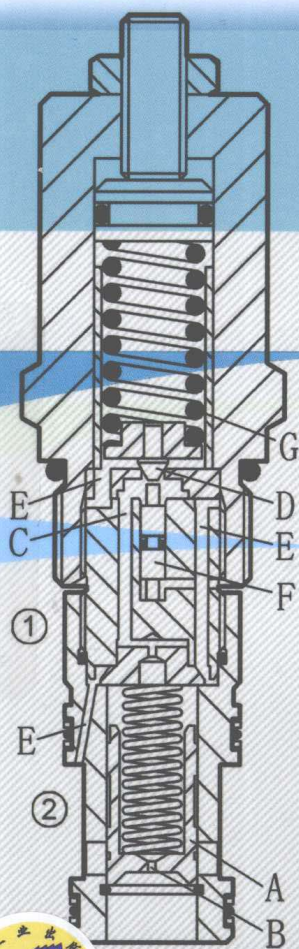
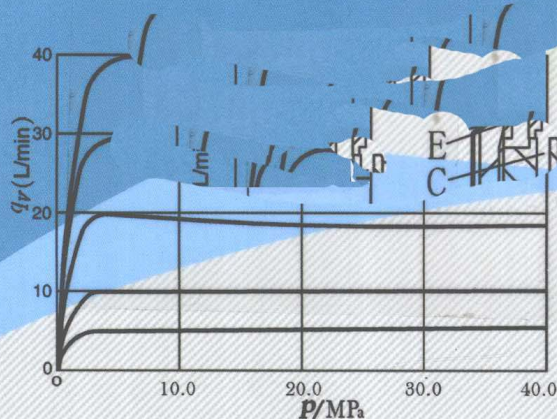




21世纪液压气动元件经典图书系列

液压螺纹插装阀

机械工程学会流体传动与控制分会 组编
张海平 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





21 世纪液压气动元件经典图书系列

液压螺纹插装阀

机械工程学会流体传动与控制分会 组编

张海平 编著

阎耀保 主审



机械工业出版社

前 言

本书是一位在中国和德国多年从事液压技术开发的工程师专门为年轻一代的中国同行总结的著作，也是一位大学液压课教师为刚走出大学校门，即将从事液压技术工作，面对一大堆实际问题的毕业生而写的。本书介绍了一些世界知名公司近年来液压阀的研发内容，可供大学教师在改编修订教材时参考。

螺纹插装阀作为一种特殊安装连接形式的液压阀，自20世纪70年代以来获得了长足的发展。相对其他各类安装连接形式，如管式、板式，螺纹插装方式是变型最丰富的，品种不胜枚举，已有几万种之多，几乎能实现所有液压阀的功能，已成为液压阀的主流安装连接形式之一，在欧美已被广泛应用。随着中国现代化的进程，特别是行走液压机械应用的日益广泛，螺纹插装阀在中国的应用也突飞猛进。

笔者自1990年以来，先后使用过Waterman、Integrated Hydraulics、Sterling Hydraulics、Hydraforce、Sun Hydraulics、Bucher-Frutigen、Comatrol、Tarp 和 Bosch Rexroth 等多个国际知名公司的多类螺纹插装阀，还对Vickers、Delta Power 和 IMAV 等公司的螺纹插装阀作过比较测试，设计的三十多种集成块已生产了几万件并经过了实践的考验。希望借此书向读者介绍自己的经验、体会和研究心得。帮助液压系统设计师，制造、装配与维修人员了解螺纹插装阀，从众多供应商几千页的产品样本中正确选择、正确应用螺纹插装阀，架设一座通向产品样本的桥，是编写本书的首要目的。

了解多种阀，就有较多的手段去组建较经济、功能较好的液压系统。本书取材于多个螺纹插装阀生产公司的英文、德文产品的样本、技术资料，参考了这些公司的一些培训教材、内部研究报告和其他未公开发行的资料，结合笔者自己的研究经验和多年的实际工作体会，系统全面地介绍各种螺纹插装阀的功能、特性、测试方法，然后分门别类，通过剖面图介绍其结构和工作原理，结合特性曲线介绍其性能和应用场合，并列出了一些市场可购产品的型号，以协助液压系统设计师选用。

