

# 国外静压轴承设计研究 应用文集

航空工业部三〇三所

1986.5.

## 前 言

我所为了研制精密机械和精密测试设备，收集了美、英、苏、日、等国近两年发表的有关气体、液体静压轴承方面的文献，汇编成册。

本文集主要介绍国外静压轴承的设计经验，包括原理、结构、特性、设计方法以及各种应用，这些资料对读者有一定的参考价值。

由于我们水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者予以批评指正。

## 目 录

- 一、超精密静压轴承
- 二、复合形精密轴承
- 三、复合形轴承在机床上的应用
- 四、陶瓷制成的直线移动用静压空气导轨的结构和设计
- 五、增加静压气体轴颈轴承承载能力的研究
- 六、空气静压多孔质环形止推轴承的滑动速度、非均质和倾斜对其稳态工作特性的影响
- 七、气体——液体两相静压轴承
- 八、液体静压轴承
- 九、液体轴承
- 十、一种偏置液体静压止推轴承在动态条件下的设计
- 十一、使轴颈轴承性能好制造成本最低的公差最佳化
- 十二、平面多孔轴承滑动影响的研究
- 十三、使用非牛顿液润滑的液体静压球轴承中热量和惯量的影响
- 十四、立式止推轴承的设计准则

## 超精密静压轴承

### 1. 前言

众所周知，静压轴承很早就开始就应用了，日本真正进行研究是从1955年开始，被应用到园筒磨床的砂轮轴等很受限的领域中。后来，静压轴承广泛应用到具有高精度特性的机床、测量仪上。近几年来为了提高半导体产品、电子计算机附加设备或光学仪器的性能。其中一些主要元件需要超精密加工，从而对采用静压轴承的超精密机床进行了研究，应用范围就更广了。

静压轴承作为超精密轴承被广泛应用的原因是：主轴具有高的回转精度，在限制运动或传导运动的机构中，通过流体膜的作用使运动形成非机械运动机构比金属元件间直接接触的噪声低、S/N比高，可限制运动或传导运动，根据静压润滑膜的高刚性和衰减性能，从低速到高速稳定变化过程。过去曾对以静压轴承特征的流体节流为可变节流的静压控制轴承作机械装置进行了应用研究的尝试。最近，对具有伺服阀的适应机构或具有超微米以下的微细定位机构的静压轴承也进行了研究，它作为超精密静压轴承是今后所期待的。

本文主要叙述超精密轴承的静压轴承特点，工作特性及今后的研究课题，想再举几个应用实例。

### 2. 静压轴承的特点

轴承是为了进行回转运动或直线运动，至少控制6自由度中3自由度（球面轴承）的一种元件。众所周知，有各种各样的轴承，而且支配运动精度的元件精度和组装精度也是各式各样的，元件的数目也各不相同。

官下〔1〕希望在高精密运动机械的制造技术上，支配运动精度的基准元件 ( Datum Component ) 的数目最少，从这观点出发，对各种轴承的结构进行了性能评价，如表 1 所示。从表中可知，静压轴承较优越尤其当回转运动时 Datum 数为一个 ( 主轴 )，并且与通过流体膜的非接触控制机构相结合，希望能得到高的回转精度。

表 1 从结构学原理对各种轴承的比较

评价项目	滚动轴承		滑动轴承		静压轴承	
	回转	直线运动	回转	直线运动	回转	直线运动
摩擦力	△	△	×	×	0	0
磨损	△	△	×	×	0	0
间隙	△	△	×	×	0	0
Datum 数	×	×	0	△	0	△

×：难，△：中，0：易

图 1〔2〕是研究静压轴承元件精度和静态回转精度关系的一例。轴、轴承精度的好坏，受加工方法影响。组合 ( a ) 和组合 ( b ) 的轴相同，轴承不同，组合 ( a ) 的轴承对组合 ( b ) 的轴承，具有约 4 倍的不园度误差，但轴的回转振摆几乎不变，表示轴承的形状误差受静态回转精度的影响。另外，组合 ( c ) 的轴承和组合 ( b ) 的轴承一样，但组合 ( c ) 的轴对组合 ( b ) 的轴具有约 4 倍的不园度误差。但回轴精度约衰减到轴的不园度误差的  $1/5$ ，可认为它具有液体膜的平均化效应。这种静压轴承的平均化效应，

