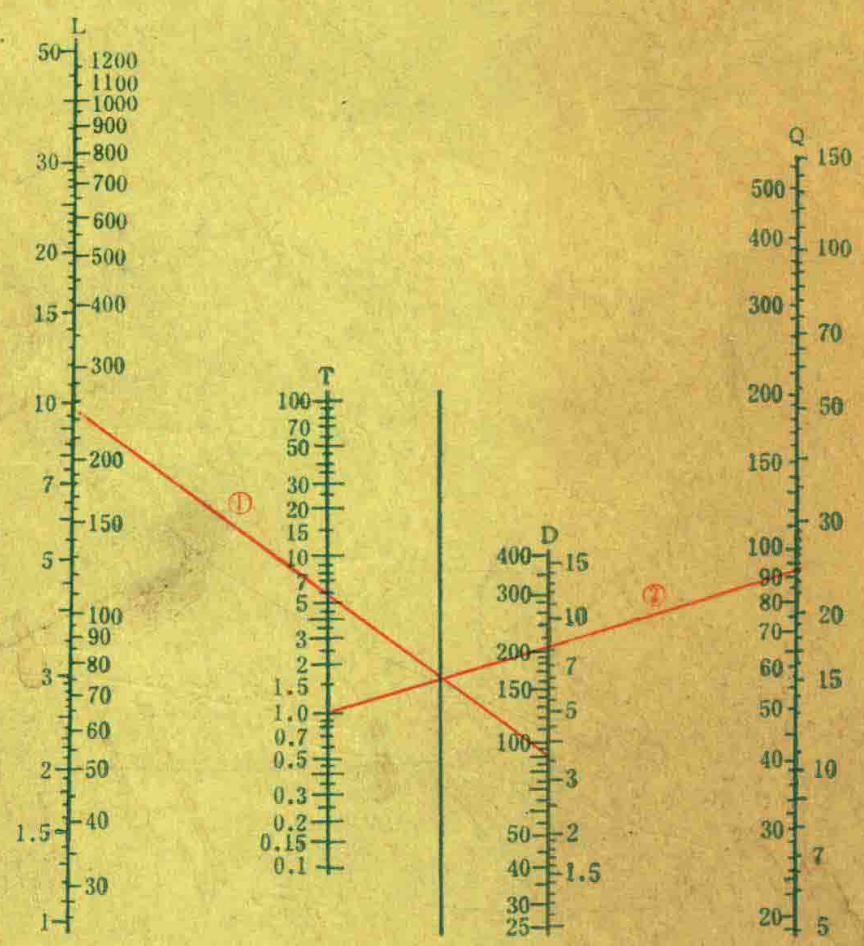


# 液压气动设计计算图表

罗志骏 编



机械工业出版社

# 液压气动设计计算图表

罗志骏 编



机械工业出版社

## 内 容 简 介

计算图表是一种比较简单而方便的计算工具。计算时只需用直尺在图表上作置尺手续，不必进行数字演算，便能得到算式的解答，其精确度可以满足一般工程计算的需要。本书介绍液压、气动设计工作中常用的计算图表和有关的基本理论、公式和技术资料，可供从事液压、气动设计工作的人员应用和参考。

### 液 压 气 动 设 计 计 算 图 表

罗志骏 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张25·插页1·字数612千字  
1981年11月重庆第一版·1981年11月重庆第一次印刷  
印数 0,001—8,300·定价 2.60 元

科技新书目：11—94

统一书号：15033·4727

# 前 言

计算图表是一种比较简单而方便的计算工具。利用图表进行设计计算，不仅能减轻繁琐的计算劳动，提高设计工作的效率，而且其答数的精确度也能满足一般工程计算的要求。

在液压、气动系统或元件的设计工作中，往往需要用很多时间进行计算，因而需要一种简便而迅速的计算方法和工具，以提高工作效率和计算的准确度。为了满足广大液压、气动设计工作者的需要，特编写了这本技术工具书。

本书不仅选编了很多常用的液压、气动计算图表，并且比较系统地叙述了液压传动与系统设计的基本理论和计算公式以及有关的技术资料，使读者能够更好地运用这些图表去解决计算工作中的问题。这不仅对于开始从事液压与气动工作的同志是需要的，而且对于经验较多的设计工作者也将有所裨益。

为了使读者能够自行绘制需要的计算图表，附录中还简要介绍了有关计算图表的绘制方法，供读者参考。

由于编者水平有限，书中会有不少缺点和错误，希望读者在使用本书的实践过程中，不断地提出批评、指正。

编 者

1978.8



机械工业出版社

# 目 录

第一章 液压油.....	1
1.1 对液压油的基本要求 .....	1
1.2 液压油的物理性质 .....	1
1.2.1. 重度 .....	1
1.2.2. 密度 .....	1
1.2.3. 比重 .....	2
1.2.4. 粘度 .....	2
1.2.5. 粘-温特性 .....	3
1.2.6. 粘度和压力的关系 .....	8
1.2.7. 油液的压缩性 .....	8
1.3 液压油的计算图表 .....	9
图表1-1 绝对粘度换算表 .....	9
图表1-2 绝对粘度与运动粘度换算 表 .....	10
图表1-3 相对粘度与运动粘度换算 表——(一) .....	11
图表1-4 相对粘度与运动粘度换算 表——(二) .....	12
图表1-5 相对粘度与运动粘度换算 表——(三) .....	13
图表1-6 绝对粘度-运动粘度-恩氏粘 度换算表 .....	14
图表1-7 绝对粘度-运动粘度-塞氏粘 度换算表 .....	15
图表1-8 绝对粘度-运动粘度-雷氏粘 度换算表 .....	16
图表1-9 绝对粘度-运动粘度-英寸 <sup>2</sup> / 秒换算表 .....	17
图表1-10 美国 ASTM 粘度-温度特性 图 .....	18
图表1-11 我国液压油粘度-温度特性 图 .....	19
图表1-12 调合油的混合粘度计算图 .....	20
图表1-13 粘度指数 (VI < 100) .....	21
图表1-14 粘度指数 (VI > 100) .....	22
图表1-15 粘度指数计算图——(一) .....	23
图表1-16 粘度指数计算图——(二) .....	24
图表1-17 液压油的压缩比 .....	25

