

飛機液壓傳動與附件

上 冊

T. M. 巴 斯 特 著

曹士睿、余德星、張 鴻 合譯

曹 士 睿 校



國防工業出版社

原書出版者的說明

本書敘述液压附件各工作参数的詳細計算及附件各組合件和零件副的液压特性，並敘述了粘性流体力学的基本原理，關於粘性流体在導管中及在液压附件緊密接合部的窄縫（毛細縫）中流動的問題也給出了計算的方法和實驗研究的数据。本書还包括飛機液压系統的主要附件——泵，液压馬达及其他作動機構、分配機構、導管、接管机件等的工作参数及性能的詳細計算，及这些附件在运动学和动力学計算上的主要数据。本書在液压附件構造的諸章節中介紹了从制造观点來看为典型的各附件的說明，及其工作情况的詳細分析，对設計、制造及使用这些附件的有关問題也作了些介紹。

本書可作为飛機工厂及附件工厂的設置人員，飛機工業及使用飛機的工程师們的参考書，也可作为航空学院高年級学生的教科書。

目 錄

緒 論

液压系統的工作原理及機構原理·····	7
液体压力大小的選擇·····	10
附件轉數的選擇·····	11
随液体压力升高所產生的困難·····	13

第 一 篇

飛機液压導管之流体力学

第一章 流体的概念及基本定义·····	15
重度和密度·····	15
流体的粘性·····	18
粘度單位的各种表示法·····	21
流体粘度为溫度的函数·····	24
流体粘度为压力的函数·····	26
液体的挤压·····	28
滑油的潤湿性·····	29
油的化学安定性·····	29
空气的基本物理性質·····	31
第二章 对飛機液压油的要求·····	33
飛機液压系統採用的液压油·····	34
第三章 液压導管水力学及液压系統計算之基本問題·····	37
流体动力学的基本原理·····	37
局部压力損失·····	45
密封連接处环形毛細縫間的液流·····	49
活塞在外圓筒內處於偏心位置的情况·····	66
精確的計算·····	67

液体經間隙的流量变化是压力的函数	72
縫隙大小的变化是液体的温度和压力的函数	74
附件各零件的振动对液体渗漏量的影响	76
掺有空气对液体流量的影响	77
液体在縫隙中流动的实验研究结果	77
縫隙偏心距的影响	78
毛细縫的粘合	78
液体經毛细縫的流量	82
液体經縫隙的流量与間隙寬度間的关系	85
橫向溝槽对縫隙緊密性的影响	87
柱塞的摩擦力	89
液体中溶解有空气和气体	92
液压信号傳佈的速度	96
液压系統導管中的液压撞击	99

第 二 篇

旋轉式液压附件

第一章 一般問題	103
液压泵	103
旋轉式附件的基本理論問題	104
吸油損失	107
有害空間	109
求各式液压泵及液压馬达工作特性的基本方程式	112
流量及功率	112
液压附件的有效系数	117
功率的机械損失	119
諸系数的值	123
諸系数的实验数值	125
有效系数的無因次曲線	127
第二章 液压傳动	130
液压馬达的轉数	131
傳动的有效系数	135
第三章 齒輪式液压泵	138

• 齒輪泵的流量	138
齒輪泵軸上的功率及扭矩	145
齒輪泵的填充特性与隙縫大小的关系的实用数据	153
齒輪泵的流量及填充有效系数与側面隙縫大小的关系	155
齒輪泵的流量及填充有效系数与徑向隙縫大小的关系	157
齒輪齒形的修正	160
求具有修正齒的齒輪的尺寸	161
齒間中液体的填充	163
齒輪的圓周速度之大小对齒輪泵填充的影响	166
加於齒輪泵軸承上的負載	170
軸頸的計算	172
• 液体在齒輪的齒窪中的壓縮	173
• 液流的脉动	178
卸除齒輪泵軸承由於液壓所產生的負荷	184
飛機上所採用的齒輪泵的構造	184
自动調節齒輪側面隙縫大小的齒輪泵	187
游動軸套的計算	190
多級的及多齒輪的齒輪泵	191
內銜接式齒輪泵	192
齒輪式液壓馬達	197
• 齒輪泵的設計問題	200
• 对齒輪泵的技術要求	202
轉子式泵	204
螺旋式泵	204
第四章 活塞式液壓泵及液壓馬達	210
手搖泵	210
徑向型轉缸式活塞液壓泵和液壓馬達	219
徑向型活塞式附件的基本計算	222
附件內的作用力	222
軸上的理論扭矩	224
活塞的运动学和动力学	227
活塞的加速度	228
慣性力	230

