

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 44050.2—2024

## 液压传动 油液噪声特性测定 第2部分：管道中油液声速的测量

Hydraulic fluid power—Determination of fluid-borne noise characteristics of  
components and systems—Part 2: Measurement of speed of sound in  
a fluid in a pipe

(ISO 15086-2:2000, MOD)

2024-05-28 发布

2024-05-28 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布



目 次

前言 ..... III

引言 ..... V

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 符号和下标 ..... 1

5 测量仪器要求 ..... 3

6 液压噪声发生器 ..... 3

7 试验条件 ..... 4

8 试验装置 ..... 4

9 试验程序(方法 1) ..... 8

10 试验程序(方法 2) ..... 9

11 试验报告..... 9

12 标注说明 ..... 10

附录 A (规范性) 平均值的误差和测量等级 ..... 11

附录 B (规范性) 动态测量的误差和等级 ..... 12

附录 C (规范性) 数据简化算法 ..... 13

附录 D (资料性) 采用三传感器法(方法 1)计算声速的 MATLAB 编程示例 ..... 17

附录 E (资料性) 采用反共振法(方法 2)计算声速的 MATLAB 编程示例 ..... 19

参考文献 ..... 21



## 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。

本文件是 GB/T 44050《液压传动 油液噪声特性测定》的第2部分。GB/T 44050 已经发布了以下部分：

- 第1部分：通则；
- 第2部分：管道中油液声速的测量。

本文件修改采用 ISO 15086-2:2000《液压传动 油液噪声特性测定 第2部分：管道中油液声速的测量》。

本文件与 ISO 15086-2:2000 的技术差异及其原因如下：

- 更改了压力波动频率范围（见第1章，ISO 15086-2:2000 的第1章），以适应我国的技术条件，提高可操作性；
- 用规范性引用的 GB/T 17446 替换了 ISO 5598:1985，增加了规范性引用的 GB/T 44050.1（见第3章），以适应我国的技术条件，提高可操作性；
- 更改了术语和定义（见第3章，ISO 15086-2:2000 的第3章），以符合我国的编写规则；
- 更改了用仪器测量谐波时的频率范围（见 5.3，ISO 15086-2:2000 的 5.3），以适应我国的技术条件，提高可操作性；
- 更改了公式(C.2)、公式(C.3)、公式(C.34)、公式(C.36)（见附录 C，ISO 15086-2:2000 的附录 C），以保持与相关标准的一致性；
- 删除了图 C.1（见 ISO 15086-2:2000 的图 C.1），以适应我国的技术条件；
- 将“回路的压力波动应至少涵盖封闭管路的第一阶和第二阶‘反共振’频率之间的频率范围”更改为“回路的压力波动应至少涵盖封闭管路的第一阶和第三阶反共振频率之间的频率范围”（见 C.3，ISO 15086-2:2000 的 C.3），以适应我国的技术条件，提高可操作性；
- 更改了迭代计算的要求（见 C.3，ISO 15086-2:2000 的 C.3），以适应我国的技术条件，提高可操作性。

本文件做了下列编辑性改动：

- 将第4章中的符号以表的形式呈现，并增加了符号的单位和表注，后续表的编号顺延；
- 将符号“ $f_i$ ”更改为“ $f_{ai}$ ”；
- 用资料性引用的 ISO 80000（所有部分）替换了 ISO 1000；
- 用资料性引用的 GB/T 786.1 替换了 ISO 1219-1:1991；
- 重新绘制了图1～图3；
- 更改了图4中横纵坐标的符号和单位，删除了“标引序号说明”；
- 增加了压力传感器校准分布示例（见图3），后续图的编号顺延；
- 增加了管路示例（见图 C.1），后续图的编号顺延；
- 更正了 ISO 15086-2:2000 的编辑性错误，将 C.2.3 中“公式(C.10)可写为”改为“公式(C.2.2)可写为”；
- 按照先后顺序调整所有公式的编号，并在正文中逐一引用。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国液压气动标准化技术委员会(SAC/TC 3)归口。

本文件起草单位：浙江大学、厦门大学、北京机械工业自动化研究所有限公司、济南液压泵有限责任公司、国家智能制造装备产品质量监督检验中心(浙江)、宁波华液机器制造有限公司、武汉科技大学、武科宜创(无锡)流体装备有限公司、太原科技大学、广东天恒液压机械有限公司、中国机械总院集团海西(福建)分院有限公司。

本文件主要起草人：徐兵、叶绍干、罗经、刘传锋、郑智剑、张策、陈新元、段俊发、安高成、于文桥、占稳、林泉。

# 引 言

在液压流体动力系统中,动力是通过封闭回路中的受压液体来传输和控制的。在将机械功率转化为流体功率的过程中,会产生流体噪声(流量波动和压力波动),进而导致结构噪声和空气噪声。流体噪声的传输受到液压回路中元件阻抗的影响。

GB/T 44050 旨在规范液压元件和系统油液噪声特性的测定,由三个部分构成。

- 第 1 部分:通则。目的在于通过提供确定液压元件和系统油液噪声特性的传递矩阵理论,为测定油液噪声的特性提供指导。
- 第 2 部分:管道中油液声速的测量。目的在于通过对安装在管路中的压力传感器的测量,确定管路内封闭油液中的声速的方法。
- 第 3 部分:液压阻抗的测量。目的在于通过对安装在管路中的压力传感器的测量,确定液压元件阻抗特性的方法。

如果能精确获得油液中的声速,就能够以适当的精度测量液压元件和系统的油液噪声特性。GB/T 44050.2 基于平面波传输线理论在刚性管路中油液压力波动分析中的应用,确定了管路油液中声速的测量方法。





液压传动 油液噪声特性测定  
 第 2 部分：管道中油液声速的测量

1 范围

本文件描述了通过安装在管路中的压力传感器的测量数据确定管路油液中声速的方法。  
 本文件适用于稳态工况下运行的液压回路，其压力波动的频率范围为 10 Hz～3 000 Hz。

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。

GB/T 17446 流体传动系统及元件 词汇(GB/T 17446—2024,ISO 5598:2020,MOD)

GB/T 44050.1 液压传动 油液噪声特性测定 第 1 部分：通则(GB/T 44050.1—2024,ISO 15086-1:2001,MOD)

3 术语和定义

GB/T 17446 和 GB/T 44050.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

测量管 measurement pipe  
 安装有压力传感器的管路。

3.2

声反共振频率 acoustic antiresonance frequency  
 测量管入口阻抗幅值极小的频率。

4 符号和下标

4.1 符号

表 1 中列出的符号适用于本文件。

表 1 符号

符号	说明	单位
$A, A', B, B'$	复系数	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
$a, b$	与频率相关的波传播系数	Hz
$B_e$	有效体积弹性模量	Pa
$c$	油液中的声速	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$d$	管路内径	m

表 1 符号 (续)

符号	说明	单位
$f$	谐波频率	Hz
$f_i$	第 $i$ 阶谐波频率	Hz
$f_{ai}$	第 $i$ 阶声反共振频率	Hz
$H$	校准后两个压力传感器信号之间的传递函数(复数)	—
$H'$	校准时两个压力传感器信号之间的传递函数(复数)	—
$H^*$	两个压力传感器信号之间的传递函数(复数)	—
$j$	虚数单位	—
$L$	传感器 1 和 2 之间的距离(方法 1)	m
$L'$	传感器 2 和 3 之间的距离(方法 1)	m
$l$	传感器 1 到管路末端的距离(方法 2)	m
$P_1$	传感器 PT <sub>1</sub> 的压力波动(复数)	Pa
$P_2$	传感器 PT <sub>2</sub> 的压力波动(复数)	Pa
$P_3$	传感器 PT <sub>3</sub> 的压力波动(复数)	Pa
$Q_{1\rightarrow 2}$	位置 1 的流量波动,流动方向从 1 到 2(复数)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_{2\rightarrow 1}$	位置 2 的流量波动,流动方向从 2 到 1(复数)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_{2\rightarrow 3}$	位置 2 的流量波动,流动方向从 2 到 3(复数)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$S_i$	对应测量频率 $f_i$ 的相干函数	—
$\epsilon$	误差(复数)	—
$\bar{\epsilon}$	$\epsilon$ 的共轭复数	—
$\epsilon_x$	复数 $\epsilon$ 的实部	—
$\epsilon_y$	复数 $\epsilon$ 的虚部	—
$\rho$	油液密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\nu$	运动黏度	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\omega$	角频率( $2\pi f$ )	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
注: $H, H', H^*, P_1, P_2, P_3, Q_{1\rightarrow 2}, Q_{2\rightarrow 1}, Q_{2\rightarrow 3}$ 都是与频率相关的符号,用大写字母表示。		

