

离心机调研报告

ZKYY-C-C0008

内 部

中国科学院原子能研究所

离心机调研报告

1959年11月4日

I、前言

用物理方法来分离同位素，几乎都是利用了同位素之间有微小的质量差别这一基本性质。这一差别十分微弱，因而分离效率很低。特别是重同位素，质量差相对于同位素本身的质量显得更小。因而分离重同位素特别困难，设备复杂，成本昂贵。

用“离心法”来分离同位素是一种很有前途的方法。他的最大优点在于分离效率不因同位素质量的增加而减小。因而对分离重同位素来说，他的单级分离效率较大。例如目前已用来分离 U^{235} 的逆流离心机分离率已达1-15左右，而现行的用以分离 U^{235} 的“扩散装置”，分离率只有1-003左右，一台离心机的分离率相当于扩散装置四、五十级（不过离心机的产量较低）。所以离心机的进一步研究，有可能成为生产浓缩铀的工业方法。

离心机从1919年起已开始研究至今已有四十年历史，还没有看到正式投入生产的报导。这主要是因为离心机的机械结构复杂，关键问题尚未完全解决。各国目前都正在研究中。我国如要从事大规模浓缩铀的工业生产，积极开展离心机的研究工作十分必要。

我们曾从事了一阶段文献研究工作，写了此总结报告。希望能给读者一个关于离心机及其有关文献的概括了解。

所能研究到的文献分成两部分：一部分是从1919年到1940年之间的文献，这些文献主要是由Beams等用英文所发表的。另一部分主要是由Groth等德国人所发表的德文文献。所有的文献主要都是描述离心机机械结构的，谈到有关的理论和实验的不多。这

实在是很自然的，因为离心机的主要問題在于机械結構。

因为我們不懂德文，所以这次主要是調研和总結了1940年前
Beano 等所写的以及58年日内瓦会议上所发表的英文文献。

总結是根据历史发展采敘述的，发展的分明是我們分的。

II、离心机的发展概況：

(一)“离心法”的提出及其初步研究(1919—1923)：

1919年 Lindemann 和 Aston 首先提出了可用“离心法”采分离同位素。在他們所发表的“分离同位素的可能性”^{(1)*} 一文中，提出了几种可能用来分离同位素的方法。其中提出了一种他們称之为“密度(Density)”的方法，这种方法是利用同位素在力场作用下，因質量不同，而引起的密度分布不同，采达到分离目的。他們具体提出了两种可加以利用的力场：

1、重力场：气体在大气中的分布可近似用波茲曼分布采表示：

$$f(h) = f(0) \exp\left[-\frac{Mgh}{RT}\right]$$

如有两种同位素气体(我們所要的同位素以下皆标以标脚“1”，不要的同位素标以“2”)則有：

$$f_i(h) = f_i(0) \exp\left[-\frac{M_i gh}{RT}\right]$$

$$\alpha = \frac{f_1(h)/f_2(h)}{f_1(0)/f_2(0)} = \exp\left[\frac{(M_2 - M_1)gh}{RT}\right] \dots\dots (1)$$

其中 f_i 为第 i 种同位素密度； M_i 是第 i 种同位素分子量； R 为气体常数； T 为绝对温度； α 是分离因数。

* 标号 [] 中的数目代表文献附录中文献的号码

由此式可見離地面越高則輕成分的相對含量越大(分子或原子量
越小)。也即輕同位素在高空中濃集。因此

建議，分別在地面和100,000呎的高度中取樣品，分
析氮的分子量，必可測出氮分子量變小，這就可以證明氮確有同位
素存在。但要做這一實驗在當時技術條件下，困難很大，所以沒有進
行過**

2、可用一高速离心机，產生一強離心力場，同位素在離心力

氮是在1912年首先被發現有穩定同位素存在元素，所以作者
想用重力場來進一步驗證氮確有同位素存在。

**這一實驗一直到1950年⁽⁴³⁾火箭技術發展後才進行。用火
箭在高空中取樣品，分析氮的分子量。分析結果在四萬公尺以下氮分
子量完全沒有改變，在53—59千公尺，氮的分子量也只減少2.7
%—3.9%。而按理論計算應該減少24%。這是因為大氣在劇烈
運動，產生了混合效应的關係。

