

YEYA CESHI JISHU

液压测试技术

姚建均 编著



化学工业出版社

YEYA CESHI JISHU

液压测试技术

姚建均 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

液压元件是现代装备制造业的重要基础件，液压技术已经成为国家工业水平的重要标志之一，而液压元件的测试是液压元件质量以及整个机械系统安全稳定的基础。本书详细介绍了液压测试的特性以及信号分析，机械参数和流体参数的测量，液压元件性能测试以及液压元件寿命预测。

本书适宜从事液压元件设计与制造的专业人士。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压测试技术/姚建均编著. —北京: 化学工业出版社, 2018.3
ISBN 978-7-122-30979-2

I. ①液… II. ①姚… III. ①液压传动-测试技术
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 276582 号

责任编辑: 邢 涛
责任校对: 边 涛

文字编辑: 吴开亮
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市航远印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 483 千字 2018 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究



德国政府在《高技术战略 2020》中提出了工业 4.0, 旨在支持工业领域新一代革命性技术的研发与创新。借鉴德国版工业 4.0 计划, 我国制定了中国制造业未来 10 年设计顶层规划和路线图的《中国制造 2025》。《中国制造 2025》为应对新一轮科技革命和产业变革, 立足我国转变经济发展方式实际需要, 围绕创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展、人才为本等关键环节, 以及先进制造、高端装备等重点领域, 提出了加快制造业转型升级、提升增效的重大战略任务和重大政策举措, 力争到 2025 年从制造大国迈入制造强国行列。

液压元件是现代装备制造业的重要基础件, 液压技术的应用程度已经成为衡量一国工业水平的重要标志之一。然而, 我国液压产业大而不强, 落后国际先进水平 15 年左右。随着工业生产和科学技术的迅速发展, 液压技术的应用领域不断扩大, 对液压元件、组件和系统的性能要求也愈来愈高。因此, 加强液压传动和液压控制领域的参数测量、性能试验和科学研究, 对开发和研制合乎要求的产品以及对原有产品进行分析和改进具有重要的作用; 同时, 液压试验技术也是定性检测和定量分析液压系统和元件的重要手段。因此, 进行液压测试技术的研究对提升液压产品设计能力和质量, 完善液压件制造业技术创新体系, 强化液压行业制造基础等具有十分重要的意义。

液压测试技术作为液压元件及液压系统研制和生产的关键技术, 是验证产品性能指标、可靠性、寿命等的重要手段。传统的液压测试只能提供独立使用、手动操作的模式, 对于测试需求复杂、测试参数较多的场合, 使用起来非常不方便。信息时代的到来, 使得计算机技术广泛应用于各个领域。控制论、信息论等理论的研究以及数字技术、传感技术、接口技术、计算机科学技术和微电子技术等的发展从多方面为计算机辅助测试奠定了理论基础和物质保障。计算机辅助测试在液压测试系统中的应用, 奠定了现代液压测试技术的基础, 大幅提高了液压测试系统的应用范围和工作效率。

互联网、物联网时代又为现代液压测试技术的发展提供了一个很好的契机, 使远程液压测试、液压测试系统联网、测试数据交换等成为现实, 并将有力助推液压制造业转型升级, 使液压技术更好服务于我国高端装备制造业的发展, 为建设制造强国贡献力量。

全书包括 13 章, 其中第 1 章介绍测试技术基础以及现代液压测试系统组成、

现状及发展趋势；第2章介绍现代液压测试系统，主要包括数据采集系统、总线技术以及智能仪器、虚拟仪器和网络化液压测试系统；第3章介绍液压测试系统信号分类、描述、分析及处理；第4章分析液压测试系统的静态和动态特性、不同激励下的响应、特性参数的测定、负载效应和抗干扰性能；第5章分析液压测试系统的静态误差和动态误差，以及提高液压测试系统静动态性能的途径；第6章介绍液压测试系统机械量的测量，主要包括位移、力、转矩和速度；第7章介绍压力、流量、油温、油液密度、油液黏度和油液污染度等流体参量的测量；第8章介绍液压系统振动和噪声的测量；第9~11章介绍液压动力元件、液压执行元件和液压控制元件的测试；第12、13章介绍液压系统加速寿命试验和液压环境模拟试验技术。