活塞泵的流量和功率	231
液流的均匀性	232
轴承的负荷	237
液体在油缸中的压缩	239
径向型活塞式液压泵的有效系数	240
径向型活塞式马达轴的转速	242
飞机上所用的活塞式液压泵及液压马达的典型构造	243
並排的径向型活塞式液压泵	245
双向作用的径向型活塞式马达	246
活塞式液压泵各机件制造材料的选择	252
径向型活塞式附件的基本工艺要求	252
油缸为轴向排列的活塞式液压泵和液压马达	253
活塞泵机构的运动学和动力学	255
活塞的速度	255
活塞的加速度	257
惯性力	258
理论流量	259
液体流动的均匀性	260
理论功率及扭矩	260
支承分配盘的支撑表面的计算	263
活塞顶的计算	267
油缸块体为固定的活塞泵和马达	267
辅助泵的计算	271
液体分配机构的计算	272
精确的分析	276
作用在活塞泵流量调节机构中的力的计算	277
活塞的惯性力及离心力的作用	285
特殊液压泵及液压马达的一般型别	288
油缸为轴向分布与带有球端分配器的液压泵	290
轴颈式液压分配器的液压泵	292
带倾斜凸轮盘的泵	298
对斜盘式液压泵的工艺要求	300
第五章 旋板式液压泵	302

机械傳动的旋板式液压泵	302
具有卸荷轴承的双重作用的旋板式液压泵	307
双重作用旋板式液压泵流量的計算	309
双重作用旋板式液压泵所供液流的均匀性	313
制造液压泵零件所用材料的选择	314
制造双重作用的旋板式液压泵及其零件的工藝要求	315
以旋板式液压泵作为液压馬达	320
旋轉活塞式液压泵	322
切片式液压泵	323
自动調節流量的液压泵	326
第六章 液压泵的傳动	330
液压泵的卸荷	330
液压泵的自动卸荷	332
用調压器來卸荷的液压泵	335
液压泵卸荷活門的計算	338
液压泵自动卸荷器常用的構造	339
液压泵用時間替續器自动卸荷	345

第 三 篇

作 动 筒

驅动力及液压大小的計算	350
轉动作用的作动筒（随动机）軸上的扭矩	352
作动筒的設計問題及典型構造	352
在行程終点帶有減震裝置的作动筒	354
減震器的計算	356
固定作动筒活塞的机械鎖	359
作动筒的典型結構	371
对作动筒及其零件的工藝要求	372

緒 論

由於近年來出現了高速噴氣式飛機及飛行載重十分大的飛機，在操縱飛機及其各附件方面就需要應用輔助的作動系統，因為用手操縱已感到困難。在飛機的各種輔助作動裝置中以電動的及液壓的最為通用。這兩種系統中的原動機在第一种情況下是發電機而在第二種情況下是液壓泵，他們通常都由飛機的發動機來帶動。將發動機的機械能轉變為電能或液壓能。然後，借電動機或液壓馬達再變成機械能以完成所需要的動作。能量在飛機上的分配和傳送，在電動系統中用導線網路，而在液壓系統中則用導管。

除上述兩種輔助系統外，也有採用機械輔助系統的。它包括一些機械裝置而將飛機發動機和從動部件連接起來。這種系統僅在短距離及小功率的情況下才使用，在現代飛機上已不大通用。

