

谭尹耕 编著



液压实验设备 与测试技术

北京理工大学出版社

前 言

在人类对自然界规律的探索 and 认识过程中，科学实验是必不可少的一个重要环节。可以说没有实验也就没有现代科学。当然，在科学实验中人是应一直居于主导地位的。人们在获得感性认识的基础上，必须通过头脑的综合和思维，上升成为理性认识，提出假设和广义的规律性结论。为了检验和验证理性结论的正确性，人们还必须主动地、积极地投身到科学实验中去，用理论来指导实验的进行，并由实验结果的分析中来不断充实、验证和发展理论，增加理论的深度和广度。因此，对于每一个献身于科学的人，特别是工程技术人员，都应对所从事的学科中的实验技术予以充分的重视。

随着科学技术的发展，液压技术的发展非常迅速，其应用范围也愈来愈广，因而对它的元件和系统的性能要求也就愈来愈高。因此，为了确定和考核液压系统及其组成元件完整的性能参数、品质指标等所进行的测试、实验工作，也就需要满足更高的要求。例如：要求迅速而准确地测出数据，并能自动显示、打印和处理实验数据；要求实验过程自动化程度高；实验内容所包括的范围也要求更加广泛等等。这样对从事实验技术的人员来说，就要求具有较为广泛的知识面，深厚的技术素质和对实验工作的严谨作风。

实验技术涉及的知识面比较广，如：机械学、电工学、计算技术、应用光学、液压流体力学、数理统计及现代控制理论等；且实验技术本身随着科学技术的发展，也在日新月异地更新和发展。由于篇幅所限，本书只能就液压实验设备

与测试技术方面的一些必备的基本知识、实验手段、实验回路、测试方法和误差分析等作一些重点介绍。本书主要内容包括:

1. 液压实验设备的原理、设计计算以及它们的正确使用原则。

2. 液压实验中一般参数的测量原理、测试方法以及常用测试仪器的的工作原理、用途、使用方法介绍。

3. 典型液压元件及系统的实验油路, 高效节能的实验方法、自动实验方案简介等。

4. 误差理论概述, 测量误差分析以及实验数据处理方法等。

目前国内很多单位和部门都对液压技术及其应用感兴趣, 为了生产、检验和研究的需要, 都在积极筹建液压实验室及测试中心; 很多院校相继开出“液压传动与控制”、“液压实验与测试技术”等课程。为了适应这一发展形势, 今将北京理工大学液压专业本科生多年使用的液压实验与测试课程教材加以修改和充实后公开出版。

本书是多年来实验工作的总结, 是经多年使用的大学本科生教材。内容编排上使理论与实际相结合, 力求作到由浅入深, 并在每章后附复习题, 符合读者自学要求。可供工科院校液压专业或相应专业学生及有关工程技术人员阅读和参考。鉴于本书内容实践性较强, 建议读者在理论学习的同时, 尽量与实际实验工作相结合, 以期收到更好的效果。

本书在编写过程中得到了徐家蓓副教授以及北京理工大学液压实验室同志们的大力帮助, 并经过李亨标副教授仔细地审定和提出宝贵的修改意见, 在此表示衷心的感谢。

编 者

1988.5.

符 号 表

μ	测量值的真值、油液的动力粘度 (Pa·s)
x_i	测量值
Δx_i	绝对误差
β	相对误差、油液体积弹性模数 (Pa或N/m ²)
β_m	仪表最大引用误差
S	测量系统的灵敏度、应变片的灵敏度系数
s	比熵[J/(kg·°C)]、位移量 (mm)
L	测量系统的线性度、长度(m)
L_B	光臂长 (m)
L_p, L_w	声压级 (dB)、声功率级 (dB)
h	测量系统的滞环、高度 (m)
t_r, t_s	阶跃响应的上升时间 (s)、过渡过程时间 (s)
t	油温、室温 (°C)
T_d	有阻尼振荡周期 (s)
ω_v	无阻尼自由振荡频率 (固有频率) (rad/s)
ω_v	伺服阀固有频率 (rad/s或Hz)
ω	角速度 (rad/s)
$\dot{\omega}$	角加速度 (rad/s ²)
ζ	系统的阻尼度
a	阶跃响应超调量
K	油箱散热系数[W/(m ² ·°C)]
K_a	伺服放大器放大系数 (增益)
K_d	油缸的速度—流量转换系数
K_f	反馈系数
K_q	伺服阀流量增益[(l/min)/mA]
K_p	伺服阀压力增益 (bar/mA);