本文件使用的单位参见 ISO 80000-1。  
除非另有说明,本文件图形符号符合 GB/T 786.1。

4.2 下标

- O——旧值;
- N——新值。

## 5 测量仪器要求

### 5.1 静态测量

测量下列参数的仪器：

- a) 平均流量(仅适用于方法 1)；
- b) 油液压力；
- c) 油液温度。

应满足附录 A 中给出的 C 级测量准确度的要求。

### 5.2 动态测量

用于测量压力波动的仪器应具有以下特性：

- a) 共振频率： $\geq 30$  kHz；
- b) 线性度： $\pm 1\%$ 。

仪器应满足附录 B 中给出的 A 级测量准确度的要求，宜带有加速度补偿。仪器不需要对稳态压力作出响应。宜使用高通滤波器过滤掉所有稳态信号分量，滤波后的测量值不应引入超过当前测量值 0.5% 的幅值误差或 0.5° 的相位误差。

### 5.3 压力波动频率分析

应使用满足如下要求的仪器测量压力波动的幅值和相位。

在特定谐波条件下，仪器应能同时获得每个压力传感器的压力波动，并相互同步。

仪器在 10 Hz~3 000 Hz 的频率范围内测量谐波时，应具有以下准确度和分辨率：

- a) 幅值： $\pm 0.5\%$ ；
- b) 相位： $\pm 0.5^\circ$ ；
- c) 频率： $\pm 0.5\%$ 。

### 5.4 不确定度

符合上述要求的测量仪器可使声速测量的不确定度分量为  $\pm 3\%$ 。

## 6 液压噪声发生器

### 6.1 通则

液压噪声发生器应在压力传感器上产生足够的压力波动水平，以便进行精确测量。

液压泵和马达产生的压力波动由基频及其谐波组成。基频等于旋转轴转速与排量组件(齿、叶片或柱塞等)数量的乘积。

高频响的液压阀也可作为液压噪声发生器。

### 6.2 发生器振动

如有必要，测量管宜在结构上与发生器隔离，减少振动的影响。

7 试验条件

7.1 通则

试验过程中应保持表 2 规定的试验条件。

7.2 油液温度

油液温度应为测量管入口处测量的温度。

7.3 油液密度和黏度

油液的密度和黏度应符合表 3 规定的准确度。

7.4 平均油液压力

平均油液压力应为测量管入口处测量的油液压力。

7.5 平均流量

平均流量应在测量管下游测量(仅适用于方法 1)。

表 2 测试条件允许的变化范围

试验参数	允许的变化范围
平均流量	±2%
平均压力	±2%
温度	±2℃

表 3 油液特性参数的准确度要求

油液特性	准确度
密度	±2%
黏度	±5%

8 试验装置

8.1 通则

如果在试验过程中压力波动幅值太小,无法进行有效的频谱分析,应选择其他噪声发生器。  
压力传感器安装时应确保其敏感膜片与管路内壁平齐,误差在±0.5 mm 以内。  
根据所采用的试验方法,给出测量管和传感器位置的规范。

8.2 隔热

应在测量管两端测量温度,测量管两端的温差不应超过 2℃,否则应在测量管上加装隔热层。

8.3 方法 1——三传感器法

8.3.1 本方法适用于同时测量声速与液压元件的其他液声特性(如阻抗、源流量波动或传递矩阵系数)。测量管应安装在试验回路中需要测量声速的位置。如有必要,可同时使用多个测量管。

测量管应均匀平直,其内径应为与其连接的管路或元件端口直径的 80%~120%。管路宜采用尽量减少振动的固定方式。

如果不需同时测量其他的液声特性,应在测量管的一端安装液压泵(如有必要,还应安装液压噪声发生器)。另一端应安装加载阀(其阀芯组件不可自由移动),如针阀。

应在测量管的上游末端测量平均压力。

8.3.2 压力传感器安装布置如图 1 所示。如需同时测量其他的液声特性,应根据测量液声特性的标准规范选择传感器的间距。否则,压力传感器之间的距离  $L$  和  $L'$  应符合表 4 的规定。

表 4 传感器间距(方法 1)

$L$	330 mm±2 mm
$L'$	470 mm±2 mm

测量管两端与最近的压力传感器之间的距离应至少为  $10d$ ,其中  $d$  是管路的内径。传感器之间的距离  $L$  和  $L'$  测量误差应为±0.5 mm,如图 1 所示。

测量管进出口之间不应连接其他元件。

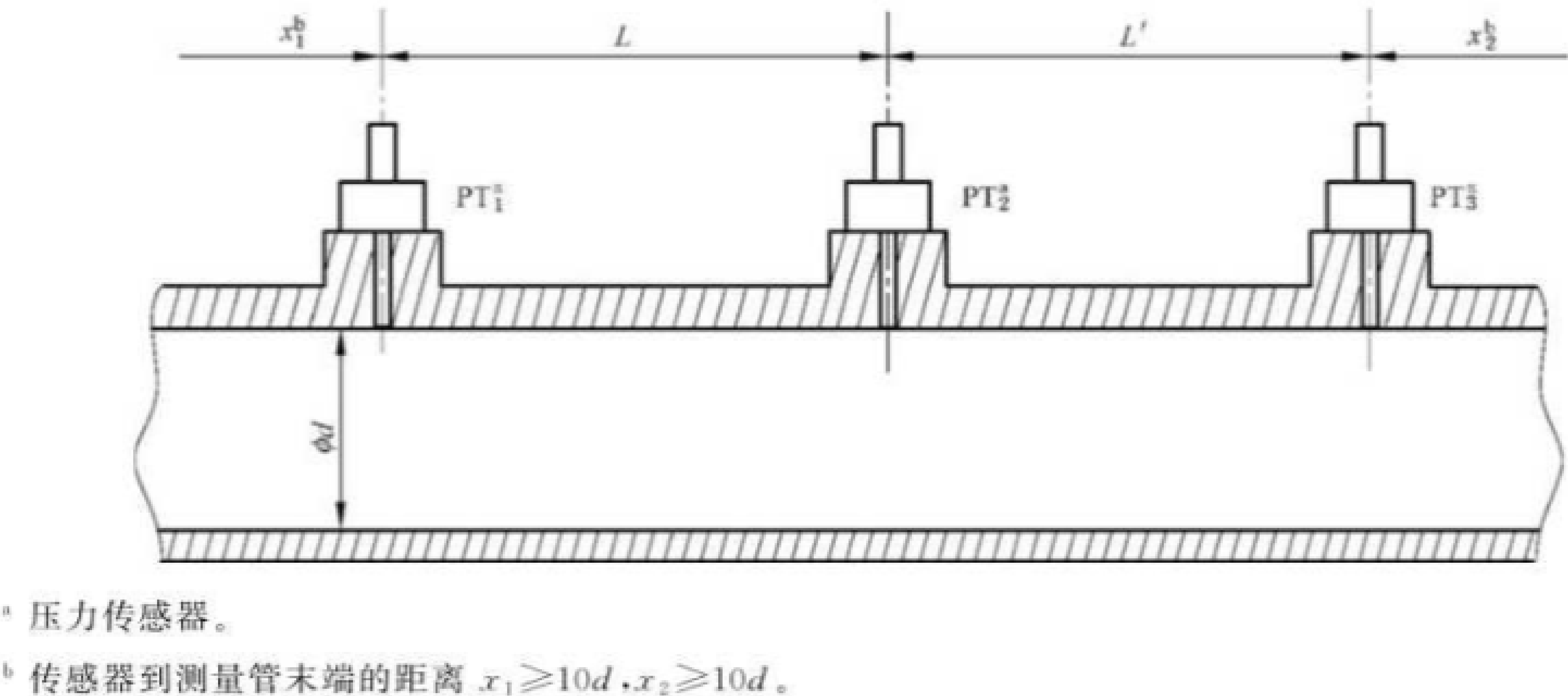


图 1 测量管中三个压力传感器的布置

8.4 方法 2——反共振法

8.4.1 由于系统中产生压力共振,本方法不适用于同时进行其他液声特性的测量。

8.4.2 试验回路如图 2 a)所示。加载阀应使用针阀或类似不包含自由移动阀芯的阀。测量管采用一端封闭的旁路连接形式与泵-加载阀回路相连。测量管中的油液温度宜尽可能均匀,且使用针阀作为排气阀,排除气泡。在进行测量之前,打开排气阀冲洗管路,完成排气并稳定油液温度。测量管排气阀的一端应向下倾斜,且位于通流管路的下方,以防止测试过程测量管中滞留空气。排气阀应安装在靠近测量管末端的位置,当其关闭时,不会在管路末端产生明显的额外容积。与测量管末端连接的连接件应具有与测量管相同的内径。

