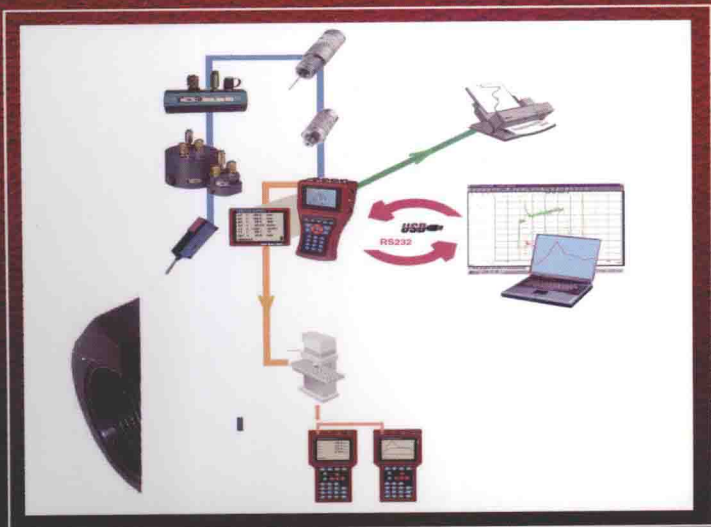


全彩版
巨惠附赠资源

实用液压测试技术

张海平◎等编著

测试是液压技术的灵魂
测试是产品创新的源泉
测试是考核达标的手段
测试是检验诊断的工具



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



实用液压测试技术

张海平 姚 静 艾 超 编著

测试是液压的灵魂
准备是测试的关键
分析是准备的核心



机械工业出版社

液压测试技术是每个从事液压技术工作的人员都应该掌握的关键技术。本书由浅入深、系统地介绍了液压测试技术的重要性、基本概念、液压测试仪器的概况与选用,如何进行液压元件的稳态、动态特性及耐久性的测试,指出了个别液压国家标准、行业标准的一些欠缺之处,并提出了改进补充建议。对如何进行液压系统测试,提供了实例分析和技巧。本书可以帮助读者深入认识掌握液压测试技术,为技术创新打下基础。

本书的附赠资源包括液压估算表格软件、各章的插图及作者已发表的文章。

本书适合于机械类专业从业人员,特别是工程机械和农业机械的液压系统设计师、液压元件的制造、检验、维修人员,以及大学、高职液压专业教师等参考使用;也可以作为在校机械类本科生和研究生流体传动与控制的专业课程补充读物,以及在职液压技术人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

实用液压测试技术 / 张海平 等编著.

—北京:机械工业出版社,2015.8

ISBN 978-7-111-51292-9

I. ①实… II. ①张… III. ①液压传动—测试技术
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 195976 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张秀恩 责任编辑:张秀恩

责任校对:舒莹 封面设计:陈沛

责任印制:乔宇

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15.5 印张·301 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-51292-9

定价:78.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

策划编辑:010-88379770

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

在液压技术领域，测试是评判液压元件和系统性能的最终依据。测试也是最重要的研发手段，是改进元件和系统性能的开始和终结。要创新，离不开测试。所以，说“测试是液压的灵魂”一点也不过分。

作者作为液压工程师，20多年来，多少次了，通过测试理解了液压元件的特性，证实了系统存在的缺陷、找到了改进的措施，产生了创新的灵感，获得了发明的专利。然而，曾几何时，居然有人把工科学生读书，学习理论，积累知识，看作是大学教育的全部，许多学液压的大学生，直至毕业不知液压测试为何物。竟然有一些液压元件生产厂，把搞到别人的图样，原封不动的仿造，美其名曰“开发新产品，赶超世界先进水平”，不搞测试，不去改进，全无探索精神，令人扼腕叹息，因而撰写此书。