图表1-18 油液混入空气后的体积弹性 模数 .....	26
第二章 液压流体力学 .....	27
2.1 流体静力学 .....	27
2.1.1. 帕斯卡定律 .....	27
2.1.2. 静压力 .....	27
2.1.3. 压力单位 .....	27
2.2 流体动力学 .....	28
2.2.1. 理想液体和稳定流动 .....	28
2.2.2. 液流连续性 .....	28
2.2.3. 管内流速 .....	28
2.2.4. 液能 .....	29
2.2.5. 伯努利定律 .....	29
2.2.6. 液体的动压力 .....	30
2.2.7. 托里西利定理 .....	30
2.3 液流状态和雷诺数 .....	31
2.3.1. 液流状态 .....	31
2.3.2. 雷诺数 .....	31
2.3.3. 临界雷诺数 .....	32
2.4 液流压力损失 .....	33
2.4.1. 沿程压力损失 .....	33
2.4.2. 局部压力损失 .....	35
2.4.3. 回转圆板的摩擦阻力和扭 矩损失 .....	48
2.5 通过小孔及缝隙的流量 .....	49
2.5.1. 流经小孔的流量 .....	49
2.5.2. 缝隙流量计算 .....	53
2.6 液压系统的水击现象和气穴现 象 .....	60
2.6.1. 液压系统的水击现象 .....	60
2.6.2. 气穴现象 .....	62
2.7 液压流体力学的计算图表 .....	63
图表2-1 液体静压力——(一) .....	63
图表2-2 液体静压力——(二) .....	64
图表2-3 管内流速——(一) .....	65
图表2-4 管内流速——(二) .....	66
图表2-5 液体动压力 .....	67
图表2-6 射流反作用力 .....	68

图表2-7	由流速求雷诺数——(一) .....	69	图表2-36	局部压力损失的当量管长 .....	98
图表2-8	由流速求雷诺数——(二) .....	70	图表2-37	小孔压力损失 .....	99
图表2-9	由流速求雷诺数——(三) .....	71	图表2-38	环状缝隙流量——(一) .....	100
图表2-10	由流量求雷诺数——(一) .....	72	图表2-39	环状缝隙流量——(二) .....	101
图表2-11	由流量求雷诺数——(二) .....	73	图表2-40	滑阀缝隙漏油量计算 .....	102
图表2-12	光滑管道的摩擦阻力系数 $\lambda$ .....	74	图表2-41	环状平面缝隙流量 .....	103
图表2-13	由流速求光滑管道的摩擦阻力系数 $\lambda$ .....	75	图表2-42	液压管路的压力冲击 .....	104
图表2-14	由粗糙度系数和雷诺数求管道摩擦阻力系数 .....	76	<b>第三章 液压泵和液压马达</b> .....		105
图表2-15	摩擦阻力系数 $\lambda$ 和雷诺数 $Re$ 的换算图(考虑管道粗糙系数) .....	77	3.1	基本特性 .....	105
图表2-16	根据雷诺数区分层流、紊流和求摩擦系数 .....	78	3.1.1	压力和流量 .....	105
图表2-17	由 $Q$ 求 $\gamma \frac{v^2}{2g}$ .....	79	3.1.2	扭矩 .....	106
图表2-18	由流速 $v$ 求层流时每米管道的压力损失 .....	80	3.1.3	功率 .....	106
图表2-19	小直径管道的压力损失(层流) .....	81	3.1.4	效率的分析 .....	107
图表2-20	大直径管道的压力损失(层流) .....	82	3.1.5	液压泵流量脉动率 .....	110
图表2-21	由流速 $v$ 求紊流时每米管道的压力损失 .....	83	3.1.6	液压马达的基本性能参数 .....	112
图表2-22	由流量 $Q$ 求紊流时每米管道的压力损失 .....	84	3.2	齿轮泵和齿轮马达 .....	113
图表2-23	直管压力损失——(一) .....	85	3.2.1	齿轮泵的分类 .....	113
图表2-24	直管压力损失——(二) .....	86	3.2.2	排量计算 .....	114
图表2-25	直管压力损失——(三) .....	87	3.2.3	齿轮泵的最佳侧板间隙 .....	114
图表2-26	直管压力损失——(四) .....	88	3.2.4	困油卸荷槽距离 .....	115
图表2-27	直管压力损失——(五) .....	89	3.2.5	齿轮轴负荷 .....	115
图表2-28	直管压力损失——(六) .....	90	3.3	叶片泵 .....	116
图表2-29	直管压力损失——(七) .....	91	3.3.1	概述 .....	116
图表2-30	直管压力损失——(八) .....	92	3.3.2	叶片泵的排量 .....	117
图表2-31	直管压力损失——(九) .....	93	3.3.3	叶片应力 .....	118
图表2-32	直管压力损失——(十) .....	94	3.3.4	定子曲线 .....	119
图表2-33	扩径管、折管和入口处局部压力损失 .....	95	3.3.5	配油盘 .....	120
图表2-34	弯头、三通、分支管和出口处局部压力损失 .....	96	3.4	径向柱塞泵和马达 .....	120
图表2-35	管道突然扩径和缩径处的局部压力损失 .....	97	3.4.1	概述 .....	120
			3.4.2	排量 .....	121
			3.4.3	柱塞头应力 .....	121
			3.4.4	径向柱塞泵的控制力 .....	121
			3.4.5	多作用式液压马达的排量 .....	122
			3.5	轴向柱塞泵和马达 .....	123
			3.5.1	概述 .....	123
			3.5.2	排量 .....	123
			3.5.3	柱塞的结构及设计 .....	124
			3.5.4	点接触式柱塞头部的接触应力 .....	125
			3.5.5	滑履的设计 .....	126
			3.5.6	压盘 .....	128
			3.5.7	缸体 .....	130

