

变量泵与变量马达的发展

(日) 喜多康雄

1 前言

液压系统的目的在于可使某一执行对象以预定的速度向正反两个方向运动。此时,为调节速度而进行节流,致使能量有所损失,并导致系统效率降低,为此需采用变量泵。此外,为了在不增加管路阻力的条件下提高马达的速度,也有必要为减少马达排量而采用变量马达。这些都是过去的一般想法。而将来则采用恒压力源系统。因此,以预定的速度向正反两个方向运动可以把任意大小的力从任意方向加在对象物体上,所以应当采用变量泵与变量马达作为执行机构。

七年前(1981年8月),作者曾在《液压与空气压》中写了“液压技术之动向”一文,综述了变量泵与变量马达基本结构的发展过程,并介绍其未来的发展趋势。为使液压系统充分吸收电子技术的进步成果,成为更具有竞争力的驱动系统,液压系统无论如何一定要达到更高的效率,更好的控制性能和更低的噪声。为实现这一目标,无能量损失的可控能量变换元件即变量泵与变量马达的进步是必不可少的。

本文将根据读者意见,回顾变量泵与变量马达的发展进程,同时就“液压技术之动向”一文中所述之理想变量泵与变量马达的具体事例进行说明。

2 理想的变量泵与变量马达

现在液压系统中所用的液压泵与液压马达,人们对它们的要求是:

- A. 节能;
- B. 可控性好;
- C. 可靠性高;

D. 噪声低。

就A项而言,要求效率要高,能量能够回收,体积小,重量轻。

就B项而言,要求在正负两个方向上都是可变的,且直线性能好,起动与低速时的扭矩效率好,排量控制的响应性能好,控制机构的可靠性高。

就C项而言,应不易烧结,寿命长,即使在高温下容积效率也很好。

就D项而言,应力变化要小,应力回程要短,刚性要高,不得采用滚动轴承。

3 现有的变量泵与变量马达

无论液压泵还是液压马达,都由于压力的作用而使泵与马达内部部件所受的力大致相同。如果运转速度相同,则相对滑动速度也必然相同。总之,如果与因压力而生之扭矩反向旋转则为泵;如果与因压力而生之扭矩同向旋转则为马达。它们内部的部件并无任何变化,因此,作为马达如具有高效率,作为泵也一定是高效率的。所以本文拟以液压马达来探讨将压力变为扭矩的变换机构。

目前,作为变量泵和变量马达使用的几乎全部是轴向柱塞式,它又分为斜轴式与斜板式两种,现分别叙述如下。

3.1 斜轴式轴向柱塞泵与马达

这是汉斯·托马(Hans Thoma)1980年的发明。此后于1946年,他又对缸体的同步驱动进行了改进,将万向接头改为连杆方式,将阀板由平面改成球面。最近,力士乐(Rexroth)公司又推出了将连杆与柱塞组成一体的采用锥形柱塞(柱塞杆装在密封部上)的改进型式。自

该发明问世以来,在近 60 年的期间内不断有所改进,目前已成为各领域最广泛应用的产品。回顾其发展历程可以看出:

- (1) 提高了缸体与阀板之间的密封稳定性;
- (2) 降低了缸体与阀板之间的流道阻力;
- (3) 简化了同步驱动缸体用的机构;
- (4) 加大了倾转角,从而作到了体积小,重量轻;
- (5) 提高了倾转部支承机构的刚性,降低了噪声;
- (6) 改变了倾转部与罩壳之间的油路连接方法,因而体积更小,重量更轻。

阀板由平面改成球面型式为(1)、(2)项的改进提供了条件;万向接头改为连杆方式实现了上述第(3)项的改进;采用将连杆与柱塞组成一体的锥形柱塞(图 1)可以达到第(4)项的目的;关于第(5)和第(6)项,采用扇形斜轴式轴向柱塞泵可以达到它们所要求的目标。目的在于实现只能单侧倾转,使控制方便以及增大