液压测试技术不仅对液压元件检验工程师、液压系统维护人员很重要，也是液压元件和系统设计及制造工程师必须掌握的基本技术。本书为这些朋友而写：

- 他们已经在从事或准备从事液压技术工作，但还未意识到测试的重要性。
- 他们想进行液压测试但还苦于入门无路。
- 他们已做过液压测试但希望做得更好。

作者希望通过本书可以帮助他们做好液压测试工作。

液压测试中最关键的是测试前的准备工作。准备是测试成功的保证。准备决定了收获的大小。没有准备，就没有收获。准备得越充分，收获就越多。所以，准备测试的能力是衡量液压工程师水平的基本标尺之一。

液压元件的多样性导致了准备测试的复杂性。准备测试需要多方面综合性的知识和能力。测试的准备工作包含了分析归纳、规划测试方案、制订试验大纲和试验计划，其中最核心的是分析归纳。分析归纳被测件的结构和特性、相关的测试标准、可能得到的测试结果。通过分析归纳，把任务细化、具体化、有序化，针对性更强了，就容易找到完成任务的恰当途径。

因此，本书的重点之一就是如何准备测试。第2章是原则性的，第4~8章是示范性的，供读者参考，从而可以自己动手准备测试，搭建回路，练习测试。

本书花了不少篇幅介绍液压元件的**耐久性**试验，这是因为，目前大多数国产液压元件的可靠性偏低，已经影响到了我国国民经济的进一步发展。改变基础件发展的滞后状况现在已经提升到国家发展战略的高度，液压件是重中之重。可靠性取决于制造的一致性和设计的优良性。现在，国内很多液压元件是通过测绘仿

造出来的，几何尺寸与先进产品相似，因此，流量-压差性能等一般稳态特性与先进水平差别还不大，差别大的就是耐久性。

本书关于液压元件的篇幅较多，而关于液压系统的篇幅相对少些，不是因为液压系统测试不重要，而是因为：

1) 液压系统的测试项目与方法相应的主机密切相关，作者无法给出既具普遍性又能用较短篇幅说清的例子。

2) 如果掌握了液压元件的测试，则对系统进行测试也就不难了。

3) 耐久性试验，如果对液压元件做好了，则在主机上就可以不做或少做，至少简单得多了。

不动手，提高不了动手能力。道理很简单，只要想一下：读一级厨师写的菜谱 100 遍，不下厨，能成为一级厨师吗？同样，不测试，也提高不了测试能力！为此，第 9 章“实验”再出了一些题目供选用。

本书从基础开始，逐章深入，各部分都以前面的介绍为基础，因此建议不要跳读。

作者希望通过本书为读者提供一些思考的途径和方法，而无意将本书写成实验指导书。因此，一些测试过程并不完整，冀望读者能通过自主思考，根据具体情况补充完善。

本书所提供的回路图是基本的、示范性的，介绍工作原理用的，实际使用时还应根据情况增添必要的安全措施。

液压元件、系统的液压特性的测试技术肯定与液压元件、系统自身的特性密切相关，但本书的重点是介绍测试技术，而非液压元件、系统，相信读者已有，或能够通过阅读相关文献获取这方面的知识。

本书专注于液压特性的测试，至于材料的理化特性、部件的几何特性、整机的工作特性等的测试，请查阅相关专著。

为了方便读者查找和延伸阅读，参考文献都放在各章末尾。全书中所有文献序号，均指该章末的延伸阅读文献序号。

测量，是“以确定量值为目的的一组操作”。“试验”一词具有多重含义。在一些液压行业标准中规定了对液压元件要进行型式试验与出厂试验，这里使用了试验一词的“考试、检验”之意。其实，这里的考试检验也离不开测量。测试，顾名思义，就是“测”+“试”，“测量”+“试验”。这里的“试验”，比较强调其尝试之意。尝试，意味着探索，进入未知领域，这是创新必不可少的环节。本书既谈测量，也谈按标准试验，还探讨超越标准规定的尝试，因此，本书较多使用“测试”一词，某些章节中尊重习惯和相应标准的提法，使用“试验”一词，请读者根据上下文理解。