本书的研究工作和编写得到了国家自然科学基金（项目编号：51375102）的资助，同时笔者的研究生余瀚、肖蕊、陈硕、牛庆涛和王涛都参与了本书的资料整理工作，万振帅和张乐校核了部分章节，在此一并表示感谢。

本书力求理论联系实际，注意分析规律，突出重点，总结要点，增强系统性，便于教学和自学。由于编著者水平有限，不足之处在所难免，恳请广大读者多提宝贵建议，以求改进。

姚建均

2017年7月

**第1章 绪论****1**

1.1 测试技术基础	2
1.1.1 信息	2
1.1.2 测量	3
1.1.3 测试	6
1.2 现代液压测试系统组成	8
1.2.1 现代液压测试系统基本组成	8
1.2.2 液压测试系统分类	9
1.3 液压测试技术的现状	12
1.4 现代液压测试技术的发展趋势	13
参考文献	15

第2章 现代液压测试系统**16**

2.1 数据采集系统	16
2.1.1 多路模拟开关	17
2.1.2 A/D 转换	18
2.1.3 D/A 转换	21
2.1.4 采样保持	23
2.2 现代液压测试系统的总线技术	24
2.2.1 总线的基本概念及其标准化	24
2.2.2 总线的通信方式	26
2.2.3 测试系统的内部总线	27
2.2.4 测试系统的外部总线	31
2.3 智能仪器	35
2.3.1 概述	35
2.3.2 智能仪器的形式	37
2.3.3 智能仪器的功能模块	38

2.4 虚拟仪器	42
2.4.1 概述	42
2.4.2 虚拟仪器的基本组成	44
2.4.3 基于 LabVIEW 的虚拟仪器的开发	47
2.5 网络化液压测试系统	51
2.5.1 概述	51
2.5.2 基于现场总线技术的网络化液压测试系统	51
2.5.3 面向 Internet 的网络化液压测试系统	53
参考文献	54

第 3 章 液压测试信号分析与处理

55

3.1 信号与液压测试系统	55
3.2 信号的分类	56
3.2.1 确定性信号和随机信号	56
3.2.2 能量信号和功率信号	59
3.2.3 连续信号和离散信号	60
3.3 信号描述与分析	62
3.3.1 概述	62
3.3.2 周期信号的频域描述与分析	63
3.3.3 非周期信号的频域描述与分析	67
3.3.4 随机信号的频域描述与分析	78
3.4 数字信号处理	85
3.4.1 数字信号处理特点	85
3.4.2 时域采样和采样定理	86
3.4.3 泄漏和窗函数	87
3.4.4 离散傅里叶变换 (DFT)	89
3.4.5 频域采样和栅栏效应	91
3.4.6 快速傅里叶变换 (FFT)	92
参考文献	95

第 4 章 液压测试系统性能分析

96

4.1 液压测试系统的静态标定	96
4.2 液压测试系统的静态特性	97
4.3 液压测试系统的动态特性	101
4.3.1 液压测试系统动态特性的分析方法	101

4.3.2	液压测试系统的数学描述	102
4.3.3	液压测试系统的传递函数	103
4.3.4	液压测试系统频率响应函数	104
4.3.5	典型环节的动态特性	105
4.4	液压测试系统在不同激励下的响应	111
4.4.1	液压测试系统对任意输入信号的响应	111
4.4.2	液压测试系统对典型输入信号的响应	112
4.5	液压测试系统特性参数的测定	114
4.5.1	静态特性的测定	114
4.5.2	动态特性的测定	116
4.6	实现不失真测试的条件	118
4.7	液压测试系统的负载效应	121
4.8	液压测试系统抗干扰性能分析	123
4.8.1	液压测试装置的干扰源	123
4.8.2	干扰途径	124
4.8.3	液压测试系统的抗干扰措施	126
4.8.4	液压测试系统的抗干扰技术	126
	参考文献	134