压力传感器 PT<sub>1</sub> 和 PT<sub>2</sub>[见图 2 a)]位于测量管的两端。PT<sub>2</sub> 应安装在距离测量管路末端  $3d$  范围

以内,其中  $d$  为管路内径。 $PT_1$  应安装在距离测量管与主回路连接点的  $5d$  范围内。 $PT_1$  与测量管之间的连接件内径应与测量管内径相同。图 2 b) 的示例中,测量管端部安装了包含针阀组件的专用连接件。

液压泵应在压力传感器上产生足够的压力波动,以便进行有效的频谱分析。否则,应将独立的液压噪声发生器连接到回路,如图 2 a) 所示。

为使压力波动幅值最大化,液压泵(或噪声发生器)与加载阀的距离应不大于测量管长度的十分之一。

安全阀的开启压力至少比平均试验压力高 10%。

8.4.3 测量管应为均匀、刚性、平直金属管。管路内径应为所连接管路直径的 50%~100%。应采用尽量减少管路振动的固定方式。

传感器  $PT_1$  到管路末端的距离  $l$  应根据公式(1)中的第一阶声反共振频率  $f_{a1}$  确定。

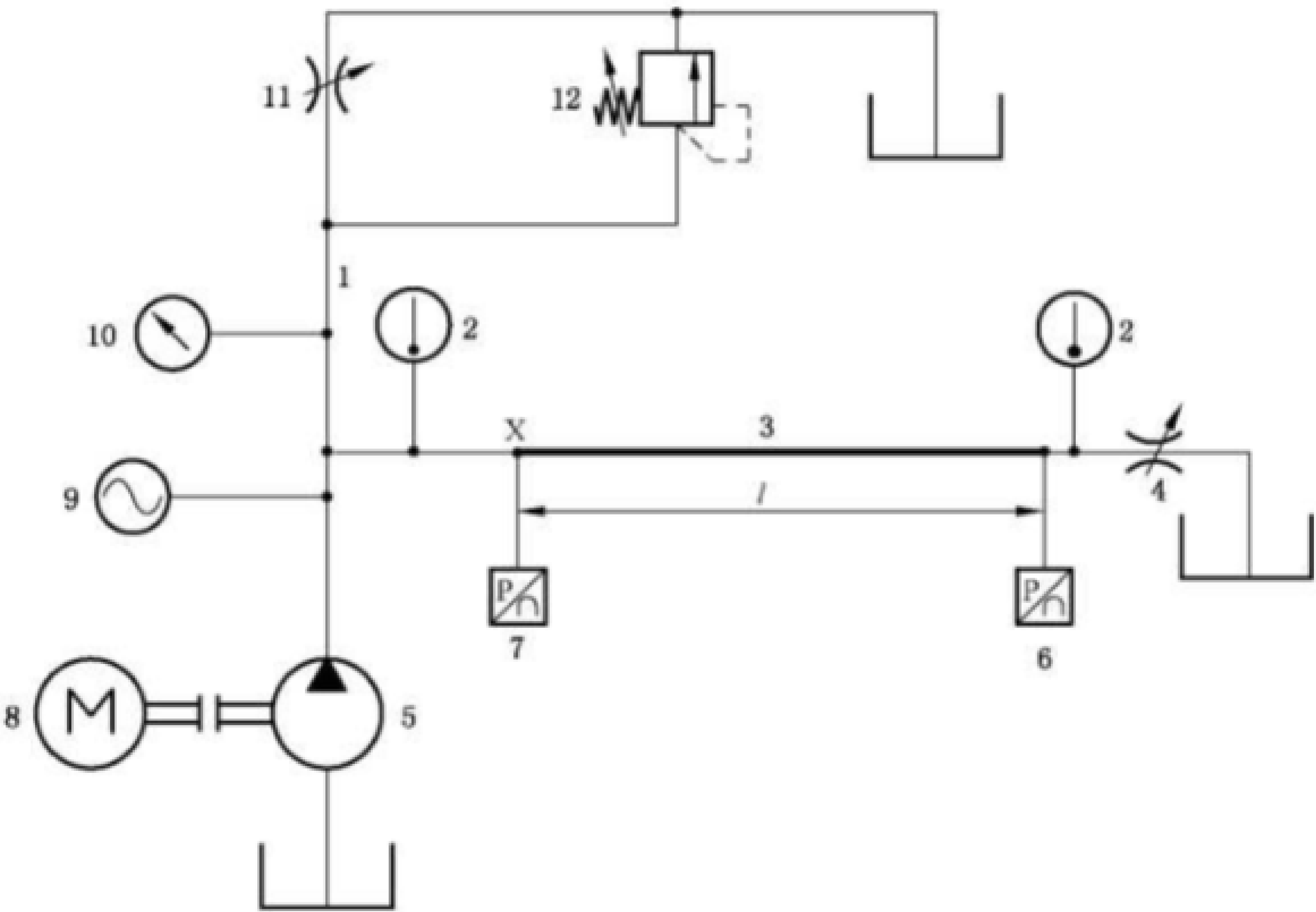
$$l = \frac{1}{4f_{a1}} \sqrt{\frac{B_e}{\rho}}$$

.....( 1 )

