

航空液压系统计算
与设计的某些问题



航空液壓系統計算 與設計的某些問題

[苏联] С. И. 羅日杰斯特維斯基 主編

秦維賢 譯

陸曾佑 等校



國防工業出版社

1966

出版者的話

本書介紹了目前普遍重視的航空液壓系統計算與設計的某些問題；工作液體及其物理性質；液體力學；液壓迴路的種類；液壓隨動系統及其動力學；液壓附件的密封裝置；高溫液壓系統的設計與試驗的某些問題。

本書譯自俄文，而俄文原書系根據英美資料編譯而成。它可供從事液壓傳動技術的工程設計人員參考，而對高等工業院校有關專業的師生亦有裨益。

本書由秦維賢同志譯出，其中緒論和第一、二、三、六、七、八各章由陸曾佑同志校閱，第四、五兩章由顧柏和同志校閱。

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

〔蘇聯〕С. Н. Рождественский

ОБОРОНГИЗ 1962

•

航空液壓系統計算與設計的某些問題

秦維賢 譯

陸曾佑 等校

•

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第074號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

•

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張7 $\frac{1}{8}$ 181千字

1966年4月第一版 1966年4月第一次印刷 印數：0,001—2,1

統一書號：15034·1104 定價：（科六）1.10元

序

飞行速度的不断提高，对飞行器的设计师提出了一系列新的问题。当飞行速度过渡到超音速时，保证高度机动性的问题与液压传动装置的改进有着密切关系。因此，在液压传动的计算与设计方面，随动系统的动力学问题和高温条件下附件的工作问题具有特殊的意义。

本书研究了以下这些问题：根据频率特性和传递函数研究液压随动机构的动力学；液压回路和随动系统；液压系统的一些设计问题，其中有高温条件下工作的密封组件和某些液体力学问题，例如复杂力场中的液体平衡，变粘度情况下的液压计算以及液体静压轴承等。书中还附有解决具体问题所必需的参考资料。

目 录

序	3
緒論	7
第一章 飞机液压系统使用的工作液体	9
§ 1-1 对工作液体的要求	9
§ 1-2 工作液体的物理性质	12
第二章 液体力学	29
§ 2-1 液体静力学	29
§ 2-2 非粘性液体动力学的基本方程式	32
§ 2-3 雷诺数。圆管中液体（气体）的层流	37
§ 2-4 液体在平行平板间的层流	40
§ 2-5 变粘度液体的层流计算	43
§ 2-6 液体在偏心圆柱面所形成的环形间隙中的层流	46
§ 2-7 液体在边界运动的间隙中的层流	47
§ 2-8 具有运动边界和变粘度的液流	49
§ 2-9 液体静压轴承	50
§ 2-10 液体在管中的紊流	53
§ 2-11 局部阻力	55
§ 2-12 喷嘴—挡板	56
§ 2-13 冷气蓄压器计算的某些问题	59
第三章 液压回路	63
§ 3-1 基本液压回路	63
§ 3-2 保证作动筒三位置动作的液压回路	64
§ 3-3 保证作动筒按规定顺序动作的液压回路	65
§ 3-4 作动杆同步运动的方法	70
§ 3-5 应急液压回路	71
§ 3-6 压力源的液压回路	73

§ 3-7 随动系统 (伺服系统)	76
§ 3-8 刹车系统	78
第四章 液压随动系统	79
§ 4-1 概述	79
§ 4-2 随动系统工作的基本原理	81
§ 4-3 操纵飞机的随动系统	86
§ 4-4 影响随动系统稳定性的因素	91
§ 4-5 滑阀的结构	94
§ 4-6 预先选择输出元件位置的随动系统	96
§ 4-7 副翼、升降舵和方向舵的随动系统原理图	99
第五章 液压随动系统的动力学	103
§ 5-1 拉氏变换法	103
§ 5-2 典型随动机构的方程式	112
§ 5-3 随动机构的传递函数	116
§ 5-4 随动机构对不同信号的反应	117
§ 5-5 随动机构的频率特性	119
§ 5-6 传递函数的种类	123
§ 5-7 根据频率特性和传递函数研究随动机构的动力学	127
§ 5-8 改善随动机构特性的方法	133
§ 5-9 容积式调节的实际随动机构的方程式	141
§ 5-10 滑阀控制的随动机构	145
§ 5-11 作用在随动滑阀上的载荷	151
§ 5-12 电动液压放大器	153
§ 5-13 节流式调节的实际随动机构的动力学	159
第六章 液压附件的密封装置	162
§ 6-1 密封装置的工作原理	162
§ 6-2 密封装置的结构	164
§ 6-3 固定密封装置	165
§ 6-4 活动密封装置	166
§ 6-5 复合密封装置	173
§ 6-6 密封装置的材料	176
§ 6-7 密封装置的试验和研究方法	183