作用下，分布為：

$$f_1(r) = f_1(0) \exp\left\{\frac{M_1 \omega^2 r^2}{2RT}\right\}$$
$$\alpha = \frac{f_1(0)/f_2(0)}{f_1(r)/f_2(r)} = \exp\left\{\frac{(M_2 - M_1) \omega^2 r^2}{2RT}\right\} \dots (2)$$

其中 ω 是角頻率， r 是離轉動中心 O 的距離。從式子中我們可以
看出只要提高轉速，就可以迅速地加強離心力場，這樣所得到的分離
率可以比在大氣中利用重力來分離大得多。因而

指出用“离心法”来分离同位素很可能是一种行之有效的方法。

用离心机来分离同位素的建议提出后，不久就有人进行了初步的
实验⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾和理论⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾研究。在最初的实验中分离物质用的是液体。第一次实验工作是 Joly 和 Poole⁽²⁾ 在 1920 年进行的。目的是为了检验铅同位素的存在*。

* 当时已发现铀系和钍系最终的稳定元素都是铅，但两者的原子量略有不同，铀铅是 206、钍铅是 208。而自然界存在的铅原子量是 207.21 介于两者之间。因而有人认为天然铅必为铀铅及钍铅的化合物。作者为了验证这一假说所以想用离心机来分离天然铅。

Lindemann 和 Aston 所用的实验装置很简单，他们把熔化了了的铅装在一个铜管内，铜管外加热，以保持铅处于熔解状态，用一马达带动铜管转动，转速是每秒 9,000 转，线速度达到 100 m/s。C. 运转一定时间后，分别从中轴及边缘取样，铸成小球，然后进行密度测量：先在空气中用天平测出小球重量 W，再把小球悬在二碘甲烷中测量出小球减轻的重量 B，显然 W/B 应正比于小球的密度，实验测得的数据如下：

中 心	边 缘	结 论
3.4015	3.4033	边缘密度大 0.05%
3.4092	3.4094	" 0.006%
3.4112	3.4111	" 小 0.003%
3.4090	3.4090	无变化
3.4065	3.4069	边缘密度大 0.01%

这些数据所示的密度变化，在测量误差范围内，不足以说明铅是否已在离心机中产生了分离效应。根据 *Lindemann* 和 *Aston* 提出的计算分离率的公式(2)，可以标出在实验条件下，边缘密度应比中心大0.005%，这一密度变化，在所用测量方法的误差之内，是不可能测出的。

第二年 *Joly* 和 *Poole* ⁽³⁾ 又用水银作为分离物质，进行离心分离实验。结果仍测不出密度变化。但 *Joly* 和 *Poole* 对“离心法”仍抱有很大的信心，他们认为这些实验失败的原因，在于转速太低，以致密度变化在测量误差范围之内，只要提高转速，必可测出分离效应。

1922年 *Milliken* ⁽⁴⁾ 改进了密度测量的方法(用比重瓶测分子量的方法)。提高了测量精确度，使密度测量误差远小于从理论上指示的水银分离后的密度变化。这时他就重新进行了分离水银的实验，但结果仍测不出密度变化。说明分离实验的失败，并非因密度测量不精确而引起。根据 *Milliken* 的分析，认为可能是由于离心机的振动，影响了分离物质平衡分布的建立，以致分离效应消失。他并且用实验证明了如分离物质是液体，振动的影响确是十分严重。他认为如用气体分离物，因气相扩散效应很大，平衡分布建立的时间比液相要短几百到几千倍，振动影响就大大减小，因此 *Milliken* 建议用气体物质来进行分离实验，提出了制作“蒸发离心机”的建议。这种离心机是把易于蒸发的液体分离物质涂在离心机壁上，在运转过程中液体不断蒸发成蒸汽，蒸汽在离心力场作用下产生分离效应，再从离心机中心把蒸汽慢慢抽出即可得轻同位素聚集了的产物。这种离

心机的分离物质是蒸汽，所以平衡时间短而受振动的干扰小；结构也较简单。它的主要缺点是不能连续进行分离，取出产品后，必须进行拆洗，把剩余在离心机内的“废物”除出，再安装，灌入新的分离物质，重新运转进行分离。所以如要得到大量产品，费时太久。但在当时，得到大量产品的问题，并未提到日程上来，所以离心机在此以后若干年内主要趋向蒸发离心机方向发展，这是很自然的。