3.5.8. 配油盘.....	132	求 $q_2$ .....	177
3.5.9. 主轴.....	134	图表3-26 双作用叶片泵排量 $q$ ——(一)	
3.5.10. 花键的验算.....	143	求 $q_1$ .....	178
3.5.11. 滚动轴承.....	144	图表3-27 双作用叶片泵排量 $q$ ——(二)	
3.5.12. 滑动轴承.....	150	求 $q_2$ .....	179
3.6 液压泵和液压马达的计算图表.....	153	图表3-28 叶片应力.....	180
图表3-1 液压泵和液压马达的理论流量.....	153	图表3-29 径向柱塞泵排量.....	181
图表3-2 液压泵和液压马达的实际流量.....	154	图表3-30 柱塞球头与平面的接触应力.....	182
图表3-3 液压泵和液压马达的理论扭矩.....	155	图表3-31 径向柱塞泵的控制力.....	183
图表3-4 液压泵和液压马达的实际扭矩.....	156	图表3-32 多作用式径向柱塞马达的排量.....	184
图表3-5 液压功率.....	157	图表3-33 柱塞面积.....	185
图表3-6 机械功率.....	158	图表3-34 轴向柱塞泵的排量.....	186
图表3-7 求 $\frac{\Delta p}{\mu n}$ 或 $\frac{\mu n}{\Delta p}$ .....	159	图表3-35 柱塞头载荷.....	187
图表3-8 求 $\frac{\Delta p}{v n}$ .....	160	图表3-36 轴向柱塞泵配油盘压紧系数——(一)求窗口环状面积.....	188
图表3-9 几种液压泵的输油脉动率.....	161	图表3-37 轴向柱塞泵配油盘压紧系数——(二)求压紧系数 $f_L$ .....	189
图表3-10 圆周速度.....	162	图表3-38 扭矩、转速和功率.....	190
图表3-11 扭矩与切向力.....	163	图表3-39 轴的极断面系数(抗扭断面系数) $Z_p$ .....	191
图表3-12 转动惯量.....	164	图表3-40 扭转应力 $\tau$ .....	191
图表3-13 转动惯量换算图表.....	165	图表3-41 轴的直径 $d$ .....	192
图表3-14 回转角加速度.....	166	图表3-42 轴的弯曲惯矩 $I_x$ 和抗弯断面系数 $Z_x$ .....	193
图表3-15 回转体加速过程时间.....	167	图表3-43 承受弯矩和扭矩载荷轴的直径.....	194
图表3-16 回转体的转动能量与制动角度.....	168	图表3-44 两点支承轴的最大挠度.....	195
图表3-17 齿轮泵的近似排量.....	169	图表3-45 轴的扭转角.....	196
图表3-18 齿轮泵排量 $q$ ——(一)求概略面积 $X$ .....	170	图表3-46 矩形花键的最大扭矩.....	197
图表3-19 齿轮泵排量 $q$ ——(二)求面积修正值 $Y$ .....	171	图表3-47 键槽轴的最大传递扭矩.....	198
图表3-20 齿轮泵排量 $q$ ——(三)排量计算.....	172	图表3-48 滚动轴承额定动负荷.....	199
图表3-21 齿轮泵的最佳侧板间隙.....	173	图表3-49 球轴承的负载能力与寿命.....	200
图表3-22 直齿齿轮泵困油卸荷槽距离.....	174	图表3-50 滑动轴承的计算.....	201
图表3-23 齿轮轴负荷.....	175	图表3-51 滑动轴承系数 $\lambda$ 和油膜厚度.....	202
图表3-24 单作用叶片泵排量 $q$ ——(一)求 $q_1$ .....	176	图表3-52 滑动轴承特性系数(完全轴承特性曲线).....	203
图表3-25 单作用叶片泵排量 $q$ ——(二)		图表3-53 滑动轴承特性系数(180°轴承特性曲线).....	203
		图表3-54 滑动轴承的散热能力.....	204
		第四章 液压缸.....	205
		4.1 液压缸的性能.....	205

4.2 液压缸的结构设计 .....	207
4.2.1. 液压缸的参数 .....	207
4.2.2. 液压缸主要零件的结构 .....	209
4.2.3. 液压缸的缓冲装置 .....	214
4.3 液压缸的结构计算 .....	217
4.3.1 缸体壁厚的计算 .....	217
4.3.2. 缸体的变形 .....	217
4.3.3. 缸底或缸盖的厚度计算 .....	218
4.3.4. 缸体与缸底及缸盖的连接计 算 .....	218
4.3.5. 活塞杆计算 .....	221
4.4 液压缸的计算图表 .....	226
图表4-1 液压缸的输出力(推力) .....	226
图表4-2 液压缸的输出力(拉力) .....	227
图表4-3 液压缸容积 $V$ .....	228
图表4-4 液压缸的速度 $v$ .....	229
图表4-5 载荷的加速力 .....	230
图表4-6 液压缸的加速时间与加速距 离 .....	231
图表4-7 液压缸一次行程所需时间 .....	232
图表4-8 液压缸的功率 $N$ .....	233
图表4-9 单叶片式摆动缸输出扭矩 .....	234
图表4-10 单叶片式摆动缸的扭矩比 系数 .....	235
图表4-11 单叶片式摆动缸的角速度 .....	236
图表4-12 摆动叶片缸转动时间 .....	237
图表4-13 液压能 .....	238
图表4-14 运动能 .....	239
图表4-15 重力能 .....	240
图表4-16 平均缓冲压力 .....	241
图表4-17 缓冲的衰减系数 .....	242
图表4-18 液压缸体壁厚 .....	243
图表4-19 厚壁筒的最大应力 .....	244
图表4-20 薄壁缸体的变形 .....	245
图表4-21 活塞杆强度 .....	246
图表4-22 活塞杆细长比 .....	247
图表4-23 用欧拉公式求活塞杆临界载 荷力 .....	248
图表4-24 用戈登-兰金公式求活塞杆 临界载荷力 .....	249
图表4-25 空心杆的截面回转半径 .....	250
图表4-26 活塞杆的许用载荷力和细长 比 .....	251

图表4-27 活塞杆临界应力(欧拉公

式) .....

