

液压传动与控制

王懋瑶 主编

机电工程
新技术
基础丛书



前 言

本书可以作为液压新技术培训教材，对大专院校有关专业及研究生也是重要的参考书。

本书主要取材于目前国内外液压技术新理论、新元件和新系统的具体应用，既有理论，又联系实际。在阐明基本概念的基础上，着重于新理论、新技术的应用。

全书共分十章，由王懋瑶同志主编，朱骥北，张继德同志主审，参加编写的有：宫嘉成同志编写第一、二章及附录，张世同志编写第三、五章，阎祥安同志编写第六、八章，王懋瑶同志编写第四、七、九、十章，并负责统稿工作。

由于编者水平有限，时间仓促，难免有不少问题，敬请读者批评指正。

编者

1984.12.

《机电工程新技术基础丛书》出版说明

科学技术的飞速发展，要求在机械工业部门从事技术和管理工作的干部学习和了解有关专业的新水平、新成就、新技术、新知识。为了贯彻机械工业“上水平、上质量、上品种，提高经济效益”这个总方针，帮助在职工程技术人员学习业务，更新知识，更好地为祖国的四化建设服务，我们特组织编写了这套《机电工程新技术基础丛书》，第一批将陆续出版十七种。这十七种书是：《工程数学方法》、《弹塑性力学》、《机械优化设计》、《电机、电器优化设计》、《机电产品可靠性技术》、《能源利用与开发》、《液压传动与控制》、《测试技术》、《环境污染与治理》、《材料科学及其新技术》、《数控技术》、《微型计算机应用技术》、《电子电路技术》、《自动控制工程》、《系统工程概论》、《管理数学》、《技术经济分析》。

这套丛书的读者对象，主要是六十年代以来的大学和中专毕业生，现在从事机电产品的设计、制造工艺、技术改造、设备维修、质量管理、技术管理等工作的工程技术人员。

丛书内容着重于七十年代以来机电工程和管理工程有关学科的最新发展。重视阐明物理概念的基础上，介绍新技术、新理论的应用，以及如何进行有效管理和提高经济效益。为了适应更多读者的需要，丛书以介绍基础性知识为主，不过多地作专业理论的探讨和论证。使它既可以作为在职技术干部和管理人员的培训教材，又可兼顾自学需要，使具有一般高等数学、普通物理知识的读者能够看懂。

由于条件和水平所限，丛书内容难免有不妥之处，希望读者提出宝贵意见，帮助我们改进提高。

目 录

前言

第一章 液压传动与控制基础知识.....	1
§1-1 液压传动与控制基本概念	1
一、基本概念	1
二、控制的形式	1
三、液压传动的优缺点	2
§1-2 液压油	4
一、液压油的分类	4
二、液压油的粘度和粘温特性	5
三、液压油的使用要求	5
四、液压油的选用	7
§1-3 流动液体力学	8
一、基本概念	8
二、连续性方程	11
三、欧拉运动方程	12
四、伯努利方程	13
五、纳维-斯托克斯方程	15
六、动量方程	20
§1-4 流动液体阻力	22
一、层流、紊流和雷诺数	22
二、圆管中的层流流动	23
三、圆管中的紊流流动	25
四、进口起始段流动	26
五、局部压力损失	27
§1-5 孔口及缝隙流动	28
一、小孔流量计算	28
二、缝隙流量计算	30
§1-6 液压卡紧、冲击、气穴	34
一、液压卡紧	34