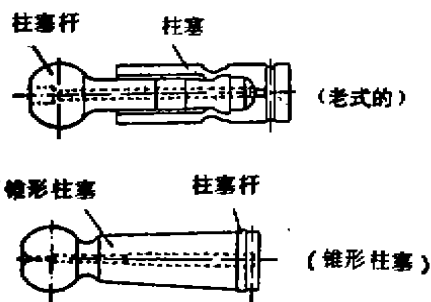


图 1 老式柱塞与锥形柱塞

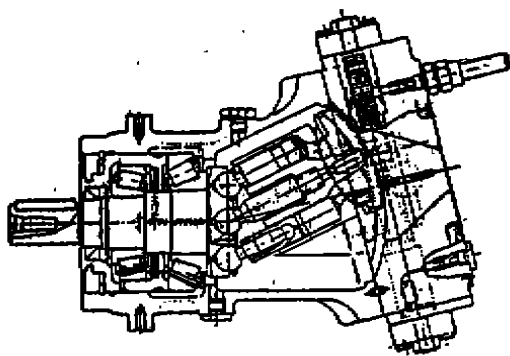


图 2 扇形斜轴式轴向柱塞泵

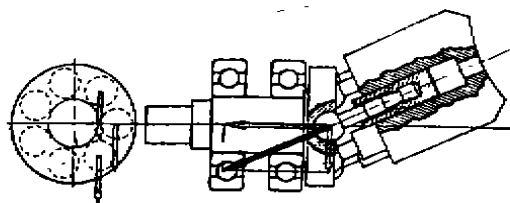


图 3 将压力变为扭矩的机构(斜轴式)

油路阻力而有利于效率(图 2)。

将压力变为扭矩的变换机构的工作原理如下(图 3):作用于柱塞底部的压力借助于柱塞变为推力,该推力又借助于连杆推动驱动轴法兰部的球面底座(向连杆轴向推动)。将该球面底座节圆半径乘以推动该球面底座的圆周方向分力即为输出扭矩。由于相对连杆柱塞的倾斜比较小,所以它的优点是柱塞侧面的表面压力小,上述周向分力(有效成分)小于连杆的轴向推力。这一倾向在倾转角越小时表现得越明显。

如设图 3 中倾转角为 α , 柱塞面积为 A , 压力为 P , 相对于连杆柱塞的倾斜忽略不计, 则支承驱动轴的轴承上所受到的推力载荷为 $n \times P A \cos \alpha$ 。式中 n 为高压侧的柱塞数目。对于径向载荷, $n \times P A \sin \alpha$ 则作为悬垂载荷加在驱动轴的支承机构上。这些载荷值比较大, 为获得较长的寿命, 如采用大型轴承, 则确保润滑乃是必不可少的条件, 因而这也限制了大型化重量化, 并对工作液有一定要求。

3.2 斜板式轴向柱塞泵与马达

这是对 1905 年哈维·威廉(Harvey Williams)和雷诺兹·詹尼(Reynolds Janney)发明的轴式液压传动装置(图 4)进行改进后的结构更加简单的变量泵与变量马达, 1950 年后已开始了大量生产。与斜轴式相比, 它体积小, 重量轻, 具有良好的排量控制响应性能, 所以在各种液压泵中的应用日益扩大。在实现了批量生产的 40 年期间, 概括地说, 它进行了下列四个方面的改进:

- (1) 提高了缸体与阀板之间的密封稳定性;

- (2) 降低了缸体与阀板之间的流道阻力;
- (3) 提高了柱塞滑块的可靠性;
- (4) 通过提高斜板支承机构的刚性来降低噪声。

关于第一点, 应使缸体上承受的径向力加在其着力点上。有多种设计方案可以解决这一问题, 最近多采用以贯穿中心的驱动轴花键部分来支承径向力(图5)。

将压力变换为扭矩的机构的工作原理如图6所示。作用于柱塞底部的压力通过柱塞变为推力, 这一推力同柱塞端导向板由斜盘所受反力的垂直轴向分力相平衡。导向板由斜盘所受反力的垂直轴向分力变为对于缸体所支承柱塞的悬垂载荷, 缸体上作用有缸前缘与柱塞后端大致与轴向垂直(方向大致相反)的两个力。