252	
第五章 液压辅件 .....	253
5.1 蓄能器 .....	253
5.1.1. 用途和分类 .....	253
5.1.2. 蓄能器容量计算 .....	253
5.1.3. 蓄能器供油系统中液压泵的容 量 .....	256
5.2 油箱和冷却器 .....	256
5.2.1. 油箱的用途和结构型式 .....	256
5.2.2. 油箱的构造 .....	256
5.2.3. 液压系统的发热、散热和温 升 .....	258
5.2.4. 油箱的散热 .....	258
5.2.5. 冷却器的计算 .....	259
5.3 滤油器 .....	261
5.3.1. 液压油的污染问题 .....	261
5.3.2. 污染度标准 .....	262
5.3.3. 滤油器的类型和结构 .....	263
5.3.4. 滤油器的选择 .....	266
5.4 管道的设计 .....	266
5.4.1. 管道的种类和应用 .....	266
5.4.2. 管道的计算 .....	267
5.4.3. 管道的共振现象和计算 .....	271
5.5 管道的连接方法和管路辅件 .....	272
5.5.1. 硬管的焊接连接 .....	273
5.5.2. 硬管的可拆卸连接和管路辅 件 .....	273
5.5.3. 硬管的挠性连接和管接头 .....	277
5.5.4. 软管的连接和管路辅件 .....	277
5.6 液压辅件的计算图表 .....	281
图表5-1 蓄能器容量 .....	281
图表5-2 消除压力冲击用蓄能器容量 计算 .....	282
图表5-3 蓄能器系统液压泵流量 .....	283
图表5-4 液压装置的发热量 .....	284
图表5-5 油箱温升 .....	285
图表5-6 油箱面积计算 .....	286
图表5-7 冷却器交换热量 .....	287
图表5-8 水冷却器计算——(一)热平 衡表 .....	288
图表5-9 水冷却器计算——(二)散热 面积及平均温差表 .....	289

图表5-10 管道内径的计算 .....	290	系 .....	346
第六章 液压伺服系统 .....	291	图表7-5 绝热变化时体积与温度的关 系 .....	347
6.1 伺服系统的分类和组成 .....	291	图表7-6 配管的压力降 .....	348
6.2 伺服控制理论的基本概念 .....	293	图表7-7 阀门串连接时由有效截面 积求总合截面积——(一)有 效截面积在 100mm <sup>2</sup> 以下 时 .....	349
6.2.1. 伺服系统的运动方程 .....	293	图表7-8 阀门串连接时由有效截面 积求总合截面积——(二)有 效截面大于100mm <sup>2</sup> 时 .....	350
6.2.2. 传递函数和典型环节 .....	294	图表7-9 由 C <sub>v</sub> 值求阀门的有效截面 积 .....	351
6.2.3. 频率特性 .....	297	图表7-10 C <sub>v</sub> 值与 K <sub>v</sub> 值的关系 .....	352
6.2.4. 伺服系统的稳定性 .....	305	图表7-11 通过小孔的空气流量 .....	353
6.2.5. 系统的过渡过程品质 .....	306	图表7-12 小孔流量的温度修正 .....	354
6.2.6. 稳态误差 .....	310	图表7-13 用测量筒测漏气量 .....	355
6.2.7. 系统的综合校正 .....	311	图表7-14 气缸输出力——(一)缸径为 10~100mm .....	356
6.3 液压伺服系统的设计和分析 .....	313	图表7-15 气缸输出力——(二)缸径100 ~500mm .....	357
6.3.1. 液压伺服系统静特性的设 计 .....	313	图表7-16 活塞杆伸出时气缸耗气量 (行 程 100mm 时) .....	358
6.3.2. 液压伺服系统动特性的分 析 .....	318	图表7-17 活塞杆缩回时气缸耗气量 (行 程 10mm 时) .....	359
6.3.3. 液压伺服系统设计举例 .....	329	图表7-18 由空压机流量、工作压力求 蓄气罐的容量 .....	360
6.4 液压伺服系统的计算图表 .....	334	图表7-19 由蓄气罐和空压机容量求空 压机每分钟的负荷运转时 间 .....	361
图表6-1 液压马达的流量和转速 .....	334	图表7-20 气缸工作时间与自由空气流 量——(一)缸径小于 100mm .....	362
图表6-2 液压马达的负载压力和输出 扭矩 .....	335	图表7-21 气缸工作时间与自由空气流 量——(二)缸径100~ 500mm .....	363
图表6-3 系统最大功率输出时, 液压缸 和伺服阀规格的选择 .....	336	图表7-22 小孔或喷嘴的空气流量 .....	364
图表6-4 伺服阀-液压缸系统的无阻尼液 压固有频率 .....	337	图表7-23 气缸缝隙空气漏损量 .....	365
图表6-5 纯惯性负载时, 伺服阀-液 压缸系统的时间常数 T <sub>1</sub> .....	338	附 录 .....	366
图表6-6 弹性负载时, 伺服阀-液 压缸系统的时间常数 T <sub>2</sub> .....	339	一、单位制 .....	366
图表6-7 伺服阀-液压马达系统的无阻尼液 压固有频率 .....	340	1.1 力学的有关单位 .....	366
图表6-8 纯惯性负载时, 伺服阀-液 压马达系统的时间常数 T <sub>1</sub> .....	341	1.1.1. 公制绝对单位制 .....	366
图表6-9 由于伺服阀, 伺服放大器特性漂 移引起的液压缸输出位置误 差 .....	342	1.1.2. 公制工程单位制 .....	366
第七章 气动系统计算图表 .....	343		
图表7-1 与压缩空气等价的自由空气 体积 .....	343		
图表7-2 空气的重量 .....	344		
图表7-3 绝热变化时压力与温度的关 系 .....	345		
图表7-4 绝热变化时压力与体积的关			