第5章 液压测试系统误差分析

135

5.1	误差的基本概念	135
5.1.1	误差的定义	136
5.1.2	误差分类	136
5.1.3	误差的来源	139
5.2	静态误差分析	140
5.2.1	原理误差	140
5.2.2	工具误差	141
5.3	环节静态误差分析	143
5.3.1	开环系统的静态误差分析	144
5.3.2	闭环系统的静态误差分析	145
5.4	动态误差分析	149
5.4.1	动态测量数据与动态测量误差	149
5.4.2	动态测量误差与静态测量误差	151
5.4.3	动态测量误差的评定指标	152
5.5	环节动态误差分析	153
5.5.1	开环系统的动态误差分析	153

5.5.2 闭环系统的动态误差分析	154
5.6 提高液压测试系统静动态性能的途径	156
参考文献	158

第 6 章 机械量的测量

159

6.1 直线位移的测量	159
6.1.1 电感式位移传感器	159
6.1.2 电阻式位移传感器	163
6.1.3 电容式位移传感器	165
6.1.4 磁致伸缩位移传感器	168
6.1.5 光栅式位移传感器	169
6.1.6 磁栅式位移传感器	171
6.2 角位移的测量	172
6.2.1 感应同步器	173
6.2.2 角度编码器	175
6.2.3 旋转变压器	177
6.3 力的测量	178
6.3.1 电阻应变片式力传感器	178
6.3.2 电感式力传感器	179
6.3.3 电容式力传感器	180
6.3.4 压电式力传感器	180
6.3.5 压磁式力传感器	181
6.4 转矩测量	182
6.4.1 电阻应变式转矩传感器	182
6.4.2 压磁式转矩传感器	183
6.4.3 光电式转矩传感器	184
6.4.4 磁电感应式转矩传感器	184
6.4.5 振弦式转矩传感器	185
6.5 速度测量	185
6.5.1 数字式转速测量传感器	186
6.5.2 激光多普勒速度计	189
6.5.3 频闪式转速表	191
参考文献	191

第 7 章 流体参量测量

192

7.1 压力测试	192
----------------	-----

7.1.1	弹性式压力计和压力变送器	193
7.1.2	压力传感器	196
7.2	流量测试	199
7.2.1	容积式流量计	199
7.2.2	压差式流量计	202
7.2.3	流体阻力式流量计	204
7.2.4	速度式流量计	206
7.3	油温测试	209
7.3.1	热膨胀式温度传感器	210
7.3.2	压力式温度传感器	210
7.3.3	热敏电阻式温度传感器	211
7.3.4	热电偶温度传感器	212
7.4	油液密度测量	214
7.4.1	谐振式液体密度传感器	214
7.4.2	射线式液体密度传感器	216
7.4.3	超声波液体密度传感器	216
7.4.4	电容式液体密度传感器	217
7.5	油液黏度测量	217
7.5.1	恩氏黏度计	218
7.5.2	毛细管法测量黏度	218
7.5.3	旋转式黏度计	220
7.5.4	振动式黏度计	222
7.6	油液污染度的测定	223
7.6.1	油液的污染度测定方法	223
7.6.2	油液污染度测定前的准备工作	226
7.6.3	油液污染度等级确定	227
	参考文献	228

第 8 章 液压系统振动和噪声测量

229

8.1	液压系统振动与噪声的主要来源	229
8.1.1	机械系统振动与噪声	229
8.1.2	流体工作过程的振动与噪声	230
8.2	振动测量	231
8.2.1	惯性式测振传感器	231
8.2.2	电涡流式振动位移传感器	232
8.2.3	磁电式振动速度传感器	233

8.2.4 压电式加速度传感器	234
8.2.5 测振传感器的合理选择	238
8.3 噪声测量	239
8.3.1 噪声测量的主要参数	240
8.3.2 噪声的响度分析及评价	242
8.3.3 噪声测量仪器	246
8.3.4 噪声测量方法	248
参考文献	251