有效体积弹性模量  $B_e$  可使用制造商提供的试验油液数据进行估算,不需要精确的值。

频率  $f_{a1}$  宜在 100 Hz~200 Hz 范围内选择。

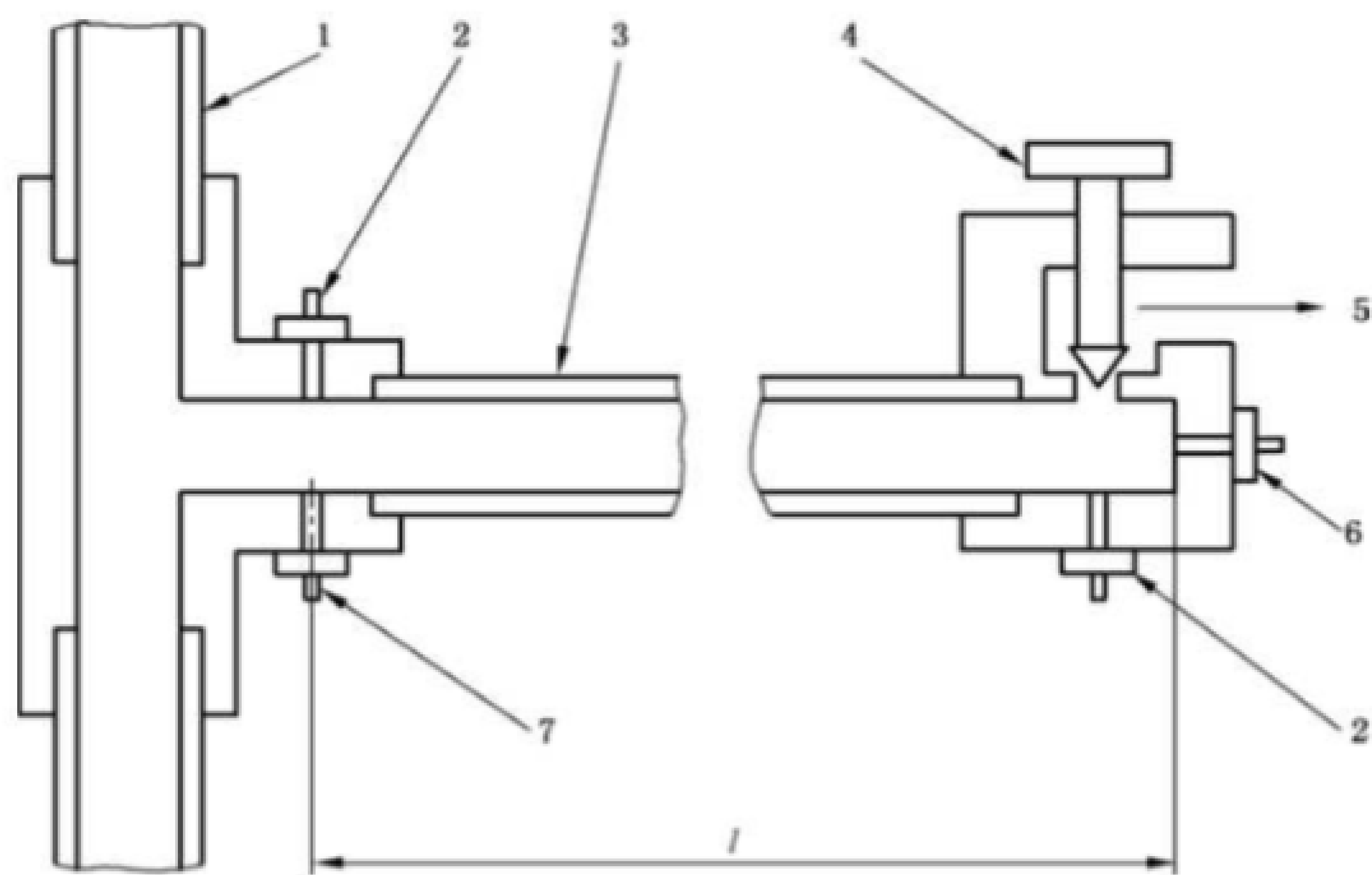
传感器  $PT_1$  到管路末端距离的测量误差应为 ±0.5 mm。



- 标引序号说明:
- 1 —— 通流管;
  - 2 —— 温度传感器;
  - 3 —— 测量管;
  - 4 —— 排气阀;
  - 5 —— 泵;
  - 6 —— 压力传感器  $PT_2$ ;
  - 7 —— 压力传感器  $PT_1$ ;
  - 8 —— 电机;
  - 9 —— 液压噪声发生器;
  - 10 —— 压力计;
  - 11 —— 加载阀;
  - 12 —— 安全阀。

a) 试验回路

图 2 典型反共振试验回路



- 标引序号说明：
- 1——通流管；
  - 2——温度传感器；
  - 3——测量管；
  - 4——排气阀；
  - 5——接油箱；
  - 6——压力传感器 PT<sub>2</sub>；
  - 7——压力传感器 PT<sub>1</sub>。

b) 传感器位置和排气阀安装示例

图 2 典型反共振试验回路（续）

8.5 压力传感器的校准

应对压力传感器进行校准。将压力传感器安装在公共油路块中测量相同的压力波动以进行相对校准。应使所有压力传感器沿油路块轴向流道同一横截面周向分布，如图 3 所示。

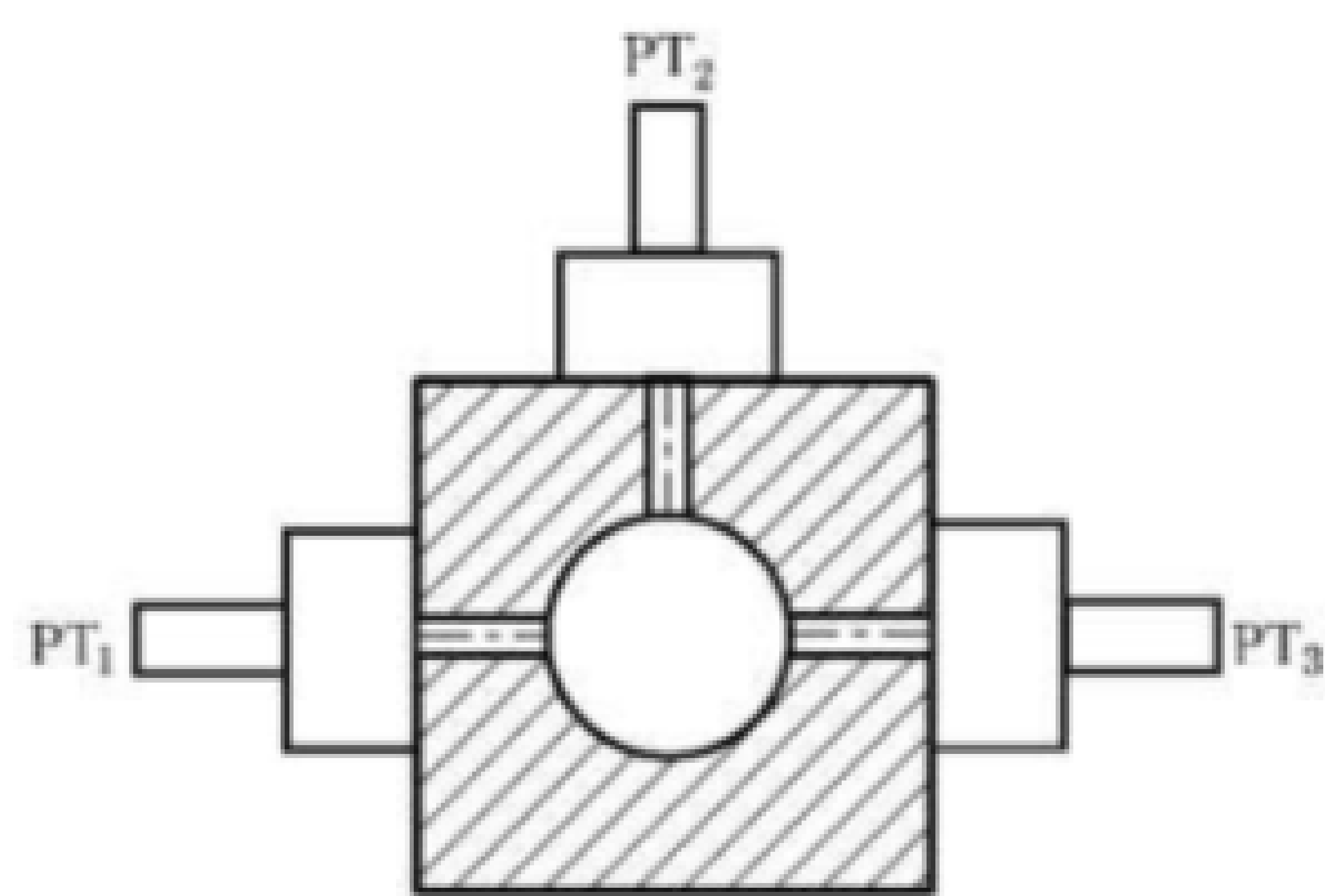


图 3 压力传感器校准分布示例

将一个传感器作为参考，在一定频率范围内测量各压力传感器之间的幅值和相位关系。

若传感器之间的幅值差超过 1% 或相位差超过 0.5°，需对测试数据分析中的差异进行校正（见 9.3 和 10.3），并记录校准过程中得到的传递函数，见公式(2)和公式(3)。

$$H'_{12} = \frac{P_1}{P_2}$$

.....( 2 )



$$H'_{32} = \frac{P_3}{P_2}$$

..... ( 3 )

9 试验程序(方法 1)

9.1 在试验开始前,让液压系统运转足够长的时间,将系统中的空气排出,并将所有油液的状态参数稳定在表 2 给出的限值内。

9.2 取至少 16 个时间序列压力传递函数的综合平均值。

计算一定频率范围内基频及其谐波频率  $f_i$  的相干函数  $S_i$ 。图 4 给出了宽带激励情况下传递函数  $H_{12}^*$  和  $H_{32}^*$  [见公式(4)和公式(5)]的典型示例。

$$H_{12}^* = \frac{P_1}{P_2}$$

..... ( 4 )

$$H_{32}^* = \frac{P_3}{P_2}$$

..... ( 5 )