1.2 温度及热工单位 .....	367	2.2.20. 导热系数 .....	377
1.3 热量单位 .....	367	三、计算图表 .....	378
1.4 国际单位制(SI) .....	367	3.1 单位换算图表 .....	378
二、单位的换算及换算表 .....	369	图表8-1 单位换算图表——(一)长度、 面积、容积、速度、质量、重 量、力 .....	379
2.1 液压、气动常用工程单位的名称、代号及其和国际单位制(SI)的换算 .....	369	图表8-2 单位换算图表——(二)压力、 粘度、功、能量、功率、温 度、热量 .....	380
2.2 单位换算表 .....	372	3.2 弓形几何尺寸及计算图表 .....	378
2.2.1. 长度 .....	372	图表8-3 弓形几何尺寸计算图表 .....	381
2.2.2. 面积 .....	373	四、计算图表的绘制方法 .....	378
2.2.3. 体积 .....	373	4.1 图尺的绘制方法 .....	378
2.2.4. 质量 .....	373	4.1.1. 均等直线图尺的作法 .....	378
2.2.5. 重度 .....	373	4.1.2. 对数直线图尺的作法 .....	383
2.2.6. 力 .....	374	4.2 计算图表的绘制方法 .....	383
2.2.7. 压力 .....	374	4.2.1. 单线计算图表 .....	384
2.2.8. 应力 .....	374	4.2.2. 平行尺加法计算图表 .....	385
2.2.9. 流量 .....	375	4.2.3. 平行尺乘法计算图表 .....	386
2.2.10. 扭矩 .....	375	4.2.4. 三尺交于一点的计算图 表 .....	388
2.2.11. 角度 .....	375	4.2.5. “N”形计算图表 .....	389
2.2.12. 线速度 .....	375	4.2.6. 复合计算图表 .....	390
2.2.13. 角速度 .....	376	4.2.7. 图尺的复用 .....	391
2.2.14. 功、能和热量 .....	376	4.3 均等图尺三角形和对数图尺三角 形 .....	391
2.2.15. 功率 .....	376		
2.2.16. 热功率和机械功率 .....	376		
2.2.17. 绝对粘度 .....	377		
2.2.18. 运动粘度 .....	377		
2.2.19. 散热系数 .....	377		

# 第一章 液 压 油

## 1.1 对液压油的基本要求

液压油是液压系统中传递能量的工作介质，并有润滑液压元件内相对运动表面的作用，为使液压油长期保持良好的工作性能，必须满足下列要求：

- (1) 对元件的工作表面和密封材料有良好的润滑性能；
- (2) 具有适当的粘度和良好的粘-温特性；
- (3) 较好的化学稳定性；
- (4) 良好的消泡性和防锈性；
- (5) 对密封材质有良好的相容性；
- (6) 体积弹性模数高；
- (7) 与水的分离性好；
- (8) 无毒，不含机械杂质和水分等。

## 1.2 液压油的物理性质

### 1.2.1. 重度

单位体积油液的重量称为重度，用  $\gamma$  表示：

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ (gf/cm}^3\text{)} \quad (1-1)$$

式中  $G$ ——油液重量 (gf)；  
 $V$ ——体积 (cm<sup>3</sup>)。

### 1.2.2. 密度

单位体积油液的质量称为密度，用  $\rho$  表示：

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \text{ (gf} \cdot \text{sec}^2\text{/cm}^4\text{)} \quad (1-2)$$

式中  $M$ ——油液质量 (gf·sec<sup>2</sup>/cm)；

$g$ ——重力加速度 ( $g=981\text{cm/sec}^2$ )。

油液的密度随温度升高而减小，其关系为：

$$\rho = \rho_0 - \beta(t - t_0) \quad (1-3)$$

式中  $\rho$ ,  $\rho_0$ ——温度为  $t$  和  $t_0$  时油液的密度。

$t_0 = 20^\circ\text{C}$  时， $\rho_0$  和  $\beta$  的关系见表 1-1。

表 1-1

$\rho_0$	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	0.999
$\beta$	$890 \times 10^{-6}$	$837 \times 10^{-6}$	$765 \times 10^{-6}$	$699 \times 10^{-6}$	$633 \times 10^{-6}$	$567 \times 10^{-6}$	$515 \times 10^{-6}$

一般液压系统工作温度在70℃以下，油液的密度，比在20℃时仅变化3%，因而在一般的近似计算中，可不予考虑。

一般液压油在常温下的 $\gamma=840\sim 950$  (kgf/m<sup>3</sup>) = 0.84~0.95 (gf/cm<sup>3</sup>)，故其密度 $\rho=(0.86\sim 0.96)\times 10^{-6}$ (kgf·sec<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>)。

### 1.2.3. 比重

20℃时油液的重度和4℃时蒸馏水的重度之比，称为比重，用 $S$ 表示。比重是一个没有单位（量纲）的量，而重度则是有单位的。由于在4℃时蒸馏水的重度为1gf/cm<sup>3</sup>，因此，在20℃时油液的重度和比重在数值上相同，且在其它温度时也十分接近，但概念上不要混淆。

### 1.2.4. 粘度

液体流动时各液层之间的摩擦阻力，称为液体的粘性。表示粘性大小的物理量，称为粘度，粘度是液压油的重要特性之一。

#### 1. 绝对粘度（动力粘度） $\mu$

$$\mu = \tau / \frac{dv}{dy} = \tau \frac{dy}{dv} \quad (1-4)$$

式中  $\tau$ ——相邻液层间的速度梯度为 $\frac{dv}{dy}$ 时所需的剪应力 (dyn/cm<sup>2</sup>)；

$dy$ ——相邻液层的距离 (cm)；

$dv$ ——相邻液层间的相对滑动速度 (cm/sec)。

绝对粘度的单位在CGS制中用泊(P)表示，1泊(P)=1达因·秒/厘米<sup>2</sup> (dyn·sec/cm<sup>2</sup>)。泊的百分之一称为厘泊(cP)，1cP=10<sup>-2</sup>P。在MKS制中，绝对粘度的单位为公斤力·秒/米<sup>2</sup>(kgf·sec/m<sup>2</sup>)二者关系为：

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{m}^2 = 98.1 \text{ P} (\text{dyn} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2) \approx 100 \text{ P} = 10^4 \text{ cP}.$$

绝对粘度的英制单位用雷(reyn)表示，1雷=1磅力·秒/英寸<sup>2</sup> (lbf·sec/in<sup>2</sup>)，1微雷=10<sup>-6</sup>雷。

$$1 \text{ lbf} \cdot \text{sec} / \text{in}^2 = 68950 \text{ 泊(P)} = 6.895 \times 10^6 \text{ 厘泊(cP)};$$

$$1 \text{ lbf} \cdot \text{sec} / \text{ft}^2 = 478.8 \text{ P};$$

$$1 \text{ 泊(P)} = 1.45 \times 10^{-5} \text{ R 雷(reyn)}.$$

不同单位制的绝对粘度的换算，可从图表1-1和附录中查找。

#### 2. 运动粘度 $\nu$

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ ——油液密度(kgf·sec<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>)。