在实验工作进行的同时，*Mulliken* [6][7] *Chapman* [5] 和 *Harkins* [5] 等同时也进行了初步的理论工作，较完整的是 *Mulliken* [4] 的工作，他研究了液体和蒸发离心机的理论。得出了蒸发离心机在抽气率极低的情况下，剩余在离心机内的物质分子量，随分割因（取出物质作总物质的百分数）的变化：

$$\delta M = \frac{(M_2 - M_1)^2 N_1 N_2 \omega^2 r^2}{2RT} \ln(1 - \delta) \text{ --- (3)}$$

其中：N 是克分子分数。

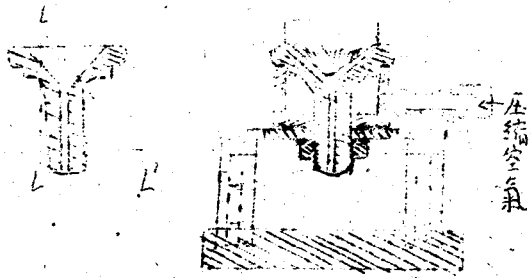
(二) “自动平衡、真空型”超离心机的发展 (1923—1935)。

由前所述，如要检验能否用“离心法”来分离同位素。关键在于提高转速以增加分离率，以及消除离心机内部的“扰乱”。

1925年 *Henriot* 和 *Huguenard* [8] 设计了用空气推动和空气支持的高速转子，这种转子后又经 *Beams* 和 *Pickels* [9][10] 改进简图如图(1)锥形转子上铣有槽。压缩空气从 LL' 喷出，冲击在凹槽上使转子转动，同时把转子托起。大气从锥形定子的顶端进入在转子下形成一薄膜，这样转子即可稳定地旋转。

这种离心机具有以下优点：

1、这种离心机不用轴承，故可以高速并持久地运转。例如用直径为1吋的转子可以毫不困难地达到二千转/每秒以上。



2、这种转子运转十分稳定；并且可以自动找中心。等曾有意在转子的圆周上钻孔以

图一

破坏对称性或转子上放一重物，结果转子仍可稳定地运转。

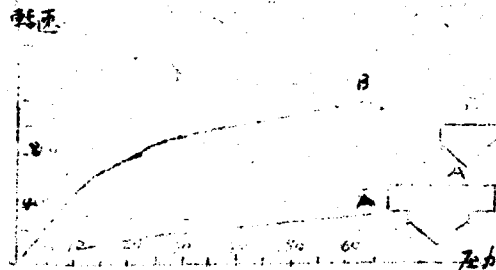
这种离心机曾被应用于生物学实验上及分离溶液中的微粒。发现以下几个主要问题及缺点：

1、因为转子是在空气中运转的。转子表面与空气摩擦，表面温度升高。同时压缩空气从锥形转子中喷出，喷出后迅速膨胀，从而使转子中心温度下降。这就形成了转子内部温度很不均匀，使分离物层中产生了凝，破坏了分离效应。

2、转速的提高受空气摩擦很大限制。速度提高摩擦力也迅速提高，以后即使空气压力再提高，也很难使转速提高很多，（如图2所示）。转速达到了“饱和”。

3、转子越大，则用同样的空气压力，所得到的转速越低，并且更易达到饱和。由于2、3两点就大大地限制了转子的转速和大小。

这些缺点主要是因为空气



图二 转速—压力图

摩擦所致。为此 *Svedberg* 设计了一种“自动平衡、真空型”离心机以后 *Beams* 和 *Pickels* 加以改进，如图 3 所示。

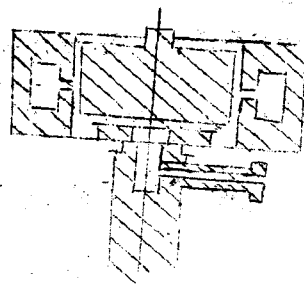
这种离心机的特点是把透平和转子部分分开。透平做得很小，在大气中转动，所以摩擦力不大。比透平大得多的转子置于真空中运转，摩擦力也就不大。这样转子既可保持转速均匀；又可提高转速，加大转子半径。装置中

图三 自动平衡真空型离心机

需要密封很困难，*Beams* 等是用密封的油填充盖来解决的。（填充盖的构造见第三十页）填充盖要漏油所以加一小 z ，利用离心力把油棒到边上，再用一管子把油收集在底部。取出纯化后，再可应用。