由于液压产品的应用极其广泛，一个液压阀的性能，对某些应用是不可接受的缺点，但对另一些应用则很可能是求之不得的优点。孰优孰劣，要根据具体应用来分析判断。本书将通过多种回路来阐明这一点。希望通过示例使读者掌握这样的分析判断能力。

我们都想创新。但是，创新从何而来？俗话说，“熟读唐诗三百首，不会做

诗也会吟。”著名的液压专家路甬祥教授指出，“在我们学科大量是集成化的创新应用，根据应用的需要和需求，把已有的技术，最适合的技术集成起来，组成一个新的技术，这也是创新，而且是非常有作为的创新。”博采已有的技术，融会贯通之后，新主意就容易出来了。

螺纹插装阀技术既不是新技术，也不是什么了不起的技术，但是是一个能解决问题的技术，一个不难掌握的技术，一个有生命力的技术，一个商机。

本书给出了许多细节，因为实际工作的成功避不开大量细节。有许多初看很理想的计划方案，最终败于一些细节。这就是为什么德国工程师常说“魔鬼总是躲在细节里”。有实际工作经历的中国液压工程技术人员一定也会有同感。

为使读者有更深入的感性认识，本书摘录了一些产品的剖面图、特性曲线和性能数据作为实例。但是，笔者不打算也不可能用本书取代产品目录。因为，如果罗列产品的所有数据，就太冗赘了；再者，螺纹插装阀技术还在不断发展，产品目录也在年年更新；第三，生产商对产品样本上的数据承担责任，若交货与之不符，可以退货，本书则不可能承担这一责任。摘录的特性曲线和性能数据只是部分，要看完整的，请查阅原版产品样本。还需要声明的是，举例引用产品的数量多少与生产商的规模及产品质量无关。之所以选择这些产品做例子，无非是因为曾经用过，或比较熟悉，或正好手头上相关资料较多的缘故。本作者无意在此书中为任何一个生产厂商做广告。

本书中，给出了一些液压技术词汇的英文，希望对读者阅读原版产品样本有所帮助。目前大多数国产液压元件与世界先进水平还有差距。因此，无论是选用，还是仿制、研发赶超，都要用到国外的产品说明书。而许多外国产品样本的中文译本，一是没有使用常用的专业术语；二是一些译者非液压专业技术人员，他们不能理解原文的上下文关系，因此译文读起来很费解；三是，这些中文版本大多更新不及时，常有印刷错误，也不像英文原版那样承担相应的责任。

本书也是为刚走出校门，要从事液压系统设计，面对一大堆实际问题的大学毕业生和研究生而写的。目前，由于种种原因，部分大学液压传动教科书内容陈旧，偏重理论公式，脱离实际，苦读多年的大学生面对实际液压问题，往往一头雾水，不知从何下手。

中国将成为现代制造强国，需要一大批能真正解决实际问题的工程技术人员。本书的宗旨是，“解决一个实际问题，胜过写十篇脱离实际的论文”。反对理论脱离实际。主张理论要以测试为基础。

本书面向实际应用，回避了繁复的理论计算公式，所给出的少量公式只是为了帮助定性分析或粗略的估算。作者并不反对计算，相反，主张在规划设计阶段应该尽可能地去估算。本书所附的光盘中附有表格软件，供液压估算用。

但是，从自己在中国和德国多年从事液压系统数字仿真研究及长期在工厂做液压系统开发工作的经验，深深体会到，由于液压系统的非线性和实际工况的复杂性，精确计算至今对绝大多数应用是不实际的，甚至是不可能的。如果连稳态的一些基本状况都不能定性地分析清楚，又谈什么瞬态特性的定量计算呢？

笔者主张，液压技术人员少玩弄公式，多研究（液压元件的性能）曲线。因为曲线可测可验证，公式只能作为辅助解释分析曲线的工具。

认识了解液压阀最好也是最终的方法，就是：

- 根据阀的结构了解其工作原理；
- 根据曲线认识其性能；
- 根据应用选择适当的产品；
- 根据测试最终确定是否适用。

本书所阐述的各类螺纹插装阀的性能要求及测试方法，对其他各种液压阀也是适用的。

笔者参考了世界液压强国德国的多本大学液压教材，对一些文献，包括国际标准和国家标准及原版产品样本，提出了商榷意见，对液压教科书中的一些概念进行了探讨，如对稳态液动力的分析、对溢流阀瞬态特性的测试等。这些都可供大学教师在改编修订教材时参考。