第 9 章 液压动力元件测试

252

9.1 液压泵的技术要求	252
9.2 液压齿轮泵测试	254
9.2.1 性能要求和清洁度指标	254
9.2.2 试验方法和试验项目	255
9.2.3 装配和外观的检验方法	262
9.3 液压叶片泵	263
9.3.1 性能要求和清洁度指标	263
9.3.2 试验方法和试验项目	265
9.3.3 装配和外观的检验方法	270
9.4 液压轴向柱塞泵	271
9.4.1 性能要求和清洁度指标	271
9.4.2 试验方法和试验项目	273
9.4.3 装配和外观的检验方法	279
9.5 液压螺杆泵	279
9.5.1 试验类型和试验项目	279
9.5.2 试验实施	280
9.5.3 试验条件	283
9.5.4 性能参数的计算与换算	284
参考文献	287

第 10 章 液压执行元件测试

289

10.1 液压缸的性能与检验	289
10.1.1 液压缸的性能要求	289
10.1.2 液压缸的试验和检查	295
10.2 液压马达测试	300

10.2.1	液压马达的性能要求	300
10.2.2	装配要求	303
10.2.3	试验方法	304
10.2.4	装配和外观的检验方法	310
参考文献		310

第 11 章 液压控制元件测试

311

11.1	液压阀压差-流量特性试验	312
11.1.1	试验装置	312
11.1.2	试验条件	313
11.1.3	试验测量	314
11.1.4	试验结果的表达	316
11.2	方向控制阀试验	316
11.2.1	通则	317
11.2.2	试验内容	318
11.3	流量控制阀试验	325
11.3.1	试验回路	325
11.3.2	试验内容	325
11.4	压力控制阀试验	331
11.4.1	试验回路	331
11.4.2	试验内容	332
11.5	电液伺服阀测试	335
11.5.1	测量等级及试验条件	335
11.5.2	稳态试验	335
11.5.3	动态试验	341
11.5.4	其他试验	343
参考文献		344

第 12 章 液压系统加速寿命试验

345

12.1	寿命试验与加速寿命试验	345
12.2	加速寿命试验的类型	348
12.3	加速寿命试验的参数模型	350
12.3.1	加速寿命试验的统计模型	350
12.3.2	加速寿命试验的参数模型	351
12.3.3	常见寿命分布的加速模型	353

12.4 加速寿命试验的非参数模型	355
12.4.1 单应力线性加速函数	355
12.4.2 多应力线性加速函数	356
12.5 试验时间与应力、子样大小间的关系	358
12.5.1 子样大小与应力的关系	358
12.5.2 子样大小与试验时间的关系	360
12.5.3 子样大小、试验时间、置信度及可靠性之间的关系 ...	364
12.6 高压软管的寿命试验	365
参考文献	367

第 13 章 液压环境模拟试验技术

368

13.1 液压振动模拟试验系统	368
13.1.1 系统基本构成	369
13.1.2 控制策略	372
13.2 液压道路模拟试验系统	374
13.2.1 原理及作用	374
13.2.2 控制策略	375
13.3 多自由度运动模拟器	378
13.3.1 结构特点及应用领域	378
13.3.2 控制策略	379
13.4 动态加载试验系统	381
13.4.1 分类	381
13.4.2 系统组成	382
13.4.3 系统工作原理	383
参考文献	383

第1章

绪 论

液压技术是以流体作为工作介质对能量进行传动和控制的一种技术,由于它具有输出力大,结构紧凑,体积小,调速方便,使用安全可靠,压力、流量可控性好,可柔性传送动力等优点,并易与微电子和电气技术相结合,形成自动控制系统,因此在国防工业、机床工业、冶金工业、工程机械、汽车工业、农业机械、船舶工业、海洋开发等各方面得到了极其广泛的应用。

在液压技术的范畴内,所需要测量的物理量一般为压力、流量、力、转矩、位移、速度、加速度、转速、温度、噪声和振动等,这些物理量一般都具有时变性。在测量过程中,通常是通过传感器,将非电量转换成电量,再进行放大、转换、显示、记录或控制。

随着工业生产水平的提高、规模的扩大以及科学技术的发展,人们对液压传动系统和液压控制系统及液压元件的性能和可靠性也提出了愈来愈高的要求。因此,开展液压传动系统和液压控制系统的基础研究,设计和研制合乎要求的液压系统,以及对原有液压产品进行分析和改进,以满足各种用途的需要和不断提高的要求,就成为液压科技人员的重要任务。要完成这些工作,液压测试是不可缺少的环节。

