

# 飞机設備

下 册

B. H. 克尼雅節夫 著  
K. E. 波里休克



國防工業出版社

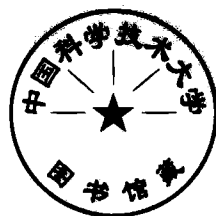


# 飞机设备

下册

В. И. 克尼雅节夫、К. Е. 波里休克 著

余德星等译



国防工业出版社

## 內 容 介 紹

本書为高等航空学校“飞机设备”课程的必要教学参考书。

書中对飞机设备进行了分类,并且討論了对各类飞机设备的基本要求,以及現代飞机上所安装的各种仪表装置的作用原理与构造。

本書可作为課程設計及畢業設計的参考資料,并可作为有关技术人员的参考資料。

В.Н.Князев и К.Е.Полищук  
ОБОРУДОВАНИЕ САМОЛЕТОВ

Государственное  
издательство оборонной промышленности  
Москва—1952

本書系根据苏联国防工业出版社  
一九五二年俄文版譯出

## 飞 机 設 备

下 冊

〔苏〕克尼雅节夫、波里休克 著

余 德 星 等譯

\*

国防工业出版社出版

北京市書刊出版业营业許可証出字第 074 号  
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店发行

\*

850×1168 1/32 • 10<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 印張 • 263,000 字

一九五八年九月第一版

一九五八年九月北京第一次印刷

印数: 1—1,100册 定价: (10) 1.90元

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第五章 飞机的液压设备及气压设备 .....        | 1   |
| § 1. 飞机液压系统及气压系统概論 .....      | 1   |
| § 2. 飞机液压动力系统 .....           | 13  |
| § 3. 飞机气压动力系统 .....           | 48  |
| 第六章 航行駕駛仪表及自动駕駛仪 .....        | 56  |
| § 1. 概論 .....                 | 56  |
| § 2. 航向仪表——罗盘 .....           | 59  |
| § 3. 航空地平仪 .....              | 74  |
| § 4. 空速表, M数表及高度表 .....       | 81  |
| § 5. 非稳定飞行的檢查仪表 .....         | 89  |
| § 6. 位置指示器 .....              | 93  |
| § 7. 自动駕駛仪 .....              | 96  |
| 第七章 空中领航及計算仪器, 自动领航仪 .....    | 111 |
| § 1. 概論 .....                 | 111 |
| § 2. 測定空中领航数据的仪表 .....        | 112 |
| § 3. 計算仪表及仪器 .....            | 118 |
| § 4. 定位的仪表及设备 .....           | 120 |
| § 5. 測定空間座标的自动器 (自动领航仪) ..... | 123 |
| 第八章 动力装置的仪表及自动調节器 .....       | 132 |
| § 1. 概論 .....                 | 132 |
| § 2. 檢查溫度的仪表 .....            | 133 |
| § 3. 檢查压力的仪表 .....            | 138 |
| § 4. 轉数表与同步器 .....            | 144 |
| § 5. 測量燃油消耗量及燃油蓄存量的仪表 .....   | 151 |
| § 6. 航空发动机的自动調节器 .....        | 163 |
| 第九章 飞机的高空設備 .....             | 168 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| § 1. 在高空条件下人的呼吸及行动的基本数据 ..... | 168        |
| § 2. 飞机氧气设备概论 .....           | 172        |
| § 3. 氧气调节器的分类及其一般要求 .....     | 175        |
| § 4. 連續供氧式调节器 .....           | 177        |
| § 5. 断續供氧式调节器 .....           | 184        |
| § 6. 可移动的和跳伞的氧气调节器 .....      | 195        |
| § 7. 余压氧气调节器 .....            | 198        |
| § 8. 飞机氧气系統 .....             | 199        |
| § 9. 密封座舱设备和同溫层密封飞行衣 .....    | 211        |
| <b>第十章 飞机的防护设备</b> .....      | <b>234</b> |
| § 1. 暖气-通风设备 .....            | 234        |
| § 2. 飞机的加溫与散热装置 .....         | 251        |
| § 3. 飞机的防冰设备 .....            | 259        |
| § 4. 飞机的防惰设备 .....            | 270        |
| § 5. 急救设备 .....               | 273        |
| § 6. 防火设备 .....               | 279        |
| <b>第十一章 偵察及檢查用的照象器械</b> ..... | <b>283</b> |
| § 1. 空中照象原理 .....             | 283        |
| § 2. 空中照象机 .....              | 294        |
| § 3. 空中照象机在飞机上的安装 .....       | 310        |