§ 6-8	密封裝置的故障	186
§ 6-9	在高溫下工作的密封組件	188
§ 6-10	固定的金屬密封裝置	192
§ 6-11	金屬密封裝置的計算	199
第七章	液壓系統的試驗	203
§ 7-1	試驗台与試驗方法	203
§ 7-2	液壓系統的高溫試驗	210
第八章	高溫液壓系統設計的某些問題	214
§ 8-1	氣流的滯止溫度	214
§ 8-2	在高溫下工作的附件和系統的材料及表面處理	216
§ 8-3	工作液體	219
§ 8-4	液壓系統附件的設計	221
§ 8-5	過濾器	226
§ 8-6	導管与接头	227
§ 8-7	高溫液壓系統的工作特点	227
参考文献		228

緒 論

从本世紀三十年代起，液压傳动就已經可靠地使用在飞机結構中了。随着飞机的飞行速度、机动性和载重量的不断提高，需要增大操纵机构上的作用力以及增大附件的功率，才能完成刹車、爬升、收放起落架和移动艙盖等各种动作。为了有效地完成这些动作，在傳动系統中就有必要采用电动的、气压的或液压的傳动裝置。

究竟選擇上述哪一类傳动裝置，这与很多因素有关。而各类傳动的特点以及在規定工作条件下使用的可能性，在选择傳动型式时則具有特別的意义。

在容积式液压傳动裝置中，使用壓縮性很小的液体作为工作介质。这种傳动裝置可以很完善地調节工作机构的速度，并且具有很大的能量容量，因而結構紧凑。較之电动和冷气傳动來說，容积式液压傳动的这些特性具有很大的优点，因此在現代飞机結構中它仍然保持着牢固的地位。

在現代的大型飞机上，当导管的总长在500米以上时，液压系統的各种附件和組件共計有70种左右。由于各个附件的单位功率（相对单位重量）相当大，因此，这种飞机液压系統的总功率达到200千瓦。目前所使用的附件，其特性数据如下：

液压泵—— $p = 210 \text{ 公斤/厘米}^2$ ； $n = 4000 \text{ 转/分}$ ；

$$N_{yA} = N/G = 4 \sim 3 \text{ 千瓦/公斤}；$$

液压馬达—— $p = 200 \text{ 公斤/厘米}^2$ ； $n = 3000 \text{ 转/分}$ ；

$$N_{yA} = 1.9 \text{ 千瓦/公斤}；$$

液压作动筒—— $P = 6000 \text{ 公斤}$ ； $p = 200 \text{ 公斤/厘米}^2$ ；

$$N_{yA} = 2.5 \text{ 千瓦/公斤}。$$

改进液压泵和液压馬达的結構，首先是提高它們的轉速，还能进一步增大●它們的单位功率。“維克尔斯”●飞机和導彈公司生产的变流量轉子型軸向柱塞泵可作为反映出这方面所达到的成果的例子。在这种泵中，当单位功率为8馬力/公斤时，获得了很高的能量容量；当設計轉速 $n = 8000 \text{ 转/分}$ 时，它具有 210 公斤/厘米^2

● 原书誤为减小。——譯者

● Missiles and Rockets, Aug. 1958.