本书分段较多,排版较松,就是希望层次清晰些,给读者在阅读时留出喘息、思索、批注的空间。通过批注,提出问题、疑惑,纠正错误,才能加深理解。

由于国内的液压技术术语大多是舶来货,多人各自翻译,很不统一,有些直译未反映本意,似是而非,容易引起误解。本书尽可能列举各种同义词,纠正一些名不符实的名称,以便利初学液压者。

关于**压力单位**问题。作者查阅了欧美所有世界知名的液压公司的产品样本,压力单位全都使用 bar,没有一家公司的产品样本中出现过 MPa 这个单位,在国际液压标准中也很少出现 MPa,甚至 GB/T 17491—2011(附录),GB/T 20421.3—2006(附录 B)都推荐使用 bar。但为了执行我国关于法定计量单位的规定,作者不得不花很多精力,把所引用的许多材料中的 bar 改为 MPa。希望读者还是能非常熟悉 bar: 1bar=0.1MPa。这样,在阅读国外产品样本时才不会有困难。书中有些曲线是作者本人使用“液压万用表(见 3.15 节)”实测的,为了表示其真实性,保留了其原始显示格式,包括压力单位 bar,不再一一说明。

在液压技术中,常常使用“弹簧力与反向液压力有效作用面积的商”,为叙述简便起见,本书中将此简称为**弹簧压力**。将“弹簧**预紧力**与反向液压力有效作用面积的商”称为**弹簧预紧压力**(bias spring value)。

根据 GB 3102.3—1993《力学的量和单位》,质量流量的代号为 q_m , 体积流量的代号为 q_v 。鉴于在液压技术中,几乎只使用体积流量,行业内也普遍接受代号 q 。所以,为了简洁起见,本书中用 q 表示体积流量。

目前,在液压系统中使用的压力(工作)介质,虽说主要还是矿物油(约占 85%~95%),然而,为了安全、环保等各种因素,也越来越多使用其他液体,如难燃液压油、油包水、水包油悬浮液、可生物快速降解的合成酯、植物油等。但为叙述简便起见,本书仍使用**液压油**或**压力油**代表所有压力介质。

全面地来说,输送液体的泵有两大类:**容积式**和**动力式**。因为液压技术中几乎不使用动力式泵,所以本书中略去“容积式”,简称其为**液压泵**或**泵**。

马达一词,有时也被用于称呼电动机和汽车发动机,但都属于不规范汉语,应该避免使用。按国家标准 GB/T 17446—2012《流体传动系统及元件 术语》,马达指“提供旋转运动的执行元件”,含液压马达和气动马达。因为本书不涉及气动,所以,书中的“马达”专指“液压马达”。

本书引用标准中的液压系统图,已修改为新标准 GB/T 786.1—2009 的图形符号,并对标准中的技术性错误进行说明,读者应注意。

为缩减篇幅,本书使用了下列简称。

IFAS——Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, RWTH Aachen 德国亚琛工业大学流体传动与控制技术研究所。

伊顿——美国 Eaton-Vickers 公司。

VI 实用液压测试技术

力士乐——德国 Bosch-Rexroth AG 公司。

派克——美国 Parker Hannifin 公司。

哈威——德国 HAWE Hydraulik SE 公司。

布赫——德国 Bucher Hydraulik 公司。

升旭——美国 Sun Hydraulics 公司。

和德尼科——德国 HYDROTECHNIK 公司。

雅阁辉托斯——德国 ARGO-HYTOS 公司。

艾通——德国 ETO GRUPPE Beteiligungen GmbH 公司。

上海诺玛——上海诺玛液压系统有限公司。

书中多数内容不是抄现成的，而是作者自己想出来，做出来，编出来，或吸收国外的先进知识，属于“无中生有”，第一次见诸文字。所以，尽管反复检查多次修改，但难免还有错误。作者衷心欢迎读者提出意见和建议。作者电子信箱：hpzhang856@sina.cn。读者还可通过作者的博客 <http://blog.sina.com.cn/lwczf>，反映意见，查阅不断更新的勘误表。