作为超精密轴承可以说是最大的武器。

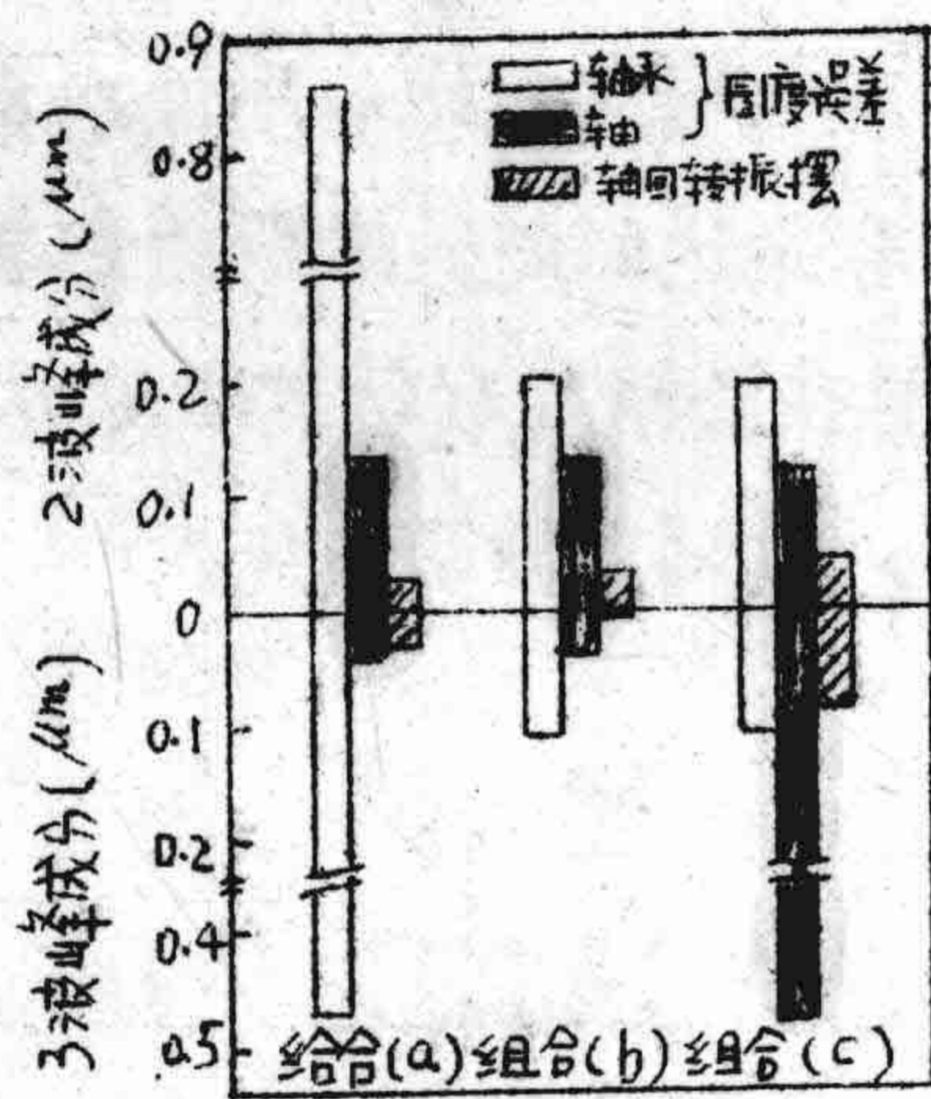


图 1 轴、轴承的不园度误差和回转振摆

图 2 [3] 表示用正园度为  $0.052 \mu m$  的基准球测量静压轴承支承的轴径为  $12.5 mm$  的立型主轴径向动态回转精度，用微处理机进行处理，再通过 X - Y 绘图机作图的结果。包括基准球形状误差的精度，用最少区域园半径差 (MZCRW) 得到  $0.074 \mu m$  的结果。

波峰成分由 3 个波峰支配，和基准球的不圆度一致，修正了误差后的真正回转精度约  $0.025\mu m$ ，而轴向也能得到约  $0.020\mu m$  的回转精度。

静压轴承的运动精度由容易产生相对加工精度的主轴精度所决定，当与油膜均化效应相结合，即可获得高精度控制，传导运动的特性。但是要研究、设计出更高精度的静压轴承、轴承系列，需定量地掌握元件精度和回转精度。为了充分发挥静压轴承的特点，也需考虑驱动系统方面的特点，要在使用皮带轮、弹性联轴节、机内电动机等方面上下功夫，与空气轴承相比，刚性、衰减性优越的静压轴承，采用皮带轮驱动较容易达到超微米级的回转精度，但要达到  $0.01\mu m$  级的精度，需要在高精度联轴节研究方面下功夫，边测量静压轴承气室压力变动，边调整驱动系统。〔5〕