的压力以及 750 小时的寿命。容积效率为 0.96~0.98。根据实验数据,流量由零变到最大值的时间(即泵的快速动作时间)不超过 0.004 秒。这种液压泵的特点不是靠用改变传动盘的斜角来调节流量(这是以前各种结构所采用的方法),而是靠改变分配活门的转角,也就是用改变分配相位来调节流量的。

任何的液压系统,包括飞机液压系统在内,都是由下列各部分组成的:

1) 液压能发生器(液压泵); 2) 液压能接受器(液压马达); 3) 调节和分配装置; 4) 保护装置。

飞机液压系统的设计包括两个主要步骤:(1) 编制系统图,它必须满足需要的液压容积,以保证飞机液压传动机构可靠地动作;(2) 计算和设计各个回路和附件,以及整个系统。根据计算的结果,最后确定方案。液压系统及其组成回路的计算按下列顺序进行:能量计算,液压计算,最后是动力学计算。

本书仅研究了:航空液体力学、随动传动动力学、高温系统设计、附件的密封装置、液压系统的试验及工作液体的物理性质等。

设计液压系统是从选择工作压力开始的,工作压力是系统增压管路中由液压泵形成的压力。

在初期的航空液压系统中,工作压力不超过 50~60 大气压。在这种压力下,系统的尺寸庞大而笨重。在许多情况下,按工艺观点确定的系统附件的壁厚要比计算数据大得多。后来,压力提高到 80~100 大气压,结构上也还没有重要的变化。随后,改进液压系统工作的方向便趋向于减轻重量和使附件生产广泛标准化。由于这些工作的结果,在第二次世界大战结束后就确定了标准的工作压力,英国为 180 大气压,美国为 210 大气压。使用这样的压力,特别在大型飞机上,显著的一个优点是减轻了液压系统的重量。根据国外的资料,目前液压系统正在采用 280~350 大气压的工作压力。工作压力影响液压系统的重量,经过研究证明,根据导管材料的不同(硬铝或钢),压力在 150~250 大气压范围内最为适宜[●]。

● H. Himmler, La commande Hydraulique, Paris, Dunod, 1960.

第一章 飞机液压系統 使用的工作液体●

§ 1-1 对工作液体的要求

液压系統中的工作介质是壓縮性很小的粘性液体，对它提出的要求如下：

- 1) 比重不应超过 1 克/厘米³；
- 2) 粘性指数必須較高，即液体粘性随溫度变化应很小；
- 3) 工作溫度范围足够大（+200°C ~ -70°C）；
- 4) 在整个工作溫度范围内潤滑性保持不变；
- 5) 长期貯存时，液体不应脫层或分解；
- 6) 使用安全，即无毒性，特別在喷射情况下；
- 7) 閃点应高；
- 8) 不起泡沫；
- 9) 液体不应腐蝕密封材料和銹蝕金屬零件；
- 10) 在不低于 280 公斤/厘米² 压力下進行多次泵的流量試驗时，液体不改变自己的性质，也不引起分解；
- 11) 制造价格低廉而且原料充足。

在目前还没有不燃燒的液体（以水为基体的液体除外）的情况下，除防火（要求 7）这一条要求以外，現有的工作液体均能滿足其它要求。

在这一問題上，还有着大量的試驗工作要做。

● 本章取自下列資料：

- H. Conway, Aircraft Hydraulics, London, 1957, v. 1, ch. 1;
G. Keller, Aircraft Hydraulics Design, Ohio, 1957, ch. 1;
W. Ernst, Oil Hydraulic Power and Its Industrial Application, N. Y. 1960.

目前所使用的航空液体，可分为下列几类：

- 1) 矿物的（以石油为基体）；
- 2) 植物的（以蓖麻油为基体）；
- 3) 水的（以水甘醇混合液为基体）；
- 4) 合成的（以醚和硅树脂为基体）；
- 5) 卤化的碳氢化合物。

表 1-1 列出目前英国和美国所使用的工作液体，并具有正式的说明书。而表 1-2 所列的工作液体也是广泛应用的，但没有正式的说明书。

表 1-1 有正式说明书的液压系统工作液体

英 国 标 記	美 国 标 記	国际标记	附 注
DTD-585	MIL-0-5606	OM-15	以矿物油为基体 广泛使用
DTD-388	AC-3586C A类	OF-30	以蓖麻油为基体 用于减震支柱
DTD-641	AC-3586C C类 轻质	OF-5	以蓖麻油为基体 代替 Lockheed-22 油液。使用 不广
DTD-900/4081 (Lockheed-22)	—	—	以蓖麻油为基体 具有良好的低温性能