本书附赠的资源中有各章的插图，可以帮助读者阅读，也可供企业技术培训、大学教师教学选用；一些作者本人已公开发表的文章，以便读者查阅；还提供了液压估算表格软件。此附赠资源放在百度网盘中。读者只要扫描本书末的二维码，即可从网上下载。

燕山大学姚静博士和艾超博士参与了本书的编写，两位老师还细致地校阅了全书，本人谨在此衷心感谢。

感谢本书所引用的参考文献的所有作者。由于本书准备时间较长，有些引用文献可能遗漏标注，恳请有关作者谅解。

谨以此书献给含辛茹苦抚育我成长的父亲与母亲。

张海平
2015年4月

目 录

前言

第 1 章 测试是液压的灵魂	1
1.1 液压测试的作用	1
1.2 测绘仿造应该继以测试改进	2
1.3 仿真应该以测试为基础	3
延伸阅读文献	9
第 2 章 液压测试的基础知识	10
2.1 液压测试的类型	10
2.2 液压测试的过程	12
2.3 液压测试的工况	16
2.4 液压测试的设备	17
2.5 液压元件测试的标准	19
2.6 液压元件的出厂试验	22
2.7 液压元件的型式试验	27
延伸阅读文献	29
第 3 章 液压测量仪器的概况与选用	30
3.1 概述	30
3.2 测量技术的一些基本概念	31
3.3 压力的测量	35
3.4 流量的测量	39
3.5 温度的测量	44
3.6 位移的测量	46
3.7 速度与转速的测量	49
3.8 振动的测量	51
3.9 力的测量	55
3.10 转矩的测量	57
3.11 噪声的测量	57
3.12 油液品质的测量	60
3.13 测量用的二次仪表	66
3.14 计算机辅助测试	67

3.15 液压万用表	69
延伸阅读文献	75
第4章 液压阀稳态特性的测试分析	76
4.1 概述	76
4.2 节流阀流量-压差特性的测试分析	77
4.3 换向阀流量-压差特性的测试分析	80
4.4 二通流量阀压差-流量特性的测试分析	82
4.5 溢流阀压力-流量特性的测试分析	86
4.6 电调制换向节流阀节流特性的测试分析	90
4.7 电比例溢流阀压力-输入信号特性的测试分析	100
延伸阅读文献	105
第5章 泵马达液压缸稳态特性的测试分析	106
5.1 液压泵效率的测试分析	106
5.2 液压泵变量特性的测试分析	111
5.3 液压马达效率的测试分析	116
5.4 液压缸负载效率的测试分析	123
5.5 液压缸泄漏量的测试分析	129
延伸阅读文献	132
第6章 液压元件瞬态特性的测试分析	133
6.1 概述	133
6.2 溢流阀瞬态特性的测试分析	134
6.3 二通流量阀瞬态特性的测试分析	136
6.4 电磁换向阀工作范围的测试分析	139
6.5 电调制换向节流阀瞬态特性的测试分析	146
6.6 恒压变量泵瞬态特性的测试分析	153
延伸阅读文献	156
第7章 液压元件耐久性的测试分析	157
7.1 试验目的的分析	157
7.2 失效的分析	160
7.3 金属部件的疲劳破坏简介	161
7.4 强化试验浅析	166
7.5 试验前的准备工作	168
7.6 压簧的测试分析	171
7.7 开关型盖板式插装阀的测试分析	173
7.8 直动式溢流阀的测试分析	176