二、液压冲击	37
三、气穴	39
第二章 液压油的污染与控制	41
§2-1 造成油液污染的原因	42
§2-2 油液污染后的危害	43
§2-3 油液污染标准和检验方法	45
一、污染度	45
二、检测方法	47
§2-4 过滤器	50
一、过滤器的合理选择	50
二、过滤比 β	52
三、描述过滤过程的数学模型	52
四、过滤器的安装与检查	57
§2-5 油液污染的控制	57
一、减少潜伏的污物	57
二、防止污物侵入, 主要从装配和使用两方面加以控制	58
三、防止新生的污物	58
§2-6 油液变质的危害与控制	58
第三章 新型液压传动介质	61
§3-1 抗磨液压油	62
一、特点	62
二、组成	63
三、使用情况	63
§3-2 抗燃液压介质	64
一、抗燃液压介质的种类与特性	64
二、抗燃液压介质的液压元件	67
§3-3 高水基液压介质	69
一、高水基液压介质的特点	70
二、高水基液压介质的种类	70
三、使用高水基液压介质应注意的事项	74
四、今后展望	77
第四章 电液比例控制	79
§4-1 电液比例控制基本概念	79

VI

一、电液比例控制	79
二、电液比例控制的优点	80
三、电液比例阀的分类	81
§4-2 电液比例阀的特性	82
一、静态特性	82
二、动态特性	84
§4-3 电—机械比例转换装置	85
一、电—机械比例转换装置的要求	85
二、移动式力马达的工作原理及吸力特性	86
三、电磁铁的结构特点与性能参数	95
§4-4 电液比例控制的电控制器	99
一、电控制器主要参数的性能和要求	100
二、电控制器的类别	101
三、电控制器基本型式	101
§4-5 电液比例压力控制	105
一、结构与工作原理	105
二、特性分析	106
三、主要参数设计的确定	109
四、电液比例压力阀应用回路	110
§4-6 电液比例流量控制	115
一、电液比例调速阀的结构与工作原理	115
二、电液比例调速阀的静态特性	117
三、比例调速阀结构参数的确定及对特性的影响	119
四、电液比例调速阀应用举例	121
五、新型的比例流量阀	122
§4-7 电液比例换向阀	130
一、比例换向阀的结构和工作原理	130
二、静态特性	131
三、电液比例换向阀的应用实例	135
§4-8 其他电液比例控制元件	136
一、电液比例复合阀	136
二、电液比例控制泵	139
第五章 二通插装阀及其应用	142

§5-1 二位三通插装阀的基本结构与工作原理	143
一、插装阀的基本结构	143
二、方向控制插装阀	147
三、压力控制阀	156
§5-2 三通插装系统的应用举例	166
一、剪板机液压控制系统	167
二、塑料注射机液压控制系统	169
第六章 电液伺服控制与应用	179
§6-1 电液伺服控制的基本原理	179
一、工作原理	179
二、系统的组成与分类	181
三、电液伺服阀	182
§6-2 电液伺服控制的基础知识	184
一、职能方框图	184
二、数学模型	185
三、拉氏变换与传递函数	192
四、典型环节	195
五、函数方块图	200
六、频率特性	204
七、稳定性	210
八、稳态误差	215
九、瞬态响应	217
§6-3 电液伺服系统实例	225
一、带材跑偏控制系统	225
二、地震模拟试验装置	230
三、海浪模拟试验装置	232
四、高层建筑减振装置	233
五、大型材料试验机	234
第七章 液压系统噪声与控制	237
§7-1 液压噪声控制的声学基础	238
一、声波与声速	238
二、声压与声压级	240
三、声功率与声功率级	243

VIII

四、响度与响度级	246
五、噪声的测量方法	247
§7-2 液压装置的噪声源	251
一、机械振动	252
二、压力脉动与压力急剧变化	253
三、气穴与气蚀	256
四、水击现象	258
五、紊流与涡流	264
§7-3 液压泵的噪声与控制	265
一、齿轮泵	265
二、叶片泵	269
三、柱塞泵	271
§7-4 液压阀的噪声与控制	275
一、溢流阀	275
二、换向阀	280
三、流量阀	281
§7-5 液压管路的噪声与控制	284
一、管路产生噪声的原因	284
二、降低管道噪声的措施	285
§7-6 油箱的噪声与控制	294
一、油箱产生噪声的原因	294
二、控制油箱产生噪声的措施	295
§7-7 隔声和吸声	297
一、隔声的对象与方法	298
二、隔声罩的隔声能力及要求	298
三、吸声材料	300
第八章 微型机在液压技术中的应用	303
§8-1 微型机及其在液压技术中的应用近况	303
一、微型机应用的基本知识	303
二、微型机在液压技术中的应用近况	313
§8-2 微型机在精密拉伸液压机上的应用	316
一、拉伸液压机简介	316
二、微型机在液体凹模拉伸液压机上的应用	316