结果, 由缸体前缘受力矢量的周向分力中减去柱塞后端受力矢量的周向分力即为输出扭矩, 并借助于花键传给驱动轴。

这样, 在斜盘式中, 由于柱塞端部悬垂载荷的作用, 在缸体前缘与柱塞后端上产生柱塞侧压, 而柱塞后端的侧压则与有效的输出扭矩相对抗。这种侧压可转变为摩擦力, 对起动及低速运转时的扭矩性能有不良影响, 并且不利

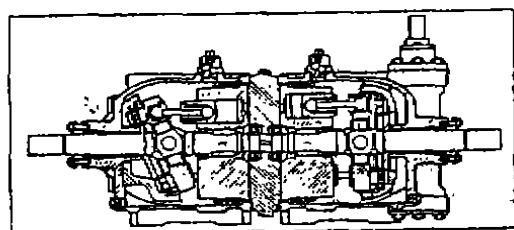


图4 威廉-詹尼的轴向式液压传动装置

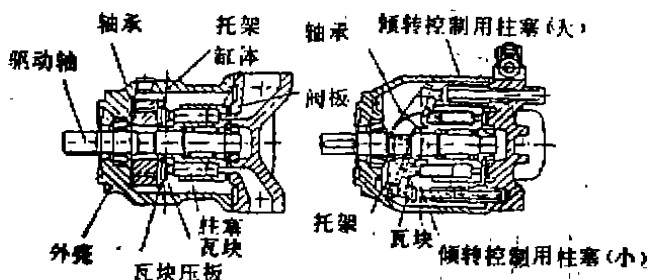


图5 采用托架型凸轮的斜盘式泵

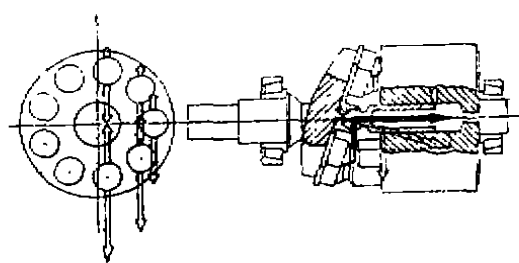


图6 将压力变为扭矩的机构(斜盘式)

于控制。不过, 在斜盘式马达中, 由柱塞侧压所产生的旋转力可以传递给输出轴。

4 新型径向缸式变量泵与变量马达

径向柱塞式是1910年H.S.(Hele-Shaw)发明的, 曾用于船舶舵机。然而, 由于径向式重量重, 体积大, 不适于高速运转, 因而让位于轴向式。

另一方面, 于1980年开始, 日本岛津制作所作为风车驱动的大型变量泵研制了这种新式结构的产品, 并随即用作HWBF(高水基工作液), 开始大量生产。1985年, 在关于流体控制与测量的国际学术会议上(FLUCOM 85)发表了论文。1988年试制成采用高压式(将力偶环外周的静压垫改为浮动式)的汽车用无级变速器。

图7表示历来的斜轴式、斜盘式与径向缸式施加转动力方式的比较。(a)为斜轴式, (b)为斜盘式, (c)为径向缸式。

由图7可见, 过去的产品都是将力加在轴心的单侧上, 使轴转动, 用一只手即可转动曲柄。与此相反, (c)式可用双手转动T形手柄上的套筒扳手, 从相反方向将同样的力加在两侧上, 使轴转动。用单手转动曲柄, 需要有支承轴的轴承, 而用双手转动操纵手柄时, 则不

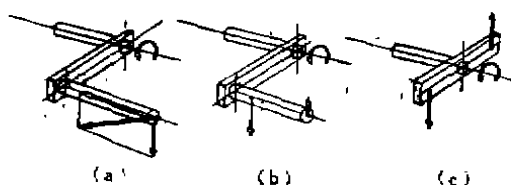


图7 转动力施加方式的比较

需要支承轴承。因此，从尺寸、重量、寿命等方面考虑，可以不配备容易产生故障的滚动轴承。

基于上述原因，在(a)的情况下，由于推动方向倾斜，轴承不得不承受相当大的推力。在(b)的情况下，与转动力相反方向的力起作用。与此相反，在(c)的情况下，力的方向经常与杆成直角(圆周方向)。