7.9 开关型电磁铁的测试分析	178
7.10 液压缸的测试分析	183
7.11 液压泵的测试	189
延伸阅读文献	192
第 8 章 液压系统的测试	193
8.1 测试目的	193
8.2 测试技巧	194
8.3 液压缸起动测试实例	195
8.4 挖掘机测试实例	197
8.5 消除液压缸终端缓冲时的压力尖峰测试实例	200
8.6 加载测试	203
延伸阅读文献	207
第 9 章 实验	208
实验 1 简单回路压力变化的测试	208
实验 2 节流阀开度影响的测试	209
实验 3 进口节流回路负载流量特性的测试	209
实验 4 液压缸终端缓冲特性的测试	210
实验 5 电液伺服位置系统瞬态响应特性的测试	211
附录	214
附录 A 液压估算表格说明	214
A.1 液压缸的压力、速度	214
A.2 液压缸容腔惯量系统	215
A.3 流量脉动对压力、速度的影响	217
A.4 液压泵马达负载压力、流量、转速、功率	220
A.5 转动惯量、马达-负载转动惯量系统	221
A.6 弹簧-惯量系统的固有频率	223
A.7 间隙泄漏、滑阀泄漏	224
A.8 管道压降	226
A.9 通过固定液阻的流量	226
A.10 滑阀开口流量	228
A.11 滑阀稳态液动力	229
A.12 滑阀阀芯移动摩擦力	229
A.13 锥阀通流	230
A.14 弹簧刚度与弹簧力	232
A.15 进出节流口面积估算	233

X 实用液压测试技术

A.16 并联型能量回收回路	234
A.17 串联型能量回收回路	235
附录 B 附赠资源内容	236
延伸阅读文献	237

第1章 测试是液压的灵魂

1.1 液压测试的作用

液压测试在液压技术中被广泛应用，起着极其重要的作用。

1. 研发新产品离不开测试

液压元件设计师接到一项研制任务之后，在进行初步分析，必要的计算和方案构思的基础上，就要进行某些模型测试和单项测试，据此设计样品。在样品试制出来以后，再要进行样品性能的全面测试。在此基础上，再进行第二轮样品设计、试制和测试。设计-测试-改进，这样的过程往往要重复多次。在此过程中，测试都是不可缺少的重要环节。对此，德国工程师协会（VDI）有详细的指导^[1]。

2. 考核达标需要测试

中国的机械行业标准（JB）规定，对液压元件应进行型式试验与出厂试验，以考核被试件在标准规定的工况下，性能是否达到了标准推荐的指标（详见 2.5 节）。一些生产厂也会组织测试，确认自己的产品达到了标准。

3. 履行交货合同需要测试

通过性能测试才能真正确认供给用户的产品是否符合供需双方合同中对产品液压性能的要求。

生产厂在设计制造尚无针对性客户、针对性应用的通用件时，可遵循的只有标准。但应该认识到，标准对液压元件性能的要求是通用性的，而实际上，不同应用场合对液压元件性能的要求差别很大。例如，溢流阀，用作常开的恒压阀和偶尔开一次的安全阀时，对调压稳定性、噪声的要求就很不同。再如，液压泵用于冲击较小的场合，例如起重机，和用于冲击很大的场合，例如挖掘机，对耐冲击的要求相差也很大。最极端的例子，液压件用于导弹上和用于工程机械上，对耐久性的要求更是天壤之别。所以，根据顾客需要的应用工况，进行测试，是更科学合理的。合同重于达标！

4. 找出产品存在的问题需要测试

很多场合下，测试不是为了证明产品的优良，而是为了找出缺陷。业内行家说：不怕有问题，只怕不知道问题在哪里。测试可以帮助找出问题。只有找到问题，才可能进一步提高产品质量。

5. 比较产品之间的差距需要测试

要知道自己生产的产品与先进水平的差距，也需要通过测试。为此，把一台先进水平的和一台自己的产品放在相同环境下，采用相同测试回路，以相同的条件工况，进行测试，寻找差距。

这种测试对测试条件的要求可以不遵循标准，只要能够得出有说服力的结论就可以了。

6. 液压系统调试需要测试

液压元件组装到主机上之后，要检验在各种实际应用工况中的表现是否符合设计时的预想，要进行测试。

7. 排除故障需要测试

主机在运行中，出现缺陷或故障，要寻找缺陷、故障的原因，确定相应的改进措施，测试也是不可缺少的。

如能在主机调试正常后，进行详细的测试记录，在遇到缺陷故障后再进行测试，与原先的记录做比较，也是极有益于寻找故障部位的。

8. 液压系统状况实时监测需要测试

重大设备在运行时，都需要持续的实时监测，包括液压参数。例如，远洋舰船舵机液压系统的压力都是长期持续监测记录的，即使没有突发性故障，在返回母港后，也会读取分析。如果设备处于不便接近的位置，例如风力发电机，则利用无线通信网络和因特网远程传输数据，以便及时了解系统状况，在发生严重事故前，尽早发现问题，预防故障。

