon_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}$$

B.3.1.2 代数方程算法

设数据记录序列为包含了一系列在时刻 t_i ($i = 1, \dots, n$) 上采集的正弦信号样本 y_i , 信号的角频率为 ω , 定义:

$$\alpha_i = \cos(\omega t_i) \quad \beta_i = \sin(\omega t_i)$$

然后计算下面的九个和:

$$\sum_{i=1}^n y_i; \sum_{i=1}^n \alpha_i; \sum_{i=1}^n \beta_i; \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i; \sum_{i=1}^n \alpha_i^2; \sum_{i=1}^n \beta_i^2; \sum_{i=1}^n y_i \alpha_i; \sum_{i=1}^n y_i \beta_i; \sum_{i=1}^n y_i^2$$

使用这些和, 计算:

$$A_1 = \frac{A_N}{A_D} \quad B_1 = \frac{B_N}{B_D} \quad D = \bar{y} - A_1 \bar{\alpha} - B_1 \bar{\beta}$$

其中:

$$\begin{aligned} A_N &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \alpha_i} - \frac{\sum_{i=1}^n y_i \beta_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i^2 - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \beta_i} \\ A_D &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \alpha_i} - \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i^2 - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \beta_i} \\ B_N &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i} - \frac{\sum_{i=1}^n y_i \beta_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \beta_i} \\ B_D &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i} - \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i^2 - \bar{\beta} \sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i - \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n \beta_i} \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad \bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \end{aligned}$$

拟合函数如下:

$$\hat{y}_i = A_1 \cos(\omega_0 t_i) + B_1 \sin(\omega_0 t_i) + D$$

其幅值和相位表达形式:

$$\hat{y}_i = C \cos(\omega_0 t_i + \theta) + D$$

其中:

$$C = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left[\frac{-B_1}{A_1}\right] & (A_1 \geq 0) \\ \arctan\left[\frac{-B_1}{A_1}\right] + \pi & (A_1 < 0) \end{cases}$$

拟合残差有效值为

$$\rho = \epsilon_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\epsilon}{n}}$$

其中：

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sum_{i=1}^n y_i^2 + A_1^2 \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 + B_1^2 \sum_{i=1}^n \beta_i^2 + nD^2 - 2A_1 \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i - 2B_1 \sum_{i=1}^n \beta_i y_i - 2D \sum_{i=1}^n y_i \\ &\quad + 2A_1 B_1 \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i + 2A_1 D \sum_{i=1}^n \alpha_i + 2B_1 D \sum_{i=1}^n \beta_i \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - A_1 \alpha_i - B_1 \beta_i - D)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{aligned}$$

由于这是一种闭合算法，因而收敛是肯定的。

B.3.2 正弦波四参数最小二乘拟合算法

正弦波信号的频率未知时，可采用四参数最小二乘拟合算法。

三参数正弦曲线拟合是一种闭合的线性过程，绝对收敛。四参数正弦曲线拟合则不然，尚无确切的数学公式可直接计算获得拟合参数，所有已知的方法都属非线性迭代拟合过程，若拟合初始值距离目标值“太远”，则很容易导致迭代过程发散或收敛到局部最优点而不是总体最优点上，致使拟合结果错误。而且，拟合初始值是否与目标值足够“接近”，又缺乏实际判据，很难对其进行量化控制，只能在拟合不收敛时，重新选取初始值或重新获取测量数据。希望能找到一个判据，当判据要求满足时，四参数正弦波曲线拟合过程是绝对收敛的。下面的过程具有这样的特点。

设正弦数据记录序列中时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的采集样本 $y_1, y_2, \dots, y_n$ ，待估计的正弦波形序列 y_i ($i = 1, \dots, n$) 的模型为