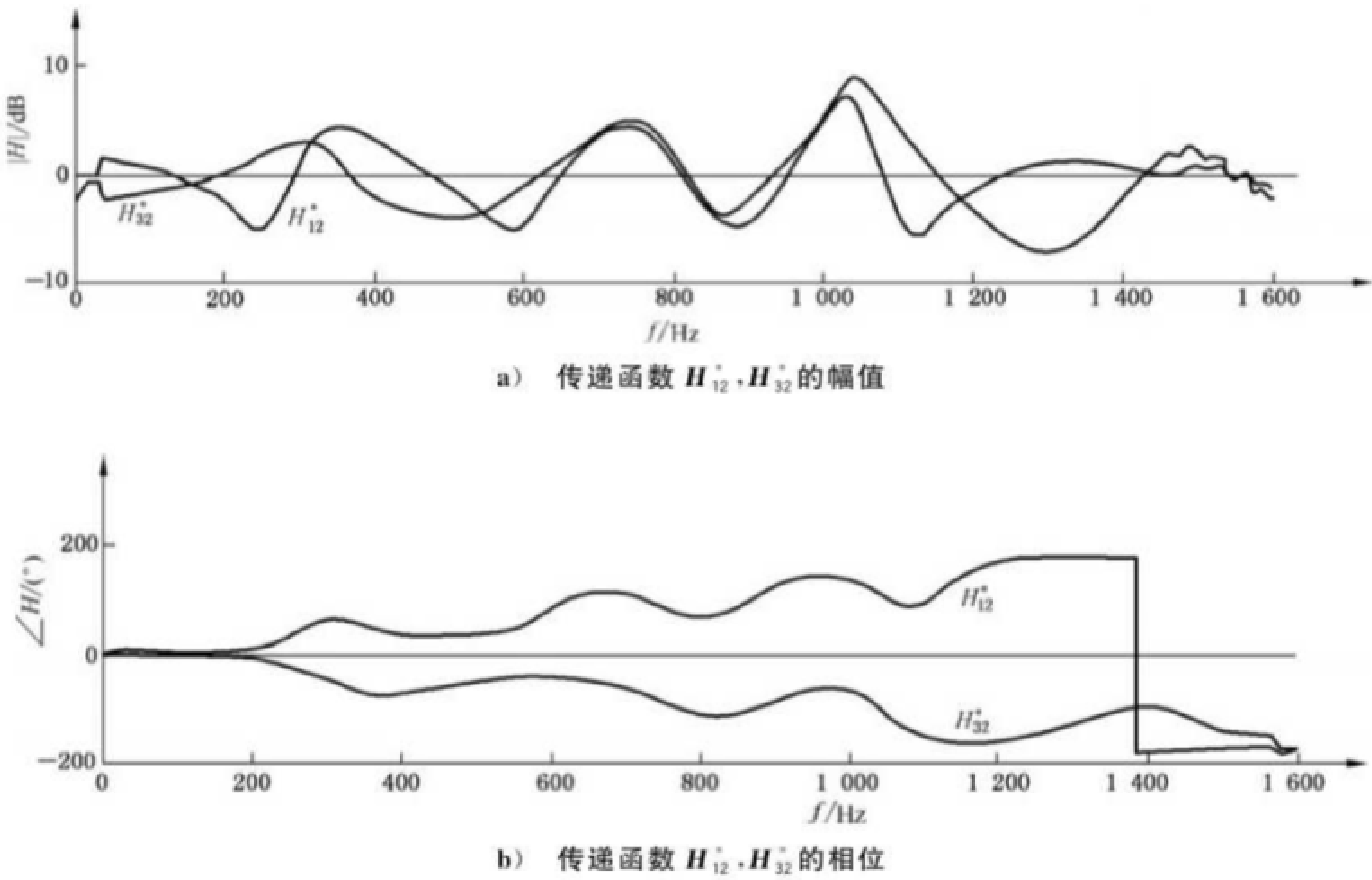


图 4 传递函数  $H_{12}^*$  和  $H_{32}^*$  的典型示例

9.3 使用从压力传感器校准过程中(见 8.5)获得的传递函数  $H'_{12}$  和  $H'_{32}$ ,利用公式(2)和公式(3)对综合平均传递函数  $H_{12}$  和  $H_{32}$  进行校正,见公式(6)和公式(7)。

$$H_{12} = \frac{H_{12}^*}{H'_{12}}$$

..... ( 6 )

$$H_{32} = \frac{H_{32}^*}{H'_{32}}$$

..... ( 7 )

如果不需校正(见 8.5),则  $H_{12} = H_{12}^*, H_{32} = H_{32}^*$ 。

9.4 按照附录 C 中 C.1,计算相关函数  $S_i$  大于 0.95 所对应频率的声速。相关函数  $S_i$  的值总是一个小于或等于 1 的正数。可用 C.1 中给出的最小二乘误差法计算在一定频率范围内的声速。

9.5 使用平均流量除以测量管的内部横截面积计算油液平均速度。若油液平均速度大于声速测量值



的 5%，则测试结果无效，结果不应用于试验报告。

10 试验程序(方法 2)

10.1 在试验开始前，让液压系统和噪声发生器(如适用)运转足够长的时间，将系统中的空气排出，并将所有变量(包括油液的状态参数)稳定在表 2 给出的限值内。特别注意体积弹性模量的影响。

在稳定化期间，排气阀宜完全打开，让油液通过测量管。在这一阶段，宜调整加载阀，使其产生的平均压力略低于所需测试压力 0.5 MPa。

在使用压力传感器进行测量前，应关闭排气阀，必要时可通过调节加载阀重新建立平均压力。

10.2 取至少 16 个时间序列压力传递函数的综合平均值。

10.3 使用传感器 PT<sub>1</sub> 和 PT<sub>2</sub> 校准过程中获得的传递函数  $H'_{21}=P_2/P_1$  (见 8.5)，使用公式(9)校正测量传递函数  $H^*_{21}$  [见公式(8)]。

$$H^*_{21}=\frac{P_2}{P_1}$$

.....( 8 )

$$H_{21}=\frac{H^*_{21}}{H'_{21}}$$

.....( 9 )

如果不需要校正(见 8.5)，则  $H_{21}=H^*_{21}$ 。

10.4 识别并记录传递函数  $H_{21}$  取最大值时的频率。按 C.3 计算声速。

11 试验报告

11.1 通则

- 试验报告应包含以下信息：
- a) 测试单位的名称和地址；
  - b) 测试人员姓名；
  - c) 试验油液的相关参数；
  - d) 测试日期和地点；
  - e) 标准说明(见第 12 章)。

11.2 测试数据

- 试验报告应包含以下试验数据。
- a) 测量管的特性和安装条件：
    - 1) 测量管特性(长度、内径、壁厚、材质)；
    - 2) 试验装置说明(仅适用于方法 2)；
    - 3) 液压回路的说明以及隔振和隔热处理方式。
  - b) 采用的试验方法(方法 1 或方法 2)。
  - c) 测量仪器：
    - 1) 测量等级；
    - 2) 用于压力波动测量的设备详情，包括型号、序列号和制造商；
    - 3) 频率分析仪的带宽；
    - 4) 仪表系统整体频率响应及上次校准日期和方法；
    - 5) 压力传感器的校准方法和上次校准的日期和地点。
  - d) 试验条件：
    - 1) 油液类型；

- 2) 运动黏度；
- 3) 油液密度；
- 4) 油液温度；
- 5) 平均压力；
- 6) 平均流量(仅适用于方法 1)。

### 11.3 试验结果

试验报告应包含以下试验结果：

- a) 声速；
- b) 测量管入口处的油液温度和平均压力。

## 12 标注说明

当选择遵守本文件时，宜在试验报告、产品目录和销售文件中使用以下说明：

“试验中声速的确定符合 GB/T 44050.2《液压传动 油液噪声特性测定 第 2 部分：管道中油液声速的测量》”。

附 录 A  
(规范性)  
平均值的误差和测量等级

根据测量准确度的要求,可选择 A、B 或 C 三种测量等级中的一种进行试验。

试验方法默认变量平均值的测量值符合表 A.1 的 C 级。在特殊情况下,经有关各方协商一致,可使用 A 级或 B 级进行更精确的测量。需要注意的是,测量使用 A 级和 B 级需要更精确的仪器和方法,会增加试验的成本。