现在正在研究，利用自学习和模式识别技术，对大量的测试数据进行分析，归纳成健康指数，在此基础上，可以更早地预测故障，制订预防性检修维护计划。

9. 实时控制需要测试

在液压伺服系统中，也要对被控参数进行实时测量，并将测量结果反馈到输入端的误差检测器上，与设定值或输入值进行比较，根据比较结果进行调节。一个伺服系统的控制精度，在很大程度上取决于测量的准确度与及时性。所以，被控物理量的测量装置也是液压伺服系统的重要组成部分。这种测量对实时性有很高的要求，难点在控制算法。

本书不对实时监测与实时控制展开介绍，感兴趣者请查找相应文献。

1.2 测绘仿造应该继以测试改进

测绘仿造，又被称为逆向工程，是国内很多液压元件制造厂目前正在做的。

现代液压技术经过半个多世纪的发展，已经相当成熟，高端产品中高科技含量很高。而目前中国很多液压产品离世界先进水平还有相当的差距。要迅速赶上世界先进水平，开发新产品，在相应产品或技术没有专利保护的情况下，从测绘

仿造开始,不失为一个有利的起点。德国人有时也搞测绘仿造,日本人更是如此。然而必须看到以下几点。

(1) 测绘仿造不能保证液压性能一模一样

1) 仅仅测绘液压元件的几何尺寸不可能完全掌握样品的特性,还需要了解各部件的材料组成成分、金相组织状况等。因为这些因素对液压元件的性能,特别是工作耐久性,有着十分重要的作用。而这些因素又与加工工艺有密切关系,很难完全测出来。

2) 现代液压元件为了满足在高压高速下工作的需要,有一些很细微的尺寸和形状与位置变动,不知道作用原理的话,根本就不会去测。

3) 几何尺寸的测量一般都是在室温常压下进行的,测不到在高温高压下发生的变形。

4) 测绘只能测有限的几个样品的尺寸,测不出允许的加工偏差。

5) 机械加工,也不可能做到一模一样。

(2) 仿造也不需要与样品一模一样

1) 由于自己的材料、加工制造能力的限制,必须做一些改动。

2) 开发液压元件,需要的是其液压性能,只要液压性能达到或超过样品就可以了,不需要几何尺寸一模一样。

3) 外形一模一样,反有仿冒之嫌。

(3) 通过液压测试做到液压功能接近

通过液压测试可以深入认识元件的工作原理,比较仿制品与原件的液压功能差别。测绘仿造,顶多只能做到形似。而不测试,就如同没有灵魂,形似神不似。

(4) 测绘仿造之后应该继以改进创新

1) 仅测绘仿造,就只能永远跟在别人后面走。不改进创新,永远不会有自主知识产权。

2) 专利所限制的也只是一模一样的照搬。如果能在它的基础上有所改进,那就不但不受它限制,反过来还可以再申请专利保护。

3) 世界先进水平的产品也是处在不断改进中的。凭什么说,拿来作为仿造对象的那个样品已经是完美无缺的,必须依样画葫芦,不能再改进逾越呢?!

4) 而要改进,也需要测试比较,确定目前达到的水平、存在的问题,从而确定改进创新的方向。改动带来的变化也需要通过测试来确定。

所以,测绘仿造仅仅只能是开发的起点而已,绝不应该是开发的终点。

1.3 仿真应该以测试为基础

液压传动与控制技术发展至今,理论上做了很多研究,发现了很多规律,这

是毋庸置疑的。现代液压集液压技术、微电子技术、传感检测技术、计算机控制技术及现代控制理论等众多学科于一体，成为一门高交叉性、高综合性的技术学科。尤其是在与计算机技术相结合后，在系统设计、控制、故障诊断、模拟现实等方面有了长足的进步，出现了一些通用的和液压专用的数字仿真软件，使得建模与求解都很方便。