↓

ϕ 热流量 (kw)、磁通量
 ϕ_P 泵发出的热流量
 ϕ_r 溢流阀发出的热流量
 ϕ_T 油箱自然发散的热流量
 A 散热面积 (m^2)、节流面积
 A_c 冷却面积
 $\Delta\tau$ 平均温差 ($^{\circ}\text{C}$)
 P 功率 (kw)
 P_e, P_P, P_H 电功率、泵轴输入功率、液压功率;
 η, η_V, η_m 效率、容积效率、机械效率
 k 冷却器传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]、弹簧刚度 (N/mm)、置信系数
 q 流量
 q_V, q_m 容积流量 (l/min)、质量流量 (kg/min)
 q_W, q_L 水流量 (m^3/h)、泄漏流量
 q_{Le}, q_{Li} 外漏流量、内漏流量
 c 声速 (m/s)
 c_p 比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$]
 C 径向间隙、油液可压缩率
 c_d 流量系数
 ρ 液压油密度 (kg/m^3)
 V, V_t 体积、容积、总容积 (m^3)
 V_P 液压泵排量 (ml/r)
 V_M 液压马达排量 (ml/r)
 V_{th} 理论排量
 T 扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)
 T_{th}, T_e, T_f 理论扭矩、液压马达启动扭矩、摩擦扭矩
 T_0 标准时基信号周期
 θ 角度、扭转角、齿间角 ($^{\circ}, \text{rad}$)
 J 转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

II

p, p_s 压力、油源压力 (Pa, MPa, bar)
 $\Delta p, \Delta p_L$ 压力差、负载压差 (MPa)
 n 转速 (rpm)、测量次数
 v 速度、流速 (m/s)
 F 力 (N)
 m 质量 (kg)、扩张比
 f, f_c 频率 (Hz)、标准时基脉冲频率
 f_{-3dB}, f_{-90} 振幅下降 -3dB 时频宽、相位滞后 90° 时频宽
 Z 测速盘齿数、泵或液压马达柱塞数
 λ 声波波长 (m)
 W 声功率 (W)、重力 (N)
 W_r, W_o, W_i 反射声功率、输出声功率、入射声功率
 i 比焓 (J/kg)、电流 (A 或 mA)
 I 电流 (A 或 mA)
 ξ 功率回收系数、仪表常数 (c/l)
 E_H 霍尔电势 (mV)
 B 磁感应强度 (T)
 ϵ 应变变量
 R 电阻 (Ω)
 Re 雷诺数
 U, U_T 信号电压、测速发电机输出电压 (V)
 N 累计计数、脉冲数、匝数、测量次数
 γ 油液的重度 (N/m³)
 G 材料剪切弹性模数 (N/m²)
 α 相位角 (rad)
 τ 测量时间、时间间隔 (s)
 v_s 记录线速度 (m/s)
 σ 标准误差
 P_r 概率

δ 随机误差
 ν 剩余误差
 $\bar{x}$ 测量值的算术平均值

目 录

前 言

符号表

第一章 基本知识	1
1-1 液压实验技术	1
1-2 测量及测量系统	6
复习题	19
第二章 液压实验设备及实验油路	21
2-1 液压实验设备	21
2-2 液压实验方法及油路	48
复习题	147
第三章 液压实验中的测试技术	152
3-1 基本参数的测量	152
3-2 液压实验中测试用的基本仪器	231
复习题	267
第四章 测量误差分析及实验数据处理	207
4-1 测量误差分析	270
4-2 实验数据处理	291
复习题	302
参考文献	304

第一章 基本知识

1-1 液压实验技术

一、液压实验技术的概念

通过人的主观能动性和所具有的技术水平（包括知识、经验丰富的程度、正确的使用和维护保养所需设备等）将液压实验设备与测量系统有机地结合起来，为有效地完成规定的实验目的的服务的一整套技术统称为液压实验技术。

人和设备是相辅相成的，但人是起主导作用的。人的渊博知识、对新技术的敏感、丰富的实践经验、实验工作的能力等是液压实验技术的基础，只有发挥人的主观能动作用才会有高质量的实验设备和先进的测量系统，液压实验技术也才能发展得更完美。