表 A.1 测量仪器的允许系统误差

测量等级	A	B	C
平均流量 %	±0.5	±1.5	±2.5
平均压力 %	±0.5	±1.5	±2.5
温度 ℃	±0.5	±1.0	±2.0

注：表 A.1 中给出的百分比限值是对应被测值的大小,而不是试验(数据)的最大值或仪器的最大读数。

附 录 B  
(规范性)  
动态测量的误差和等级

根据试验准确度的要求,可选择 A、B 或 C 三种动态测量等级中的一种进行试验。  
试验方法默认瞬时压力的测量值符合表 B.1 的 A 级。

表 B.1 测量仪器的允许系统误差

动态测量等级	A	B	C
瞬时压力 %	±1.5	±3.0	±5.0

注：表 B.1 中给出的百分比限值是对应测量值的大小,而不是试验(数据)的最大值或仪器的最大读数。

附 录 C  
(规范性)  
数据简化算法

C.1 介绍

试验测量的谐波压力波动或传递函数数据需要进行数学处理,以评估声速。由于分析过程复杂,数据处理最好使用频率分析仪和数字计算机进行。

本附录描述了数据处理所涉及的数学方法。

进入一段恒定直径管路的流量波动是该点和同一管路中另一点压力波动的线性组合,见公式(C.1)~公式(C.5),管路如图 C.1 所示。

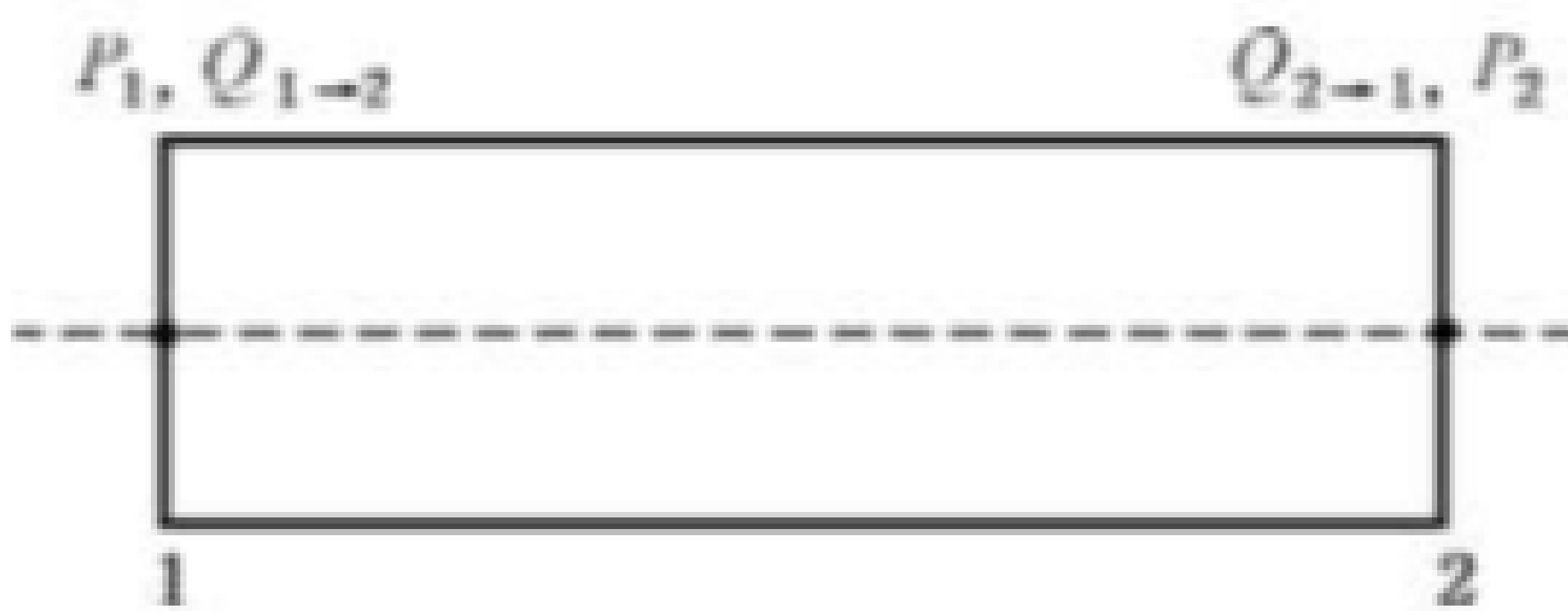


图 C.1 管路示例

$$\begin{aligned} Q_{1 \rightarrow 2} &= AP_1 + BP_2 \\ Q_{2 \rightarrow 1} &= AP_2 + BP_1 \end{aligned} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$A = \frac{-\pi d^2 j \omega}{4 \rho c (a - j b)} \cot \left[ (a - j b) \frac{L}{c} \right] \dots\dots\dots (C.2)$$

$$B = \frac{\pi d^2 j \omega}{4 \rho c (a - j b) \sin \left[ (a - j b) \frac{L}{c} \right]} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$a = \left( \omega + \sqrt{\frac{2 \omega \nu}{d^2}} \right) \dots\dots\dots (C.4)$$

$$b = \left( \frac{4 \nu}{d^2} + \sqrt{\frac{2 \omega \nu}{d^2}} \right) \dots\dots\dots (C.5)$$

C.2 三传感器法

C.2.1 方法基础

这种方法要求同时测量恒定直径刚性管路内三个不同位置的压力波动。

对于安装有三个压力传感器 PT<sub>1</sub>、PT<sub>2</sub> 和 PT<sub>3</sub> 的刚性管路,传感器相距分别为  $L$  和  $L'$ ,代入公式(C.1) 得到公式(C.6)和公式(C.7):

$$Q_{2 \rightarrow 1} = AP_2 + BP_1 \dots\dots\dots (C.6)$$

$$Q_{2 \rightarrow 3} = A'P_2 + B'P_3 \dots\dots\dots (C.7)$$

对于压力传感器 PT<sub>2</sub>,其流量波动的代数和为零,见公式(C.8)和公式(C.9):

$$Q_{2 \rightarrow 1} + Q_{2 \rightarrow 3} = 0 \dots\dots\dots (C.8)$$

$$(A + A')P_2 + BP_1 + B'P_3 = 0 \dots\dots\dots (C.9)$$

因此,得到公式(C.10):

$$1 + \frac{B}{A + A'} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) + \frac{B'}{A + A'} \left( \frac{P_3}{P_2} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

如果声速精确已知,在任何频率下公式(C.10)在理论上都成立。

在实际应用中,通过测量压力波动传递函数,上式的结果为非零。因此,公式(C.10)可以写成:

$$1 + \frac{B}{A + A'} (H_{12}) + \frac{B'}{A + A'} (H_{32}) = \epsilon \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

把公式(C.2)~公式(C.5)代入上式,得到公式(C.12):

$$\epsilon = H_{12} \sin \left[ \frac{L'}{c} (a - jb) \right] + H_{32} \sin \left[ \frac{L}{c} (a - jb) \right] - \sin \left[ \frac{L + L'}{c} (a - jb) \right] \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

### C.2.2 声速计算步骤

要确定声速,可使用最小二乘误差方法得到总误差  $E$  的最小值,见公式(C.13):

$$E = \sum_1^N \epsilon \bar{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

总误差  $E$  是对应频谱中每个频率的幅值误差的平方和(  $\sum_1^N$  表示第 1 次到第  $N$  次谐波频率对应变量的和)。

当满足以下条件时,总误差  $E$  的值最小,见公式(C.14):

$$\frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad \dots\dots\dots (C.14)$$

因此,得到公式(C.15):

$$\frac{\partial (\sum \epsilon \bar{\epsilon})}{\partial c} = \sum \frac{\partial (\epsilon \bar{\epsilon})}{\partial c} = \sum \epsilon_N \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} + \sum \bar{\epsilon}_N \frac{\partial \epsilon}{\partial c} = 0 \quad \dots\dots\dots (C.15)$$

利用一阶牛顿插值公式,可得公式(C.16)和公式(C.17):

$$\epsilon_0 - \epsilon_N = (c_0 - c_N) \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

$$\bar{\epsilon}_0 - \bar{\epsilon}_N = (c_0 - c_N) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

将公式(C.16)和公式(C.17)中的  $\epsilon_N$  和  $\bar{\epsilon}_N$  代入公式(C.15),可得公式(C.18)~公式(C.21):

$$\sum \epsilon_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} - \sum (c_0 - c_N) \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} + \sum \bar{\epsilon}_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} - \sum (c_0 - c_N) \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = 0 \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

$$2 \sum (c_0 - c_N) \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = \sum \epsilon_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} + \sum \bar{\epsilon}_0 \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = \overline{\left( \epsilon_0 \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \right)} \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

$$2 \sum (c_0 - c_N) \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = 2 \operatorname{Re} \left[ \sum \bar{\epsilon}_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} \right] = 2 \operatorname{Re} \left[ \sum \epsilon_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} \right] \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