## 第五章

### 飞机的液压设备及气压设备

#### §1. 飞机液压系统及气压系统概论

##### 飞机液压及气压动力系统的功用及特点

在现代的飞机上广泛地采用着各种功用的动力传动装置，如用来收放起落架、打开起落架整流板及诸仓门以及操纵机轮刹车等。

欲解决这些问题，常常使用电气装置。但是在许多情况下，使用电气装置是不够合理的。这是因为需要有重量较大的电动机，在电动机与其所传动的机构之间要有复杂的机械传动装置，以及给飞机电气系统增加了很大的负荷等原因。根据这些原因，在现代的飞机上除了用电气传动装置以外，还常常采用液压或气压传动装置。

在液压动力系统中所用的工作物为液体，此液体借助于液压泵在高压下沿导管而传予液压传动装置。

在气压动力系统中所用的工作物为空气，此空气为压缩机所压缩，或在高压下储存于特殊气瓶中，在使用时沿导管而传予气压传动装置。

液压及气压动力系统仅用于动力传动装置，因此它们的优缺点在颇大程度上由后者的性质来决定。

在重型飞机的需要作巨大位移的装置（例如，起落架收放机构）上，以及需要在很大的范围内均匀地改变运动速度的装置上，此时要求的功率大，因此应用液压传动装置特别适宜。

液压传动装置及为其供给能量的液压动力系统，在相同的功

率（或力矩）下，与其他式样的传动装置比较，其尺寸与重量为最小。但这个优点却引起了对液压传动装置诸零件制造精确度的高度要求。气压传动装置也具有液压传动装置所具的同样优点，但是差得多。气压传动装置工作不均匀并有冲击，因而在很大程度上限制了它的使用。

液压和气压系统的主要缺点是：在这些系统中有许多相当笨重而又缺乏韧性的导管。此外，控制整个系统工作的附件及其传动装置也比较复杂。

在苏联制造的飞机上，液压和气压动力系统现在已经达到了高度的发展和完善。在这方面 T. M. 巴斯特的的工作起了巨大作用。

在飞机动力系统中以空气作为工作物的主要优缺点

#### 优 点

1. 使用空气作为工作物的动力系统不需要在飞机上及机场上保存备用工作物（如使用液体时那样）。

2. 当温度变化时，空气粘性的变化较小，因此飞机气压系统的性质不论在冬季与夏季以及接近地面与高空中实际上是不变的（不考虑空气压缩机在高空工作的特点）。

3. 在地面上当航空发动机不工作时，气压传动装置及其机构的试验与运转比液压的简单得多，因为在机场上很容易获得压缩空气，并将其储于高压气瓶中。

#### 缺 点

1. 高压的压缩空气具有很大的位能储量，当它在传动装置中扩张起来时这种能量会引起相当大的作用。这就引起了传动装置的急剧工作，并且在传动行程的终止时产生很大的冲击，因此可能引起传动装置本身及与之相联的装置受到损坏。为了消除这种缺点不得不采用各式阻尼器（吸收冲击能量的装置），这又使系统更加复杂化了。除此而外，传动装置应当有可能停留在任何

位置（不仅在极限位置）上，因此就给設計傳动装置带来了巨大的困难。

2. 在气压傳动装置中气密的皮革垫及橡皮垫如不加液体潤滑（象液压傳动装置一样），尤其在夏季，則很快便会干裂，以致失去气密性。欲达到經常自动潤滑的目的，便会給結構上带来巨大的困难。因此气压傳动装置一般在維護时不得不常常涂油。