它的最大不同点在于：用单手时，转动曲柄的力是金属推动金属的力；而以双手转动手柄时，是液体推动金属的力。

液体推动金属的力有一对，它们大小相等，方向相反，即成力偶方式，并命名为液力偶(Fluid Force Couple)方式。将此FFC方式的新型变量泵与变量马达称为径向缸型式，这是因为在过去的泵与马达中，柱塞是将液压力变为机械力(推力)的部件，而在FFC方式中，这种意义上的柱塞是不存在的。

4.1 液力偶方式的原理

大小相等方向相反的力偶具有不选择作用点的性质，因此，如果力偶作用于同驱动轴成一体部件上，则无论其向何方和作用于何处，总是作用在驱动轴的中心上。这是因为径向力得以平衡，其余均是单纯的回转力。图8所示可助说明。另外，这种关系不仅局限于同一平面，只要矢量在平行平面内成立，即可扩大到三维立体内成立。

FFC方式变量泵与变量马达的基本结构

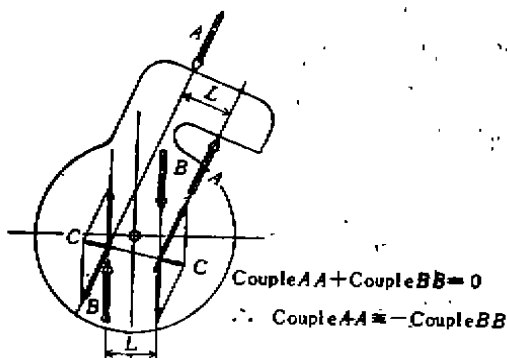


图8 如将任意力偶 AA 与中心力偶 BB 合成，就得到 CC，且等于零

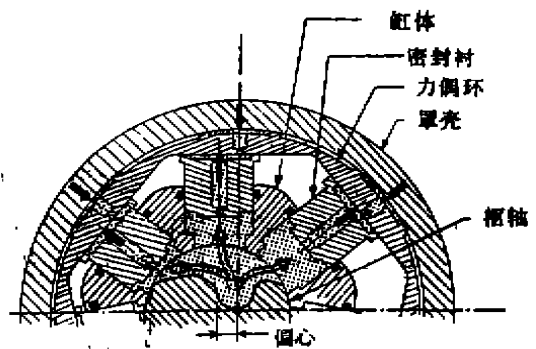


图9 FFC 方式的结构与工作原理

是由下列(由外向内顺序)部件组成(图9)。

- 1) 内表面加工成圆筒状的罩壳。
- 2) 利用设置在外周的7个静压垫与罩壳相接，内表面由7个与静压垫相应平面构成力偶环。
- 3) 与力偶环内侧各平面垂直相接的密封衬。
- 4) 有7个与密封衬嵌合的径向缸的缸体。
- 5) 与缸体中心孔嵌合，相对处于罩壳中心，并在正反两侧可与轴向垂直的偏心枢轴。

在上述简单结构中，既没有柱塞，也没有柱塞瓦。枢轴由设在罩壳内的沟所支承，并也支承着缸体。缸体借助于欧氏联轴节与力偶环保持同步转动，并与力偶环和驱动轴结为一体。

图9可以说明这种液压马达结构的工作原理。油一旦被导入油缸，则由密封衬所密封的油推动力偶环的内侧平面。同时，油从设在各平面中央的孔导入设于力偶环外周的静压轴承(垫块)，并从外侧推动力偶环。如图所示，由来自内外两侧的油推动力偶环的力的矢量互为180°。由于静压垫的面积等于缸面积，所以力的大小彼此相等。即力偶环由于液压的作用，在一侧上承受大小与缸的偏心成比例的力偶。

鉴于上述力偶的性质，如果力偶作用于力偶环的一侧，则仅液压马达输出轴的中心受到力偶作用。因而用3个或4个流入侧油缸的压力乘以各偏心量(正、负)之和的乘积，就可得到与该积成正比的正负两个方向的输出扭矩。