二、液压实验设备

液压实验设备是指在液压实验中，为完成一定的实验目的所使用的设备的总称。它主要包括三部分：实验对象、基本设备和辅助设备。

1. 实验对象 它可以是实际应用的液压元件和系统、新研制的样机；也可以是为某实验目的而专门设计的实验装置，如喷嘴-挡板阀压力静特性实验装置等，这些俗称被试件。

2. 基本设备 它们是进行液压实验时必备的主要设备。包括有液压源、实验台和油箱等。

3. 辅助设备 它们是为完成一定的实验目的所需要的
一些附加设备，如加载装置、冷却和加热装置、过滤装置、
环境模拟实验设备和安全保护装置等。

三、“液压实验”设计

在接受上级下达的某项实验任务、科研项目中提出的实验研究的要求、兄弟单位要求协作实验的合同等以后，为了使实验任务能在最佳的条件下，高效率、低成本地圆满完成，事前要对整个实验工作进行计划 and 设计，这就是所谓的“实验设计”。它包括的内容有

1. 制定实验工作计划

1) 整个实验工作中应包括的工作项目 事前的调查研究、拟定实验大纲、器材的采购和加工、实验室的准备、正式实验、实验结果分析及编写实验报告等。

2) 实验工作进程计划 根据完成任务要求的总时间和工作项目，可适当合理安排为以下几个阶段。如第一阶段为调研、方案论证及具体装置设计阶段；第二阶段为加工、外协及实验准备阶段；第三阶段为正式实验阶段；第四阶段为改进实验、复测数据、整理实验记录、处理数据和提出实验报告等。在每个阶段的计划中应包括日期、人力等的安排。

3) 实验所需的器材计划及经费要求 根据实验大纲的实际需要，本着节约开支的原则合理提出器材计划。计划内容应包括测量仪器、液压元件、材料等的型号、规格、简要性能指标、精度级别、所需数量、出产厂家等。如有特殊基建要求的话，还应提出基建面积、空调、通风、防尘、湿度、减振、照明、吸音、隔音、用水量，电源种类及容量等方面的要求。在此基础上，考虑仪器、设备的成本折旧、用

电、用水及消耗品的费用、人员的工资及报酬等提出整个实验所需的经费要求。

2. 拟定实验大纲 大纲是具体指导实验工作进行的文件。一般它是根据实验任务书的要求、国家或部颁的实验标准或实验技术条件、具体实验室的实际情况等来拟定的。实验大纲应包括的内容有：

- 1) 实验的目的及意义；
- 2) 实验的具体内容及要求；
- 3) 实验的具体实施方案（包括油路、电路的设计，测试方法及精度。如果实验对象需要设计的话，应提出工作原理及设计方案等。）
- 4) 实验条件的要求，如：实验要求的油源压力、流量的范围，稳压程度，温度变化范围，工作油液性能，环境模拟的要求等等。

3. 测量仪器的选择及标定 根据实验大纲规定的测试方案及精度要求来选择适用的参数传感器及测量仪器。在选择时主要考虑的因素有两条，一是量程范围。要使被测参数的变化范围在仪表量程以内，这是理所当然的。但为了使测量误差减小，应尽量使满量程值与被测量上限相符。另一是精度。这要根据实验任务要求被测参数的误差大小来定，或是根据实验结果总误差的要求，按误差分配原则来设计的。总的来说，在测量仪器的选择上应持科学、严肃、慎重的态度。

关于测量仪器的校准和传感器的标定工作，是实验前的一项重要准备工作。所谓仪器的校准是在规定的使用条件下，用标准量值或高档次仪器的量值与被校仪器的量值进行比较，判定后者的精度是否符合要求，或作出校正曲线的工作。这只是就仪器本身作出合格与否的鉴定，以保证其被测

量值的可靠性。而传感器的标定必须在实验工作条件下，对它进行静态或动态标定，作出标定曲线。由于校准和标定工作都涉及标准仪器或标准量的精度选取问题。这就要根据微小误差准则进行设计，使选定的标准仪器的误差对标定结果总误差的影响小到可以忽略的程度。

一般对传感器、测量仪器进行标定或校准的原则如下：

1) 在实验准备阶段，对于按设计而选取的仪器或传感器，要用高档次仪器或标准量仪器在与实验工作相同的条件下进行校准或标定，作出校准曲线和标定曲线。当实验周期较长或在实验环境恶劣的条件下工作时，在实验间隙中也应及时对传感器和仪器多次进行校准和现场标定。

2) 高级、精密仪器除按规定的条件保存、运输、使用外，还必须定期交国家计量单位检验，以确保其所测数据的可靠性。

3) 长期运转使用的仪器，在正常情况下建议一年内至少进行一次校准。

4) 在实验进行期间，对所测得的数据发生怀疑时，应及时重新对传感器和仪器进行校检。一般在实验完成后，也还要对它们进行校核。

综上所述，在测量仪器的选择、校准和传感器的标定工作中，需要利用误差综合和分配的原则、微小误差准则等知识。这些内容将在第四章中详细讨论。

四、液压实验工作环境的要求和条件

1. **温度和湿度** 室温宜保持在 20°C 左右。因为一般测量仪器的出厂校检都是在 20°C 左右的温度下进行，湿度宜在80%以下。凡有高精度仪器、设备的地方以及液压元件和系