这一装置的主要缺陷是转动和支持的压缩空气同一来源。离心机要停止时，必须降低转动空气的压力。但这时支持空气的压力也下降了，转子和定子就会发生摩擦。为此 *Beams* ^[10] 等又设计了一种

离心机，把支持空气和驱动空气分开。就克服了这一缺陷。如图 4 所示。



图四 透平部份剖面图

于是这种“自动平衡真空型”离心机趋于较完善。

（三）“蒸发离心机”的发展（1935—1939）： — 9 —

A、“空气驱动空气支持，真空型”蒸发离心机：

由于“自动平衡，真空型”离心机的发展，使有可能加大转子半径和提高转速；并且可保持转子温度均匀和稳定地运转，从而可以避免转子内部分离物质的扰乱。这样就鼓舞了 *Beams* 等重新开始用“离心法”来分离同位素的实验（这种实验在1923年后就停止了）。

1936年 *Beams* 等^[13] 报导已用这种类型的离心机制成了气体超离心机，用以分离 N_2 和 CO_2 最初步的结果，与公式(2)所示相近。1937年 *Beams* 等又报导已制成了蒸发离心机用以分离中的氧，所得结果与理论大致符合。证明了用“离心法”来分离可能性完全可能。1939年 *Beams* 等发表了“用蒸发离心机的方法来分离同位素”^[15] 一文，总结了他们所进行的蒸发离心机的工作。从这篇文献中可以看出他们的工作已有一定的成绩。现将他们这篇文献主要介绍如下：

Beams 等提出了用离心方法来分离同位素的优越性：首先是“离心法”的分离因数只与分子的质量差有关。而与分子质量的绝对值无关。所以这种方法用于分离重同位素具有很大的优越性。其次因为分离因数与分子质量的绝对值无关，也就与我们选用同位素的何种化合物来作分离物质无关；这就给了我们选用分离物质以很大方便。选用分离物质一般是考虑到了：

- 1、有高蒸汽压，这样便于得到大量的产品。
- 2、与转子不起化学作用。
- 3、不易燃，不易爆。

4. 易于凝固，便于收集。

5. 分析比较简单。

6. 与我們所要同位素形成化合物的其他元素最好没有同位素，或只有少量的同位素。在 *Beams* 等分离 Cl_2 同位素实验中选用了 CCl_4 是因为： CCl_4 不易燃；易挥发；有较高蒸气压；在干冰温度下易凝固；同位素分析较简单。

Beams 等也简单地提了一下，这几年来他们所进行的蒸发离心机的工作情况。他们初期采用的转子都是扁的。例如用了直径为 8.9 cm 高 0.64 cm 的扁圆转子（要用扁状转子，是因为动平衡的要求¹⁶）。转子在真空室内以 1550 转/秒运转。以每小时抽 2 C C 液体的速率从中心把浓缩了的 抽出。分析结果浓缩程度只是理论值的 40% 等认为这是因为转子容积太小抽气速率太高，破坏了平衡，以致分离效应下降。

为了克服这一点缺陷在 1937 年 *Beams* 等改进了离心机结构有可能使长管状的转子⁽¹⁶⁾ 稳定地运转。这样长管状的蒸发离心机就设计成功，增大了离心转子的容积。

图五是这种长管状蒸发离心机⁽¹⁶⁾ 的剖面图。这一装置的运动部分包括：离心转子 C；空气抽气机，空气支持透平 T，以及转轴 A 和 三部分。转子是用钨合金制成外径 $4\frac{1}{2}$ 英寸长 11 英寸

过精加工和动平衡，屈服点是 $159,000 \cdot 16S / \text{in}^2$ 。转子是在真空室 V (V 是不銹鋼管外徑 7 厚 $1/2$ 长 18 下上兩端用都拉鉛圓板板密封，它一方面起了保护作用，一方面內部抽成真空，使轉子在真空中運轉) 以 $1000-1100$ 轉/秒轉速運轉 (曾做過破壞實驗，把轉子加速到 1200 轉/秒時，轉子變形，半徑加大了 0.02)。氣抽 A 穿過了真空密封的油填函蓋 G_1 和 G_2 。 G_2 使真空室密封； G_1 則使壓縮空氣與產物隔絕。另加兩輔助軸承 G_3 和 G_4 ，這兩軸承是用彈簧片壓住，可在徑向移動。加這兩輔助軸承的目的是為了當轉子發生振動或迸動時，軸承可以加一適當的徑向力在轉軸上，以降低振動或迸動。這兩軸承上的油是由油填函蓋 G_1 和 G_2 中漏下來的。轉子內軸心處接一小鋼管 M，管子上開有均勻的小孔，以保證蒸汽均勻地被抽出。並加有都拉鉛圓板 N 以支持小鋼管，板上也開有小孔。