§8-3	微型机液压数字仿真系统	324
一、	仿真技术简介	324
二、	计算机数字仿真步骤	325
三、	应用实例	326
§8-4	微型机在液压系统模型辨识中的应用	331
一、	模型辨识技术简介	331
二、	电液伺服阀模型辨识	332
第九章	液压系统节能	335
§9-1	新型传动介质与相应的元件	335
一、	高水基传动介质	335
二、	以海水作为传动介质	336
§9-2	提高元件效率, 发展低能耗元件	336
一、	提高液压泵和液压马达的效率	336
二、	减低控制阀的压力降	337
三、	降低控制功率发展低能耗元件	339
§9-3	提高液压系统的效率	340
一、	压力补偿控制	340
二、	负载感应控制	341
三、	适应控制	342
§9-4	电液比例控制节能系统	344
一、	定量泵 + 比例控制阀	344
二、	变量泵 + 比例节流阀	345
三、	变量泵 + 比例换向阀	345
四、	比例复合阀控制的功率匹配轻型柱塞泵	346
五、	多联泵 + 电液比例节流溢流阀	346
六、	采用中心供油泵站控制	347
§9-5	实行液压系统能量回收	348
一、	能量转换器	348
二、	能量蓄能器	348
三、	液压节能(包括能量回收)系统应用举例	350
第十章	液压系统故障检测诊断	356
§10-1	液压系统故障预兆	356
一、	振动	356

二、噪声	356
三、温升	357
四、爬行	357
五、进气	357
六、污染	357
七、泄漏	358
§10-2 液压回路设计不当引起故障.....	358
一、换向阀选用与回路设计不周	358
二、调速回路设计和调试不当	361
三、顺序阀使用不当	362
§10-3 液压故障参数与检测.....	363
一、故障参数	364
二、专用液压故障测试仪表及设备	365
§10-4 液压系统故障诊断方法.....	368
一、“四觉”诊断	368
二、顺序推断检测	368
三、采用故障测试器	370
§10-5 利用微型机对液压泵故障早期诊断.....	380
一、仪器的结构与使用	380
二、检测举例	382
三、滑履磨损量的评价方法	383
四、耳轴承磨损量的评价方法	384
五、微型机控制	385
六、检测结果	385
附表1	387
附表2	388
附表3	389
附表4	389
附表5	389
附表6	390
附表7	390
附表8	390

第一章 液压传动与控制基础知识

§1-1 液压传动与控制基本概念

一、基本概念

液压传动是用液压油作为工作介质，通过动力元件液压泵，将机械能转换为油液的压力能，然后再通过管道、控制元件，进入执行元件将油液压力能转换为机械能，驱动负载实现直线或回转运动。若要执行机构能够连续地准确的动作，则必须对液压系统的压力、流量或方向进行精确的控制。所以液压传动与控制是一个问题的两个方面。从机械量的输出来讲就是对力(F)、位移(S)和速度(V)的控制。

二、控制的形式

由于液压装置对传动和控制的精度要求是不同的，选用的元件和控制方式必然不同。归纳起来分：开关控制、比例控制和伺服控制。从局部看，它们虽有互相取代的可能，但就全面来看，三者会长期共存。

1. 开关控制

就是用普通的液压元件和电气元件组成的液压系统。一般用手动或电磁驱动来控制系统的压力、流量和方向。主要是控制油路的开关大小和方向，所输出的流量、压力是间断不连续的，而且控制精度低。