本书假定读者已学过基础的液压教科书，对液压技术已有初步的了解。

本书除第1章绪论外，各章基本自成体系，因此可跳读，供查用。各章的概述应该读，后面的类型举例可以根据需要选读。

本书所附光盘中有各章的幻灯片演示文件，其中大多数系彩图（彩图的原因为各大公司提供，未作任何修改，有的不符合国家制图规范，有的有错误，读者只能作为参考），比书中的黑白图要易懂得多，建议读者在阅读本书时，同时利用计算机观看相应的演示文件。

本书由同济大学閻耀保教授主审，他对本书初稿作了细致的审阅，提出了很多宝贵的意见。同济大学讲师李晶博士、閻耀保教授研究室2010届本科毕业生协助进行部分引文的翻译工作。在此一并感谢。

本书中很多内容是笔者自己的研究所得，所以尽管多次检查反复修改，但错误难免。笔者衷心欢迎读者提出意见和建议，从而在出修订本时能得以改进和补充。笔者电子信箱：hpzhang856@sina.cn，还为本书开了一个博客 <http://blog.sina.com.cn/lwczf>，以收集读者反馈，并提供不断更新的勘误表。

笔者谨在此感谢黄人豪研究员，没有他的推动，我不会下决心写本书。借此机会，再次感谢我已故的硕士导师黄谊教授、我的博士导师陆元章教授和钟廷修教授所给予的指导，我也特别感谢我的博士后导师巴克（W. Backé）教授，是他提醒我，要注重实际，到实际中去，这整个地改变了我的专业学习的轨迹。

感谢德国洪堡基金会 (AvH-Stiftung) 曾给予的资助。

HYDRAFORCE、Sun Hydraulics、Parker Hannifin、EATON-Vickers 等公司为本书提供了最新的产品图片和数据。

为缩减篇幅, 在本书中使用了下列简称, 代替公司全名。

HF——HydraForce (海德福斯) INC 公司; SUN——Sun Hydraulics 公司; ET——Eaton-Vickers (伊顿) 公司; PK——Parker Hannifin (派克) 公司; ST——Sterling Hydraulics 公司; ih——Integrated Hydraulics 公司; BR——Bosch-Rexroth (博世力士乐) 公司; IFAS——Institut für Fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, RWTH 德国亚琛工业大学流体传动与控制技术研究所。

张海平

2011 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 液压阀的安装连接方式	1
1.1.1 管式	2
1.1.2 片式	3
1.1.3 板式	6
1.1.4 叠加式	8
1.1.5 插装式	9
1.1.6 各种连接方式的应用现状	15
1.2 螺纹插装阀的产销现状	16
1.3 螺纹插装阀的应用与局限性	17
1.3.1 应用方式	17
1.3.2 应用领域	22
1.3.3 螺纹插装阀的局限性与对策	22
1.4 认识及选用液压阀的途径	25
1.4.1 通过结构了解功能	25
1.4.2 通过曲线认识特性	26
1.4.3 根据应用选择液压阀	27
1.4.4 根据测试确认适用性	29
1.4.5 理论分析研究	29
1.5 阀的结构与作用在阀芯上的力	30
1.5.1 阀芯与开口形式	30
1.5.2 阀芯的驱动方式	32
1.5.3 弹簧力	33
1.5.4 静压力	34
1.5.5 稳态液动力	36
1.5.6 摩擦力与液压卡紧力	43
1.5.7 电磁力	44
1.6 液压阀的性能参数	48
1.6.1 阀的大小规格	48
1.6.2 压力	48
1.6.3 压差流量特性	50
1.6.4 流量	51