3. 气压动力系統的工作压力通常为液压动力系統的  $\frac{2}{3}$  到  $\frac{1}{2}$ ，这样一来就会使得傳动装置的尺寸及其重量相应地增大。因而在同一压力下，空气通过縫隙的漏量就要比液体的漏量大得很多。

### 在飞机动力系統中以液体作为工作物的主要优缺点

#### 优 点

1. 液体的足够的、而在保持一定的条件时也不过分的粘性，能减小液体通过液压連接件及机构間的不气密部分及縫隙时的漏量及反流，并可在系統中产生  $100 \sim 200$  公斤/公分<sup>2</sup> 的压力，而且由于高压在系統中的应用，使我們有可能制造外廓尺寸小的傳动装置。

2. 由于液体的压縮性极小，因此在升高其压力时液压泵的功率消耗量最小，同时导管中压力变化的傳遞速度很高（在  $1000$  公尺/秒以上）。

3. 由于液体压縮性极小，因而保證了液压傳动装置工作的均匀性并有可能停留于任一位置上。

4. 在飞机液压系統中所应用的液体一般都具有很好的潤滑性，因此使傳动装置气密性的維護工作大为減輕，同时还增加了它工作的可靠性。

#### 缺 点

1. 在飞机及机場上必須有备用液体。

2. 液体的粘性与温度有密切的关系，因此必須分別地备有“夏季的”与“冬季的”液体；即使这样在低温下还有时使系統的工作形成不正常現象。因此就不得不設法将液体的温度保持在一定的範圍內。

3. 液压系統在使用上比气压系統复杂得多，因为在地面上当航空发动机停止工作时，必須备有特殊的机場設備，供液压系統作試驗。

4. 飞机液压装置有許多零件在制造上必須具有高度的精确性。

由此得知：当使用尺寸极小、导管很长的傳动装置，而又要求其产生强大的功率和均匀地工作时，液压动力系統具有它的优越性。

### 对飞机液压系統中所采用的液体的基本要求

飞机液压系統中的液体必須达到下列基本要求：

1. 在各种使用情况下，液体的粘性必須保持在一定的範圍內。

假如液体太稠，那末它由动力源沿着管路流到使用处的速度将太慢，液压泵功率的消耗很大，而傳动装置的工作也就迟緩而无力。假如液体很稀，那末它很容易通过密封垫与空隙而流失，使系統的使用复杂化和机构的工作恶化。

液体的粘性（和流动性）取决于它的温度及成分。飞机液压系統中液体的粘性当温度为  $+50^{\circ}\text{C}$  时应不小于  $1.5\sim 2.0^{\circ}\text{E}$ （恩格列尔粘度），而当温度为  $-50^{\circ}\text{C}$  时不大于  $80\sim 100^{\circ}\text{E}$ 。

2. 液体必須具有足够的潤滑能力。

凡是傳动机构在工作时都产生很大的摩擦力，此摩擦力在缺乏滑油或滑油不足时能够使摩擦面加速磨損，甚至于使它們卡住，即使全部机构遭到損坏。

当系統中的工作物为液体时，最好不用特殊的滑油涂潤摩擦

面，而用工作的液体，因此这种液体就必须有足够的潤滑性。此潤滑性取决于液体的均質性及其分子对被潤滑面的附着力（潤滑性能）的大小，即取决于其成分。

### 3. 所用液体必須在化学上是中性物。

飞机液压系統的液压泵和傳动装置的工作性能大都取决于它們工作面的高度完善性。显然，假如工作的液体对制造这些表面所用的材料（通常是鋼的，鋁的及銅合金的）来講，在化学性能上不是中性的，那么它們光滑的表面就会很快地被损坏。此外，工作液体对气密材料（橡皮及皮革）也不应具有化学作用，因为气密性损坏后会給液体带来不能容許的泄漏及反流。