運轉离心机時，先用高壓氣體，使轉子很快地加速達到我們所要的轉速，然後把氣壓降下來，降到正好能維持轉子穩定運轉，就保持氣壓不變。轉子的轉動慣量很大，轉速改變很慢，所以氣壓可用手調。

轉子運轉後將轉子內部抽成真空 (真空系統是由一冷阱，以及冷阱後面所裝的真空泵組成)。再把 CCl_4 滲入。滲入的方法可用一毛細管插入軸內，把 CCl_4 從毛細管中滲入或使 CCl_4 自行蒸發進入轉子內。

在 *Beam* 等實驗中轉子中滲入了 105 cc 。運轉一段時間後就開始取樣。因為 CCl_4 很容易凝固，所以抽氣時 CCl_4 經過冷阱就凝固而被收集。

樣品分析是用比重法測比重或用質譜分析來進行的。用這兩種方

法所測得的結果一致。

在不同抽气速率下进行了实验，实验结果和理论作了比较。结果如图六所示（圆圈即为实验结果）。结果表明当抽气率达到每分钟 0.2 C.C. 之上时实验值开始小于理论值。

实验值下降的原因据等估计有以下几个可能性：

1、抽气率太快，破坏了蒸汽在离心力场中的平衡。

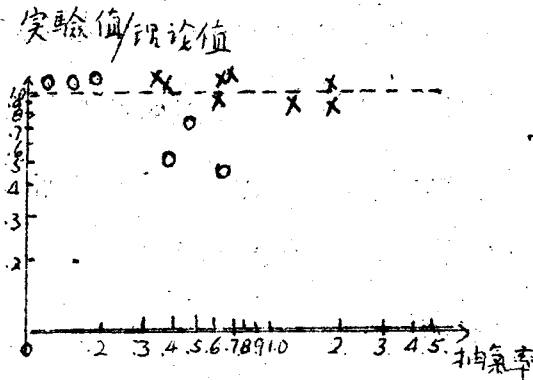
2、抽气后液体表面重同位素成分增加，从而使分离率下降。

3、蒸汽中有浓度梯度产生，以致发生了局部对流，扰乱了蒸汽平衡分布。

4、抽气时边缘蒸汽向中心移动而边缘蒸汽线速度大，到中心后形成涡流，扰乱了平衡以致分离效率下降。

为了确定这些可能性那一个是影响分离率的主要因素，等进行了系列实验和理论分析。Beams 等认为第一个因素是不可能的，因为气相中扩散速度很快，所以平衡很易建立，每分钟 0.2 C.C. 的抽气率不应破坏平衡，影响到分离率。而液体表面重同位素增加

等认为是可能的，因为蒸汽蒸发时液体表面冷却，程度变大。这就会使液体发生剧烈的扰乱，使液体各处浓度趋于一致。至于谈到第三个因素，Beams 等做了实验来检验它的影响，他们曾把低压气



在 *Dreani* 等进行一系列实验的同时, R. F. Humphrey (16) 在蒸发器机的理论方面也进行了一些工作。得出了较完整的理论结果。

主要结果有以下几个:

1、平衡时的分离因数:

$$\alpha = \exp\left[-\frac{(M_2 - M_1)^2 v^2}{2RT}\right] \quad (4)$$

2、当油气速率 Q 不大到破坏平衡时, 分离因数是:

$$\alpha' = \exp\left[\frac{(M_2 - M_1)^2 v^2}{2RT} \left(\frac{2\beta}{2\beta + Q}\right)\right] \quad (5)$$