当对一项液压产品进行研制时,设计者在对设计对象进行方案构思、初步设计计算的基础上,就要对某些模型进行试验。样机试制出来后,又要对样机进行性能试验和各种条件下的环境试验。在试验数据的基础上,再对样机进行改进,直至符合设计要求。同时,液压试验也是定性检测和定量分析液压系统和元件的重要手段。对于液压伺服系统而言,被控物理量的测量精度对系统的控制精度有很大影响。因此,进行液压测试技术的研究对提升液压技术、创新设计液压产品、促进高端装备制造业的发展,具有非常重要的意义。

液压测试技术是测试技术的一个重要分支,是测试技术在液压系统中的应

用。传统液压测试只能独立使用、手动操作，二次仪表显示，难以满足测试需求复杂、测试参数较多的场合，也满足不了现代液压系统对测试技术越来越高的要求。现代液压测试技术融合了液压技术、计算机技术、传感器技术、仪器仪表技术和测试技术等学科，紧密结合了计算机测试技术与液压测试技术，可为液压技术的发展提供可靠有力的测试平台。

1.1 测试技术基础

1.1.1 信息

(1) 信息和信号

测试的目的是获取信息，测试技术是一种研究如何获取信息的技术。信息是事物运动的状态与方式，是物质的一种属性。在这里，“事物”泛指一切可能的研究对象，包括外部世界的物质客体，也包括主观世界的精神现象；“运动”泛指一切意义上的变化，包括机械运动、化学运动、思维运动和社会运动；“运动方式”是指事物运动在时间上所呈现的过程和规律；“运动状态”则是事物运动在空间上所展示的形状与态势。总之，“信息即事物运动的状态与方式”。

信号是表示消息的物理量，是信息的载体和表现形式。它包含光信号、声信号、电信号、磁信号、热信号等。其中，电信号具有很多优点：其参量容易控制，可以方便地用来表示物体的各种运动状态方式；易于产生、放大和处理，便于信号变换；传输速度快，传播距离远，可以传递很大的信息量。因此在工程领域被广泛采用。测试系统中，需要采集的信号也往往是电信号。

现代液压测试系统通过各种传感器反馈的信号，获取系统的压力、流量、油温、振动、噪声及执行机构的运动情况等数据。把测试到的数据输入计算机系统，计算机根据输入的数据，通过信号处理技术，分析提取测试系统的信号特征，完成信号到信息的转换。利用这些信息即可对液压元件及液压系统的工作状况、性能、可靠性、寿命等指标进行评价，并可进行故障诊断和监测。因此，液压测试系统包含了信息的收集、传递、转换、存储、加工和使用，是一个典型的信息系统。

(2) 信息的性质

信息既不是物质也不是能量，但可以被识别、转换、存储、传输。信息的主要性质有：

① 普遍性 信息是事物运动的状态和状态变化的方式。因此，只要有事物存在，只要事物在不断地运动，就会有它们运动的状态和状态变化的方式，也就存在着信息。所以信息是普遍存在的，信息具有普遍性。

② 无限性 在整个宇宙时空中，信息是无限的，即使是在有限的空间中，

信息也是无限的。一切事物运动的状态和方式都是信息，事物是无限多样的，事物的发展变化更是无限的，因而信息是无限的。

③ 有序性 信息可以用来消除系统的不确定性，增加系统的有序性。获得了信息，就可以消除认识主体对于事物运动状态和状态变化方式的不确定性。信息的这一性质使信息对人类具有特别重要的价值。

④ 时效性 信息具有动态性质，一切活的信息都随时间而变化。因此，信息也是有时效的。信息是事物运动的状态和状态变化的方式，事物本身在不断发展变化，因而信息也会随之变化。脱离了母体的信息因为不再能够反映母体的新的运动状态和状态变化方式，所以它的效用就会降低，甚至完全失去效用。这就是信息的时效性。所以人们在获得信息之后，并不能就此满足，信息要及时发挥效用，要不断补充和更新。