有時在飛機上也採用其他的輔助作動系統，系利用別種能源。例如，可用火藥起動器來起動發動機以及用爆發裝置來應急放起落架。

氣壓輔助作動系統在飛機上沒有得到廣泛的應用，其原因就是它具有嚴重的缺點，而不能用它獨有的特點來補救。譬如，氣壓系統不可避免的在機構中要有水分凝結，並在低溫時可能凝固，因而破壞了機構的工作。在這種系統中要求自動化的問題特別困難。另外，氣壓系統不能使從動部件固定在中間位置，而僅能使其從一極限位置到另一極限位置。最後，在解決緊密性的問題方面也有著嚴重的困難。

但是，氣壓傳動的主要缺點則是空氣的可壓縮性，可以導致附件的撞擊作用，而在需要瞬時反應的裝置中氣壓系統也不能

用。另外，气压机件的摩擦部分需要潤滑，而液压机件則不需要潤滑。

气压系統的优点即簡單、价廉，特别是这种系統不需要回路導管。当从动部件需要大的移动速度时，气压傳动則較电动的及液压的为优，例如，在炸彈艙門的傳动中动作的瞬时性就很重要。

气压系統的优点还表现在貯存能量簡單且貯气瓶可在很短的时间內放压。如所週知，貯气瓶在瞬时放压时可以和慢慢放压时放出同样多的能量，但是蓄电池在迅速放电时，則只能放出其一部分的能量。

温度降低对各种能量儲蓄器的工作都有不良的影响。對於蓄电池來說，当温度降低时可取得的能量迅速降低 另外 当低温时不能再次充电。對於貯气瓶來說，当温度降低时由於空气体積的減小所放出的能量也有些減少，但是，这种貯气瓶在任何温度下都可以再次充注。

由於气压傳动有上述的各种缺点，它在应急系統中以及只在小型飛機的主要的輔助系統中才得到应用。

適合於飛機上应用的有液压的及电动的輔助作动系統，这两种系統在飛機上应用范围目前已有顯明的区别，液压的（其中也包括气压

的）主要用在作动裝置上（用在飛機的「肌肉」系統上），而电动的則用在指揮裝置上（用在飛機的「神經」系統上）。

但也有不符合这一原則的情况，而採用电动液压复合系統最为適宜。在后一种情况下，可以充分利用电动系統的优点（能量傳动方便，信号傳遞迅速）及液压系統的优点（完成力的傳动

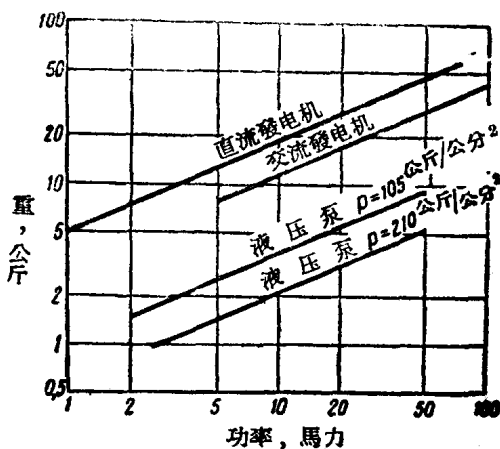


圖1. 液压原动机和發電机的重量

簡單而減速比与有效系数大及其工作可靠)。

当为飛機选用某种輔助作动系統时，必須依照其具体条件並根据这些条件來判定其优缺点。

选用作动系統的一个主要准則就是附件及系統的單位傳輸功率的重量要最小，这一准則永远是主要的。因为飛機的飛行性能和它的重量有重大的关系。特別對於远航程的飛機，系統重量最小則更为重要。假設在这种飛機上用於移动飛機自重的燃料重量，等於飛機的重量，那么，在飛機結構重量上每節省一公斤就相當於飛行重量減少兩公斤。