所以, 此时支承输出轴的轴承载荷为零。

4.2 FFC方式变量泵与变量马达的实际结构

在实际结构上, 为防止柱塞的悬垂载荷, 确保油路畅通, 柱塞都制成圆柱形式, 而其底座部分的截面为梯形的四棱柱块。在枢轴的圆锥面上有一对孔口, 设置在梯形块斜面上的一对孔口之间由一对交叉形的立体交叉油路联系(图 10)

因销轴呈圆锥形, 故缸也倾斜, 力偶环和罩壳(轴端一侧)也都呈圆锥形。罩壳枢轴底座上开有梯形沟, 与枢轴梯形块相嵌合。它一方面作支承, 一方面使枢轴有可能向与轴垂直的方向移动(偏心)(图 11)。

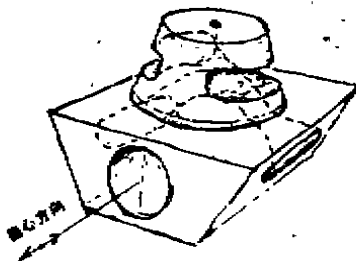


图 10 枢轴简图

4.3 各部件间的静压平衡

如果先下结论的话, 那么在 FFC 方式中, 内部各部件同枢轴的偏心量无关, 它们都能保持静压平衡。内部滑动面的表面压力大致为零, 所有 PV 值几乎都为零。

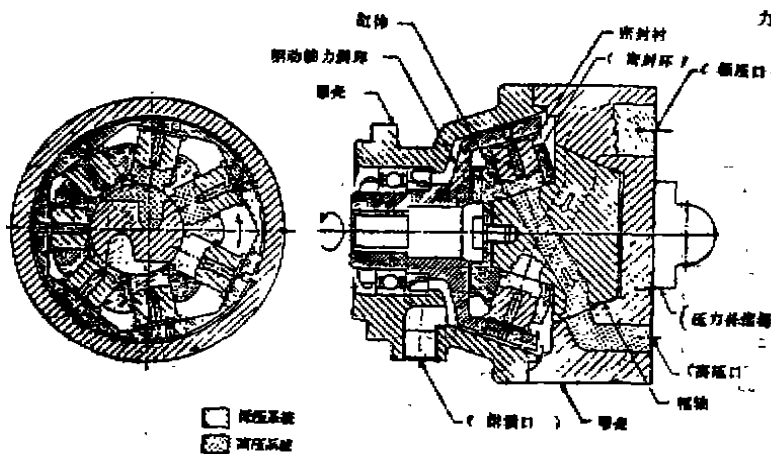


图 11 FFC 方式的结构(开式回路用)

图 12 为利用沿油路的斜向截面图来说明内部部件压力平衡的图解。而力偶环(驱动轴)与罩壳如图 13 所示, 接受由液压引起的力偶, 分别与外部扭矩相平衡, 即, 前者与轴负载扭矩平衡, 后者与壳体的约束力(反作用扭矩)相平衡。

4.4 FFC 方式变量泵与变量马达的特点

该方式虽可全部满足第 2 节所述的理想条件, 但其中一些具体情况如下所列。

A₁ 示例……图表 1 (在速度与压力的广大范围内效率良好)

A₂ 示例……图表 2 (与老式产品相比, 重量轻 1/3 以下)

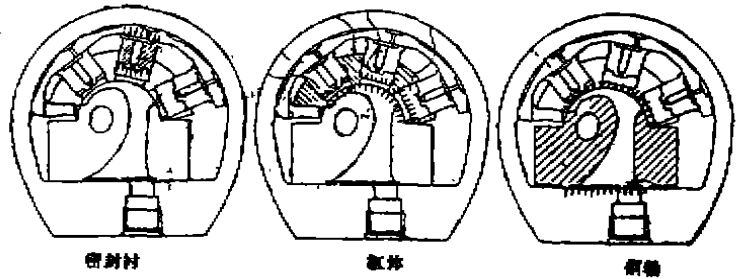


图 12 承受液压力完全平衡的部件

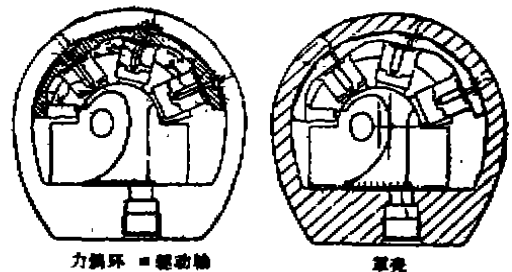


图 13 承受液压力偶的部件

B₂ 示例……图表 3 (启动扭矩效率约为 95%)