1.6.5	泄漏	52
1.6.6	正常工作粘度范围	52
1.6.7	密封材料	53
1.6.8	正常工作温度	53
1.6.9	抗污染性	54
1.7	好的液压阀是试出来的	54
1.7.1	特性测试	55
1.7.2	耐压测试	55
1.7.3	寿命测试	56
1.7.4	环境测试	57
1.7.5	出厂试验	57
1.8	关于本书内容	58
1.8.1	液压阀分类	58
1.8.2	本书章节划分	59
1.8.3	其他说明	60
第2章	溢流阀	61
2.1	概述	61
2.1.1	功能与应用	61
2.1.2	类型	63
2.1.3	稳态特性与测试	65
2.1.4	动态特性与测试	71
2.1.5	其他特性	77
2.2	普通型溢流阀	80
2.2.1	球阀型溢流阀	81
2.2.2	锥阀型溢流阀	82
2.2.3	滑阀型溢流阀	85
2.2.4	差动型溢流阀	86
2.2.5	增强阻尼型溢流阀	87
2.2.6	先导型溢流阀	88
2.2.7	软溢流型溢流阀	91
2.3	压力保险型溢流阀	94
2.4	带反向单向阀型溢流阀	96
2.5	双向溢流型溢流阀	99
2.5.1	二端口型溢流阀	99
2.5.2	三端口型溢流阀	101
2.5.3	带梭阀型溢流阀	101
2.6	可外控型溢流阀	103
2.6.1	失压开启型溢流阀	103

2.6.2 加压开启型溢流阀	104
2.6.3 卸荷加压型溢流阀	106
2.7 气控比例型溢流阀	107
2.8 电控开关型溢流阀	109
2.9 电控比例型溢流阀	110
2.9.1 概述	110
2.9.2 加载型溢流阀	111
2.9.3 卸载型溢流阀	113
第3章 顺序阀	115
3.1 概述	115
3.1.1 功能与应用	115
3.1.2 类型	116
3.1.3 稳态特性与测试	117
3.1.4 其他特性	120
3.2 二通常闭型顺序阀	120
3.2.1 直动型顺序阀	120
3.2.2 先导型顺序阀	121
3.2.3 保险型顺序阀	124
3.2.4 加压开启型顺序阀	126
3.2.5 加压卸荷型顺序阀	128
3.2.6 带反向单向阀型顺序阀	130
3.2.7 气控比例型顺序阀	133
3.3 二通常开型顺序阀	134
3.3.1 加压关闭型顺序阀	134
3.3.2 加压卸荷关闭型顺序阀	136
3.4 三通型顺序阀	138
3.4.1 普通型顺序阀	138
3.4.2 保险型顺序阀	140
3.4.3 加压换向型顺序阀	142
第4章 减压阀	144
4.1 概述	144
4.1.1 功能和类型	144
4.1.2 应用举例	145
4.2 二通型减压阀	147
4.2.1 稳态特性与测试	147
4.2.2 动态特性与测试	151
4.2.3 直动型减压阀	153
4.2.4 先导型减压阀	153

4.2.5	气控比例型减压阀	155
4.2.6	电比例型减压阀	156
4.3	三通型减压阀	157
4.3.1	稳态特性与测试	157
4.3.2	动态特性与测试	160
4.3.3	直动型减压溢流阀	161
4.3.4	先导型减压溢流阀	163
4.3.5	外控加压型减压溢流阀	166
4.3.6	外控卸荷型减压溢流阀	167
4.3.7	气控比例型减压溢流阀	168
4.3.8	电比例型减压溢流阀	169
第5章	平衡阀	175
5.1	概述	175
5.1.1	功能	175
5.1.2	应用	176
5.1.3	类型	178
5.1.4	控制比与其在系统中对控制压力的影响	179
5.1.5	溢流压力的设定	181
5.1.6	稳态特性与测试	181
5.1.7	系统稳定性和瞬态响应特性的测试	186
5.1.8	其他特性	189
5.2	三端口型平衡阀	190
5.2.1	普通三端口型平衡阀	190
5.2.2	带附加阻尼型平衡阀	194
5.2.3	带附加溢流功能型平衡阀	195
5.3	四端口型平衡阀	196
5.3.1	带单独背压端口型平衡阀	196
5.3.2	无背压型平衡阀	198
5.3.3	无背压无溢流功能型平衡阀	200
第6章	流量控制阀	202
6.1	节流阀	203
6.1.1	功能、类型和应用	203
6.1.2	特性	204
6.1.3	节流阀在系统中的作用方式与特性	205
6.1.4	普通节流阀	210
6.1.5	单向节流型节流阀	212
6.1.6	电比例型节流阀	215
6.2	二通流量阀	218