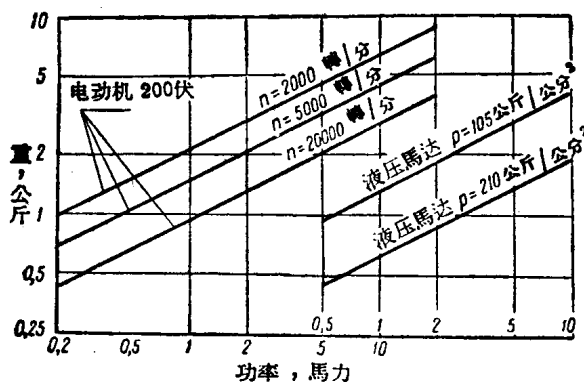


圖2. 液壓馬達和直流電動機的重量

統計証明，液壓系統在目前所用的轉數（2500~3000轉/分）及壓力（200~250公斤/公分²）下，每一千瓦功率為0.15~0.20公斤，而目前的發電機每一千瓦功率則有1.5~2.0公斤的重量。

電動的、液壓的及氣壓的附件按重量方面的比較數據如圖1~3所示。

圖1中的圖表說明，在相同的轉數下，目前所用的發電機的重量和壓力為105公斤/公分²的液壓系的重量相比較要大五倍，而和壓力為210公斤/公分²的液壓系的重量相比較則要大八倍。在重量方面既是高壓交流發電機也不能和液壓泵相比。

液壓泵不僅在重量方面較為優，而且較發電機有更廣泛的使用範圍。因為發電機只有在達到一定的最小速度才能產生功率。

液压泵的重量小便使其容易固定，且易於免除因振动而產生的困难。由於液压泵的尺寸小，各部的慣性力矩也不大，这样便使傳动机構簡化了。

圖 3 中的曲線說明，在所有应用的旋轉式馬達中，每單位功率的重量隨功率的增大而減小。還應注意到圖 3 中所示的液压及气压馬達的重量特性曲線是按連續工作來計算的，而電動机的重量特性曲線則按間歇工作來計算之。

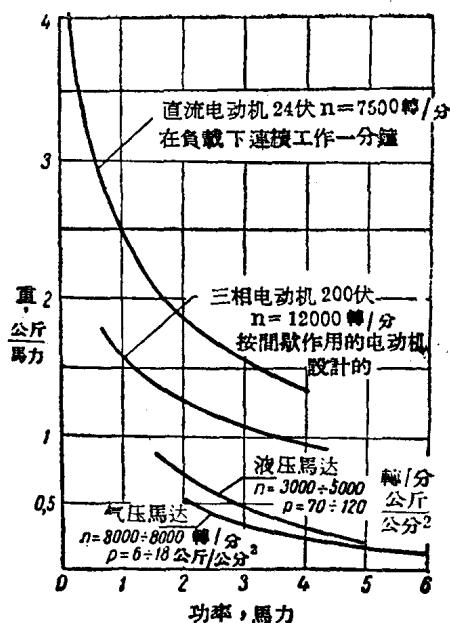


圖 3. 旋轉式馬達的重量

以上所提到的液压附件的重量並不是極限值，我們將見到它的重量特性在今後的改善。例如，就有一種功率為 60 馬力的自動調節轉數的液压傳动机構，當 $p=300$ 公斤/公分² 時，它的重量（包括液压泵，馬達，滿盛着油的油箱及操縱附件在內）总共只有 20 公斤，即每馬力佔 0.33 公斤。

當壓力增高時，系統每單位功率的重量更要減少。例如，當壓力為 500 公斤/公分² 左右時，液压系的重量每一千瓦共約 0.10 公斤。

液压附件最主要的優點就是它的體積小。例如，液压馬達总共才佔相同功率的电动机體積的 12~13%。

雖然，液压系統有上述一些優點，但以飛機各部傳輸（分配）能量方面來說，則不如電動的簡單。電導線的柔軟性使其在很難接觸的地方也較易安裝。另外电气系統可用電門或可熔保險絲來保護，保險絲能使損壞只及於某一部分。而在液压系統中，能量的傳輸及損壞的局限則較电气系統為複雜。