统需进行装配调试的地方，都一定要注意湿度和防潮的问题，否则由于湿度太高将引起生锈、发霉而造成仪器精度下降和液压产品质量恶化。

2. 防尘 液压实验室应该要求密封以防尘。要求高的实验是在密封净化小间里进行的。

3. 通风 因为密封，必须强制通风，否则由于室内水蒸汽、人呼出的二氧化碳气、液压油蒸发的废气等将使湿度增加、空气污染和严重影响工作人员的健康。

4. 文明生产制度 实际是保证液压实验能正常进行所必须的一些制度。包括定期及日常的清洁卫生制度、仪器仪表定期维修和校准制度、技安制度等。必须使每个参加实验人员养成自觉遵守各项制度的习惯。

5. 安全、防护措施的准备 包括防火、防爆、保障人身安全的措施；仪器、设备的安全措施，如消防器材、安全罩、液压过载保护、失压保护等。应该通过各种尽可能办到的措施，以保障人身及国家财产的安全。

6. 特殊的环境实验要求 在液压实验中，有些产品要根据其使用的特殊环境条件，要在实验条件下再现和模拟这些条件。如高、低温实验，盐雾环境实验，淋雨实验，道路模拟实验，振动及大加速度实验等。测试产品在这些条件下性能的变化。

五、实验报告的编写

实验报告是实验工作的成果，是最后的表达形式。编写实验报告的能力是实验工作人员的一项基本功。实验报告一般应包括的内容有

1. 实验项目；

2. 实验油路及测试线路。包括油路及测试的工作原理说明；组成油路各元件的选择和简单计算；传感器、测量仪器的选择，包括型号、精度级别以及校准、标定方法和特性曲线等。

3. 实验装置及实验方法简介。

4. 实验条件的说明。包括工作油液牌号、粘度、实验油温、室温等。

5. 实验所测数据。包括数据表格、特性曲线、照片等。

6. 实验结果分析。此项应包括：实验数据误差分析；由实验应得出的结论；实验中存在的问题和改进意见。

7. 实验日期、地点、实验主要负责人和参加人签字。

1-2 测量及测量系统

一、有关测量的几个概念

1. 测量 将被测量（参数或物理量）与具有工程单位的标准量进行比较后，得出具有一定误差和单位的量，此过程叫测量。

2. 真值 对于每一个物理量而言，都存在一个客观上的确切的量值，这就是真值。而通常一个物理量的真值不是随便就知道的，人们需要去测定它，这也是实验工作者的任务。但实际中由于测试仪器、测量方法、环境条件、人的观察力等都不能达到完美无缺的程度，故真值是无法测得的。

3. 测量误差 就是测量值与真值之差值。把测量值 x_i 与真值 μ 之间的差值称为绝对误差 $\Delta x_i = x_i - \mu$ ；而把绝对误

差 Δx_i 与真值的比值的百分数称为相对误差 $\beta = (\Delta x_i / \mu) \times 100\%$ 。与绝对误差相比，相对误差能对测量结果提供更可靠的评价。

例如，测量40bar的压力值时有 $\pm 4\text{bar}$ 的误差，可见误差为量值的 $\pm 10\%$ ；而测量400bar的压力值时也有 $\pm 4\text{bar}$ 的误差，则此时误差仅为量值的 $\pm 1\%$ 。比较此两测量结果，虽然绝对误差均为 $\pm 4\text{bar}$ ，从相对误差的概念来看，后者测量显然更为准确些。

4. 测量的准确度、精密度、精确度 测量的准确度 指的是实验中所得的测量值与真值相符合的程度。二者之间的差值越小就表示准确度越高，也就是所得测量值的可信程度（可靠性）高。

测量的精密度 指的是在测量中所得测量值重复性（一致性）的好坏。它体现了测量值离散的程度。

测量的精确度 表征着测量的准确度和精密度综合影响的程度。

对于具体的测量而言，精密度高的准确度不一定高；准确度高的精密度也不一定高，但精确度高，则准确度和精密度都高。

5. 引用误差 它是仪器、仪表示值的相对误差。在仪器、仪表量程范围内某一点的示值与真值（或标准值）之差 Δx_i （即绝对误差）与满刻度示值 x_m 之比的百分数称为引用误差 β_n

$$\beta_n = (\Delta x_i / x_m) \times 100\% \quad (1-1)$$

由于仪表量程范围内各点的绝对误差是不相等的，通常以最大引用误差 β_m （又称最大允许误差）来表示仪表的最大的不精确度。它等于仪表各示值中最大的绝对误差 Δx_m 与满