6.2.1	功能原理、类型与应用	218
6.2.2	稳态特性与测试	220
6.2.3	动态特性与测试	222
6.2.4	节流口可调型二通流量阀	224
6.2.5	节流口不可调型二通流量阀	226
6.2.6	电比例型二通流量阀	228
6.2.7	带单向阀型二通流量阀	231
6.2.8	双向型二通流量阀	233
6.2.9	电比例双向型二通流量阀	234
6.3	三通流量阀	235
6.3.1	功能、类型与应用	235
6.3.2	稳态特性与测试	239
6.3.3	动态特性与测试	241
6.3.4	节流口可调型三通流量阀	242
6.3.5	节流口不可调型三通流量阀	243
6.3.6	电比例型三通流量阀	245
6.3.7	四端口型三通流量阀	247
6.4	定压差阀	249
6.4.1	功能与类型	249
6.4.2	特性与测试	251
6.4.3	二通口型定压差阀	255
6.4.4	三通口型定压差阀	255
6.4.5	四通口型定压差阀	256
6.5	管道破裂保险阀	258
6.5.1	功能与类型	258
6.5.2	特性与测试	259
6.5.3	旋入型管道破裂保险阀	260
6.5.4	埋入型管道破裂保险阀	262
第7章	分流集流阀	264
7.1	概述	264
7.1.1	功能与工作原理	264
7.1.2	类型与应用	266
7.1.3	分流特性与测试	270
7.1.4	压差流量特性与测试	272
7.2	分流阀	273
7.3	分流集流阀	273
7.3.1	普通型分流集流阀	273
7.3.2	中位闭型分流集流阀	275

7.3.3	带液压缸终点补偿型分流集流阀	276
7.3.4	防马达空转型分流集流阀	277
第8章	单向阀和梭阀	279
8.1	单向阀	279
8.1.1	概述	279
8.1.2	旋入型单向阀	284
8.1.3	埋入型单向阀	288
8.1.4	带反向溢流型单向阀	291
8.2	液控单向阀	292
8.2.1	概述	292
8.2.2	液控开型单向阀	297
8.2.3	双液控开型单向阀	301
8.2.4	液控关型单向阀	303
8.2.5	液控开关型单向阀	304
8.3	梭阀	305
8.3.1	概述	305
8.3.2	二入口型梭阀	308
8.3.3	三入口型梭阀	311
8.3.4	四入口型梭阀	312
第9章	电磁换向阀	313
9.1	概述	313
9.1.1	功能与类型	313
9.1.2	压差流量特性与测试	314
9.1.3	工作范围与测试	316
9.1.4	切换过程中的连通状况	321
9.2	电磁线圈与开关型衔铁套筒组件	322
9.2.1	电磁线圈	322
9.2.2	线圈测试	327
9.2.3	开关型衔铁套筒组件	328
9.3	二位二通常闭型电磁阀	330
9.3.1	滑阀型电磁阀	331
9.3.2	单向密封型电磁阀	333
9.3.3	双向密封型电磁阀	337
9.4	二位二通常开型电磁阀	339
9.4.1	滑阀型电磁阀	339
9.4.2	单向密封型电磁阀	341
9.4.3	双向密封型电磁阀	346
9.5	二位三通型电磁阀	348