声速计算的迭代过程,见公式(C.22):

$$c_N = c_0 - \frac{\operatorname{Re} \left[ \sum \bar{\epsilon}_0 \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} \right]}{\sum \frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c}} \quad (\text{初始迭代值 } c_0 = \sqrt{\frac{B_e}{\rho}}) \quad \dots\dots\dots (C.22)$$

当  $\left| \frac{c_N - c_0}{c_N} \right| < 0.0001$  时,迭代中止。

其中：

$c_0$  ——  $c$  的旧值；

$c_N$  ——  $c$  的新值。

### C.2.3 详细计算

由公式(C.12)可得公式(C.23)：

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial c} = \frac{a - jb}{c^2} \left\{ -\frac{P_1}{P_2} L' \cos \left[ \frac{L'}{c} (a - jb) \right] - \frac{P_3}{P_2} L \cos \left[ \frac{L}{c} (a - jb) \right] + (L + L') \cos \left[ \frac{L + L'}{c} (a - jb) \right] \right\} \quad \text{..... ( C.23 )}$$

$\epsilon$  和  $\frac{\partial \epsilon}{\partial c}$  可用复数表示, 见公式(C.24)和公式(C.25)：

$$\epsilon = \epsilon_x + j\epsilon_y \quad \text{..... ( C.24 )}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial c} = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} + j \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} \quad \text{..... ( C.25 )}$$

其共轭复数见公式(C.26)和公式(C.27)：

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_x - j\epsilon_y \quad \text{..... ( C.26 )}$$

$$\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} - j \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} \quad \text{..... ( C.27 )}$$

因此, 可得公式(C.28)和公式(C.29)：

$$\bar{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial c} = \epsilon_x \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} + \epsilon_y \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} + j \left[ \epsilon_x \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} - \epsilon_y \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} \right] \quad \text{..... ( C.28 )}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial c} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial c} = \left( \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} \right)^2 + \left( \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} \right)^2 \quad \text{..... ( C.29 )}$$

公式(C.22)可写为公式(C.30)：

$$c_N = c_0 - \frac{\sum_1^N \left[ \epsilon_x \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} + \epsilon_y \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} \right]}{\sum_1^N \left[ \left( \frac{\partial \epsilon_x}{\partial c} \right)^2 + \left( \frac{\partial \epsilon_y}{\partial c} \right)^2 \right]} \quad \text{..... ( C.30 )}$$

附录 D 给出了该迭代运算的 MATLAB 程序。

### C.3 封闭管路的反共振法

本方法对一端封闭的刚性管路的共振频率进行测量。该管路连接在液压回路的 X 点[见图 2a)]。压力传感器位于封闭管路的两端。

为了保证本方法的有效性, 回路的压力波动应至少涵盖封闭管路的第一阶和第三阶反共振频率之间的频率范围。

在管路封闭端的压力传感器 PT<sub>2</sub> 处, 其流量波动  $Q_{2 \rightarrow 1} = 0$ 。

由公式(C.1)可得公式(C.31)和公式(C.32)：

$$Q_{2 \rightarrow 1} = AP_2 + BP_1 = 0 \quad \text{..... ( C.31 )}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = -\frac{B}{A} = \frac{-1}{\cos \left[ \frac{l}{c} (a - jb) \right]} \quad \text{..... ( C.32 )}$$

传递函数  $\frac{P_2}{P_1}$  的幅值[见公式(C.33)]在每阶反共振频率处为极大值。

$$\left| \frac{P_2}{P_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \frac{la}{c} + \sinh^2 \frac{lb}{c}}} \dots\dots\dots (C.33)$$

极大值出现的频率为  $f_{a1}, f_{a2}, f_{a3}, \dots$ 。

由于在这些特定频率下,传递函数幅值的导数等于零。因此,对公式(C.33)进行求导,可得公式(C.34):

$$\frac{b}{a} \sinh \frac{2lb}{c} - \sin \frac{2la}{c} = 0 \dots\dots\dots (C.34)$$

由于声速的初值和实际值之间存在误差,因此存在以下关系,见公式(C.35)和公式(C.36):

$$\frac{b}{a} \sinh \frac{2lb}{c_0} - \sin \frac{2la}{c_0} = \epsilon \dots\dots\dots (C.35)$$

$$\frac{b}{a} \sinh \frac{2lb}{c_N} - \sin \frac{2la}{c_N} \approx 0 \dots\dots\dots (C.36)$$

式中:

$c_0$  ——  $c$  的旧值;

$c_N$  ——  $c$  的新值;

$\epsilon$  —— 由于  $c$  的不准确度而产生的误差。

$c_0$  和  $c_N$  的值接近,因此有公式(C.37):

$$\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_N} \approx 0 \dots\dots\dots (C.37)$$

则可得公式(C.35)和公式(C.36)之间的近似差值,见公式(C.38):

$$\frac{2lb^2}{a} \left( \frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_N} \right) \cosh \left( \frac{2lb}{c_0} \right) - 2la \left( \frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_N} \right) \cos \left( \frac{2la}{c_0} \right) \approx \epsilon \dots\dots\dots (C.38)$$

根据  $c_N = c_0 + \Delta c$ ,可得公式(C.39):

$$V_c = \frac{c_0^2 \left( b \sinh \frac{2lb}{c_0} - a \sin \frac{2la}{c_0} \right)}{2l \left( b^2 \cosh \frac{2lb}{c_0} - a^2 \cos \frac{2la}{c_0} \right)} \dots\dots\dots (C.39)$$

迭代计算如下:

a) 使用公式(C.40)定义  $c$  的初始迭代值

$$c_0 = \frac{4f_{ak}l}{(2k-1)} \dots\dots\dots (C.40)$$

式中:

$f_{ak}$  —— 传递函数  $|H_{21}|$  的第  $k$  个极大值对应的频率;

b) 使用公式(C.39)计算  $\Delta c$ ,然后再计算  $c_N$ 。

c) 当  $\left| \frac{c_N - c_0}{c_N} \right| < 0.000\ 1$ ,迭代中止。

最后得到的  $c$  值是声速的一个特解。

附录 E 给出了本迭代运算的 MATLAB 程序。

C.4  $c$  值计算的有效性

只有当  $f_2/f_1 \approx 3$  时,  $c$  值才是有效的声速。如果频谱测量结果准确,  $f_{ak}/(2k-1)$  会近似恒定。



## 附录 D

(资料性)

## 采用三传感器法(方法 1)计算声速的 MATLAB 编程示例

```

function c=speedsnd(l12,l23,d,visc,c0,omega,h12,h32,coher,g)
% function c=speedsnd(l12,l23,d,visc,c0,omega,h12,h32,coher,g)
%波传播速度的测定,均匀油液中的波动(声速),使用三个压力传感器的直管-方法 1
%传感器 2 介于 1 和 3 之间
% c 声速的最终值 m * s-1
% l12 压力传感器 1 和 2 之间的距离 m
% l23 压力传感器 2 和 3 之间的距离 m
% d 刚性管内径 m
% visc 试验条件下油液的运动黏度 m2 * s-1
% c0 声速初选值 m/s
% omega(2 * pi * f)单个频率的矢量用于测量
% h12,h32 二维矩阵包含传递函数 P1/P2 及相关系数,P3/P4 及相关系数
% h12(:,1)和 h32(:,1)包含复数格式的传递函数;h12(:,2),h32(:,2)包含相应的实数系数
%这些矩阵的长度与 omega 向量相同
% coher 验证计算有效性的测量一致性系数最小值(通常 coher = 0.95)
% g 打印选项(如果 g==1,屏幕上的文本和图形)
%-----寻找可用频率( coherence > min value )
nrc=0; %初始化可用频率的数目
for nc=1:length(omega)
    if(h12(nc,2). * h32(nc,2)>=coher * coher )
        nrc=nrc+1;
        nv(nc)=1;%可用频率的指数化
    else
        nv(nc)=0;%不可用频率的指数化
    end %if
end %for
nv(1)=0; %未考虑零频率
%-----循环算法开始-----
a= omega(:)+ sqrt(2 * omega(:) * visc)/d;
b= 4 * visc/(d * d)+ sqrt(2 * omega(:) * visc)/d;
amjb=a(:)-j * b(:);
l12xamjb=l12 * amjb;
l23xamjb=l23 * amjb;
ik=1; %算法的初始迭代次数
c=c0;
dc=10;
while( abs(dc/c)> 0.0001)
    memc(ik)=c; %记忆连续值的数目

