

船用透平齿轮齿宽载荷分布的计算及螺旋线修正(续)

张 信 平

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

(上接1988年第1期)

2. 齿轮X方向和Y方向轴线不平行度对轮齿载荷分布的影响

造成齿轮X方向和Y方向轴线不平行度的原因很多。除了制造精度不良外。还有以下几点：(1)齿轮箱热变形不均匀。主机隔热不良可能造成对齿轮箱体的局部辐射热，二级齿轮减速器的中间轴承座温度有可能比两端的轴承座温度高；(2)齿轮两端的支持轴承支点刚度不等；(3)船体变形引起齿轮箱变形；(4)齿轮减速器输入、输出轴与连接轴不对中；(5)螺旋桨轴系设计或找正方法不良，在运行时也能引起附加外力矩作用于齿轮箱输出轴，破坏平行度。

掌握齿轮X方向和Y方向的轴线不平行度对齿轮载荷分布的影响，才能有效地采取调整平行度和齿面螺旋线修正等措施来改善齿面载荷的分布，才能对导致齿轮不平行度的诸因素，如连接轴线的不对中度，齿轮箱体变形等项目提出确切合理的限制要求。

一对齿轮的不平行度为零时，大、小齿轮滚动圆相切于共同的节线；当有Y方向轴线平行度误差时，大、小齿轮节线的相互位置发生了变化。这时可将Y方向轴线平行度误差引入小齿轮节线的变形，然后再求齿宽上各

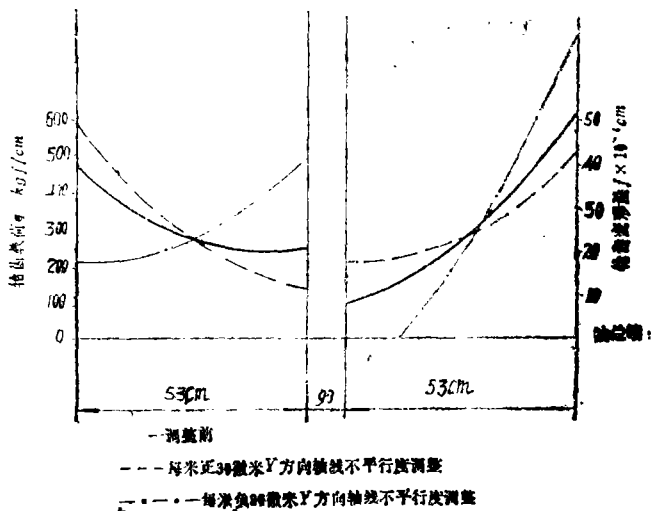


图5 作Y方向轴线不平行度调整后齿宽上轮齿变形量及轮齿载荷值

点轮齿的变形和载荷。当Y方向轴线平行度误差较大时,计算中可能出现负的 q_x ,这时 f_x 面积大于 $P/2C$,可将小齿轮节线向下平移,直到 f_x 面积等于 $P/2C$ 为止,然后再求轮齿变形及载荷。

图5的虚线是以图2的曲线为基础作Y方向轴线不平行度调整后得到的。即作每米正30微米Y方向轴线不平行度调整后得到齿宽上轮齿变形量以及轮齿载荷的值(Y方向轴线不平行度为负,法兰端齿面载荷增加,反之为正)。可以看出:人为地调整Y方向轴线不平行度能改善轮齿载荷的分布,但由于人字齿小齿轮变形引起齿轮两端的轮齿载荷较中部为大,而且,齿轮两端的载荷差值不如单斜齿大,所以,对于人字齿轮,调整Y方向轴线不平行度对改善齿面负荷分布的效果不如单斜齿明显。图5的点划线为每米作负80微米Y方向轴线不平行度调整后轮齿载荷分布图,右半人字齿局部出现轮齿不接触。

至于齿轮Y方向轴线不平行度对齿面载荷分布的影响,可将不平行度转化为单位长度上轮齿的开口,即将X方向轴线不平行度乘以 $\operatorname{tg}\alpha_s$ 转为Y方向轴线不平行度值,然后进行计算。此外,值得指出的是:对于运行中齿轮箱变形引起的轮齿局部接触,可用以上计算方法来指导齿轮不平行度的调整。

3. 轴承支点刚度对轮齿载荷分布的影响

小齿轮变形、齿轮的不平行度等会影响齿面载荷分布,引起齿轮两端轴承支反力不等,若两端轴承支点刚度相等,则造成齿轮的附加不平行度。两端轴承支反力不等引起的Y方向轴线不平行度为 $2(R_2 - R_1)/QL$

式中 Q ——轴承支点刚度 kgf/cm ;

L ——轴承支点间跨距;

R_1 ——齿轮圆周力引起的自由端轴承支反力;