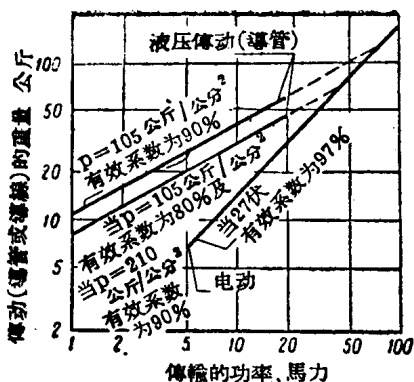


圖 4. 功率傳輸至 15 米遠時電導線及
液壓導管重量的比較

圖 4 表示功率傳遞 15 米遠時液壓系統導管及電導線在重量方面的比較數據。

決定某種系統的特性的主要因素就是它的組成附件及整個系統的有效係數。圖 5 表示相同轉數時的發電機及液壓泵的有效係數特性曲線。這裡，液壓泵的功率按壓力為 105 公斤/公分²計算而發電機的功率則按電壓為 27 伏計算。

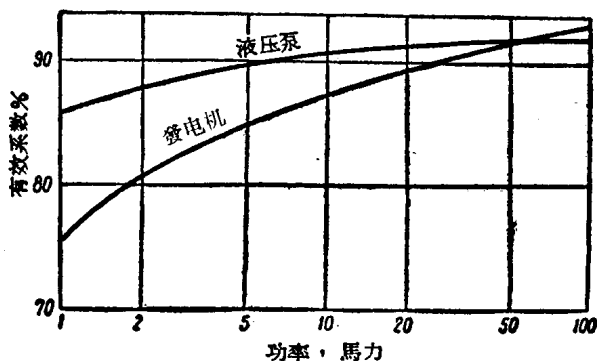


圖 5. 液壓泵及發電機有效係數的比較數據

上述曲線說明，飛機各系統整個功率範圍內（大約可達 $N = 50$ 馬力）液壓泵的有效係數較發電機的有效係數為高。

液壓傳動的主要優點，就是在保持高的有效係數下，完成高減速比（傳動比）的傳動很簡單，並且很容易操縱被動機構的位置，也就是說可以將它放在兩極限位置中的任何位置上。液壓操縱的優越性就是壓力、轉數、體積、運轉及其他的作用或各種作用的聯合容易操縱，並且工作機構加於操縱傳感器的指揮信號的反應速度也同樣容易操縱。系統的精確度和靈敏度就與此有關。

液壓馬達工作的穩定性大大地超過了電動機的。圖 6 表示有

負載的液壓馬達及電動機轉數的穩定性的特性曲線。這些曲線說明，在小轉數時，液壓馬達轉數的穩定性超過了電動機穩定性的數倍。

當評定輔助作動裝置的特性時，它在各種使用條件下的可靠性，特別是對較不熟練的人員能否來操縱系統及維護飛機來說，則是十分重要的。後一條件對於軍用飛機特別重要。另外，對於軍用飛機來說，有重大意義的是系統在受敵人炮火威脅下的弱點為最小，而其失火的危險性也最小。

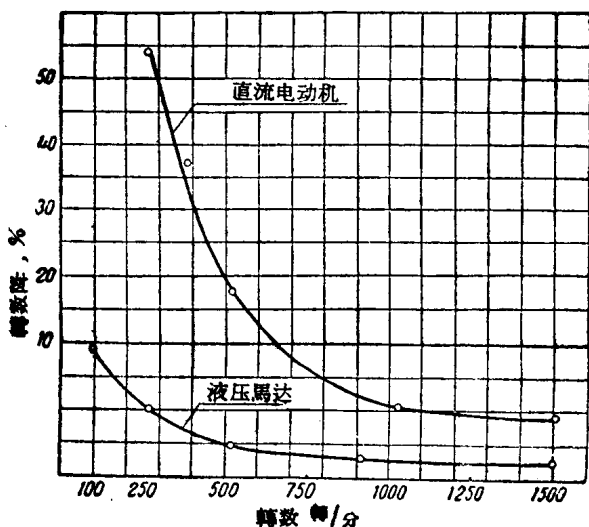


圖 6. 液壓馬達及直流電動機的轉數穩定性的特性曲線

使用的方便包括安裝、檢查及修理的方便。完成這些動作應不需拆卸飛機及其各部分。機件應很容易接近，化費力氣應最少。

液壓傳動很能滿足這些要求，即其在工作中不出故障，使不熟練的人員也可以維護它及在任何濕度及大氣壓力下都可進行工作。實在說起來，尚在不久以前，液壓附件對於溫度的變化還有某些敏感度，因而引起液體粘度的變化，並當溫度變化及有外物落入時，可能使運動機件卡住。但是近年來，由於所採用的液體其粘度在溫度必要變動的範圍內，實際上幾乎保持固定不變，及所選用的材料及機件的構造在設計的温度變動下才能避免零件卡住，