2. 电液比例控制

是由电液比例阀组成的电液比例控制系统。分开环控制与闭环控制两种方式。电液比例阀是由直流比例电磁铁和液压阀两部分组成。它按输入的电信号，连续地按比例地对油流的压力、流量和方向进行远距离控制。是一种新型的电—液控制元件。具有传递功率大、反应快、控制简单、可靠、使用维护方便，造价低

廉等明显的优点。电液比例控制适用于，液压系统要求对油流的压力和流量能连续地按比例地控制，但控制精度和速度响应要求不高，只要进行一般的污染控制就能保证系统正常工作。（详见第四章）

到了八十年代，人们把注意力集中到电反馈结构。如位置—电反馈的节流阀、调速阀、压力阀、换向阀；流量—位置—电反馈的流量阀；位置—电反馈的功率匹配叶片式液压泵等相继出现，把电液比例元件的静态特性（主要是精度）提高到可与电液伺服元件相比拟的水平。最近提出的流量—位移—力反馈原理，由于使用了耐高压的比例电磁铁及二通插装式结构，不仅结构得到了简化，而且静态性能及动态响应大大提高。

应该注意的是由于微型计算机的发展和应用把电液比例控制技术提高到一个新的阶段。

3. 伺服控制

是一种自动控制系统。该系统的主要元件是电液伺服阀。在这种系统中，输出量（机械位移、速度、加速度或力）能够自动地、快速而准确地复现输入量的变化规律。由液压拖动装置作动力元件所构成的伺服系统叫液压伺服系统。电液伺服阀的功能是，把微弱的电信号转换成相应的机械位移量，然后将机械位移量转换成相应的液压信号，并经放大，输出与电控信号成比例的液压功率。液压伺服系统具有重量轻、响应速度快、系统刚度大、控制精度高等优点。因此，目前已经广泛地应用于航天、航空、船舶、冶金、机械、化工和其他各个部门。（详见第六章）

三、液压传动的优缺点

液压传动与控制是一门新的学科，它的发展历史虽然很短，但发展的速度却非常迅速。目前，已经广泛应用于国防工业和民用工业各个部门。近几年又出现了，太阳跟踪系统、海浪模拟装置、飞机和舰船驾驶模拟器、地震再现、火箭助飞发射装置、宇航环境模拟、高层建筑防震系统及紧急刹车装置等均采用了液压技术。总之，液压技术发展如此之快，应用如此之广，其原因就

是液压技术有着优异的特点，归纳起来如下：

1.单位功率的重量轻、结构尺寸小。据统计，轴向柱塞泵单位功率的重量指标是 $1.5\sim 2\text{N/kW}$ ，而直流电机则为 $15\sim 20\text{N/kW}$ ，前者的单位功率重量只有后者的 $10\%\sim 20\%$ 。而用于直线往复运动的电动加力缸，由于有传动机构，单位功率的重量比为 350N/kW ，而液压缸是 4N/kW ，前者是后者的八十七倍。

2.能在很大范围内实现无级调速。调速方便，调速的范围比较大，达 $100:1$ 至 $2000:1$ 。虽然机械钢球变速器也能实现无级调速，但调速范围和传动功率都较小。柱塞式液压马达的最低稳定转速为 1r/min ，这是电传动很难达到的。

3.传递运动均匀平稳，反应速度快。冲击小，能高速启动、制动和换向。液压传动装置的换向频率，回转运动每分钟可达500次，往复直线运动每分钟可达 $400\sim 1000$ 次。

4.能传递较大的力或转矩。传递较大的力或转矩是液压传动的突出优点。例如人造金刚石必须在 $5\sim 6$ 万个大气压下才能制造出来。这样大的力或转矩，如采用液压传动和控制就能比较容易实现。