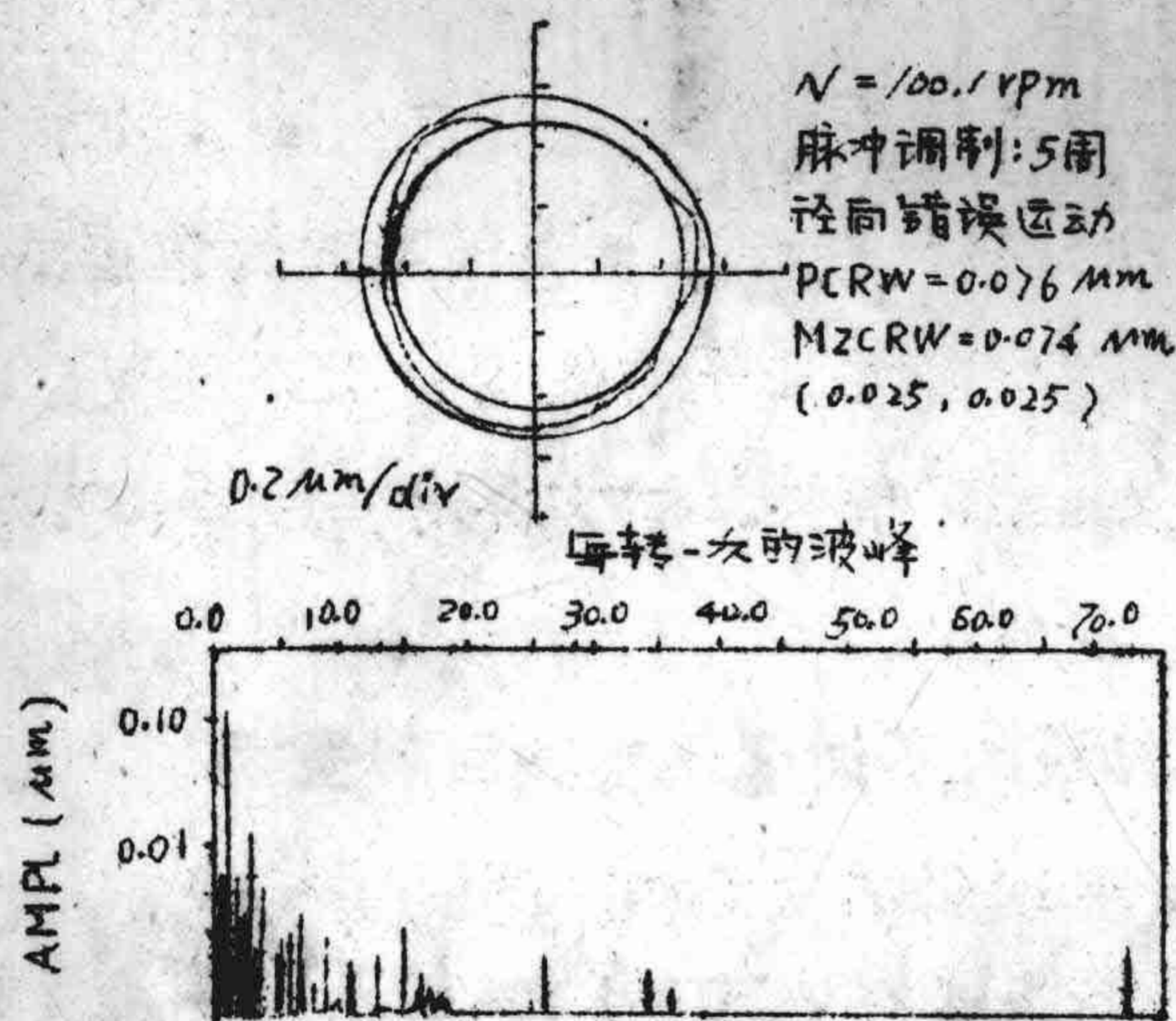


图 2 静压轴承的回转精度

要进一步研究超精密静压轴承、轴承系列，则需要研究更高回转精度的测量技术。过去主要用非接触电容式位移计检测，由基准球来获得回转误差信号，同时用回转式编码器和模拟换算回路，在同步示波器上以极坐标方式显示出来〔6〕。由于基准球的形状误差和照相判断的不正确，不可能定量地评价 $0.1\mu m$ 以下的精度，但是，最近由于采用微处理机等数据处理方法，对基准的形状误差进行修正能达到 $0.1\mu m$ 以下的精度。另外，今后对采用光导纤维的光反射仪（具有 $0.01\mu m$ 级的分辨率）的测量方法的开发〔7〕以及应用激光测长仪倾斜式振摆运动的测量方法〔8〕，也是个发展方向。

### 3. 静压轴承的工作特性

若静压轴承，在轻载荷，低中速区域下使用，如能大致地掌握偏心时的静特性，由于在大部分工作区域内在动态范围时也能得到稳定的特性，可以说是很容易使用的轴承。但是，静压轴承作为超精密轴承使用时，其性能要求更严，在正确地掌握近似解法的适用界限的同时，有时要进行有限要素法等数值分析，以及要掌握包括各种静压轴承的动特性的正确特性。本文作者想浅谈一下有限要素法及各种静压轴承的动特性。

#### 3.1 静压轴颈轴承

图3表示典型的静压轴颈轴承的结构。老式的轴承（a）是众所周知的，这种轴承的缺点是轴位移引起的气室内流量的调节功能，受在轴承两端存在的凸缘的形状和大小影响，未必能发挥最佳调节功能，但由于此种结构最简单，至今仍被采用。（b）是把（a）的缺点进行改良后的带槽轴承。气室压力不受相邻气室压力的影响。



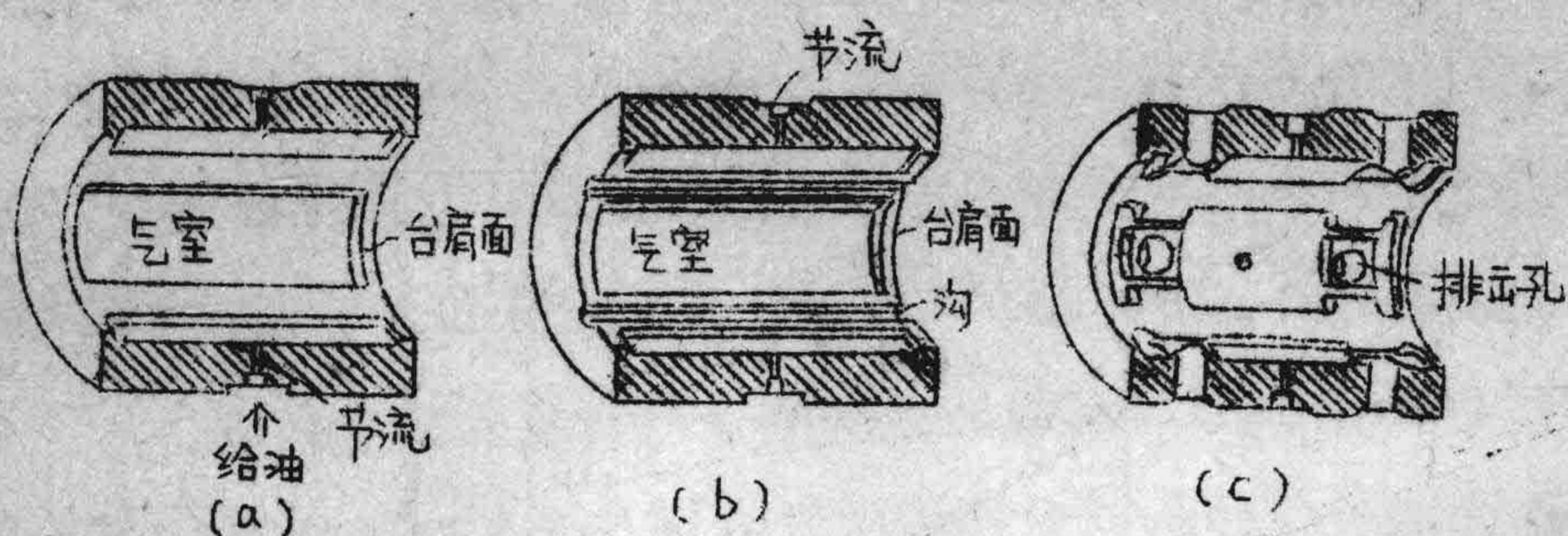


图3 静压轴颈轴承

通过流体节流流入气室的流体，必然由气室外围的凸缘排出。所以与（a）的轴承相比，由于轴承间隙变化引起的气室压力变化大，因此刚性高。

（c）的轴承的特点是在气室内部附有排出孔以此实现流量的调节功能〔9〕。由于能任意给定排出孔的形状、个数，决定轴承的刚性与流量而与承载能力无关，所以设计的自由度大，比（b）的轴承刚性更高。作为超精密静压轴承，从性能上看，大都使用图3中（b）、（c）的轴承。

静压轴颈轴承的性能，受偏心率影响〔10〕。图4是带有4个气室的静压轴颈轴承（图3（b））的偏心率 $\epsilon$ 和气室压力 $P_2$ 的关系（近似分析法〔10〕和有限要素法的比较结果）。上下气室压力 $P_1$ 、