9.6	二位四通型电磁阀	354
9.7	二位六通型电磁阀	357
9.8	三位三通型电磁阀	358
9.9	三位四通型电磁阀	358
9.10	三位五通型电磁阀	360
9.11	电磁阀手动应急机构	361
9.11.1	拉出-自动复位型手动应急机构	361
9.11.2	拉出-可卡住型手动应急机构	361
9.11.3	压下-自动复位型手动应急机构	362
9.11.4	压下-可卡住型手动应急机构	363
9.11.5	拉出压下型手动应急机构	364
第10章	电比例换向阀	365
10.1	概述	365
10.1.1	结构	365
10.1.2	功能	365
10.1.3	类型	366
10.2	比例型衔铁套筒组件	366
10.2.1	结构	366
10.2.2	特性	366
10.3	控制放大器	369
10.3.1	脉宽调制	370
10.3.2	伴生颤振	371
10.3.3	高频脉宽调制	371
10.3.4	恒电流输出	372
10.3.5	消除死区	373
10.3.6	增益调整	373
10.3.7	使能信号与急停	374
10.3.8	斜坡输出	374
10.3.9	输入信号检查	374
10.3.10	接头	375
10.3.11	数字型控制器	376
10.4	二位三通电比例换向阀	377
10.5	二位四通电比例换向阀	378
10.6	三位四通电比例换向阀	378
第11章	液控换向阀	381
11.1	概述	381
11.1.1	功能与类型	381
11.1.2	应用举例	384

11.1.3	液控特性与测试	386
11.1.4	其他特性	388
11.2	二位二通常闭型液控换向阀	389
11.3	二位二通常开型液控换向阀	392
11.4	二位三通型液控换向阀	396
11.4.1	三端口型液控换向阀	396
11.4.2	四端口型液控换向阀	397
11.4.3	五端口型液控换向阀	399
11.5	二位四通型液控换向阀	402
11.6	三位三通低压通型液控换向阀	402
11.7	三位三通高压通型液控换向阀	405
11.8	三位四通开关型液控换向阀	406
11.9	三位四通比例型液控换向阀	408
第 12 章	液压逻辑元件	409
12.1	概述	409
12.1.1	功能	409
12.1.2	类型	409
12.2	开关型液压逻辑元件	410
12.2.1	概述	410
12.2.2	三端口卸荷开启型液压逻辑元件	415
12.2.3	三端口加压开启型液压逻辑元件	418
12.2.4	四端口型液压逻辑元件	418
12.3	调节型液压逻辑元件	420
12.3.1	概述	420
12.3.2	进口压力调节型液压逻辑元件	423
12.3.3	出口压力调节型液压逻辑元件	425
第 13 章	气控换向阀	429
13.1	概述	429
13.1.1	功能与应用	429
13.1.2	类型	429
13.1.3	性能与测试	429
13.2	二通常闭型气控换向阀	429
13.3	二通常开型气控换向阀	430
13.4	三通型气控换向阀	431
第 14 章	手动换向阀	433
14.1	概述	433
14.1.1	功能	433
14.1.2	类型	433

14.1.3 应用	433
14.1.4 性能	434
14.2 二位二通型手动换向阀	434
14.3 二位三通型手动换向阀	437
14.4 二位四通型手动换向阀	438
14.5 三位三通型手动换向阀	440
14.6 三位四通型手动换向阀	441
第 15 章 流量压力阀的调节及保护元件	443
15.1 概述	443
15.2 手轮调节型调节及保护元件	444
15.3 使用工具型调节及保护元件	444
15.4 留痕迹型调节及保护元件	445
15.5 不可改动型调节及保护元件	447
第 16 章 螺纹插装阀集成块设计与制作	448
16.1 对集成块的要求	448
16.1.1 液压回路图	448
16.1.2 空间布局	450
16.2 集成块体的设计	450
16.2.1 块体材料	450
16.2.2 设计前的准备工作	452
16.2.3 CAD 软件	454
16.2.4 设计步骤	455
16.3 集成块体的制作	459
16.3.1 加工过程和刀具	459
16.3.2 数控加工中心程序	460
16.3.3 去毛刺	460
16.3.4 块体检验	460
16.3.5 标注	461
16.3.6 表面处理	461
16.4 集成块装配与测试	462
16.4.1 组装	462
16.4.2 测试	462
16.5 几个集成块实例	463
附录	472
附录 A 阀孔孔型	472
附录 B 液压估算	474
后记	481
参考文献	483

第1章 绪 论

本书介绍液压螺纹插装阀。

液压螺纹插装阀是使用螺纹直接旋入安装的液压阀。

那么，什么是液压阀？

国家标准 GB/T 17446—1998（2004 确认）《流体传动系统及元件 术语》（等同于 ISO 5598：1985）中定义阀——“用来调节流体传动回路中流体方向、压力、流量的装置。”

