

■ 盖茨胜地汽车水泵产品（烟台）有限责任公司/孙国栋 朱淑玲
■ 烟台宋和宋科学技术应用工程有限责任公司/刘爱辉



汽车水泵是发动机冷却系统上的关键部件，水泵轴承在轴向载荷的作用下，在轴承孔中发生窜动以至脱出的失效状况极易造成严重的安全隐患。因此对轴承窜动的失效原因进行分析并制定相应的应对措施十分必要。

图1所示是典型的汽车水泵结构，在水泵轴承的一端通过带轮输入转矩，带动另一端的叶轮旋转，利用离心力来输送冷却液，带轮前端的风扇随水泵一同运转，为车辆的水箱降温冷却。下面就汽车水泵轴承窜动失效的影响因素进行分析。

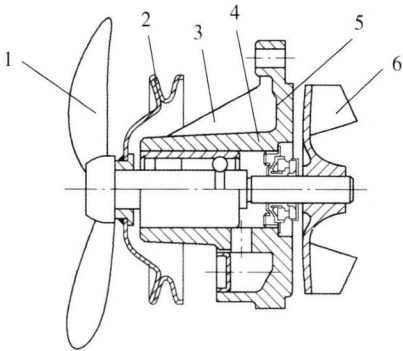


图 1

1.风扇 2.带轮 3.壳体 4.水泵轴承 5.水封 6.叶轮

温度变化的影响

水泵轴承和壳体之间通常采用过盈配合，使轴承

能够承受一定的轴向载荷。当车辆上运行的水泵温度从常温逐渐上升至较高的工作温度时，其零部件将随温度的升高而发生线性膨胀。当具有配合关系的轴承和壳体线膨胀系数差异较大时，温度的变化将导致过盈量的改变，从而改变轴承的脱出载荷。

以某型号汽车水泵为例，壳体材料为铝合金ZAlSi9Mg，轴承材料为GCr15，设计配合尺寸为 $\phi 30X7/h6$ ，当其温度从常温 20°C 上升至 90°C 的工作温度时，其过盈量的变化情况理论计算如下。

首先，根据 $\phi 30X7/h6$ ，查公差与配合手册可知过盈量为 $0.043\sim 0.077\text{mm}$ ，查材料手册得到材料的线膨胀系数见附表。

材料的线膨胀系数 (单位: $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
材料	温度范围	
	$20\sim 100^{\circ}\text{C}$	$20\sim 200^{\circ}\text{C}$
铝合金	22~24	23.4~24.8
铬钢	11	12.5

则，孔和轴的膨胀量为

$$\Delta_{\text{孔}}=30\times 23\times 10^{-6}\times (90-20)=0.048\ 3\ (\text{mm})$$

$$\Delta_{\text{轴}}=30\times 11\times 10^{-6}\times (90-20)=0.023\ 1\ (\text{mm})$$

$$\text{减少的过盈量}\Delta L=0.048\ 3-0.023\ 1=0.025\ 2\ (\text{mm})$$

过盈量的削减比例计算如下：

$$\Delta L = \frac{0.0252}{\frac{1}{2} \times (0.043 + 0.077)} = 42\%$$

取两组水泵分别在20℃和90℃测试其轴承的脱出载荷，形成对比曲线（见图2）。试验数据分析显示，常温下轴承的平均脱出载荷为10.7kN，在90℃温度下轴承的平均脱出载荷只有5.9kN，温度升高后水泵轴向承载能力下降了45%。

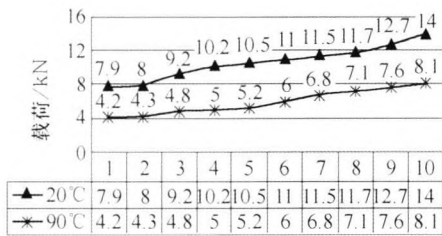


图2 试验载荷对比曲线

通过理论分析和试验测试可知，温度的变化对轴承的轴向承载能力影响很大。因此汽车水泵设计时应充分考虑材料的线膨胀系数及产品的工作温度等因素，必要时可以采用线膨胀系数差异较小的材料，或采用弹性挡圈等辅助工艺手段防止轴承窜动脱出。

壳体加工精度的影响

壳体轴承孔加工精度的主要影响因素包括表面粗糙度和圆柱度两个方面。机床加工的壳体轴承孔表面不可避免地存在较小间距和微小峰谷表面，即表面粗糙度（见图3），影响水泵轴承过盈配合的稳定性。由于表面粗糙度的影响，配合表面间的有效接触面积减小，并且装配时微观凸峰被挤平，使得实际有效过盈减小，降低了连接强度。

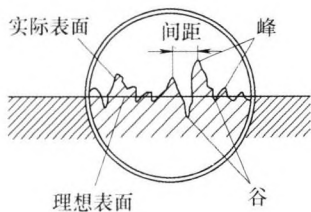


图 3

圆柱度误差包含了轴剖面和横剖面两个方面的误差，水泵壳体轴承孔加工中产生的圆柱度误差，同样可以减小配合表面间的有效接触面积，使过盈装配的轴承连接不可靠。

所以，壳体轴承孔加工精度对轴承脱出载荷的影响应给予重视。水泵壳体加工过程中，在考虑经济性的同时，还应该尽量降低轴承孔的表面粗糙度值和圆柱度误差，以此保证轴承与壳体的联结强度，防止轴承窜动脱出。

风扇运转的影响

水泵前端的风扇旋转时，由于空气流动产生的轴向力和风扇不平衡量过大引起的横向振动，都会影响轴承的可靠性，成为轴承窜动脱出的失效起因。

根据牛顿第三定律可知，风扇在起动之后其受力方向跟吹风方向相反。试验测试显示，当风扇的风速7~12m/s时，其受到的轴向力即可达到5000~8000N，力的方向是背向风扇。