$P_3$  很一致，但左右气室压力  $P_2$ 、 $P_4$  的误差大（近似算法看成是一定的）。

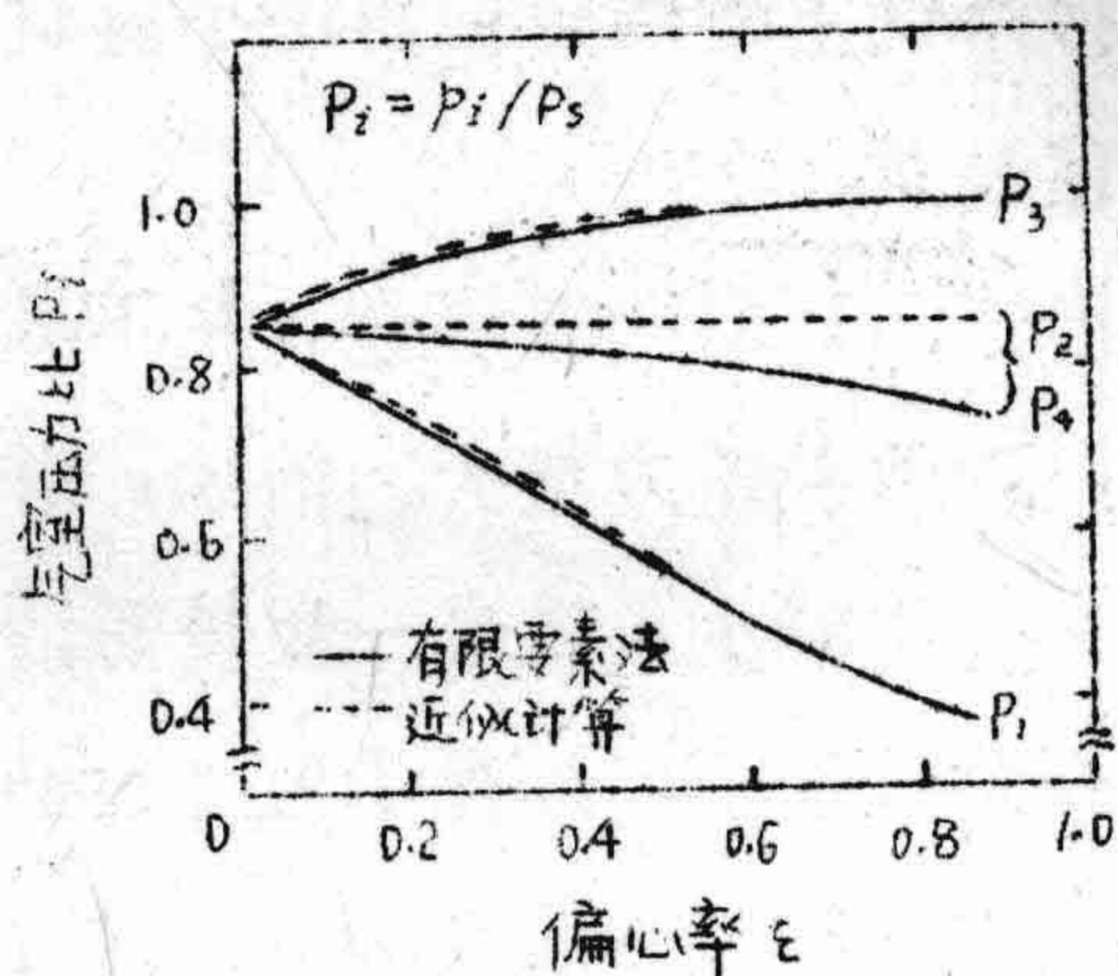


图4 偏心率和气室压力的关系

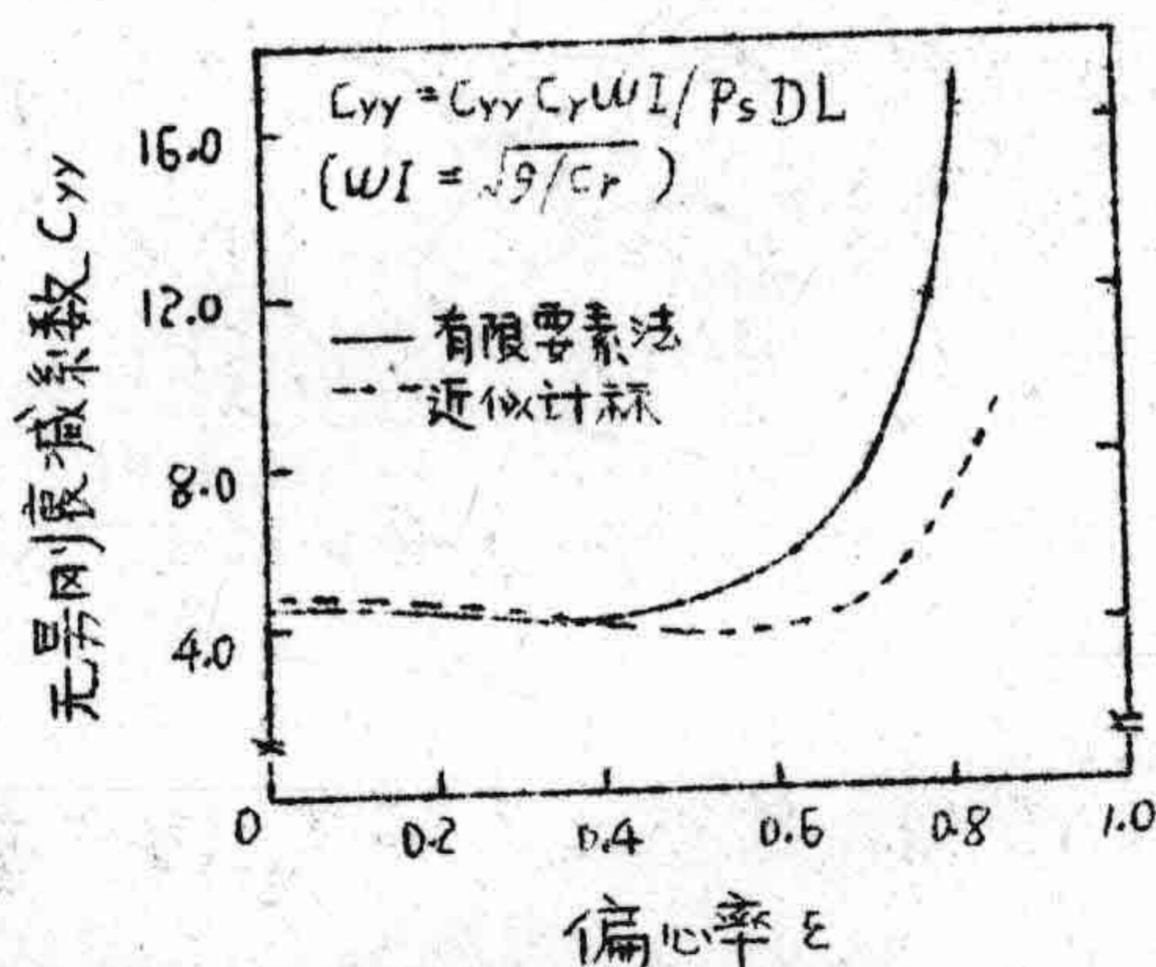


图5 偏心率和衰减系数的关系

图5是比较上下方向的衰减系数 $C_{yy}$ 的结果。在高偏心率范围内，有限要素法和近似算法两者差得大，但偏心率在0.3以下，两者很一致，与无偏心状态的值大致相等。因此，在轻载荷场合，即使是横型主轴，如果预先正确地掌握无偏心状态的特性，在实用上大致不会发生故障。