液体对它所潤滑的表面具有侵蚀能力的性質主要决定于它的酸性，即各种酸在其中的含量。

### 4. 液压系統中的液体的性質必須是恒定的。

一般說来，許多复杂的有机液体（正是适用于飞机液压系統的），随着時間的增加，或在高温的作用下都会改变本身的性質，这种改变能使整个系統所有附件的正常工作遭到破坏。特别是在液体中含有瀝青物时更促成了这种改变（此种物質在每一种液体中的允許含量由特殊的标准来确定）。

### 5. 所用液体能形成气泡及泡沫的傾向应为最小。

工作液中空气泡的存在使它的压縮性大为增加（因为空气具有巨大的压縮性），相应地也使它的主要性質——不可压縮性恶化，除此以外，又将大量增加液压系統的流动阻力。

在液体中含有水及肥皂脂时也能促使气泡及泡沫形成。

因此液压系統中所采用的液体必須无水，肥皂脂的含量应为最少。假如所应用的液体內含有肥皂脂，那末当选择液体在系統中的运动速度时，应考虑到它的促进气泡形成的傾向。

### 6. 飞机液压系統中所采用的液体及它的蒸气不应当对人发生有害的作用。

## 飞机液压系統中所采用的液体

对飞机液压系統所用液体提出之要求的多样性及某些矛盾性，严重地限制了适用液体的种数。通常所使用的液体都不能很好的合乎所有的要求。

我国（苏联）目前采用下列液体作为飞机液压系統及其傳动裝置中的工作物<sup>①</sup>：

а) 冬季使用的酒精-甘油混合液（乙醇——50%，甘油——50%）；

б) 夏季使用的酒精-甘油混合液（乙醇——30%，甘油——70%）；

в) “Велосит-Л” 矿物油；

г) МВП矿物油。

飞机液压系統中所采用的液体的粘性如图 V. 1 所示。

酒精-甘油混合液的粘性随它所含酒精量的增加而大大减小（在图 V. 1 上，分子代表混合液中含甘油的百分比，而分母则代表含酒精的百分比）；因此在冬季，由于混合液的粘性增大，故应用含有較多酒精的混合液。到了夏季，則用含有較多甘油的混合液，因为这时若甘油的含量少了就会使混合液的潤滑性恶化。甘油含量較少的混合液在冬季使用时尚能維持系統的一般工作能力，但在夏季使用时就必须防止甘油量过少。

“Велосит-Л” 与 МВП（仪表用凡士林油）油的粘性大致与一般酒精-甘油混合液的粘性相同，但是在冬季使用时 МВП 比 “Велосит-Л” 坏得多。

直接与航空发动机相联的液压傳动裝置，其工作液通常采用在航空发动机里循环的潤滑油。

<sup>①</sup> 在外国的飞机上主要也是用矿物油，有时也采用酒精与植物油的混合液，例如无水酒精与蓖麻油的混合液。

## 液压及气压系统的主要参数

当设计飞机液压系统时首先要确定所用液体的种类、它的工作压力、最大消耗量、动力源与传动装置间的允许压力降，并确定管路的近似长度，而后根据这些数据来确定导管及其他管路元件所需的额定内径。

液体的种类应根据所设计的系统的各液压传动装置及其操纵机构工作的分析以及使用经济的观点来加以选择。飞机液压系统通常使用酒精-甘油混合液。“Велосит”及МВП油仅在特殊用途的液压装置中使用。

液压系统中的工作压力根据现有的液压泵特性来选择。只有在液压系统主要传动装置初步计算所得到的尺寸过大并超过允许值时，才适宜设计一个具有更大压力的新泵。此时应考虑到：工作压力的增高，给液压泵的制造带来巨大的困难，而对系统中导管的、液压传动装置的及传动机构的气密装置的制造和使用也增加很大的困难。

在每一个单独的传动装置里液体的消耗量（公升/秒）取决于它工作部分的尺寸（在活塞式传动装置中，便取决于活塞的面积）及其位移速度，且等于这些数值的乘积。

工作部分的尺寸取决于该装置必然产生的应力的值。此应力应当等于或略大于所有反作用力的总和（包括惯性力在内）。显然，当传动装置所产生的应力相同时，它工作部分的尺寸愈小，则液体的压力愈大。在传动装置中所采用的液压通常等于供给整个系统的液压泵的工作压力的80%。