在液压系统中，用作密封圈和垫片的橡胶种类依工作液体的种类而定。例如，以植物油为基体的工作液体要求用天然橡胶制的密封圈和垫片；以矿物油或水为基体的工作液体要求用合成橡胶；而以合成液或以卤化碳氢化合物为基体的工作液体则要求用专用的合成橡胶。由此可见，在同一个液压系统中，当工作液体换为另一种工作液体时，要求相应地更换所有的密封圈和垫片。

设计液压系统时，其中使用的工作液体和密封橡胶的种类，应当相互配合地选择。而选择橡胶种类、密封零件的尺寸以及它们的加工方法，则必须根据具体情况来进行。关于密封装置的详细资料将在第六章介绍。

表1-2 沒有正式說明書的液壓系統的工作液體

名稱或牌號	基 體	顏 色	附 注
<i>Hydrolube</i> U-4	水甘醇	—	不燃燒 美國試驗應用
<i>EEL-6</i>	水甘醇	—	不燃燒 在試驗完成階段
<i>Skydrol</i>	磷酸脂	7000種綠色的 500種紫紅色的	熱穩定。美國研究 比重1.08
<i>RPM</i> 液體	鹵化碳氫化合物	—	不燃燒。美國研究 比重1.51

在工作液體中加入少量的各種顏料，不同液體就可以根據顏色來加以區別。為了更精確地確定工作液體的種類，要用相應的儀器設備，檢查它的比重和粘度。此外，辨別其為礦物油還是蓖麻油，可以用少量液體與酒精在試管中混合，這時，礦物油從酒精中很快地脫層，而蓖麻油則與酒精混合。

在英美等國家，工作液體的着色如下：

DTD-391——淺藍色；

DTD-585——紅色；

DTD-641——褐黃色；

DTD-900/4081 (Lockheed-22)——黃色；

MTL-F-7083——淡琥珀色。

以蓖麻油為基體的工作液體重於礦物油；以水為基體的工作液體重於蓖麻油；而 *Skydrol* 工作液體則重於所有其他的工作液體。由於着了色，就便於發現工作液體經各種連接密封處的泄漏。

在蘇聯，航空液壓系統使用 *AMT-10* 工作液體，它着成紅色。

在英國和美國的航空液壓系統中，最常使用 *DTD-585 (MIL-0-5606)* 工作液體，其成分如下：

高純度輕質石油鹵分	60~80%
高純度重質石油鹵分	15~30%
稠化劑(聚烷烴甲基丙烯酸鹽)	4~8%

氧化的阻化剂	0.1~0.5%
磷酸三甲苯酚酯	0.5~0.75%
染料	0.002%

这种工作液体的基本技术特性如下:

温度 -40°C 时, 粘度为 500 厘司;

温度 $+50^{\circ}\text{C}$ 时, 粘度为 10 厘司;

温度 $+200^{\circ}\text{C}$ 时, 粘度为 1.9 厘司;

凝固点为 -67°C ;

低温时稳定性良好;

不引起锈蚀;

对机械粉屑夹渣有良好的稳定性。

AMF-10 工作液体的比重为 $\gamma = 850 \text{ 公斤/米}^3$, 它具有下列
粘度:

温度 $+50^{\circ}\text{C}$ 时为 10 厘司;

温度 -50°C 时为 1250 厘司。

§ 1-2 工作液体的物理性质

压缩性

所有的液体都具有压缩性, 虽然在解决许多一般问题时可以认为它们是不可压缩的, 但对于高压下工作的液压系统, 工作液体的压缩性具有很大的意义, 在计算时必须予以考虑。图 1-1 所示为某些液体的相对体积变化(压缩性)与压力的关系曲线。表 1-3 列有英国和美国航空用油的密度数据, 它们是在不同的压力和固定的温度下得出的。为了比

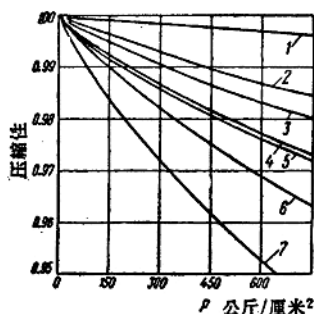


图1-1 液体的压缩性

- 1—水银; 2—甘油; 3—EEL-6 液体;
4—水; 5—Skydrol-7000; 6—DTD
-585; 7—Silicone DC.