刻度示值之比的百分数，即

$$\beta_m = (\Delta x_m / x_m) \times 100\% \quad (1-2)$$

此 β_m 是用来判别仪表是否合格的主要依据。一般习惯上将此最大引用误差 β_m 定为仪表的“精度”。以此来划分仪表的“精度”等级。常用的测量仪器、仪表的“精度”等级 $\beta_m = \pm a\%$ 分为

$$a = \pm 0.1、\pm 0.2、(\pm 0.35)、(\pm 0.4)、\pm 0.5、$$

$$\pm 1.0、\pm 1.5、\pm 2.5、\pm 4$$

它们都在仪表的刻度盘或面板上标明了，其符号为：

①、④等。例如1级精度的仪表，就是说它所测出的示值的最大绝对误差为该仪表满刻度示值的 $\pm 1\%$ 。若有一量程为0—100bar的压力表，“精度”等级为0.5级，这就是说在测量时，它的指针指示的任何一点的数值的绝对误差不超过 $\pm 0.5\text{bar}$ 。

6. 被测参数的三种典型状态 被试对象在实验或正常运转过程中，其特性参数呈现的状态不外乎有下列三种：

静态 参数不随时间而变化，即处于静止状态。如：静扭矩、恒值力负载、压力传感器标定时施加的标准压力等，见图1-1a所示。

稳态 参数变化规律不随时间而变化的状态。如：围绕某平衡点的等幅振荡、恒转速、等加速运动等，见图1-1b所示。一般情况下，静态和稳态并不严格区分；静态可视为稳态的一种特例。

瞬态 或称暂态。它是两个稳态之间的过渡状态，是寻找平衡点的过程，如图1-1c所示。

7. 模拟量信号与数字量信号 一般在测量过程中传递的信号有两种基本型式：模拟量信号和数字量信号。所谓模拟

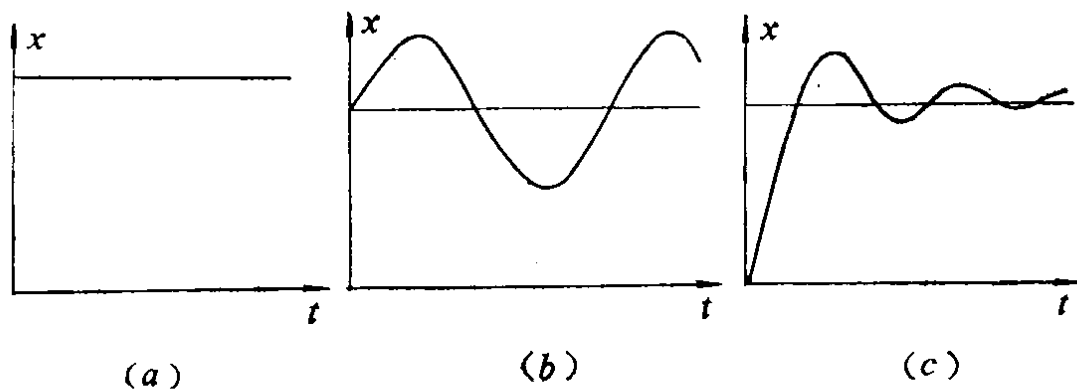


图 1-1

量信号指的是随时间连续变化的，并能直接表现出大小和极性的信号，如，随时间连续变化的随机信号、正弦变化的电压、指针的偏移等。而数字量信号指的是不连续的、离散的信号，如，BCD信号、脉冲电压、高低电平变化等。

二、测量系统

测量系统是为了测定实验对象在实验过程中参数的量值及其变化、对象的特性曲线、过程的变化规律等所用的装置、仪器和系统的总称。

根据测量系统所能接受（或能识别）的信号型式分为模拟量系统和数字量系统。以往的测量系统大都是模拟量系统，非电参数传感器转换的输出信号是随时间连续变化的电信号，然后由测量系统变成人能感觉到的指针偏转、记录曲线等。随着计算技术的发展，大量出现了数字式测量仪器。它们能实现实验数据的直接数字显示，打印和输往计算机进行处理等。从数据的可靠性、测量速度和精度等方面看，数字系统较之模拟量系统有很大提高。但它只能识别数字量信号，要求采用数字量传感器，或将模拟量信号通过模—数（A/D）转换器变成数字量信号。