但图3(a)和(c)的类型，由于不能忽视相邻气室间的相互作用，严格来说上述的近似解法不能适用，为了掌握正确的特性，必须进行数值分析。

静压轴颈轴承，在高速、高偏心率场合，并不象动压滑动轴承那样，由于台肩面的楔效应，承载能力增大。例如，若在气室内部开设独立的凸缘，因不使静压效应减少，能进一步提高动压效应。

在具有5个气室的带槽轴承上，设置了独立的凸缘，用有限要素法计算了圆周方法压力分布，结果如图6所示。载荷侧凸缘部的最大压力是供给压力的两倍以上，而反载荷侧，因为负压，明显出现动压效应。

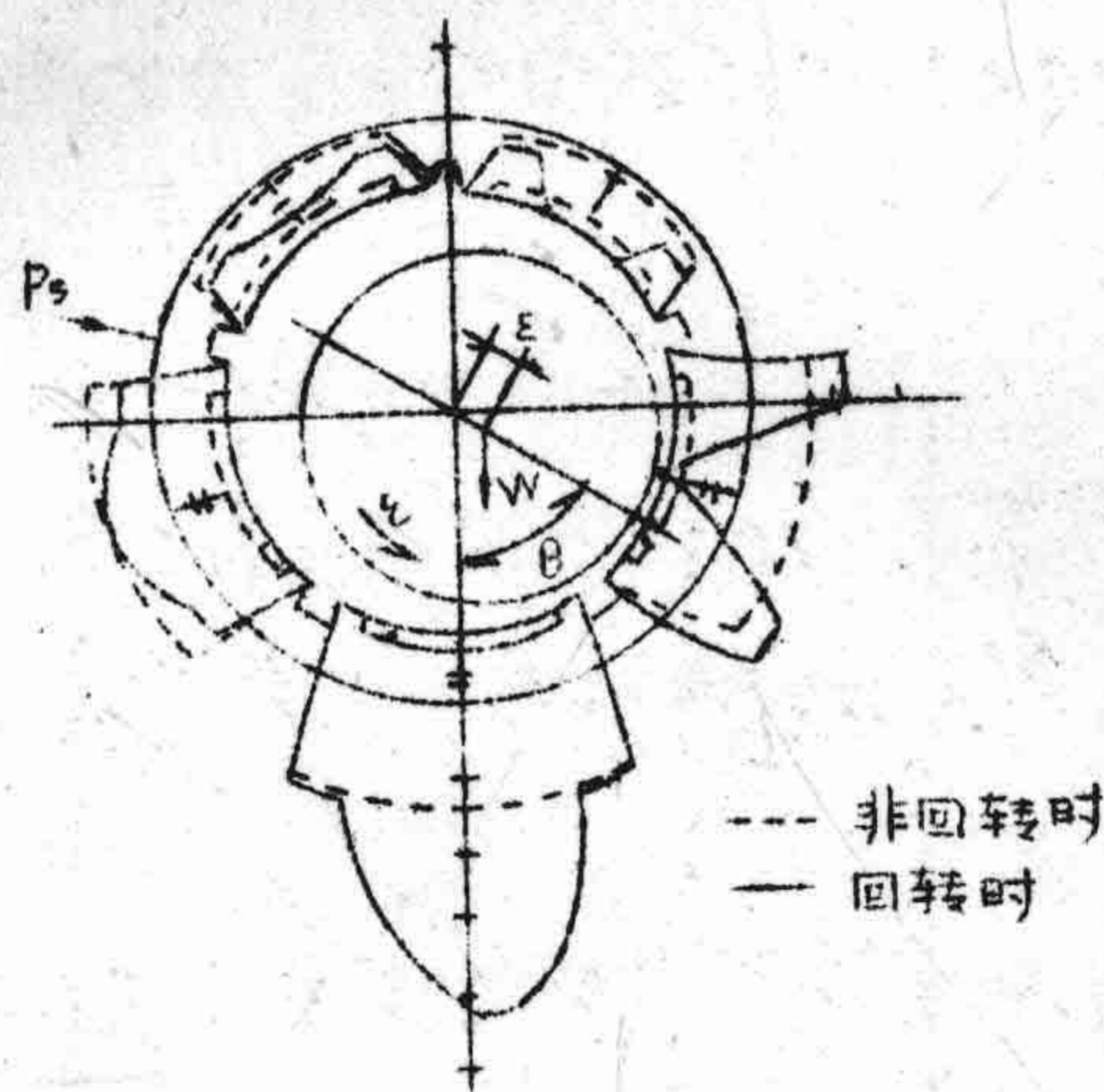
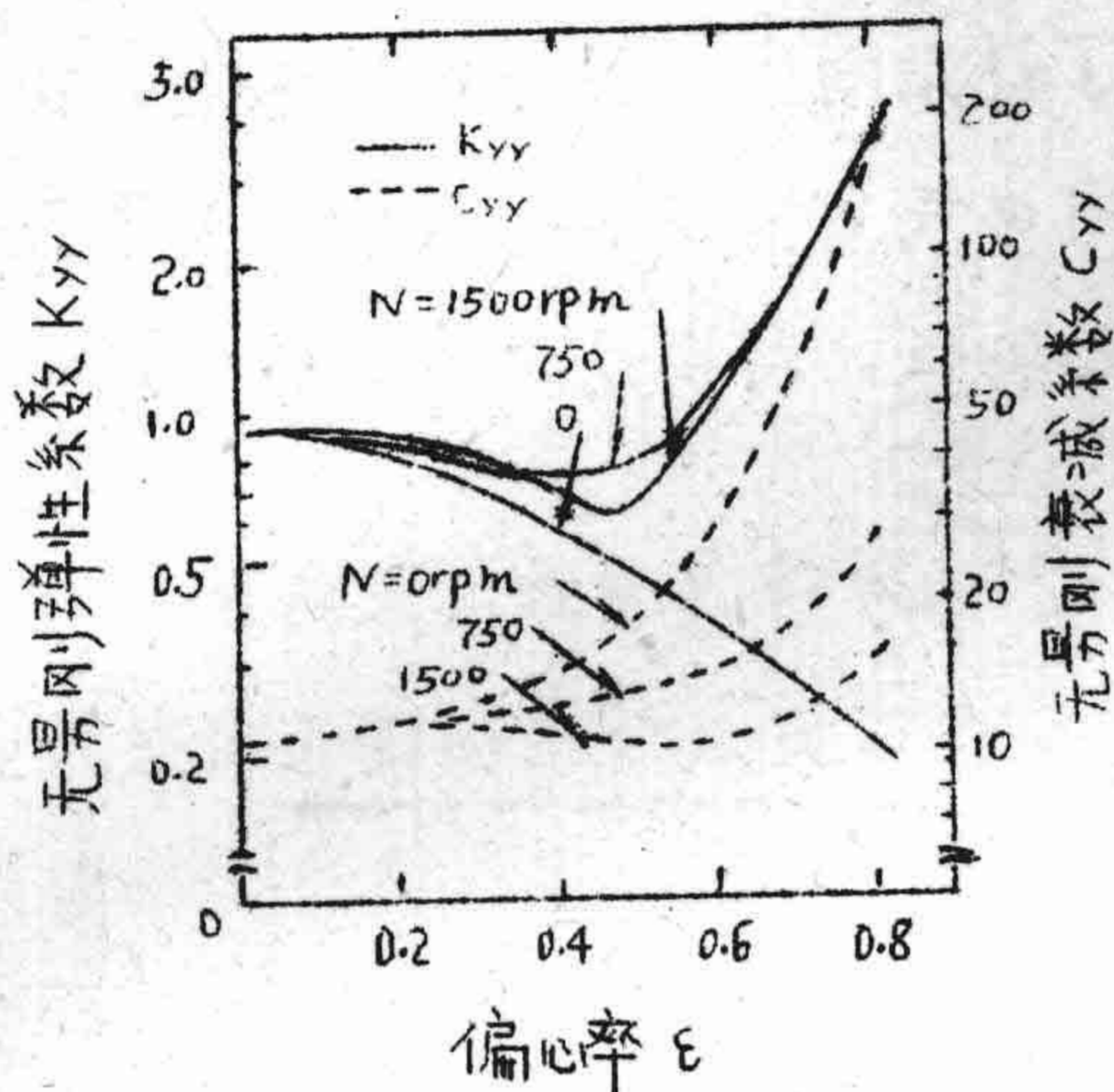