較，表中还列有甘油的数据。

表1-3 在不同压力和固定温度下，
一些航空油液的密度（克/厘米³）

名 称 或 牌 号	剩 余 压 力（公斤/厘米 ² ）					
	0	140	280	420	560	700
DTD-585	0.842	0.851	0.858	0.864	0.870	0.876
Lockheed-22	0.943	0.952	0.959	0.966	0.971	0.977
Skydrol-7000	1.057	1.076	1.083	1.089	1.094	1.099
EEL-6	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.10
甘油	1.26	1.27	1.28	1.29	1.29	1.30

液体的压缩系数 C 表征在单位压力下液体密度的相对变化，它由下列微分方程式确定：

$$C = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-1)$$

而压缩系数的倒数 $K = \frac{1}{C}$ 即为液体的容积弹性系数。

根据多烏和芬克的資料^①：

$$\rho = \rho_0 (1 + Ap - Bp^2), \quad (1-2)$$

式中 ρ ——压力 p 和温度 t 时的密度；

ρ_0 ——大气压力和同一温度 t 时的密度；

p ——压力；

A 和 B ——与温度 t 有关的系数。

在多烏和芬克的著作中还繪制有相应的曲綫。但在液压系統，所遇到的温度範圍內（ $-60 \sim +150^\circ\text{C}$ ），系数 A 与 B 的变化是不大的。因此，取 $t = 40^\circ\text{C}$ 时的平均值，对于实际計算已足够准确：

$$A = 62.2 \times 10^{-6} \text{厘米}^2/\text{公斤},$$

$$B = 1.14 \times 10^{-8} \text{厘米}^4/\text{公斤}^2.$$

① R. B. Dow and C. E. Fink, Some Properties of Lubricating Oils at High Pressure, Y. Appl. Phys. 11, May 1940,

微分 (1-2) 式并代入公式 (1-1), 得出用压力确定压缩系数的公式:

$$C = \frac{A - 2Bp}{1 + Ap - Bp^2} \quad (1-3)$$

计算表明, 对于液压传动所使用的液体, 系数 C 的变化由 60.4×10^{-6} 厘米²/公斤 ($p = 70$ 公斤/厘米²时) 到 44.5×10^{-6} 厘米²/公斤 ($p = 700$ 公斤/厘米²时)。而对于实际上最常遇到的压力范围 (70~210 公斤/厘米²), C 的变化则由 60.4×10^{-6} 到 56.5×10^{-6} 厘米²/公斤。计算时可取平均值 $C = 58.0 \times 10^{-6}$ 厘米²/公斤。

计算液体压缩性的重要性, 可以从高转速泵的液压传动中看出。这种泵在每一行程时间内进行着液体体积的压缩。对于不可调节的定流量泵来说, 设其每秒流量为 Q , 当动作筒的容积为 V 时, 则产生压力 p 所需的时间为

$$t = C \frac{Vp}{Q} \quad (1-4)$$

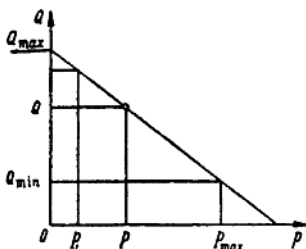


图 1-2 变流量泵的流量 Q 与压力 p 的关系

若泵的流量可变 (在大多数情况下是这样), 则产生一定的压力, 将需要比公式 (1-4) 更长的时间。在调节系统中, 常常遇到 Q 与 p 的线性关系 (图 1-2)。泵供给流量 Q 达到某一压力 p_1 , 从 p_1 开始, 随着压力的增长, 流量便降到零; 或者, 当最高压力为 $p_{\max}$ 时, 流量降到最小值 $Q_{\min}$ 。今后, 我们取 $p_1 = 0$ 。若 $p_1 \neq 0$, 则公式 (1-4) 可用于 $p < p_1$ 的情况; 对 $p > p_1$ 的情况, 则需要采用考虑变流量的公式。

根据图 1-2, 可得

$$\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{p_{\max}} = \frac{Q_{\max} - Q}{p} \quad (1-5)$$