$$y(t_i) = C \cos(\bar{\omega} \cdot t_i + \theta) + D$$

假设待估计的正弦波角频率目标值为 $\bar{\omega}_0$ ，待估计的正弦波采样序列所含信号周期个数为 p ；则有， $\Delta\bar{\omega}_{\text{max}} = \bar{\omega}_0/p$ ，在区间 $[\bar{\omega}_0 - \Delta\bar{\omega}_{\text{max}}, \bar{\omega}_0 + \Delta\bar{\omega}_{\text{max}}]$ 内的任意角频率 $\bar{\omega}$ 下，残差平方和 $\epsilon(\bar{\omega})$ 的极值存在且惟一。这样，便将四参数正弦波曲线拟合中，对幅度、频率、相位、直流分量四个参数的四维非线性搜索，变成了对频率分量 $\bar{\omega}$ 造成的 $\epsilon(\bar{\omega})$ 的一维线性搜索，可保证在区间 $[\bar{\omega}_0 - \Delta\bar{\omega}_{\text{max}}, \bar{\omega}_0 + \Delta\bar{\omega}_{\text{max}}]$ 内，用三参数拟合法实现的四参数正弦曲线拟合过程绝对收敛。该四参数拟合过程如下：

a) 设定拟合迭代停止条件为 h_e 。

b) 从已知时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的正弦波采集样本 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 。使用周期计点

法或其他方法获得每个信号周期内所含信号采样点数 m ，并获得序列所含信号周期个数 $p = n/m$ ；则频率 $\bar{\omega}_0$ 的估计值 $\bar{\omega}_0 = 2\pi v/m$ ， $v = \frac{n-1}{t_n - t_1}$ ；其收敛区间界为 $\Delta\bar{\omega}_{\max} = \bar{\omega}_0/p = 2\pi v/n$ 。

c) 确定拟合频率 $\bar{\omega}$ 的收敛区间 $[\bar{\omega}_0 - \Delta\bar{\omega}_{\max}, \bar{\omega}_0 + \Delta\bar{\omega}_{\max}] = [\bar{\omega}_0 - 2\pi v/n, \bar{\omega}_0 + 2\pi v/n]$ ，则迭代左边界频率： $\bar{\omega}_L = \bar{\omega}_0 - 2\pi v/n$ ；迭代右边界频率： $\bar{\omega}_R = \bar{\omega}_0 + 2\pi v/n$ ；中值频率： $\bar{\omega}_M = \bar{\omega}_L + 0.618 \times (\bar{\omega}_R - \bar{\omega}_L)$ ； $\bar{\omega}_T = \bar{\omega}_R - 0.618 \times (\bar{\omega}_R - \bar{\omega}_L)$ 。

d) 在 $\bar{\omega}_L$ 上执行三参数正弦曲线拟合，获得 C_L 、 θ_L 、 D_L 、 ρ_L ；在 $\bar{\omega}_R$ 上执行三参数正弦曲线拟合，获得 C_R 、 θ_R 、 D_R 、 ρ_R ；在 $\bar{\omega}_M$ 上执行三参数正弦曲线拟合，获得 C_M 、 θ_M 、 D_M 、 ρ_M ；在 $\bar{\omega}_T$ 上执行三参数正弦曲线拟合，获得 C_T 、 θ_T 、 D_T 、 ρ_T 。

e) 若 $\rho_M < \rho_T$ ，则 $\rho = \rho_M$ ，有 $\bar{\omega}_0 \in [\bar{\omega}_T, \bar{\omega}_R]$ ， $\bar{\omega}_L = \bar{\omega}_T$ ， $\bar{\omega}_T = \bar{\omega}_M$ ； $\bar{\omega}_M = \bar{\omega}_L + 0.618 \times (\bar{\omega}_R - \bar{\omega}_L)$ 。

若 $\rho_M > \rho_T$ ，则 $\rho = \rho_T$ ，有 $\bar{\omega}_0 \in [\bar{\omega}_L, \bar{\omega}_M]$ ， $\bar{\omega}_R = \bar{\omega}_M$ ， $\bar{\omega}_M = \bar{\omega}_T$ ； $\bar{\omega}_T = \bar{\omega}_R - 0.618 \times (\bar{\omega}_R - \bar{\omega}_L)$ 。

f) 判定是否 $|[\rho_M(k) - \rho_T(k)]/\rho_T(k)| < h_e$ ，是则停止迭代，并且：

$\rho = \rho_T$ 时，获得四参数拟合正弦曲线参数为 $C = C_T$ 、 $\omega = \omega_T$ 、 $\theta = \theta_T$ 、 $D = D_T$ 、 ρ ，拟合结束；

$\rho = \rho_M$ 时，获得四参数拟合正弦曲线参数为 $C = C_M$ 、 $\omega = \omega_M$ 、 $\theta = \theta_M$ 、 $D = D_M$ 、 ρ ，拟合结束；