运动粘度的单位在CGS制中为沱(St)，1沱(St)=1厘米<sup>2</sup>/秒 (cm<sup>2</sup>/sec)，沱的百分之一称厘沱(cSt)，1cSt=10<sup>-2</sup>St。在MKS制中运动粘度的单位为米<sup>2</sup>/秒 (m<sup>2</sup>/sec)，1m<sup>2</sup>/sec=10<sup>4</sup>St(cm<sup>2</sup>/sec)=10<sup>8</sup>cSt。

运动粘度的英制单位为英尺<sup>2</sup>/秒 (ft<sup>2</sup>/sec)，但它没有专门的名称，其换算关系为：

$$1 \text{ ft}^2 / \text{sec} = 929 \text{ St} (\text{cm}^2 / \text{sec}) = 92900 \text{ cSt};$$

$$1 \text{ cSt} = 1.55 \times 10^{-3} \text{ in}^2 / \text{sec} = 1.076 \times 10^{-5} \text{ ft}^2 / \text{sec}.$$

运动粘度和绝对粘度的换算，由于单位制的不同而比较麻烦，利用图表1-2可以方便地

查找。

### 3. 相对粘度

实际上，液体的绝对粘度和运动粘度都不能直接测定，一般只是在理论计算时用到。在实用中，通常使用各种粘度计，测出液体的相对粘度，再换算为绝对粘度或运动粘度<sup>⊖</sup>。

相对粘度是在特定条件下，测量油液通过管状孔口的流动速度，或者测量一定体积的液体通过管状孔口的流动时间求得的。由于测量方法不同，故有许多不同的粘度计和相对粘度单位。

各国使用的相对粘度有下面几种：

塞氏粘度 (美国)	{	塞氏通用秒(SUS)
		塞氏弗氏秒(SFS)
雷氏粘度 (英国)	{	雷氏标准秒(Red No 1)
		雷氏海军秒(Red No 2)
巴氏粘度(法国)		巴氏度(°B)
恩氏粘度(苏联, 德国)	{	恩氏度(°E)
		恩氏秒("E)

由于粘度计种类多，单位也很复杂，计算工作十分烦琐，使用图表 1-3 至 1-9 和表 1-2 进行相对粘度和运动粘度的换算，比较简便。下面的近似公式，可作校核之用。

$$\nu = At - \frac{B}{t} \text{ (cSt)} \quad (1-6)$$

式中  $\nu$ ——运动粘度(cSt)；

$t$ ——相对粘度值(sec或度)；

$A$ 、 $B$ ——系数。其值见表 1-3。

#### 1.2.5. 粘-温特性

1. 油液的粘度随温度的变化而变化。油温升高，粘度下降；油温降低，粘度增大。不同油液，其粘度变化规律也不同。

粘度与温度之间的关系，可用下面的经验公式表示。美国ASTM的粘度-温度图表(图表 1-10)，即根据这一公式作出，并已广为应用。

$$\lg \lg(\nu + 0.8) = n \lg T + C \quad (1-7)$$

式中  $\nu$ ——运动粘度(cSt)；

$T$ ——绝对温度  $T = 273 + t^\circ$ ；

$n$  和  $C$ ——取决于油液种类的常数。

用公式(1-7)作出的油液粘-温特性，很近于直线关系，因此，只要很少几个试验点，就能得到一条合适的曲线。

国产液压油的粘-温特性可由图表 1-11 查得。

对于液压系统常用的油液(指粘度在 76cSt 以下，温度在 30~150℃ 范围内)，可用下述近似公式计算其在温度为  $t^\circ\text{C}$  时的运动粘度。

<sup>⊖</sup> 我国石油产品的粘度采用运动粘度(cSt)表示。它是用毛细管粘度计，测量出一定体积油液在试验温度(通常为 50℃)下，垂直通过毛细管的流动时间，再换算为运动粘度值。