由此得

$$Q = Q_{\max} - \frac{p}{p_{\max}} (Q_{\max} - Q_{\min}) \quad (1-6)$$

若 $Q = f(p)$ ，則方程式 (1-4) 的微分形式为

$$dt = C \frac{V dp}{f(p)}。$$

將式 (1-6) 代入上式，則得

$$dt = C \frac{V dp}{Q_{max} - \frac{p}{p_{max}}(Q_{max} - Q_{min})}，$$

或

$$dt = C \frac{V dp}{Q_{max}} \frac{1}{1 - \frac{p}{p_{max}} \left[1 - \frac{Q_{min}}{Q_{max}} \right]}。 \quad (1-7)$$

积分方程式 (1-7)，得

$$\begin{aligned} t &= \frac{V}{Q_{max}} C \int_0^{p_{max}} \frac{dp}{1 - p \left[\frac{1 - Q_{min}/Q_{max}}{p_{max}} \right]} \\ &= C \frac{V}{Q_{max}} \frac{p_{max}}{1 - Q_{min}/Q_{max}} \ln \frac{Q_{max}}{Q_{min}}。 \end{aligned} \quad (1-8)$$

現在將根据公式 (1-8) 所計算的时间与根据定流量泵的公式 (1-4) 所計算的时间比較一下。假定在公式 (1-8) 中取 $Q_{max} = Q_{min}$ ，則得到 $\frac{0}{0}$ 的形式。展开不定式并假定 $Q_{max}/Q_{min} = 10.0$ ●，这一比值是实用上最普遍的，于是可得

$$t = C \frac{V}{Q_{max}} \left(\frac{p_{max}}{1 - 0.1} \right) \ln 10 = 2.5 C \frac{p_{max} V}{Q_{max}}，$$

也就是說，变流量泵产生規定压力的时间为定流量泵产生同样压力的时间的 2.5 倍。

如果在計算中設 $Q_{min} = 0$ ，則显然可得 $t = \infty$ 。然而这种条件 ($Q_{min} = 0$) 实际上是不存在的，因为調节器作动杆的位移要滞后于压力的增长；并且，在最大压力的情况下，泵仍然可以給出一些最后的流量 Q_{min} 。实际上，泵的流量开始下降的压力 p_1 不

● 原书印为10.1。——譯者

等于零，而是 $0.5 \sim 0.75 p_{\max}$ 。
 这时，公式 (1-4) 对 $0 < p < p_1$ 是正确的，而公式 (1-8) 则对 $p_1 < p < p_{\max}$ 是正确的。因此，在一般情况下，对变流量泵要求的时间为

$$t = C \frac{V}{Q_{\max}} \left[p_1 + \frac{p_{\max} - p_1}{1 - Q_{\min}/Q_{\max}} \ln \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right]$$

液体中含有不溶解的空气将大大影响其压缩性。连杰利和阿爾連指出[●]，气体液体混合物的容积弹性系数 K (等于 $\frac{1}{C}$) 可用下式确定：

$$K = K_0 \frac{V_f/V_a + 1}{V_f/V_a + K p_0/p^2}$$

式中 K_0 ——不含空气的液体的弹性系数；

V_f ——大气压力 p_0 时液体部分的体积；

V_a ——大气压力 p_0 时气体部分的体积。

图 1-3 表示液体部分与气体部分的比例不同时，系数 $b = K/K_0$ 与压力 p 的关系。

粘度

粘度是液压机构工作液体最重要的参数之一。我们知道，液体的粘度就是指液体抵抗滑移变形的物理性质。牛頓首先提出了假设，后来称之为牛頓液体摩擦定律，并可得出数学公式。按照这个定律，厚度无限小的两接触液层表面所产生的滑移应力与滑移的角速度成比例 (图 1-4)，即

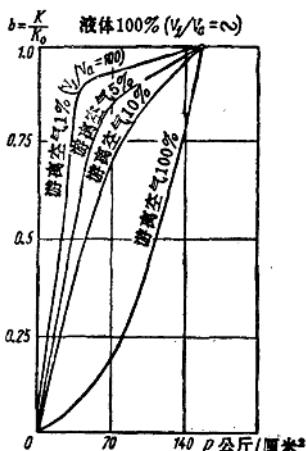


图 1-3 溶解的空气对液体容积弹性系数的影响

● H. Conway, Aircraft Hydraulics, London, 1957, v. 1,