否则，重复d) ~ f)的过程。

附录 C

激波管动态压力标准

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（图 C1）。

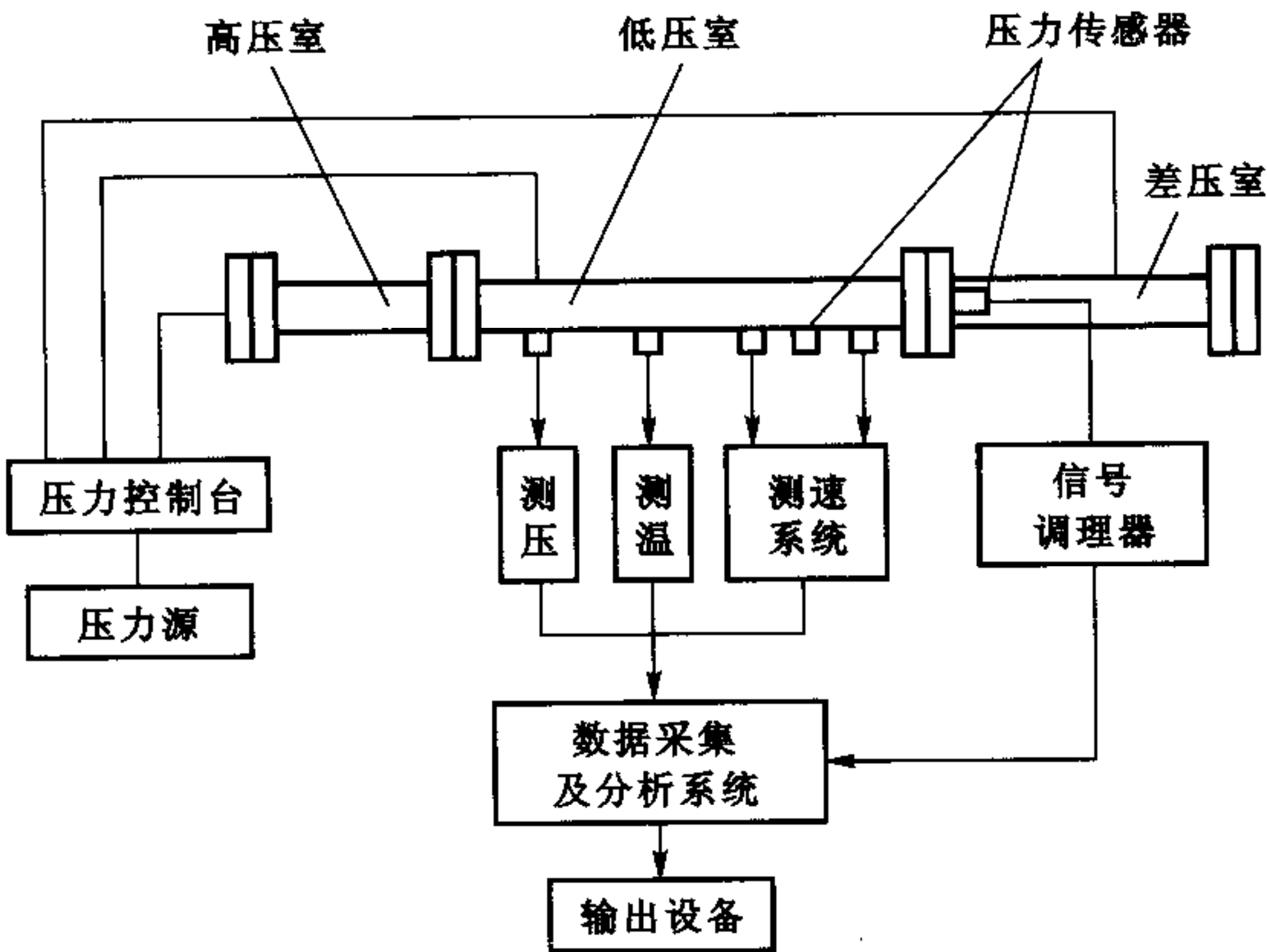


图 C1 激波管动态压力标准检定传感器原理

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成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。

激波管工作时的波系和流场情况及符号标志如图 C2 所示。

符号及其含义：

- p_1 ——破膜前的低压室压力；
- p_4 ——破膜前的高压室压力；
- p_2 ——入射激波压力；
- p_5 ——反射激波压力；
- Δp_2 ——入射激波阶跃压力；
- Δp_5 ——反射激波阶跃压力；