表 1-2 相对粘度与运动粘度换算表

运动 粘度 (cSt)	雷氏 粘度 №1 (sec) 70°F	用粘度 塞氏通 (SSU) 100°F	恩氏 粘度 (°E)	运动 粘度 (cSt)	雷氏 粘度 №1 (sec) 70°F	用粘度 塞氏通 (SSU) 100°F	恩氏 粘度 (°E)	运动 粘度 (cSt)	雷氏 粘度 №2 (sec) 140°F	塞氏 弗氏 粘度 (SSF) 122°F	恩氏 粘度 (°E)
1	28.5	—	1.00	26	103	123.7	3.59	76	31	37.8	10.0
1.5	29.5	—	1.06	27	112	128.1	3.71	77	—	38.3	10.15
2	30	32.62	1.12	28	116	132.5	3.83	78	32	38.7	10.3
2.5	31	34.43	1.17	29	120	136.9	3.96	79	—	39.2	10.45
3	33	36.03	1.22	30	123	141.3	4.08	80	33	39.6	10.6
3.5	34	37.63	1.26	31	127	145.7	4.21	81	—	40.1	10.7
4	35	39.14	1.31	32	131	150.2	4.33	82	34	40.5	10.8
4.5	37	40.75	1.35	33	135	154.7	4.46	83	—	41.0	10.95
5	38	42.35	1.39	34	139	159.2	4.58	84	34	41.4	11.1
5.5	39	43.96	1.44	35	143	163.7	4.71	85	—	41.9	11.2
6	41	45.56	1.48	36	147	168.2	4.84	86	35	42.3	11.3
6.5	42	47.17	1.52	37	151	172.7	4.96	87	—	42.8	11.45
7	43	48.77	1.56	38	155	177.3	5.10	88	36	43.2	11.6
7.5	45	50.43	1.61	39	159	181.8	5.22	89	—	43.7	11.75
8	46	52.09	1.65	40	164	186.3	5.35	90	37	44.1	11.9
8.5	48	53.79	1.71	41	168	190.8	5.48	91	—	44.6	12.0
9	49	55.50	1.75	42	172	195.3	5.61	92	38	45.0	12.1
9.5	50	57.21	1.80	43	176	199.8	5.74	93	—	45.5	12.25
10	52	58.91	1.84	44	180	204.4	5.87	94	38	45.9	12.4
10.5	53.5	60.67	1.88	45	184	209.1	6.00	95	—	46.4	12.55
11	55	62.43	1.94	46	188	213.7	6.13	96	39	46.8	12.7
11.5	56.5	64.28	1.99	47	192	218.3	6.26	97	—	47.3	12.8
12	58	66.04	2.03	48	196	222.9	6.38	98	40	47.7	12.9
12.5	59.5	67.90	2.08	49	200	227.5	6.51	99	—	48.2	13.05
13	61	69.76	2.13	50	204	232.1	6.64	100	41	48.6	13.2
13.5	63	71.60	2.18	51	208	236.8	6.77	105	43	50.9	13.9
14	65	73.57	2.23	52	212	241.4	6.90	110	45	53.2	14.5
14.5	66.5	75.48	2.28	53	216	246.0	7.03	115	47	55.5	15.2
15	68	77.39	2.33	54	220	250.6	7.17	120	49	57.8	15.8
15.5	69.5	79.34	2.38	55	224	255.2	7.30	125	51	60.1	16.5
16	71	81.30	2.44	56	228	259.8	7.43	130	53	62.4	17.2
16.5	73	83.31	2.50	57	232	264.5	7.56	135	55	64.7	17.8
17	75	85.32	2.55	58	236	269.1	7.69	140	57	67.0	18.5
17.5	76.5	87.38	2.60	59	240	273.7	7.82	145	59	69.4	19.1
18	78	89.44	2.65	60	244	278.3	7.95	150	61	71.7	19.8
18.5	80	91.50	2.71	61	248	282.9	8.07	155	64	74.0	20.5
19	82	93.55	2.77	62	252	287.5	8.20	160	66	76.3	21.1
19.5	83.5	95.66	2.83	63	256	292.4	8.33	165	68	78.7	21.8
20	85	97.77	2.88	64	260	296.7	8.45	170	70	81.0	22.4
20.5	87	99.89	2.94	65	264	301.4	8.58	175	72	83.3	23.1
21	89	102.0	3.00	66	269	306.0	8.72	180	74	85.6	23.8
21.5	91	104.2	3.06	67	273	310.6	8.85	185	76	88.0	24.4
22	93	106.4	3.11	68	277	315.2	8.98	190	78	90.3	25.1
22.5	94.5	110.6	3.17	69	281	319.8	9.11	195	80	92.6	25.7
23	96	110.7	3.23	70	285	324.4	9.24	200	82	95.0	26.4
23.5	98	112.9	3.29	71	289	329.0	9.37	210	86	99.7	27.7
24	100	115.0	3.35	72	293	333.7	9.51	220	90	104.3	29.0
24.5	102	117.2	3.41	73	297	338.3	9.64	230	94	109.0	30.4
25	104	119.3	3.47	74	301	343.0	9.77	240	98	113.7	31.7
25.5	106	121.5	3.53	75	305	347.6	9.90	250	102	119.4	33.0

表 1-3

相 对 粘 度		A	B
塞氏通用粘度(SUS)秒	<100	0.226	195
	>100	0.220	135
塞氏弗粘度(SFS)秒		2.20	203
雷氏标准粘度(Red. №1)秒	34~100	0.26	0.247
	>100	179	50
雷氏海军粘度(Red. №2)秒		2.39	10.3
巴氏粘度(°B)度		$v = \frac{4850}{B}$	
恩氏粘度(°E)度	1.35~3.2	8	8.64
	>3.2	7.6	4
恩氏粘度(°E)秒		0.1435	322

$$\nu_t = \nu_{50} \left( \frac{50}{t} \right)^n \quad (1-8)$$

式中  $\nu_t$ ——温度为 $t$ °C时油液的运动粘度(cSt);

$\nu_{50}$ ——温度为50°C时油液的运动粘度(cSt);

$n$ ——指数。

指数 $n$ 随油液在50°C时的粘度而变化, 其值见表1-4。

表 1-4

$\nu_{50}$ (cSt)	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60	68	76
$n$	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56

## 2. 调合油的混合粘度

在液压油生产厂允许的情况下, 可将不同粘度的油液调合, 以使油液具有需要的粘度。调合油的混合粘度可用下式计算:

$$^{\circ}E = \frac{a^{\circ}E_1 + b^{\circ}E_2 - c(^{\circ}E_1 - ^{\circ}E_2)}{100} \quad (1-9)$$

式中  $^{\circ}E_1$ 、 $^{\circ}E_2$ ——用以调合的两种油的粘度, 并且 $^{\circ}E_1 > ^{\circ}E_2$ ;

$^{\circ}E$ ——调合后的粘度;

$a$ 、 $b$ ——参加调合的两种油的百分比,  $a + b = 100$ ;

$c$ ——系数, 其值见表1-5。

表 1-5

$a\%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$b\%$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$c$	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	3.2	25	17

调合油的粘度可由图表1-12查得。

图表1-12可以解算：

(1) 已知两种油的粘度和调合的体积百分比，求调合后的混合粘度。

(2) 已知两种油的粘度和调合后的混合粘度，求其调合比(体积)。

### 3. 粘度指数(VI)

粘度指数表示油液粘度受温度影响的程度。粘度指数越大意味着油液粘度受温度影响相对地较小。在粘-温特性图上，粘度指数高，则粘-温曲线比较平缓。液压油的粘度指数可用以下经验公式计算：

$$VI = 100 \times \frac{L-U}{L-H} = 100 \times \frac{L-U}{D} \quad (1-10)$$

式中  $U$ ——被试油在37.8℃(100°F)时的运动粘度(cSt)；

$H$ ——IV=100的标准油在37.8℃时的运动粘度(cSt)，而其在98.9℃(210°F)的粘度与被试油相同；

$L$ ——VI=0的标准油在37.8℃时的运动粘度(cSt)，而其在98.9℃(210°F)的粘度与被试油相同。

进行粘度指数计算时，首先测定某种油液在98.9℃和37.8℃时的粘度。然后从表1-6中选择在98.9℃时和这种油粘度相同的一对标准油在37.8℃时的粘度数据 $L$ 和 $H$ 代入上式。