另外，转动风扇由于制造和安装等原因，实际转动转矩中心和其理论轴心必然存在偏差，这导致风扇运转过程中在离心力作用下产生周期性振动。由离心力表达式

$$F = mr\omega^2 = mr(2\pi n)^2$$

可知，风扇运转时的振动烈度与不平衡量和转速相关。振动对轴承的损伤非常敏感，剥落、裂纹和磨损等都会在轴承振动中反映出来。水泵轴承在一定烈度的周期性振动载荷作用下，将会出现联接的疲劳失效，使轴承窜动脱出，轴承窜动的方向趋势指向风扇。

因此，汽车水泵设计时应评估并测算风扇运转时产生的轴向力，必要时对轴承设置止推装置。针对不平衡量造成的振动影响，设计上应改善风扇的质量分布，使其运转时轴颈的振动或作用于轴承的力减小到规定的范围内；制造时确定风扇产生的不平衡量的位置和大小并加以消除。

叶轮运转的影响

叶轮旋转做功时，其前后两侧的流体介质将产生压力差，从而产生轴向力，影响轴承的窜动脱出，尤以大功率的载货汽车水泵影响更为明显。

以某重型载货汽车水泵为例，其转速 $n=3500\text{r/min}$ ，叶轮直径 $d=122\text{mm}$ ，出口宽度 $B=13.5\text{mm}$ ，叶轮流体分析结果如图4所示。

当叶轮高速旋转时，在离心力的作用下，液体

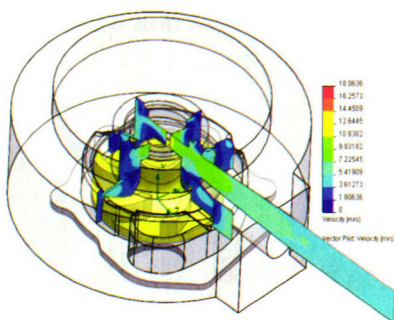


图 4

介质向周边甩出，此时正对叶片的进水侧出现一个负压区，压力约为 -10^6 kPa ，而通常叶片背向的压力为 100 kPa 。

$$F = \Delta PS = (P_1 - P_2) / 4 \pi D^2$$

考虑修正系数，可以计算出叶轮产生的轴向力为 842 N 。

可见，水泵运转时叶轮产生的轴向力不容忽视，其方向是背对叶轮的叶片，对轴承窜动的影响很大。因为叶轮产生的轴向力是不可消除的，所以在产品设计时应充分评估叶轮的轴向载荷，必要时应该考虑在轴承端面设置挡圈或阶梯来阻止轴承的窜动。在水泵设计时，如果将叶轮的叶片方向朝向带轮前端的风扇，则可以使叶轮和风扇两者产生的轴向力进行部分抵消。从而降低了水泵轴承的轴向负载，不但可以防止轴承的窜动脱出，还可以改善轴承的工作条件，提高水泵的寿命。

安装条件的影响

水泵带轮由于设计、制造以及安装误差的存在，使之中心面与相邻轮系的中心面无法完全重合，因此V带拉力方向与带轮中心面之间存在一个倾角 α ，建立图5所示力的三角形。

水泵轴承受到的轴向静拉力为

$$F = 2T \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin \alpha$$

其中， T 为带预紧力， ϕ 为带轮包角， α 为带倾角。

假设水泵的带预紧力 $T=500 \text{ N}$ ，带轮包角 $\phi=180^\circ$ ，带倾角 $\alpha=4^\circ$ ，则轴向静拉力计算如下：

$$F = 2 \times 500 \times \sin(180^\circ / 2) \times \sin 4^\circ \approx 70 \text{ N}$$

以上计算未考虑带传动的径向冲击载荷。由于带

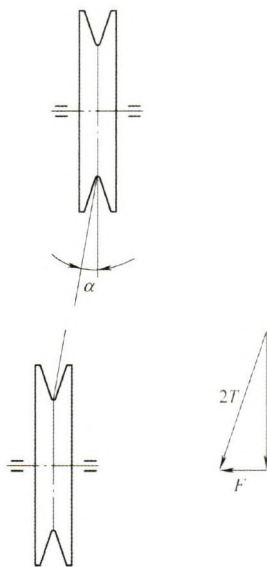


图 5

倾角的存在，水泵运转时轴承必然会受到一个高频的轴向冲击载荷。据估算，轴承实际受到的轴向动载拉力 $300 \sim 500 \text{ N}$ 。在以上因素的影响下，长期运转的水泵轴承极易出现连接的疲劳失效，最终使轴承窜动脱出。

水泵安装后其带轮在发动机轮系中的轴向偏差、水泵旋转轴与相邻轮系旋转轴的平行度误差以及周边零部件的振动等均会影响到轴承连接的可靠性，使轴承出现联接的疲劳失效。因此，从设计入手并通过工艺控制来尽量减少水泵带轮的带倾角 α 值，可以有效减少水泵轴承的轴向动载荷，防止轴承窜动脱出。另外，提高水泵所在的传动系统刚性，减少振动源的数量及其烈度可以使水泵运转更趋平稳，降低产品失效的概率。

结语

以上针对汽车水泵轴承窜动失效的影响因素进行了分析，其失效往往是多种因素综合作用的结果。因此，在产品的设计和制造过程中要尽量避免或消除不利的影响因素，必要时采取一定的预防措施来提高汽车水泵的可靠性，防止水泵轴承窜动脱出。

关键词：

汽车水泵 轴承窜动 措施

(收稿日期20130305)