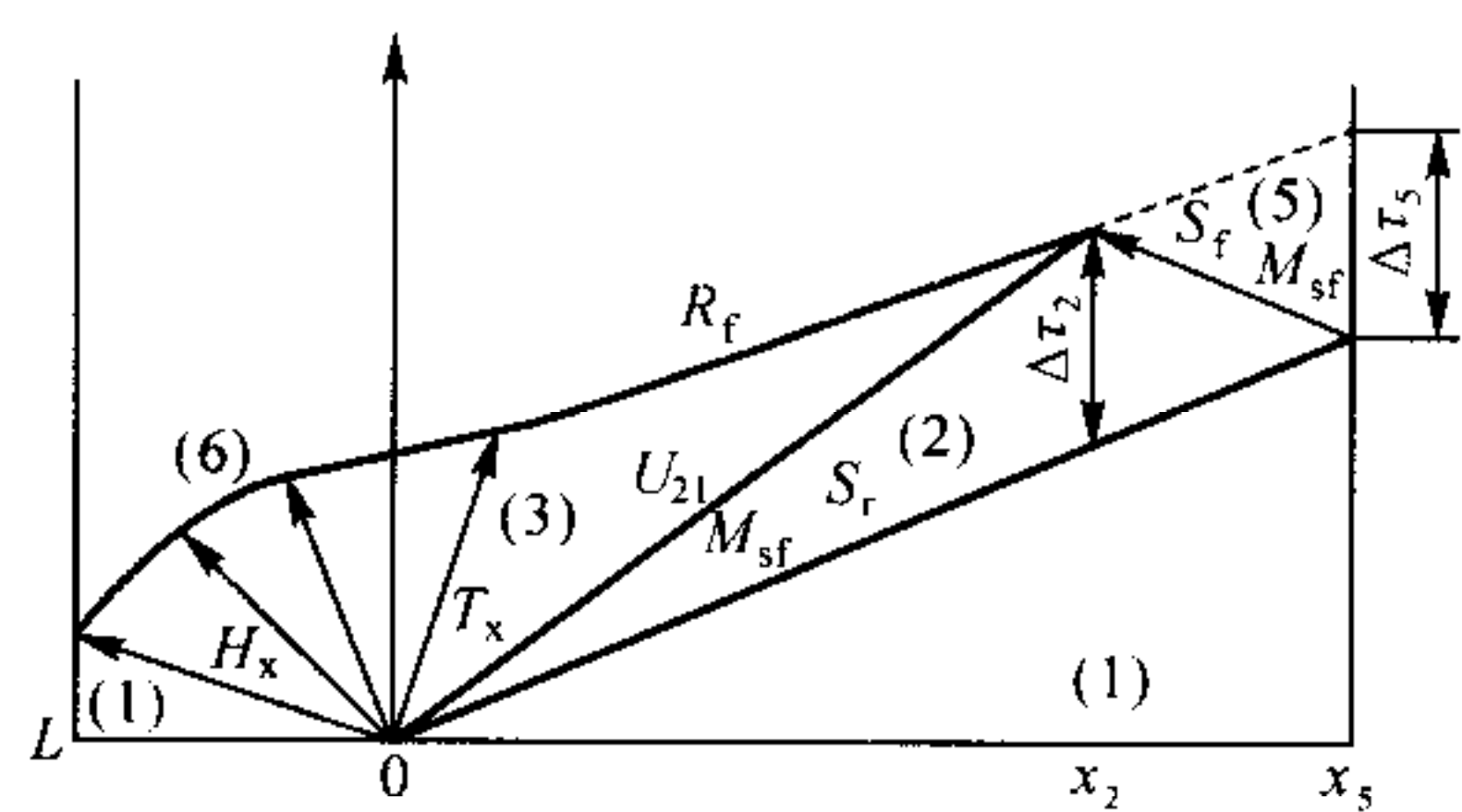


图 C2 激波波系

- T_1 ——工作介质的初始温度；
- ΔT_2 ——入射激波阶跃温升；
- ΔT_5 ——反射激波阶跃温升；
- S_r ——入射激波；
- S_f ——反射激波；
- M_{sr} ——入射激波马赫数；
- M_{sf} ——反射激波马赫数；
- C ——接触面；
- U_{21} ——接触面速度；
- H_x ——稀疏波头；
- T_x ——稀疏波尾；
- R_f ——反射稀疏波；
- L ——高压室有效长度；
- x_5 ——低压室长度；
- x_2 ——反射激波、接触面、反射稀疏波互相交会的位置；
- $\Delta \tau_2$ ——入射激波阶跃压力恒压时间；
- $\Delta \tau_5$ ——反射激波阶跃压力恒压时间；
- x_5 ——低压室内腔的有效长度；
- x_2 ——侧壁安装的压力传感器与膜片之间的距离；
- v_s ——入射激波速度；
- a ——空气中的音速。

$$a = 331.45 [T/273.15]^{1/2} \tag{C1}$$

式中： T ——低压室工作介质的初始温度，K。

C.2 参数计算方法

当激波管的工作介质为空气时，其参数均可用入射激波压力比 p_{21} 或入射激波马赫数 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）：

入射激波马赫数：

$$M_s = v_s/a = [(1/7)(6p_{21} + 1)]^{1/2} \quad (C2)$$

初始压力比：

$$\begin{aligned} p_{41} &= p_4/p_1 \\ &= p_{21} \{1 - (p_{21} - 1)[7(6p_{21} + 1)]^{-1/2}\}^{-7} \\ &= (1/6)(7M_s^2 - 1) \{1 - (1/6)(M_s^2 - 1/M_s)\}^{-7} \end{aligned} \quad (C3)$$

入射激波压力比：

$$p_{21} = p_2/p_1 = (1/6)(7M_s^2 - 1) \quad (C4)$$

入射激波阶跃压力：

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= p_2 - p_1 \\ &= (p_{21} - 1)p_1 = (7/6)(M_s^2 - 1)p_1 \end{aligned} \quad (C5)$$

入射激波温升比：