其中 $\beta = \frac{2\pi h D D'}{RT}$

h 为高度 D 为扩散系数

3、剩余在转子内液体的相对浓度随取出产品量的变化为:

$$R(y_p, t) = R(t_0) (1 - v)^{\alpha' - 1}$$

其中 v 为分割因子为取出物质占总物质的百分数。 R 是相对浓度

$$R = \frac{N_1}{N_2}$$

4、剩余在离心机内的液体的浓度及平均分子量随取出量的变化:

$$\left. \begin{aligned} \delta N_1 &= -\frac{R(y_p, t)}{[R(y_p, t) + 1]^2} \ln \alpha' \ln(1 - v) \\ \delta M &= -(M_1 - M_2) \frac{R(y_p, t)}{[R(y_p, t) + 1]^2} \ln \alpha' \ln(1 - v) \end{aligned} \right\} (7)$$

其中 $M = M_1 N_1 + M_2 N_2$ 为平均分子量。

5、取出物的浓度与平均分子量随取出量的变化:

$$\left. \begin{aligned} \delta N_1(t) &= N_1(t, t) - N_1(t_0) = -\delta N_1 \frac{(1 - v)}{v} \\ \delta M(t) &= -\delta M \frac{1 - v}{v} \end{aligned} \right\} (8)$$

馬達代替了秀平，支持轉子重疊的開始時用氣托，以後就改用磁托。所謂磁托是在轉軸頂端裝一小段鉛棒，用一條線捲把鉛棒帶轉子一起吸起。這種類型的離心機優點在於便於控制 and 調節。

5、軸向磁懸式離心機 [29][30][31] ；這種離心機是在轉軸

上裝一小段鉛棒，用幾個磁圈產生磁場，把鉛棒連帶轉子一起吸起並使其旋轉。離心機懸掛高度，用一光電池來調節。

這幾種不同原動力的離心機，看來電動及軸向磁懸式離心機很有發展前途。

(四) “同流離心機的發展 (1939--1943) :

從前節的敘述中，可以看到1940年蒸發離心機已用高速運轉的長管狀轉子製成。並且在結構上進行了一系列的改進，消除了轉子內部的“擾亂”。從而在實驗工作上取得了很大成績。同時也發展了使用其他各種原動力的離心機，其中電動及磁懸掛式離心機看來是很有發展前途的方向。在理論方面這期間也進行了研究工作，得出了蒸發離心機較完整的理論。至此蒸發離心機已較完善。

蒸發離心機有一致命弱點，就是不能連續運轉以獲得大量產品，要想用蒸發離心機來從事工業規模生產是不可能的。為了克服這一缺點，1937年 Beams [32]

等開始設計製造一種結構較複雜的“同流離心機”，這種離心機分離物質是從轉子的一端進入，從另一端的中心及邊緣，分別把“濃集”了的产品和剩餘了的“廢物”取出（因為产品和“廢物”的流向一致所以稱為“同流離心機”）。這種裝置可以進行連續生產。1938年左右他們所發表的“管狀真空蒸發

离心机”〔33〕

一文中，对这种离心机有较详细的描述，概要介绍如下：

离心机的转动部分包括：空气驱动、空气支持透平，转子以及转轴三部分。透平位于转子下部与前面已叙述过的没有什么区别。转子由已经过热处理的钢管制成在真空室V中运转。转轴由软钢管制成，输出轴 S_2 和 S_3 组成双套管， S_2 通转子中心经过填函盖 G_2 、 G_3 、 G_4 ，由C出口， S_3 通转子边缘通过 G_2 、 G_3 由B出口。 S_1 通过 G_1 由A入口。填函盖 G_1 、 G_2 是为了密封真空室， G_1 是为了把“废物”与透平隔开， G_4 是把产品与废品隔开。这一装置的转子长度加长了，所以转子在临界速度以上运转，如转轴不能在径向移动，则转轴易折断。为此把填函盖 G_1 固定在板N上，而N可以滑动，转子下也装一可以滑动轴承，这轴承是固定在板M上，板M可以滑动。这样就可以防止转轴折断，同时又可加一适当的径向力于转轴上，以减少转子的振动和进动。这一装置的剖面图如图八所示：

图八(b)是填函盖的剖面图。Q是由青铜或都拉铅块制成轴心开一孔，约比转轴大 $\frac{1}{2}$ ”。两端有插容U是焊在Q内，U的轴心开孔使转轴正好通过（U是用轴承钢或青铜制成），Q上开有孔 \odot 及 \odot 这是密封油的循环回路出