这里说的仿真是广义的，除了稳态、动态特性仿真外，也包含了对液压元件作强度有限元分析，或作元件内部的流场计算（CFD），以及研究多个部件相互作用的多体仿真。

对于动特性分析，过去用于高性能伺服阀、系统时卓有成效的线性（频响）理论，在用于常规液压元件、系统时，因为元件特性存在着很多非线性，显得非常局限牵强。而使用数字技术可以较好地描述这些非线性特性，为深入研究提供了一个有力的工具，开启了一片新天地。由于计算结果可以比较接近真实情况，就有可能进一步预测液压元件与系统的性能。

但是必须认识到，所谓仿真，说到底，不过是利用数字计算机完成复杂的运算而已，计算结果完全取决于人们建立的模型及输入的参数。如果模型或参数不正确，仿真就不可能“真”。为了更深入地说明这一点，以下回溯一下作为仿真基础的一些理论和常用参数。

1. 基础理论

液压技术的理论基础都是只适用于理想化的状态，是规律性的，作为分析是很有用的，但用于计算，则计算结果可能会由于忽略了很多因素而不准确。以下是一些例子。

（1）帕斯卡原理

液压技术（静压传动）的理论基础是帕斯卡原理：密闭容器中**静止**液体压力传递各向相等。只要用到了计算式 $F=PA$ （力 = 压力×面积），就是用到了帕斯卡原理。其前提是“液体是**静止**的”。然而，液压技术中为了传递功率，液体必须流动。所以，在液压技术中使用帕斯卡原理是有违其前提条件的。

如果在液压缸中，液体运动速度不很高，误差也不很大。但在液压阀中，在某些部位（开口处）由于液体运动速度很高，再简单套用帕斯卡原理，会有相当误差。所以，引入了“液动力”的概念，来补偿这一误差^[2]。因为液动力不容易根据压力分布来计算，所以一般都用动量变化来估算。本章延伸阅读文献[3]对一个 NG20 的二通插装阀的稳态液动力做了详细的研究，把理论计算与测试作了对比，指出，用动量变化算出的液动力往往大于测试。该文献用了 7 个曲线图介绍不同形式的锥阀的液动力随开口的变化，图 1-1 为其中的一个。作者指出，“**采用上述测试方法，在工程上更近于实际情况，与作出大量简化以后进行理论分析的方法相比，能够得到包括许多在数学上难以描述的内部因素综合作用在内的稳态**

液动力测试曲线”（本章延伸阅读文献[4]204页）。可惜，过来人三十年前的这番真知灼见至今仍未得到很多中国教授的足够重视。

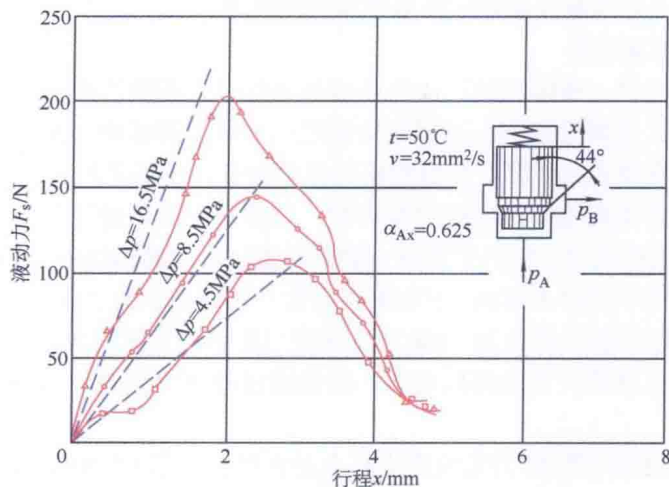


图 1-1 一个 NG20 二通插装阀的液动力曲线

---理论计算 —●—测试

(2) 纳维-斯托克斯方程

1827年法国人纳维（C. L. M. Navier）建立了粘性流体的三维运动方程，1845年英国人斯托克斯（G. G. Stokes）又以更合理的方法导出了这组方程，这就是沿用至今，作为流场仿真基础的 N-S 方程。它适用于粘性可压缩流体的非定常运动。此方程假定流体的粘度为常数。而众所周知，液压技术中目前所使用的所有液压油的粘度，都会随温度变化而变化。一般，液压油经过液压泵升压之后，每流过一个液阻，压力会有一定程度的降低。所损失的能量基本上都转化为热量，导致油温升高。因此，粘度不是一个常数。所以，即使采用 N-S 方程组，也还是不能完全反映液压系统的实际工况。