5.易实现功率放大。这在控制系统中是非常重要的一个特点，它可以减少执行部件所需要的操纵力，以微小信号输入而得到较大的功率输出。如采用伺服阀的操纵系统，在数控机床上可用极微弱的脉冲信号，然后经过液压转矩放大器来驱动执行部件。对于电液伺服控制系统其放大倍数可达30万倍。

6.液压传动装置的控制、调节比较简单，操纵比较方便、省力，易于实现自动化。尤其和电气控制结合起来，能实现复杂的顺序动作和远程控制。

7.液压系统易于实现过载保护。由于用油作为传动介质，故能自动润滑，元件使用寿命较长。

8.液压元件已标准化、系列化和通用化，便于设计和选用。

液压传动的缺点：

1.由于存在液体的泄漏和液体的压缩性，以及管路产生的弹

性变形，使液压传动无法保证严格的传动比。

2. 由于有机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失，因而总效率降低，不宜作远距离传动。

3. 工作时受温度变化的影响大，不宜在低温及高温条件下工作。

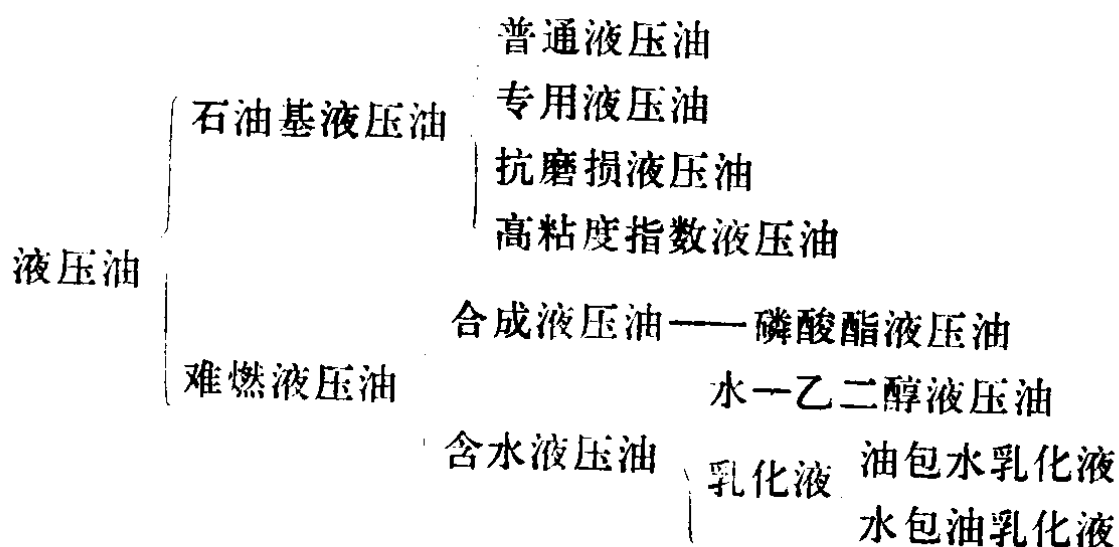
4. 液压元件制造精度要求高，使用维护比较严格。

5. 发生故障时不易查明原因，不易迅速排除。

§1-2 液 压 油

一、液压油的分类

液压油是液压传动系统的工作介质，又是液压元件的润滑剂。液压油分为石油基液压油和难燃液压油两大类。



1. 石油基液压油

这种液压油是以石油的精炼物为基础，加入各种为改进性能的添加剂而成。添加剂有抗氧添加剂、油性添加剂、抗磨添加剂等。不同工作条件要求具有不同性能的液压油，不同品种的液压油是由于精制程度不同和加入不同的添加剂而成。

2. 合成液压油

磷酸酯液压油是难燃液压油之一。它的使用温度范围宽，可达 $-54 \sim 135^{\circ}\text{C}$ 。抗燃性好，抗氧化安定性和润滑性都很好。缺点是与多种密封材料的相容性很差。有一定毒性。