[例] 已知一被试油在37.8℃时的粘度为82.5cSt，而在98.9℃时的粘度为9.1cSt，求该油的VI值。

[解] 由已知条件得 $U=82.5$ 。因被试油在98.9℃时的运动粘度为9.1cSt，故由表查得 $L=138.18$ ， $L-H=D=60.44$ 代入公式(1-10)得：

$$VI = \frac{138.18 - 82.5}{60.44} \times 100 = 92.3$$

如被试油在98.9℃时的粘度 $< 2cSt$ 时，则须按下面公式，先求出 $L$ 和 $L-H$ 的值，再计算VI值。

$$L = X(1.655 + 1.2665X) \quad (1-11)$$

$$L-H = X(0.1725 + 0.34984X) \quad (1-12)$$

式中  $X$ ——被试油在98.9℃时的粘度(cSt)。

[例] 已知被试油在37.8℃时的粘度为5.538cSt，而其在98.9℃时的粘度为1.805cSt，求该油的VI。

$$[解] \quad L = 1.805(1.655 + 1.2665 \times 1.805) = 7.114$$

$$L-H = 1.805(0.1725 + 0.34984 \times 1.805) = 1.451$$

$$\therefore VI = \frac{7.114 - 5.538}{1.451} \times 100 = 108$$

VI $< 100$ 时的粘度指数可从图表1-13查得。

VI $> 100$ 时的粘度指数，可由图表1-14查找。

我国液压油粘度通常用50℃和100℃时的运动粘度表示。计算粘度指数时，可测定被试油在50℃和100℃时的运动粘度 $\nu_{50}$ 和 $\nu_{100}$ ，再用图表1-15、1-16求出粘度指数。若已知数据不是50℃和100℃时，可先从图表1-11找出这种油在这两种温度下的粘度，再行计算。

表 1-6

运动粘度 98.9°C (cSt)	L	D (L-H)	运动粘度 98.9°C (cSt)	L	D (L-H)	运动粘度 98.9°C (cSt)	L	D (L-H)	运动粘度 98.9°C (cSt)	L	D (L-H)
2.00	8.376	1.745	6.00	62.61	21.91	10.00	162.89	73.59	14.00	293.07	146.45
2.10	9.061	1.905	6.10	64.61	22.85	10.10	165.78	75.17	14.10	296.75	148.58
2.20	9.771	2.073	6.20	66.61	23.79	10.20	168.71	76.76	14.20	300.45	150.73
2.30	10.501	2.249	6.30	68.61	24.72	10.30	171.59	78.32	14.30	304.11	152.85
2.40	11.267	2.429	6.40	70.62	25.66	10.40	174.51	79.90	14.40	307.73	154.96
2.50	12.053	2.617	6.50	72.66	26.61	10.50	177.48	81.52	14.50	311.51	157.15
2.60	12.865	2.814	6.60	74.77	27.60	10.60	180.39	83.10	14.60	315.26	159.33
2.70	13.702	3.017	6.70	76.99	28.67	10.70	183.33	84.70	14.70	318.97	161.49
2.80	14.562	3.225	6.80	79.31	29.32	10.80	186.30	86.32	14.80	322.75	163.70
2.90	15.451	3.442	6.90	81.73	31.03	10.90	189.30	87.95	14.90	326.54	165.92
3.00	16.364	3.667	7.00	84.22	32.31	11.00	192.30	89.61	15.00	330.34	168.14
3.10	17.302	3.898	7.10	86.77	33.69	11.10	195.36	91.09	15.10	334.26	170.44
3.20	18.265	4.135	7.20	89.36	35.12	11.20	198.47	93.00	15.20	338.19	172.75
3.30	19.254	4.379	7.30	91.93	36.55	11.30	201.62	94.74	15.30	342.09	175.05
3.40	20.268	4.630	7.40	94.37	37.80	11.40	204.71	96.45	15.40	345.89	177.24
3.50	21.307	4.889	7.50	96.80	39.03	11.50	207.82	98.17	15.50	349.87	179.59
3.60	22.373	5.156	7.60	99.23	40.26	11.60	210.95	99.90	15.60	352.91	182.03
3.70	23.462	5.428	7.70	101.69	41.52	11.70	214.12	101.67	15.70	357.92	184.39
3.80	24.573	5.708	7.80	104.21	42.80	11.80	217.32	103.41	15.80	361.94	186.77
3.90	25.718	5.994	7.90	106.67	44.05	11.90	220.48	105.21	15.90	365.97	189.16
4.00	26.89	6.30	8.00	109.16	45.32	12.00	223.68	106.99	16.00	370.02	191.56
4.10	28.14	6.69	8.10	111.75	46.66	12.10	226.99	108.84	16.10	374.19	194.04
4.20	29.45	7.17	8.20	114.38	48.01	12.20	230.33	110.71	16.20	378.37	196.53
4.30	30.82	7.60	8.30	116.96	49.36	12.30	233.63	112.57	16.30	382.52	198.99
4.40	32.29	8.14	8.40	119.63	50.75	12.40	236.95	114.44			
4.50	33.85	8.75	8.50	122.24	52.08	12.50	240.31	116.33			
4.60	35.49	9.43	8.60	124.85	53.44	12.60	243.70	118.24			
4.70	37.21	10.17	8.70	127.48	54.82	12.70	247.06	120.14			
4.80	39.00	10.95	8.80	130.14	56.22	12.80	250.46	123.07			
4.90	40.85	11.78	8.90	132.85	57.64	12.90	253.89	124.01			
5.00	42.74	12.63	9.00	135.51	59.04	13.00	257.32	125.96			
5.10	44.68	13.52	9.10	138.18	60.44	13.10	260.81	127.95			
5.20	46.64	14.42	9.20	140.88	61.87	13.20	264.36	129.97			
5.30	48.62	15.34	9.30	143.63	63.33	13.30	267.94	132.01			
5.40	50.61	16.27	9.40	146.33	64.76	13.40	271.47	134.03			
5.50	52.61	17.21	9.50	149.04	66.20	13.50	275.04	136.08			
5.60	54.61	18.15	9.60	151.76	67.65	13.60	278.61	138.13			
5.70	56.61	19.09	9.70	154.53	69.13	13.70	282.21	140.20			
5.80	58.61	20.03	9.80	157.34	70.64	13.80	285.85	142.29			
5.90	60.61	20.97	9.90	160.09	72.10	13.90	289.45	144.36			