(3) 伯努利方程

1738年瑞士人伯努利（D. Bernoulli）从经典力学的能量守恒出发，得到了流体定常运动下，流速、压力与流道高度之间的关系。伯努利方程适用于液压油，从形式上来说，很简洁。但是，好看不好用。因为，从这一个等式，为了得到其中一项，必须知道其余所有各项。

拿流线的伯努利方程来说，如果知道了在流线上点 1 的压力和速度，并且知道了点 2 的速度，并且忽略两点间的高度差，才可以利用此方程求出点 2 的压力。但是由于流体的运动常常很复杂，在紊流，特别是在通流截面积变化处，如阀口、阻尼孔等，伴随有涡流，根本无法得到实际速度分布的解析表达式，也就无从得

到压力分布的解析表达式，就无法据之计算压力。

2. 参数

仿真过程中必须输入描述液压系统状况的参数。

(1) 流态与雷诺数

在液压系统中，液体流动造成的压差对元件乃至系统的性能起着极其重要的作用。而压差又受到流态——紊流还是层流——极大的影响。相同的通过流量，按紊流和按层流公式去计算，算出的压差有时会有几十倍之差。

而决定流态是紊流还是层流的雷诺数，是英国人雷诺经过上万次测试后总结出来的。对圆管有效的上临界雷诺数，根据雷诺自己的测试约为 12000，后人曾在特别安静的环境中获得 40000；下临界雷诺数，雷诺建议为 2300，一般取 2000。同心环缝的下临界雷诺数约为 1100，滑阀阀口的下临界值约为 260。等等这些，都不是根据任何理论公式计算出来的，而是通过测试得到的，而各人的测试结果还有差别^[5]。

目前常见的雷诺数-阻力系数图实际上是在尼古拉兹 (J. Nikuradse 1932) 等人大量测试的基础上拟合出来的。如果再去回顾一下，雷诺之后，勃拉修斯 (H. Blasius 1913)、普朗特 (L. Prandtl 1925)、尼古拉兹 (J. Nikuradse 1932) 等人在这方面做的大量测试研究报告^[5]，就可以知道，那些根据雷诺数计算压差的公式是非常非常简化了的，许多因素被忽略不计了。所以，算出来的压差是有误差的。

(2) 阀口通流

实际工作中，阀口的通流量常套用薄壁孔的公式来计算

$$q = \alpha A \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

其实，这个公式用于薄壁孔就有很多前提条件，流量系数 α 的变化范围很广^[6]。此公式对薄壁孔尚且不准，对实际应用有多种不同形状的阀口，更难准确。例如，测试表明^[4]，锥阀口通流的流量系数随阀口形状、流动的雷诺数的平方根而变。

(3) 弹性模量

液压技术中使用的液压油都是可压缩的，通常用弹性模量来表征。此参数对液压元件系统的动态性能仿真是必不可少的。然而，实际弹性模量随压力、温度、所含未溶解空气量，以及使用的管道等多种因素而变化，详见本章延伸阅读文献 [6]。

此外，还有很多其他因素，很难精确确定，如：

——细长孔的流量计算公式只在层流时有效。

——液压介质的粘度随温度压力而变，这就影响到雷诺数，从而影响到流态的确定、液阻的计算。

——密封圈的摩擦力，随安装间隙、压力、温度、磨损状况而变化。

——滑阀阀芯与阀体间的摩擦力，随阀芯阀孔的间隙和形状与位置偏差而变。