作者认为，这个提法并未点出阀的本质，只说到了阀的用途，或者说是良好愿望。愿望，尽管良好，却不一定能实现。因为，能否真正调节回路中流体的方向、压力或流量，还取决于回路中其他部件的状态。比如说，泵根本没有运转，或另有一旁路通油箱，那么无论怎样改变溢流阀，也无法调节压力。

液压阀，其实，只是“可以改变液流通道开口度的装置”。这才是液压阀的本质。只有从这个本质出发，才能全面理解液压阀在实际液压系统中的种种效应和现象。本章 1.5 节将对液压阀的这一本质展开深一步的阐述。

阀是液压控制系统中最关键的元件。液压系统可以没有泵，但是不能没有液压阀。

液压技术发展至今，液压阀种类已极其繁多，令人眼花缭乱，为了帮助梳理出一些脉络，从而方便了解掌握，可以从不同的角度来作一些分类。例如

从功能角度看，可以分为换向阀、顺序阀、溢流阀、减压阀、流量阀（调速阀）等；

从结构角度看，可分为滑阀、球阀、锥阀、滑锥阀等；

从控制方式来看，可分为手动、机动、液动、气动、电磁开关驱动、电液动、电磁比例驱动等；

从工作方式来看，可分为开关阀和连续调节阀。

等等。

1.1 液压阀的安装连接方式

从安装连接成系统的方式的角度来看，液压阀大致可分为管式、板式、片式、叠加式和插装式等几类。

1.1.1 管式

管式阀（line mount valve）的进出油口都带有内螺纹，通过相连接的管接头与管道，和其他元件相连。有二端口、三端口或多端口，见图 1-1、图 1-2。

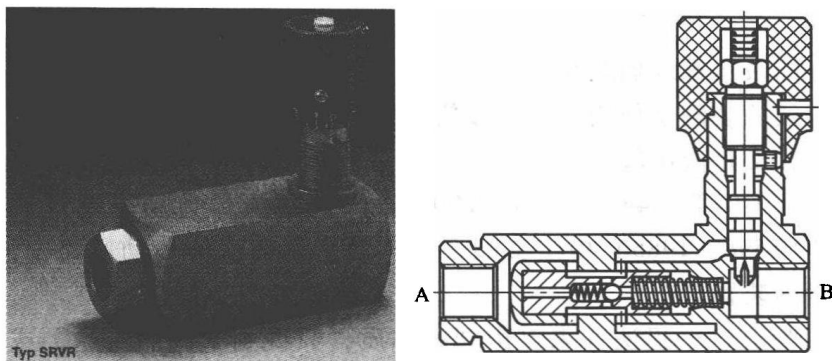


图 1-1 管式阀示例（Hydac）

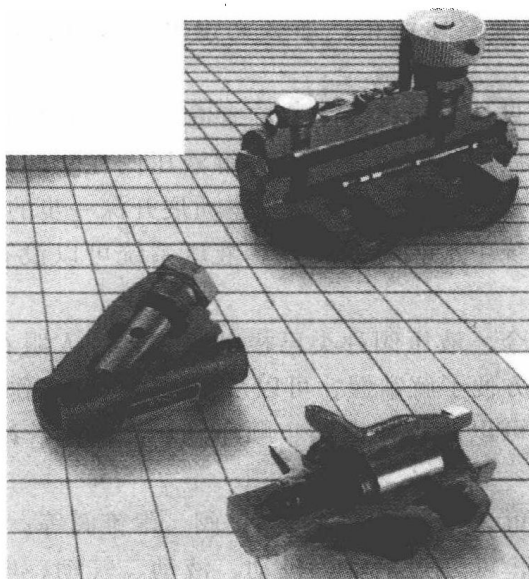


图 1-2 管式阀示例（BR）

管式是历史最悠久的一种安装连接方式，20 世纪初起就普遍使用，至今还继续有使用。

管式阀是各种安装连接方式中唯一的一种独立完整的阀：接上管接头和管道就能用，不需要其他任何配件。

随着液压系统日益复杂，这种安装方式的弱点就日益凸显：

- 1) 元件分散布置，占地大。
- 2) 可能泄漏的部位多。