图6 压力分布

图7以转速  $N$  为参数，表示了上述轴承载荷方向的衰减系数  $C_{yy}$ ，弹性系数  $K_{yy}$  和偏心率  $\epsilon$  的关系。随着偏心率的增高，转速差别显著，表示出了动压轴承的特性。因此包括复合项  $K_{xy}$ ， $C_{xy}$  等其它油膜系数也变大。



$$K_{yy} = k_{yy} C_r / p_s PL, \quad C_{yy} = C_{yy} C_r w I / p_s DL, \\ w I = \sqrt{g / C_r}.$$

$p_s$ : 供给压力,  $C_r$ : 半径间隙,  $D$ : 轴径,

$L$ : 轴承宽度,  $g$ : 重力加速度

图7 混合轴承的油膜系数

所以，即便是静压轴承也要掌握回转时的正确的动特性，所以必须使用考虑动压效应的混合轴承，随着对高速、高性能静压轴承要求的提高，这种倾向就更大。今后必须对动压效应的负压发生区域的边界条件，高速时的干扰问题，以及气泡混入流体后对混合流体压缩性的影响而造成的更综合的油膜系数等加以分析和试验，更

正确地掌握超精密静压轴承系统的失衡响应及对于驱动系统等外界干扰的动作。

### 3. 2 静压止推轴承

静压止推轴承往往用圆锥面轴承或球面轴承和轴颈轴承的复合型轴承来代用。一般情况下使用纯止推轴承。象机床那样比较长的主轴，因为用两个轴颈轴承会产生对于力距负荷的反力，所以大都使用单一气室轴承。但是，为了让角刚度加到止推轴承上，构成更高精度的主轴系统，可有效地采用多气室型或多凸缘型。为了正确地掌握这种类型的静压止推轴承的动特性，特别是倾斜动特性，也需要进行数值分析。