$$\begin{aligned} T_{21} &= T_2/T_1 \\ &= p_{21}(p_{21} + 6)/(6p_{21} + 1) \\ &= (7M_s^2 - 1)(M_s^2 + 5)/(36M_s^2) \end{aligned} \quad (C6)$$

入射激波阶跃温升：

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= T_2 - T_1 \\ &= (T_{21} - 1)T_1 \\ &= [(p_{21}^2 - 1)/(6p_{21} + 1)]T_1 \\ &= [(M_s^2 - 1)(7M_s^2 + 5)/(36M_s^2)]T_1 \end{aligned} \quad (C7)$$

反射激波压力比：

$$\begin{aligned} p_{51} &= p_5/p_1 \\ &= p_{21}[(8p_{21} - 1)/(p_{21} + 6)] \\ &= (1/3)(7M_s^2 - 1)[(4M_s^2 - 1)/(M_s^2 + 5)] \end{aligned} \quad (C8)$$

反射激波阶跃压力：

$$\begin{aligned} \Delta p_5 &= p_5 - p_1 \\ &= (p_{51} - 1)p_1 \\ &= 2[(4p_{21} + 3)(p_{21} - 1)/(p_{21} + 6)]p_1 \\ &= (7/3)(M_s^2 - 1)[(4M_s^2 + 2)/(M_s^2 + 5)]p_1 \end{aligned} \quad (C9)$$

反射激波温升比：

$$\begin{aligned} T_{51} &= T_5/T_1 \\ &= (2p_{21} + 5)(8p_{21} - 1)/[7(6p_{21} + 1)] \\ &= [(4M_s^2 - 1)(M_s^2 + 2)]/(9M_s^2) \end{aligned} \quad (C10)$$

反射激波阶跃温升：

$$\begin{aligned} \Delta T_5 &= T_5 - T_1 \\ &= (T_{51} - 1)T_1 \end{aligned}$$

$$= \{ [4(4p_{21} + 3)(p_{21} - 1)] / [7(6p_{21} + 1)] \} T_1$$
$$= \{ [2(M_s^2 - 1)(2M_s^2 + 1)] / (9M_s^2) \} T_1$$

(C11)

当 $p_{21} = 2$, 室温为 20℃ 时, 由式(C1) ~ 式(C11)可得如下参数:

入射激波马赫数	$M_s = 1.363$
初始压力比	$p_{41} = 4.34$
膜片爆破压力	$\Delta p = (p_{41} - 1)p_1 = 3.34p_1$
入射激波压力	$p_2 = 2p_1$
入射激波阶跃压力	$\Delta p_2 = p_1$
入射激波阶跃温升	$\Delta T_2 = 0.23 T_1$
反射激波压力比	$p_{51} = 3.75$
反射激波压力	$p_5 = 3.75p_1$
反射激波阶跃压力	$\Delta p_5 = 2.75p_1$
反射激波阶跃温升	$\Delta T_5 = 0.48 T_1$

附录 D

快开阀动态压力标准

D.1 简介

快开阀动态压力标准采用阶跃压力对压力传感器进行检定，其产生阶跃压力上升时间依不同的标准有较大差异，一般在微秒（ μs ）至毫秒（ ms ）量级。虽然快开阀动态压力标准产生的阶跃压力上升时间比激波管长，但其压力值范围较宽、压力平台保持时间理论上可以无限长、幅值误差可比激波管小一个数量级，因而很适于压力传感器灵敏度的检定以及低频特性的检定。目前此类标准动态压力幅值可以覆盖压力范围（0~1000）MPa，幅值准确度可达 0.1%。

一种可产生正阶跃压力的快开阀动态压力标准如图 D1 所示。它可采用气体或液体作工作介质，快开阀门将高压室和低压室隔开，高压室容积远大于低压室，压力传感器安装在低压室。检定时通过快速打开快开阀门使低压室压力突然升高，加载于压力传感器。低压室压力和高压室压力达到平衡的时间（阶跃压力上升时间）主要取决于开阀速度、高压室和低压室的结构以及流体的黏性。阀门开启前低压室和高压室的压力可以准确控制，阀门快速开启后低压室最后达到的稳态压力由于具有足够长的稳定时间，可以实现准确测量，其测量不确定度主要取决于用于测量其压力的数字压力计的准确度等级。