B₃ 示例……图表 4、图 14 (既无偏心机构也无连杆, 油直接推动枢轴)

图表 2 为相对于排量容积的质量比较。对于径向缸型式, 由于行程/缸径比较小, 即使排量容积相同, 缸底部的流速也比历来的型式小。例如, 该处的流速

峰值为 10m/s, 如将转速按 50ml/rev 加以比较, 则应为:

径向缸式……约 7000r/min

斜盘式……约 4000r/min

斜轴式……约 3500r/min

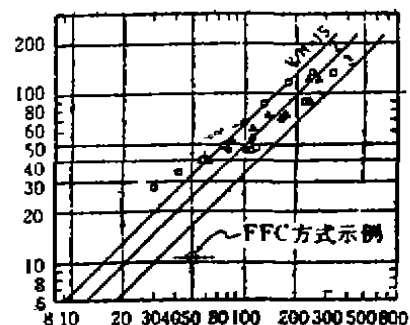
因此, 如将吸入时的离心力效果一并考虑在内, 可认为比历来的达到更高速的运转。其所有的 C_p 值都较大, 预计可以实现体积小, 重量轻, 功率密度也非常大的目标。

如图表 4 所示, 其控制响应性能之所以优异, 是因为偏心行程短, 没有连杆机构, 所以偏心操作时的移动质量小。由于没有控制连杆, 所以控制机构的耐久性与可靠性均十分优异。

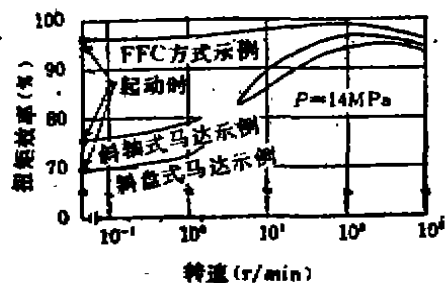
关于 C_1 , 由于 PV 值大致为零, 故无烧结的危险; 关于 C_2 , 由于驱动轴的轴承负载几乎近于零, 故 B_{10} 的寿命可无限大; 而关于 C_3 , 本是为高水基工作液研制的, 即使粘度较低, 效率依然如故。

关于 D_1 , 径向式与轴向式相比, 它的声音轻一向为人们所称道。其原因如图 15 所示。

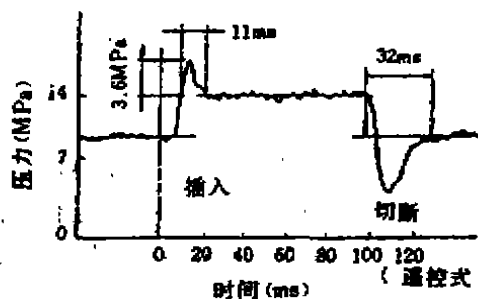
当缸数为 $2N+1$ 时, 随着缸体的转动, 高压缸的数目有 N 个和 $N+1$ 个两种情况, 彼此互相反复。在径向式条件下, 即使高压缸数目变化, 柱塞推力合成矢量的大小不变; 在轴向式条件下, 柱塞推力合成矢量的大小与高压缸数目成比例变化, 其着力点也随之不断移