```

```

    l12_=l12xamjb /c;
    l23_=l23xamjb /c;
    E = nv(:). * ( sin(l23_). * h12(:,1)+sin(l12_). * h32(:,1)- sin(l12_+l23_));
    dEsurdc=nv(:). * amjb(:)/(c * c). * (-l23 * cos(l23_). * h12(:,1)-l12 * cos(l12_). * h32
(:,1)+(l12+l23) * cos(l12_+l23_));
    dc= - sum(E. * conj(dEsurdc))/ sum(dEsurdc. * conj(dEsurdc));
    dc=real(dc);    % real:使 c 变为实数
    c=abs(c+dc);    % abs:使 c 成为正值
%-----屏幕上的文本(可选)-----
if(g==1)
    if(ik==1)
        fprintf('\n determination of speed of sound with coherence imposed > %g\n',coher);
        fprintf(' number of available frequencies: %g on %g maxi\n',nrc,length(omega));
        fprintf(' c%g= %6.2f dc= %6.4f\n',ik,c0,dc );
    else
        fprintf(' c%g= %6.2f dc= %6.4f\n',ik,memc(ik),dc );
    end
else;
end; %if(g==1)
%----- 警告信息 -----
if(ik>50)
    fprintf(' number of iteration values > 50\n');
    fprintf(' something is wrong ! ,verify the initial values\n');
    return
else;
end; %if(ik>50)
ik=ik+1;    %增加迭代次数
end    % end of loop while( abs(dc/c)> 0.0001 )
%----- GRAPHICS(optional)-----
if (g==1)
    fprintf('\n final value of speed of sound = %6.0f m/s \n\n',real(c));
    np=1:ik-1;
    plot(np,memc(np),' * w',np,memc(np));
    grid;
    xlabel(' * --> NUMBER OF ITERATIONS');
    ylabel('speed of sound m/s');
    title('progression of the algorithm ');
    text(0.5,0.5,['final value=',num2str(c)],'sc');
else;
end    %if g==1
% ----- END FUNCTION speedsnd.m

```

## 附录 E

(资料性)

## 采用反共振法(方法 2)计算声速的 MATLAB 编程示例

```

function cele=lsur4(f1,f2,k1,k2,visc)
%function cele=lsur4(f1,f2,k1,k2,visc)
% f1 第一反共振频率
% f2 第二反共振频率
% k1 f1 出现的最大值的数目
% k2 f2 出现的最大值的数目
l=1;
d=10e-3;
w1=2 * pi * f1;
aa=w1+sqrt(2 * w1 * visc/d^2);
bb=4 * visc/d^2+sqrt(2 * w1 * visc/ d^2);
e=1e-5;
dc=10;
c=4 * l * f1/(2 * k1-1);
while(abs(dc)>e)
    a=aa * l/c;
    b=bb * l/c;
    dc=c/2 * ( b. * sinh(2 * b)+ a. * sin(2 * a))./( b.^2. * cosh(2 * b)+ a.^2. * cos(2 * a));
    c=abs(c+dc);
    fprintf('dc= %e c= %e \n',dc,c);
    if dc>2000
        return;
    end
end
c1=c;
w2=2 * pi * f2;
aa=w2+sqrt(2 * w2 * visc/ d^2);
bb=4 * visc/d^2+sqrt(2 * w2 * visc/d^2);
e=1e-5;
dc=10;
c=4 * l * f2/(2 * k2-1);
while(abs(dc)>e)
    a=aa * l/c;
    b=bb * l/c;
    dc=c/2 * ( b. * sinh(2 * b)-a. * sin(2 * a))./(b.^2. * cosh(2 * b)- a.^2. * cos(2 * a));
    c=abs(c+dc);
    fprintf('dc= %e c= %e \n',dc,c);
    if dc>2000

```

```
        return;
    end
end
c2=c;
% 验证测量值
if abs((c1-c2)/(c1+c2))< 0.05
    c=(c1+c2)/2;
    ecart=abs(c1-c2)/2;
    fprintf('cele moy = %e   ecart = +- %e \n',c,ecart);
end
```

参 考 文 献

- [1] GB/T 786.1 流体传动系统及元件 图形符号和回路图 第1部分:图形符号
  - [2] ISO 80000-1 Quantities and units—Part 1:General
-





中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
液压传动 油液噪声特性测定  
第 2 部分：管道中油液声速的测量  
GB/T 44050.2—2024

\*

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

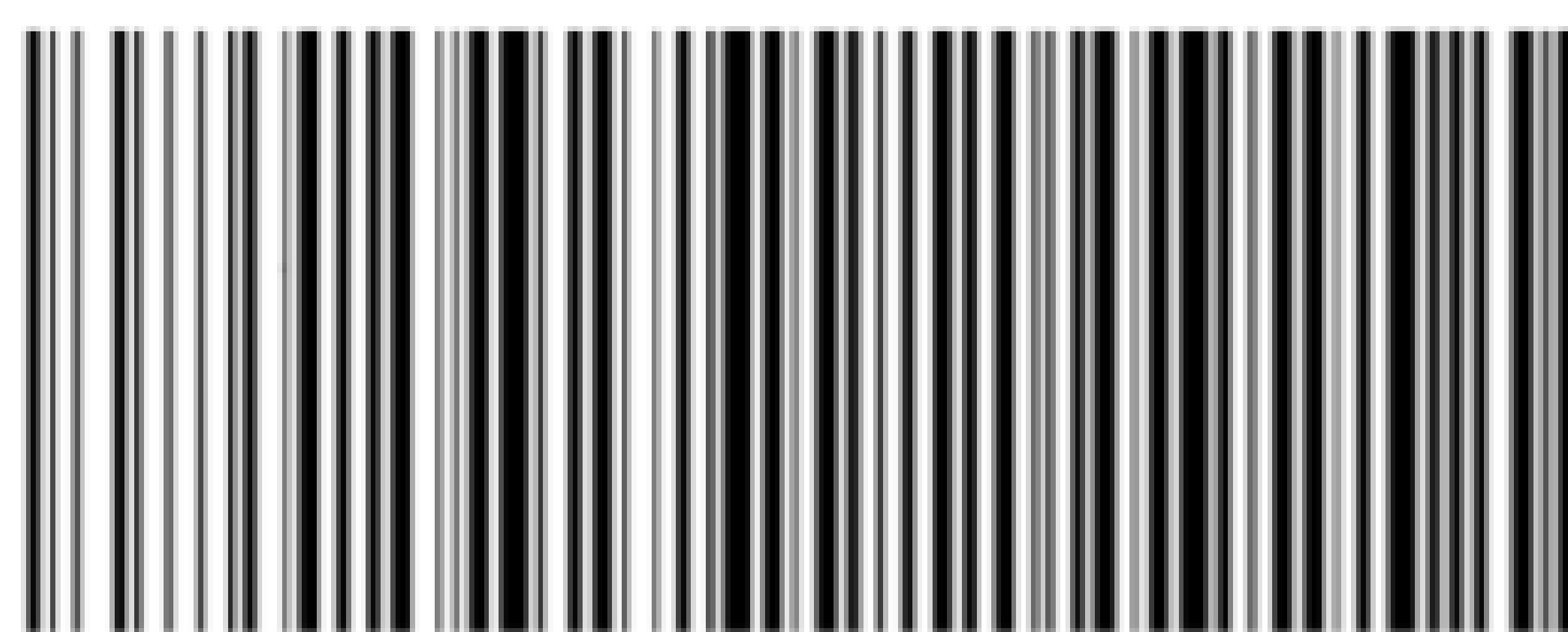
服务热线：400-168-0010

2024 年 5 月第一版

\*

书号：155066 • 1-76247

版权专有 侵权必究



GB/T 44050.2—2024



[www.bzxz.net](http://www.bzxz.net)

免费标准下载网