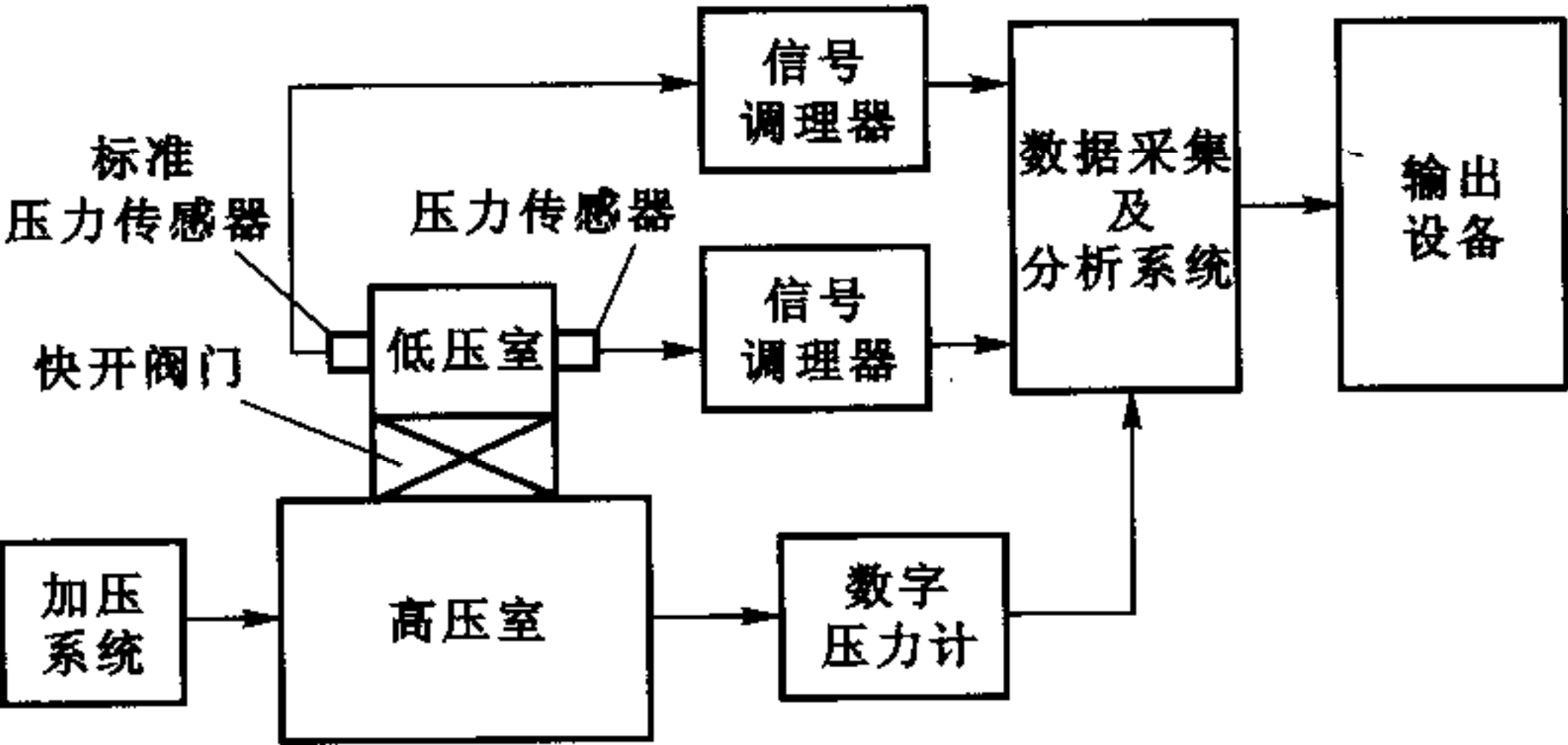


图 D1 快开阀动态压力标准检定压力传感器原理

D.2 参数计算方法

阶跃压力值可直接溯源到静态压力是快开阀动态压力标准的优点之一。阶跃压力作用下传感器的灵敏度 K_s 按公式（D1）计算。

$$K_s = \Delta \bar{u} / \Delta p \tag{D1}$$

式中： $\Delta \bar{u}$ ——阶跃压力作用后与作用前压力传感器响应稳定值之差；

Δp ——阶跃压力值， $\Delta p = p_s - p_0$ ，其中 p_s 是开阀后的稳定压力值，由数字压力计测出； p_0 为开阀前低压室的压力值，由标准压力传感器测出。

附录 E

常用符号

本规程常用符号列入附表 E1 中。

附表 E1

符号	所代表的量	单位
a	给定温度下气体中音速	m/s
f	频率	Hz
$K(f)$	幅值灵敏度	—
K_s	静态灵敏度	—
M_s	激波马赫数	—
p_1	低压段压力	MPa
p_2	入射激波压力	MPa
p_5	反射激波压力	MPa
p_H	压力传感器测量上限	MPa
Δp	阶跃压力	MPa
Δp_2	入射激波阶跃压力	MPa
Δp_5	反射激波阶跃压力	MPa
T	温度	K
t_r	压力传感器上升时间	s
t_s	压力传感器建立时间	s
t_{rp}	阶跃压力上升时间	s
u	电压值	V
δ	过冲量	—
δ_K	幅值灵敏度相对误差	—
ξ	阻尼比	—
τ	平台压力持续时间	s
v_s	入射激波速度	m/s
θ	相位	度
ϕ	相移	度
ω	角频率	rad/s
ω_n	固有频率	rad/s
ω_d	振铃频率	rad/s
ω_r	谐振频率	rad/s

附表 F3 快开阀动态压力标准检定记录

[illegible]

附录 G

检定证书及检定结果通知书（内页）格式

G.1 检定证书内页格式

检定依据文件：	空气温度：	℃	空气湿度：	% RH
测量标准名称：	测量标准有效期：		年	月 日
测量标准编号：	测量标准制造商：			

检 定 结 果

检定频率点：

检定结论：合格

以下空白

G.2 检定结果通知书内页格式

检定依据文件：	空气温度：	℃	空气湿度：	%RH
测量标准名称：	测量标准有效期：		年	月 日
测量标准编号：	测量标准制造商：			

检 定 结 果

检定频率点：

检定结论：不合格

不合格项目及内容：

以下空白

中华人民共和国
国家计量检定规程
动态压力传感器
JJG 624—2005
国家质量监督检验检疫总局发布

*

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲2号
邮政编码 100013
电话 (010) 64275360
<http://www.zgjl.com.cn>
北京市迪鑫印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
版权所有 不得翻印

*

880 mm × 1230 mm 16开本 印张 2.25 字数 43千字
2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷
印数 1—1 500