⑤ 可转化性 信息虽然不是物质，也不是能量，但是信息可以转化，在一定条件下，信息可以转化为物质、能量。最主要的条件是信息必须被人们有效地利用。正确而有效地利用信息，就可能在同样的条件下创造更多的物质财富和能量。

⑥ 可存储性 信息可以用不同的方式存储在不同的介质上。人脑可以存储信息；计算机可以通过存储器、光盘、U 盘等存储信息；照相机、摄像机、手机等可通过存储卡存储信息。

⑦ 可转换性 信息可以有多种表现形式，各种表现形式之间又可以相互转换。同一种信息可以用语言、文字、数字、图像或图表等不同的方式来表示，它们都可以转换成计算机代码，计算机代码又可转换成语言、文字、数字、图像或图表等方式。

⑧ 可传递性 信息可以通过手势、旗语、烽火、信件、绘画、文字、符号、印刷品（包括纸质和电子版）、电话、电影、广播、电视、手机通信、计算机网络等传媒被近距离或远距离传递。在测试技术中，测试对象借助机械、声、光、电、磁等来传递信息。

⑨ 可加密性 在全球化、网络化和计算机化的趋势下，信息安全越来越重要，尤其是涉及国家安全、个人隐私的信息，可以对重要的信息进行加密保护。信息加密可利用数学或物理手段，对信息在传输过程中和存储体内进行保护，以防信息泄漏。

1.1.2 测量

测量是获取信息的一种重要手段。测量是对非量化实物的量化过程，在机械工程领域，测量指将被测量与具有计量单位的标准量在数值上进行比较，从而确定两者比值的实验认识过程。门德列耶夫说过：“没有测量就没有科学。”科学技

术的发展离不开测量,在工业和科技领域主要通过测量获取信息。有些信息可以通过测量直接获取,而有些信息是不易直接测量得到的。对于不易直接测量得到的信息,往往需要通过对其相关的信息进行处理才能获得。

1.1.2.1 测量方法

测量方法对测量工作十分重要,它关系到测量任务是否能完成。为了及时获得准确可靠的数据,应根据不同的测量对象,使用不同的测量装置,选择合理的测量方法。对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。

(1) 直接测量、间接测量和组合测量

按测量手段和获得测量结果的方法不同进行分类,主要有直接测量、间接测量和组合测量三种测量方法。

① 直接测量 用预先标定好的仪表对被测对象进行测量时,仪表读数不需要经过任何处理,就能直接表示测量所需要的结果,称为直接测量。如用米尺测量工件长度、压力表测量油源压力、温度计测量油源温度等都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速、测量结果直观,多用于工程实际;缺点是测量精度不容易做到很高。

② 间接测量 有的被测量无法或不便于直接测量,但可以根据某些规律找出被测量与其他几个参量间的函数关系。这就要求在进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,然后将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需的结果,这种方法称为间接测量。例如,对试件的质量无法直接测量时,可通过它的体积和已知材料的密度,进而计算得到它的质量。间接测量比直接测量来得复杂,但是有时可以得到较高的测量精度。间接测量方法能够获得许多不能通过直接测量的信息,或者通过间接测量方法能够得到比直接测量方法精度更高的结果。

③ 组合测量 组合测量又称“联立测量”,即被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后测量结果。在进行联立测量时,一般需要改变测量条件,才能获得一组联立方程所要的数据,解联立方程求出未知的被测量。对联立测量,在测量过程中,操作手续很复杂,花费时间很长,是一种特殊的精密测量方法,一般适用于科学实验或特殊场合。

(2) 绝对测量和相对测量

根据不同的测量读数方法,可分为绝对测量和相对测量。

① 绝对测量 测量中,当被测量是通过对一个或数个基本量的直接测量或利用物理常数值进行测量时,称为绝对测量,它能从读数装置上读出被测量的整个数值。例如,在液压测试系统中,在测量精度要求不高的情况下,常用卷尺测量工件长度。绝对测量一般使用通用量具,适合单件、小批量加工、测量,通用性好,可以直接读数。