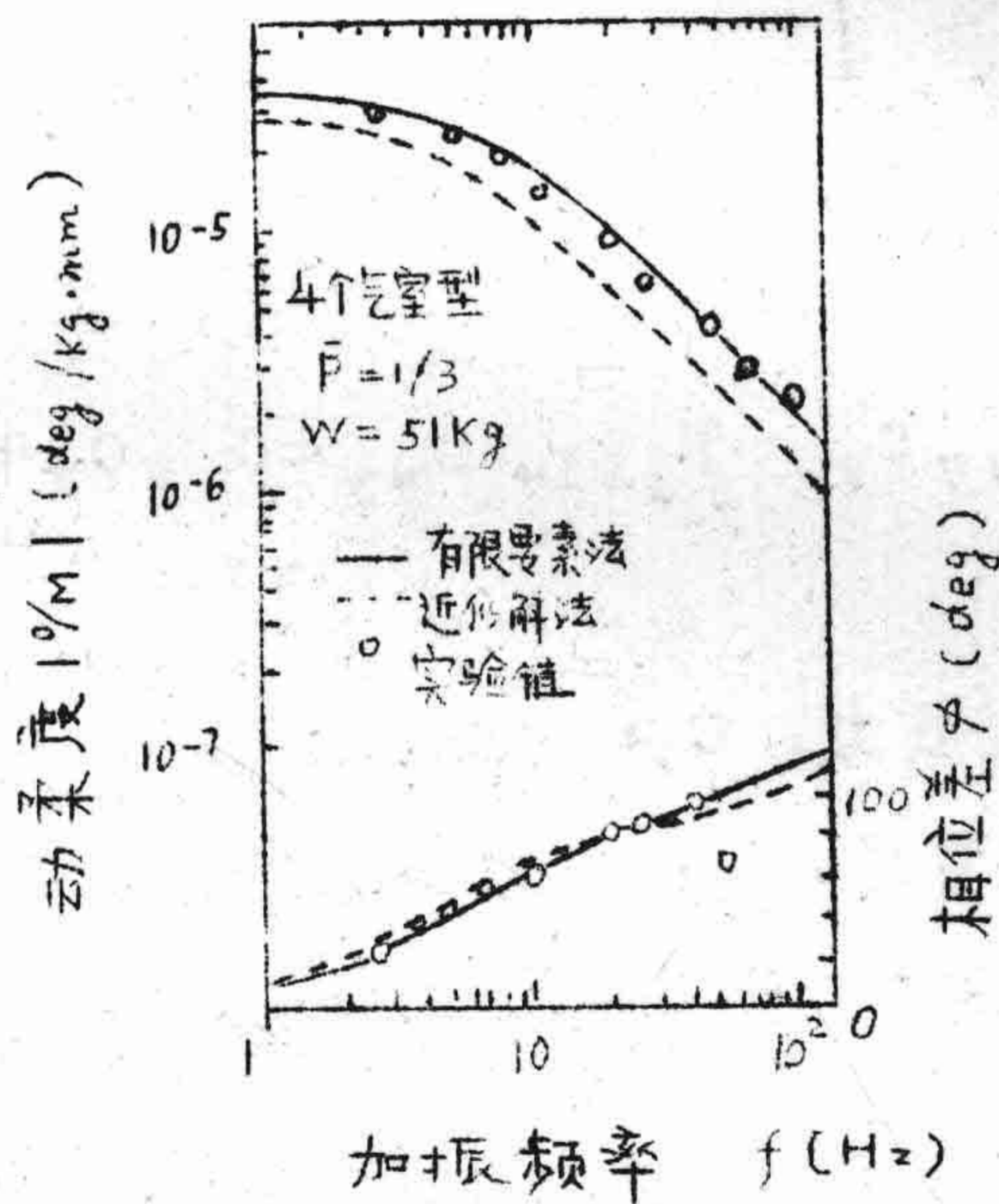


图 8 频率响应

图 8 是具有 4 个气室的多气室型倾斜振动的频率响应一例 [11]。采用有限要素法的结果和实验值很一致，而采用近似解法的结果比实

验值还低。这是因为近似解法在各气室的中心代表油膜厚度的变化，不能正确地获得轴承台肩面的挤压效果〔11〕。另外，关于动作特性的各向异性，无论是静态的还是动态的，如果是4个气室数，几乎可忽视。〔11-12〕静压轴颈轴承偏心率大致在0.3以下，如果采用4个气室，异向性可忽视。但是，气室的个数与轴的园度误差的峰值有关，它影响静态回转精度〔2〕，所以作为超精密静压轴承，今后必须考虑的地方。

以机床为使用对象时，工件高频振动的外界干扰往往成问题，这时轴承的衰减性能很重要。可是从图8可知，静压轴承的频率特性一般是过衰减，这是具有高衰减性能的轴承。这种轴承不但是台肩面的挤压效果，就是气室部分的挤压效果的影响也很大，这是静压轴承的特点，从能量吸收率这个观点来考虑静压轴承气室部分的衰减特性，这是设计轴承反映出来的新动向〔13〕。

### 3. 3 静压控制轴承

检测气室压力同时自动地调节节流的静压控制轴承（自动调节静压轴承），具有所谓静刚性无限大的魅力。而且也可能得到负刚性，对机床来说，修正工具及工具的支承部分或工件的弹性变形量，获得正确地切深。〔14〕这是今后超精密领域所期待的轴承。

可变节流阀可分为定流量阀、积分阀、滑阀、隔膜阀等，实际上被认为有希望的是隔膜阀。隔膜阀结构比较简单，动态响应优越，这是已经证明了的。〔15〕作者认为采用隔膜阀的园板型止推轴承的响应性与固定节流相比较，结果并不逊色。图9是它的实例。