所以这些困难才都能被克服掉。

液压傳动的优越性还表现在从动附件的軸線和軸能随意改变位置，容易使运动接通、断开或逆轉，操縱簡單，防止过载容易，並可簡單的达到自动化。

液压系統及其附件容易統一及标准化，因为各种不同的機構進行工作时，所需的不同的力量以改变作动筒活塞面積的办法而得到。液压系統的制造及維護十分簡單，由於液体实际上有不可壓縮的性質，附件各部运动的傳动進行得很均匀而無撞击。在液压附件中各摩擦部分的潤滑有可靠的保障，並能預防皮垫圈的干燥。

液压系統的工作原理及機構原理

在大多数情况下，液压系統由三个基本環節組成：

- 1) 动力環節，其中包括液压泵及屬於能源的附件；
- 2) 分配環節，分配及調節液流，也就是决定液压機構动作的方向及速度；

3) 工作環節，它所包括的附件是將压力能轉变为作动附件的动能（机械能）；这种附件在大多数情况下，就是作动筒（往复运动），也可能是液压馬达（旋轉运动）。

飛機構造上所採用的液压傳动是屬於容積式的附件，該附件是按閉合連通管的原理工作的。圖 7 为这种傳动裝置的原理圖。二閉合連通器中，有一个（容器 1）为液压泵（主动部），而另一个（容器 2）为馬达（被动部）。当容器 1 和 2 是十分緊密而液体实际上为不可壓縮时，活塞 a_1 和 a_2 的位移可以它們所經過的体積的相等的恆等式來表示

$$h_1 f_1 = h_2 f_2, \quad (1)$$

式中 h_1 及 h_2 ——主动部及被动部活塞的位移；

f_1 及 f_2 ——主动部及被动部活塞的面積。

根据公式 (1) 可得以下諸式

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}, \quad (2)$$

$$h_2 = h_1 \frac{f_1}{f_2} = h_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (3)$$

略去液体阻力及活塞的摩擦力不計，可得以下的关系式

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{p f_2}{p f_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}; \quad (4)$$

$$P_2 = P_1 \frac{f_2}{f_1} = P_1 \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad (5)$$