3. 水—乙二醇液压油

这种液体由水、乙二醇和添加剂组成，而蒸馏水占35%~55%，因而抗燃性好。这种液体的凝固点低，达-50℃，粘度指数高（130~170），为牛顿流体。缺点能使油漆涂料变软。但对一般密封材料无影响。

4. 乳化液

乳化液属抗燃液压油，它由水、基础油和各种添加剂组成。分水包油乳化液和油包水乳化液，前者含水量达90%~95%，后者含水量达40%。

二、液压油的粘度和粘温特性

液体流动时，流层之间产生内部摩擦阻力的性质称为液体的粘性。粘性的大小用粘度表示。粘度分动力粘度 μ ，运动粘度 ν 和相对粘度。各国采用的相对粘度单位有所不同，我国采用恩氏粘度 $^{\circ}E$ 。

液体的粘度随液体的温度和压力的变化而变化的。压力增大时粘度亦增大。温度对液体的粘度有较大的影响，温度升高，油液粘度下降。油液粘度的变化，对液压元件的性能有较大的影响，因此要求液压油的粘度随温度的变化尽可能的小些。液体粘度随温度的变化叫粘温特性。国产油的粘温特性如图1-1所示。粘温特性还常用粘度指数来表示。粘度指数越高，液体的粘温特性越好，即温度变化后，粘度变化较小。液压油的粘度指数一般高于90。

三、液压油的使用要求

1. 适宜的粘度和良好的粘温性能。一般液压系统所用的液压油粘度范围为 $(11.5 \sim 60) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，最好在 $(20 \sim 40) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2. 润滑性能好。润滑性是指油液在运动副表面，作为分界层和润滑剂的能力。好的润滑性，即表明油膜对运动表面有牢固的附着能力，并且保证摩擦系数很小，从而增加元件的寿命。为了改善液压油的润滑性，可加入添加剂。如加入抗磨添加剂，在局