传动装置工作部分的位移速度由其工作条件来确定，该速度通常为给定值，并可经常改变。因此在传动装置中，液体的消耗量也可能是可变的。在计算液压系统时需采用最大的消耗量。

在全部液压系统中液体的计算消耗量决定于在所有传动装置都同时工作时的最大消耗量的总和，此时要考虑到储压器（假设

有的話)的減荷(卸压)作用。

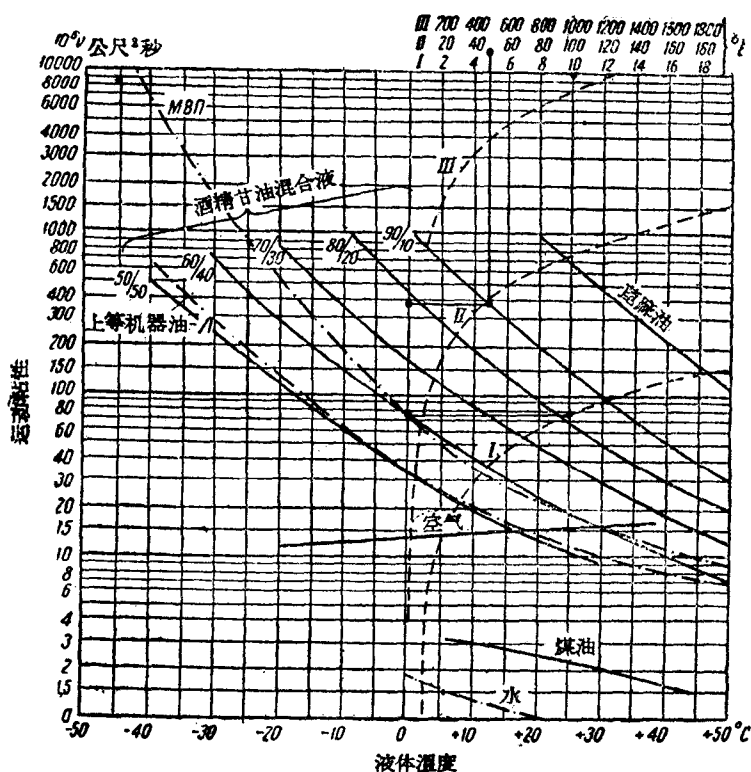


图 V.1 在各种温度下确定液体粘性的半对数图  
半对数图的使用規則

以 $^{\circ}\text{E}$ 为单位的粘性换算成工程上的运动粘性: 沿右上角的刻度(I, II或III)取 $^{\circ}\text{E}$ 的值, 并通过此点划一条直线与对应的虚线(I, II或III)相交, 所得交点的纵坐标对着左边的垂直刻度得一读数, 此数即为所給出的对应的运动粘性 $\nu$ (公尺<sup>2</sup>/秒)的值。

例如  $^{\circ}\text{E}=10$ ;  $\nu=75 \cdot 10^{-6}$  公尺<sup>2</sup>/秒。  
 $^{\circ}\text{E}=50$ ;  $\nu=375 \cdot 10^{-6}$  公尺<sup>2</sup>/秒。

計算飞机气压系統空气消耗量的方法与液压系統的方法相同，仅用空气的密度和粘性值代替液体的相应值而已。在这种情况下，应估計到：上述数值与空气的压力有密切的关系。

系統接头及导管的公称直径。为了提高飞机液气压系統的使用性能，最好使所有导管及接头的截面面积都相同，这样即可使該架飞机所用导管及其接头的公称直径都相同，或尽量不超过两种以上的直径。

全系統的公称直径可由下列公式确定。

$$d_{\text{ном}} = \sqrt[5]{0.0812 \lambda_0 \gamma \frac{Q^2}{\Delta p} L'}, \quad (\text{V.1})$$