式中 p —— 容器中液体的压力；

P_1 及 P_2 —— 液压作用在活塞上的静压力。

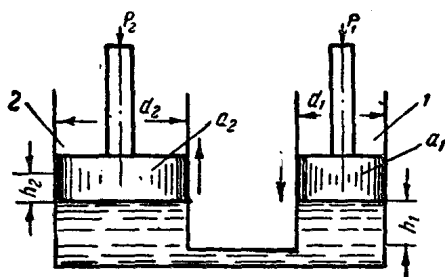


圖 7. 液压傳动原理圖

上述公式为計算靜压式（容積式）液压傳动的基本公式。

假設活塞 a_1 移动行程 h_1 所經過的时间为 t ，即可求得活塞的运动速度为

$$V_1 = \frac{h_1}{t} \quad (6)$$

力和速度的乘積得功率

$$W = P_1 V_1 = p f_1 V_1, \quad (7)$$

式中 p —— 液体压力，公斤/公分²；

f_1 —— 活塞面積，公分²；

V_1 —— 活塞运动的速度，公分/分；

W —— 功率，公斤公分/分。

由於活塞面積 f_1 和它的移动速度 V_1 的乘積等於活塞 a_1 在單位时间内所經過的体積 Q ，或等於活塞 a_1 由作动筒 1 挤入作动筒

2 的液体体积，则上一公式又可写成下一形式

$$W = pQ, \quad (8)$$

因此，理论功率的公式则为

$$N = \frac{PQ}{45 \times 10^4}, \quad (9)$$

式中 Q ——所挤出的液体体积(活塞所经过的体积)，公分³/分；

P ——液体的压力，公斤/公分²；

N ——理论功率，马力。

在图 7 所示的原理图中，为所有液压原理图的主要部分，即液压泵与马达。

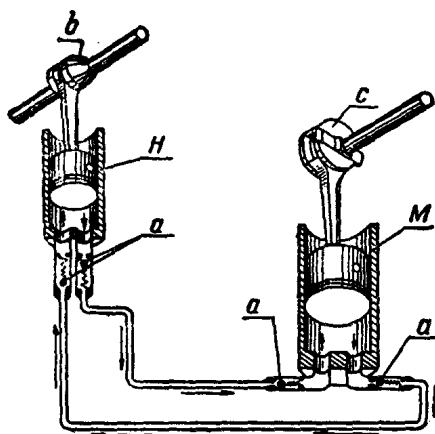


图 8. 迴轉液压傳动的原理圖

將液压泵 H 及馬達 M 裝以活門 a (圖 8) 並將它們的活塞連桿同主動曲柄軸 b 及被動曲柄軸 c 相連，則得到迴轉傳動機構的最簡單的原理圖。

將圖 7 所示的原理圖裝一附件以分配液压泵所供給的液体並裝一保險裝置，以限制液体压力提高的可能，則得直線运动的液压傳动原理圖。

这种原理圖如圖 9 所示。某种構造形式的液压泵 1 从油箱 4 吸取液体並經分配機構 3 將它送入作動筒 2 的某一腔中，使它的活塞移动。

液体从不工作的腔 (圖 9 中右边的) 經分配機構 3 流洩到油箱中。当轉动分配機構 3，作動筒的工作腔和非工作腔互相掉換，活塞即進行反方向的运动。

管路圖中也裝有保險活門 5，当系統中压力超过額定值时，

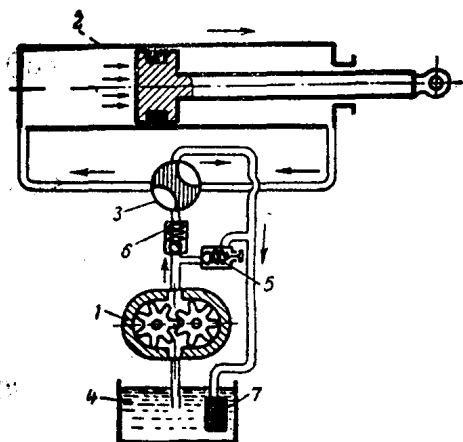


圖 9. 液壓系統原理圖

它就打开，然后液体即進入油箱 4。在將液体引回到油箱的管路中裝有濾過器 7。管路圖中裝有單向（阻止）活門 6，以防止液体的倒流。

液体压力大小的選擇

由公式（9）可見，在保持或甚至減小附件的體積及重量下，以提高液壓傳動系統中液体压力的办法，可以增大其功率。

随着压力的提高，便必須增加作动筒及導管的厚度，因而重量將有些增加，但系統中液体的重量將大大的減小，因此整个重量也將減小。但是，当压力的数值超过某一定的界限后，作动筒就开始加重，並較系統中因液体體積的減小而变輕的程度还要大些，因而整个系統的总的重量又重新增大。顯然，超过某一压力后，就使重量同样增大的这一压力，其大小与制造作动筒的材料的強度有关。對於鋼的作动筒來說，这一压力为 1500~2000 公斤/公分² 而對於杜拉鋁的作动筒則为 500~600 公斤/公分²。

作动筒中工作压力提高的界限，以能保證速桿有所需要的強度來決定。

導管比重（每單位傳輸功率的重量）的变化，除因液体阻力的关系所引入的修正量外，基本上也和作动筒重量的变化一样（圖 10）。

顯然，随着導管内切面的減小，導管的有效面積和它的圓周之比为

$$\frac{f_{TP}}{\pi d} = \frac{d}{4}。$$