图9表示止推直径为190 mm，在静负荷400 kgf状态下，得到30 kgf台阶负荷变动时的响应，可以看出使用隔膜阀时，所得

到的峰突量比固定节流的位移量小，响应时间也大致相同，刚性接近无限大，表示出台阶响应优越的性能。

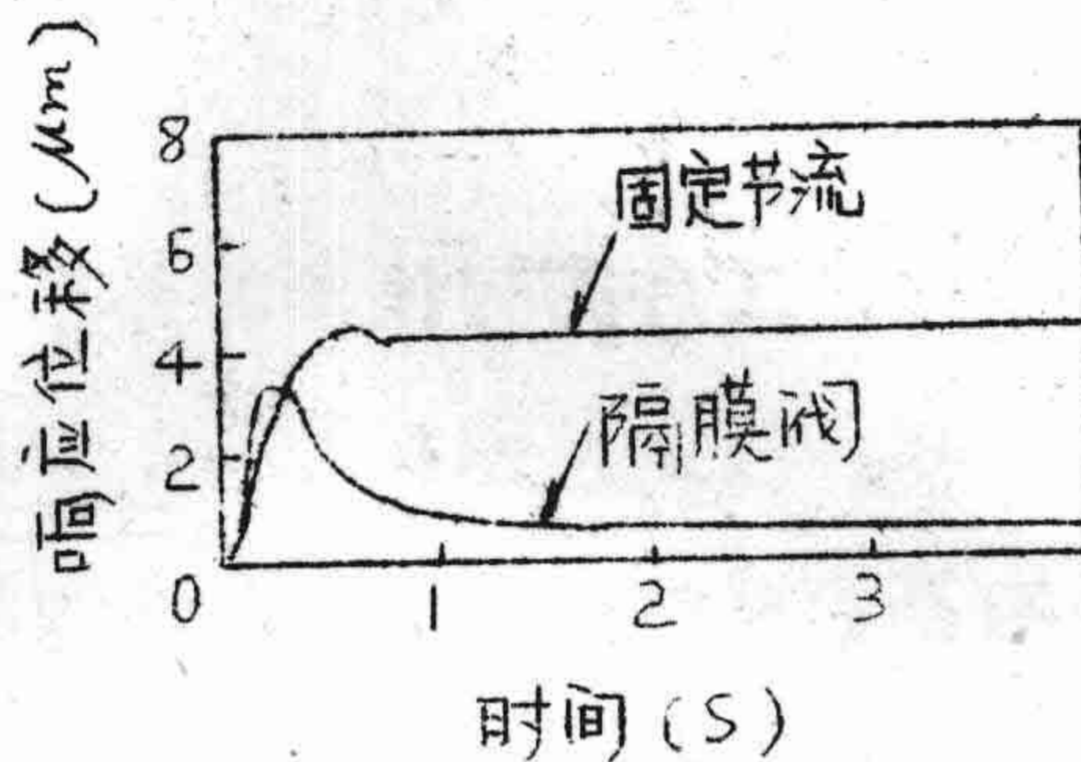


图9 台阶响应

但是，关于频率响应存在着一些问题，不单是缩短可变节流的响应时间，而且还必须改善包括其相位的动特性，其方法是：在轴承表面设置两个气室，检测不同相位的气室压力，然后由这些相位的线性组合，调节节流，将会改善动刚性<sup>[16]</sup>，或者在气室部分连接由节流和空气室组成的稳定化元件，使能量吸收率增加，获得稳定的动特性<sup>[14]</sup>

图10是采用可变节流阀代替隔膜阀，在轴颈轴承上装入能作静压支承的可动环的实例。这样，能预防隔膜阀的制造误差和安装误差引起的性能误差，而且使控制轴承实行了小型化。

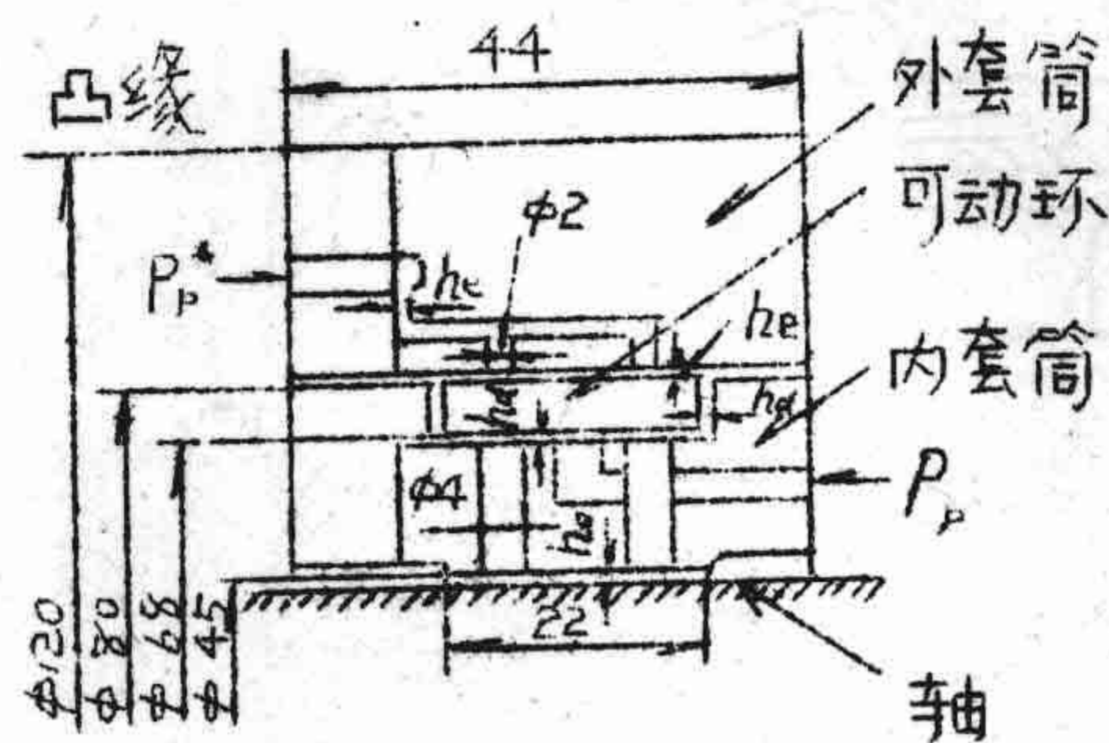


图 10 自动调整静压轴承

轴承在静态情况下，具有刚性无限大的性能，但由于静压支承可动环，环两端漏油，大大影响其性能，而在动态情况下，表示出怎样的特性呢？这一点较感兴趣。另外，在轴承内部设置可变节流机构的实验，在静压止推轴承一节中也已了解。图 11 [18] 表示它的实例。

图 11 的 C 部分具有园板型可变节流网的功能，其负荷特性和定流量阀类型相同（理论上）。

应用伺服阀的实例，有磨床的适应控制 [19]。它是由电脉冲马达控制差动阀门，使控制轴颈轴承用的气室压力发生变化，这样可以使砂轮正确地进给  $0.05 \mu m$ 。最近，正在研究利用微型电子计算机的、具有回转振摆修正机构的高精密回转轴系，精度可控制到  $0.01 \mu m$  以下。