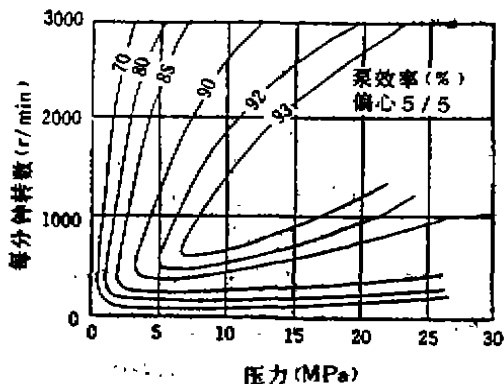
图表 2 与轴向柱塞式变量泵及变量马达的质量比较



图表 3 启动与低速时的扭矩效率



图表 4 压力补偿器的响应示例



图表 1 FFC 方式变量泵与变量马达的全效率示例

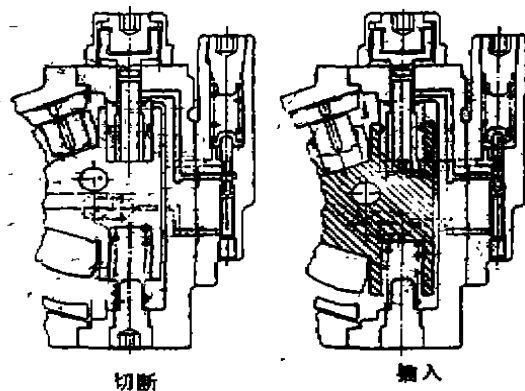


图 14 液体推动枢轴(控制缸底)的偏心控制

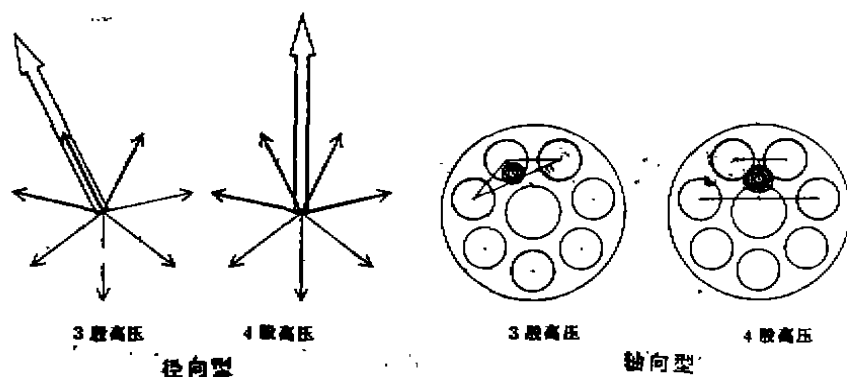


图 15 合成矢量随转动变化的比较

动。亦即，在轴向式情况下，合成矢量能迅速产生较大的变动，并以高速进行反复；反之，在径向式条件下，合成矢量的方向较少变化，故内力变化亦较少。

至于 D_2 ，由于将油缸推力等作为内力封闭于泵和马达内，所以有几个部件一方面受到拉伸应力或剪切应力的作用，一方面又与推力相抗衡，它们形成一个圆环（包括油缸在内）。该圆环在长度较大刚性较低时，扩散到外部的噪声亦较大，但图 11 所示为应力环形较短刚性较大的结构。

上述理由是否成立姑且不论，至少有一点是肯定的，那就是径向缸式变量泵及变量马达与老式的轴向柱塞式相比，它显得十分安静。此外，它还有部件数目少，加工表面多为锥形面，尺寸允差较大，没有球面接头的优点。

5 结束语

以上介绍了液压泵与液压马达的发展演变以及液力偶(FFC)方式的进展过程。作者认为，不管怎样，新的径向缸式变量泵与变量马达毕竟切实地解决了过去变量泵与变量马达所存在的几个主要问题。

关于油压，除了本文所述的若干关键问题以外，还存在一个所谓恒定压力源系统的新课题。在老式系统中，通常先确定流量，然后根据负载再确定压力。而在恒压力源系统中，则一反惯例，首先确定压力，然后再确定流量。

关于速度控制，实际上系指扭矩控制系统。它具有易于回收能量，运转安静，无冲击，各执行机构可分别独自进行控制，并可容易地增加或削减等许多优点。

齐佩玉译自《油压与空气压》。

1989, 20(2).—7~14 吴超发校