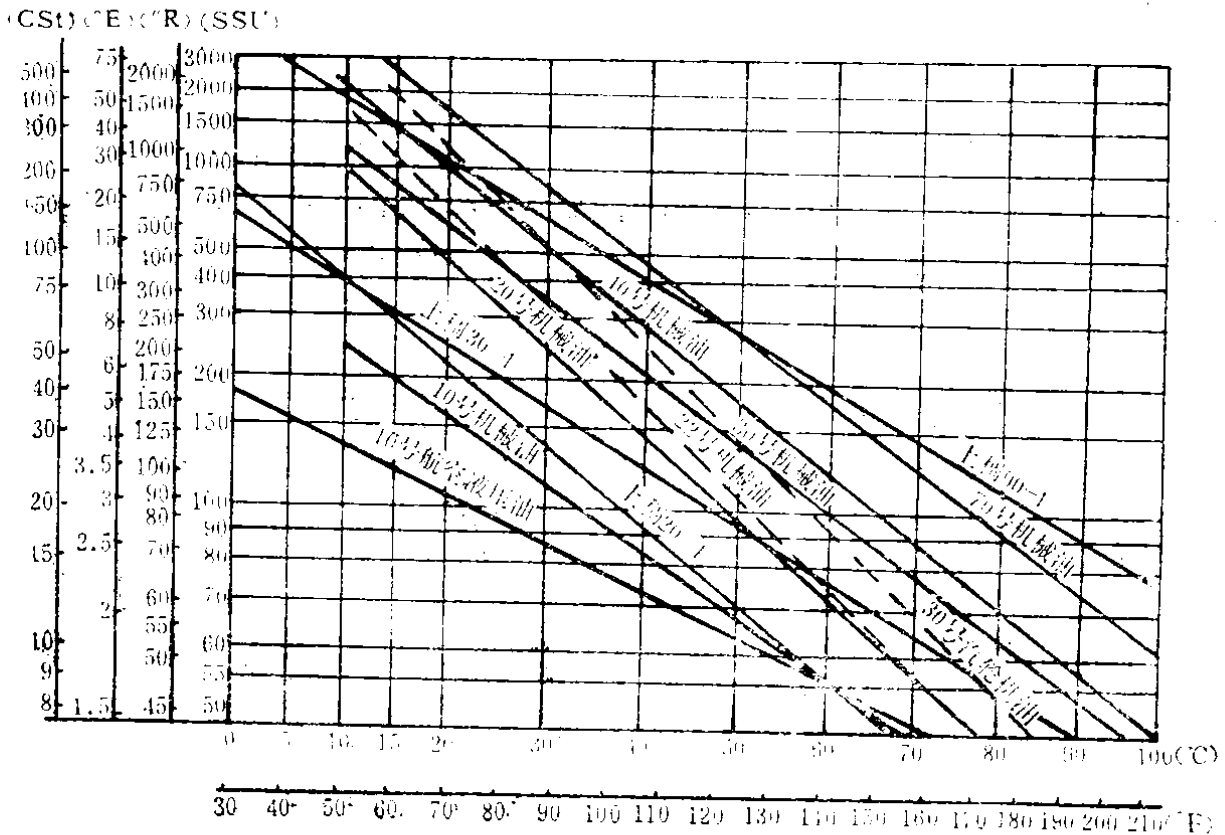


图1-1 部分国产油的粘温图

部产生高温高压时，可与金属表面产生化学反应，将油膜破裂处覆盖，因其生成物有良好的减磨特性，故提高了液压油的润滑性。

3. 稳定性要好。即对热、氧化、水解和剪切都有良好的稳定性，使用寿命长。油液抵抗其受热时发生化学变化的能力叫做热稳定性。由于这种化学变化是随温度升高而加快，所以一般把液压油的工作温度限制在 65°C 以下。氧化稳定性是指油液抵抗与空气中的氧或其他含氧物质发生化学反应的能力。油液抵抗其遇水分解变质的能力叫做水解稳定性。水解变质后的油液粘度降低，腐蚀性增加。油液在很大的压力下流过很小的缝隙或小孔时，由于机械剪切作用使油的化学结构发生变化，粘度减小，因而要求油液具有抗剪切稳定性。

4. 抗乳化性和抗泡性。抗乳化性是指油液中混入水份后的油水分离能力。抗泡性是指油液中混入空气后能把气泡从油中分离出来的能力。油液中混入水或空气，都会使油的润滑性降低，加

速油的变质。

5.相容性。相容性是指油液与系统中的各种密封材料、涂料等非金属材料互相接触时能否因化学反应而变坏的性能。相容性差的油液会使橡胶密封件等溶解，因此必须谨慎地使用。

6.凝固点低，流动性好。闪点高，抗燃性好。

四、液压油的选用

选择液压油时，应根据泵的种类、工作温度、系统压力等，确定适用粘度范围，再选择合适的液压油品种。对于不同的泵，油的推荐粘度范围见表1-1。几种液压油的性能见表1-2。

表1-1 油的推荐粘度范围 cSt(50°C)

工作温度 °C		5~40	40~80
叶片泵	6.9 MPa 以上	17~29	25~44
	6.9 MPa 以下	31~40	37~54
齿 轮 泵		17~40	63~88
轴 向 柱 塞 泵		25~44	40~98
径 向 柱 塞 泵		17~62	37~154

〔注〕运动粘度的法定计量单位： m^2/s ， $1\text{cSt} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$

表1-2 几种液压油的主要性能

油的品种	普通 液 压 油						数控 机床 液压油	航空 液压油	磷酸 酯液 压油	油包 水乳 化液
	10号	20号	30号	40号	60号	80号				
粘度cSt (50°C)	8~12	18~22	28~32	38~42	57~63	77~83	18~22	≥ 10		50~60
粘度指数， 不低于	95						175	130		135
闪点(开口) °C，不低于	140	170	180	190			170	92	220	
凝点°C，不 高于	-15	-10					-10	-70	-18	-20

在选用液压油时，粘度是一个重要参数，粘度的高低将影响