式中  $\gamma$ ——液体的密度；以公斤/公尺<sup>3</sup>計；

$Q$ ——系統中液体的最大消耗量，以公尺<sup>3</sup>/秒計；

$\Delta p$ ——由液压源流到使用处之間的管路中所允許的液压降，以公斤/公尺<sup>2</sup>計；

$\lambda_0$ ——通过理想光滑直圓管的层流的理論阻力系数，其值等于

$$\lambda_0 = 50.2 \frac{d_{\text{ном}}}{Q} \nu, \quad (\text{V.2})$$

式中  $\nu$ ——液体的运动粘性系数，以公尺<sup>2</sup>/秒計；

$L'$ ——管路的計算长度，其值等于

$$L' = \sum a_n L_n + \sum b_n d_{\text{ном}}, \quad (\text{V.3})$$

式中  $L_n$ ——实际长度，而  $a_n = \frac{\lambda}{\lambda_0}$ ——导管  $n$  个段中每一段導管的相对阻力系数；

$b_n = \frac{\xi}{\lambda_0}$ ——管路接头及机构的局部相对阻力系数。

导管的实际阻力系数  $\lambda$  及接头与机构的局部阻力系数  $\xi$  是由实验来确定的。在典型的計算情况下根据試驗数据推算出的系数  $a$  及  $b$  值，并列于表 V.1 中。

表 V.1

液压系统各元件的阻力系数  $a$  及  $b$  的数值  
(根据 T.M. 巴斯特(Багшта)所给数据)

| 元 件                              | $a$       | 元 件                   | $b$     |
|----------------------------------|-----------|-----------------------|---------|
| 理想导管                             | 1.0       | “Априс” 型管子接头 (在活門一面) | 18.5~27 |
| 飞机用的直导管                          | 1.17      | 接头(在活門对面), 其型别同上      | 20~27.5 |
| 正确弯曲的导管, 其弯曲半径与导管直径的比为 $r/d=3.3$ | 1.17      | 标准的旋轉弯头 (根据螺栓的位置)     | 40~100  |
| 导管在弯曲处有10% (按其直径而言) 的皺紋          | 1.28      | 使液流轉 90° 的三路开关        | 12      |
| 导管在弯曲处有30% (按其直径而言) 的皺紋          | 2.45      | 单向活門 (板式)             | 35      |
| 长度为300~500公尺的具有接头的軟管 (直的)        | 1.17~1.33 | 单向活門 (球式)             | 190     |
| 小弯曲半径的軟管                         | 1.68      | 操縱活門                  | 33~59   |
|                                  |           | 钻过孔的旋轉弯头 (沒有空心內螺栓)    | 50~70   |

方程式 (V.1) 对层流及紊流均正确。

方程式 (V.1) 右端根号中隱藏有  $d_{\text{ном}}$  (参看方程式 V.2 及 V.3 中  $\lambda_0$  与  $L$  的值), 所以不能将其平方。因此利用連續的近似法解算最为简单, 如果给出  $d_{\text{ном}}$  值并使管中所产生的压力降不大于系统中工作压力的 ~20%。

研究表 V.1 中所列的数据后可以得出下列的結論:

a) 导管直綫段的阻力系数比較小, 因此无須在初步計算时极精确地估計它的长度以及特別考虑它的經濟性。

б) 正确地施行导管的弯曲可使它的阻力增加較小, 但有皺紋出現时, 其阻力就大为增加。

в) 管路接头及其操縱机构中之諸零件产生的阻力最大。

### 液体同空气通过縫隙的溢漏

液体通过縫隙及密封物的溢漏, 决定着它們从系統中漏失的量以及动力源与傳动装置的工作情况。从这个观点出发, 縫隙愈

小愈好。

从另一个方面来看，在工作面間的縫隙过小，它們間的摩擦将显著增加。因此在液压裝置的設計及制造时对縫隙的正确选择与保持应引起特别注意，这对其制造上的复杂性与經濟性大有影响。

实验指出，当縫隙的宽度在 0.1 公厘以內，工作液的压力在 100 公斤/公分<sup>2</sup>时，液体的流动为层流；而空气通常則为紊流。

在层流情况下，为了判定液体通过同心圓环縫隙（图 V. 2, a）的漏量，采用 T. M. 巴斯特所給的公式：

$$q = \frac{\pi \Delta p s^3 d g}{12 \nu \gamma l}, \quad (V. 4)$$

式中  $q$ ——液体通过縫隙的漏量，以公分<sup>3</sup>/秒計；

$\Delta p$ ——縫隙两面的压力差，以公斤/公分<sup>2</sup>計；

$s$ ——縫隙宽度，以公分計；

$d$ ——結合面的公称直径，以公分計；

$g$ ——重力加速度；

$\nu$ ——运动粘性系数，以公分<sup>2</sup>/秒計；

$\gamma$ ——液体的比重，以公斤/公分<sup>3</sup>計；

$l$ ——沿液体流动方向之縫隙的长度，以公分計。

流过二平行平面間的縫隙的公式为（参看图 V. 2, b）：

$$q = \frac{\Delta p b s^3 g}{12 \nu \gamma l}, \quad (V. 4')$$

式中，除前面的符号外，

$b$ ——沿垂直于液体流动方向之縫隙的长度。

从公式（V. 4）及（V. 4'）得出，液体的漏量与縫隙宽度的立方成正比，因此为了保持漏量在允許的範圍內，必須对液压裝置各工作面的尺寸規定严格的公差。縫隙的宽度通常以百分之几，甚至以千分之几公厘来計算。

通过偏心圓环縫隙（参看图 V. 2, c），楔型縫隙（参看 V. 2, z）及回繞式气密裝置（图 V. 3）的漏量为通过同心圓环式（或平行

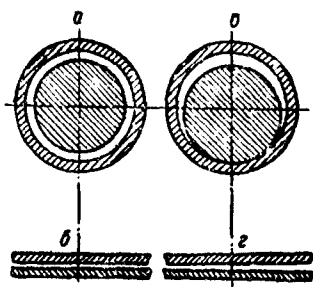


图 V.2 在液压及气压装置中  
縫隙的类型

的)縫隙漏量的一部分(几分之  
几);而回繞式气密装置系在一  
个工作面上作出一系列与液体流动  
方向相垂直的凹沟。

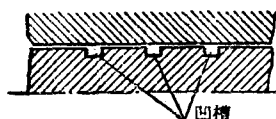


图 V.3 回繞式气密装置  
示意图

根据 T. M. 巴斯特引用的数据, 将不同情况下的漏量值列于  
表 V.2 中。

表 V.2

各式縫隙的漏量  $q$  的比较

(在相同尺寸及相同压力差的情况下)

| 同心圆环 (或平行的) 縫隙             |                                                                           | 偏心圆环 (或楔形的) 縫隙 |              |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|
| 光滑的                        | 有回繞式气密装<br>置                                                              | 光滑的            | 有回繞式气密装<br>置 |
| 层 流 时                      |                                                                           |                |              |
| $q$<br>(按公式 V.4 或<br>V.4') | $m \cdot q$<br>$\left(m = \frac{a}{a-b}\right),$<br>通常 $m = 1.1 \sim 1.2$ | 在 $2.5q$ 以下    | $2.1q$       |
| 紊 流 时                      |                                                                           |                |              |
| $\frac{q}{\sqrt{s^3}}$     | $n \cdot q$<br>$n = 0.5 \sim 0.76$                                        | $1.15q$        | $1.28q$      |

当某一密封表面以速度  $v$  (公分/秒) 运动时若其方向与液体流动方向相  
反, 则通过縫隙的漏量等于

$$q' = q - \frac{b \cdot s \cdot v}{2},$$

式中  $a$ ——凹槽軸綫間的距离;  
 $b$ ——沿液体流动的方向的每一凹槽的长度;  
 $s$ ——縫隙寬度。