R_2 ——轮齿圆周力引起的法兰端轴承支反力。

如考虑轮齿径向力的影响,上式可乘以 $(1 + \operatorname{tg}^2\alpha_s)$ 。

可将支反力差引起的Y方向轴线不平行度引入小齿轮节线变形中进行迭代计算。不平行度会减小轴承支反力较大一端的轮齿变形值,这对于减小齿轮载荷集中是有利的。

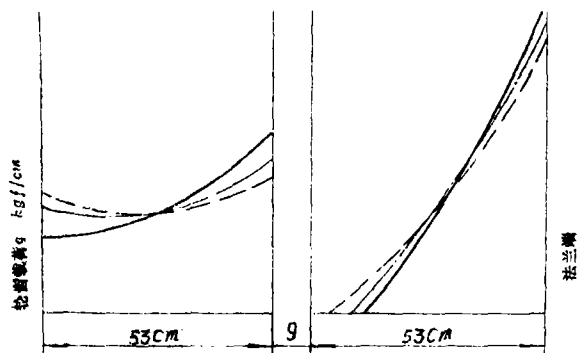
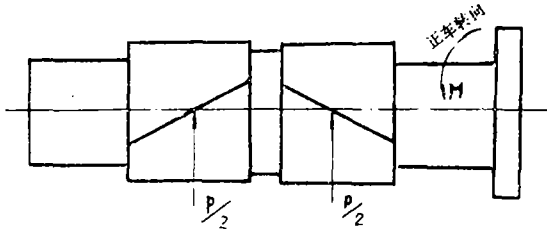


图6 轴承支点不同时,刚度对轮齿载荷分布的影响

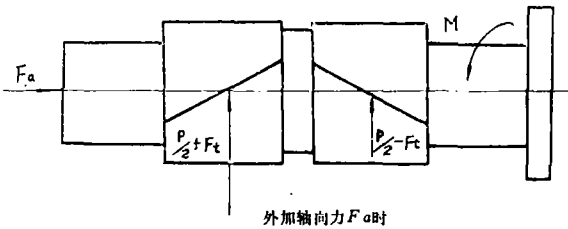
图6所示的三条曲线,表示轴承支点不同,刚度对轮齿载荷分布的影响。轴承支点刚度越低,对轮齿载荷分布均匀越有利。同时应说明:支持轴承支点刚度由支持轴承油膜刚度、支持轴承座刚度,支持轴承座除外的齿轮箱体刚度构成。齿轮箱体刚度越低意味着齿轮箱体对船体基础的变形越敏感。所以,对于刚性固定在基础上的齿轮箱,当没

有措施能隔离船体变形对齿轮箱的影响时，不能片面追求齿轮箱体的低刚度来改善齿面

载荷分布。此外，在齿轮箱设计时应力求齿轮两端轴承支点刚度相等，以避免可能导致齿面载荷不均匀的附加不平行度。



无轴向力时



外加轴向力 F_a 时

图 7 有、无外加轴向力的小齿轮受力示意图

4. 轴向力对轮齿载荷分布的影响

图 7 表示有或无外加轴向力的小齿轮受力示意图。当小齿轮能自由轴向移动，即没有外加轴向力时，外力矩 M 和轮齿圆周力 P 的力矩平衡。二半人字齿各承担 $P/2$ 。当小齿轮轴向移动受阻，如有图示方向的外加轴向力 F_a 作用时，左半人字齿传递圆

周力为 $F/2 + F_t$ ，右半人字齿传递圆周力为 $F/2 - F_t$ ，轴向力引起的附加圆周力 $F_t = F_a / 2 \tan \beta$ 。图 8 表示外加轴向力对轮齿载荷的影响。

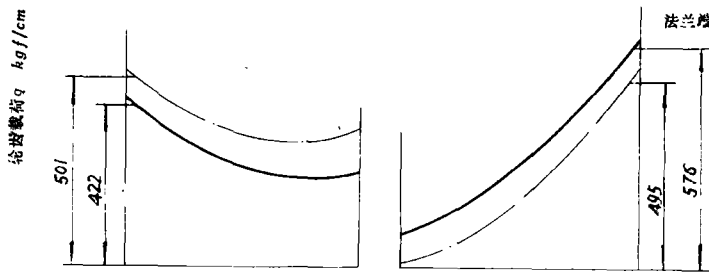


图 8 外加轴向力对轮齿载荷的影响

—•—•— 外加轴向力 6220kgf (向法兰端)

—— 无外加轴向力

三、螺旋线修正对轮齿载荷均布的效果

据国外报导，螺旋线修正能使齿面载荷分布趋向均匀，提高轮齿承载能力 2~3 倍。此外，螺旋线修正能减小运行时的振动和噪音，所以，这种方法在国外商船或军舰透平齿轮上都有采用。

第一部份所述的齿面载荷不均匀是由于齿面均布载荷的小齿轮变形在齿宽各点不

等, 进而引起齿宽上各点轮齿变形不均匀而形成的。如果事先按计算工况均匀载荷时的变形值, 在相反方向, 对齿面进行修正, 则在计算工况下, 小齿轮变形使小齿轮的节线恢复到正常位置, 从而可达到沿齿宽齿面载荷分布均匀的目的。

考虑到工艺性, 螺旋线修正一般在小齿轮上进行, 其形式有三种:

① 整个齿面曲线修正, 按计算工况轮齿载荷均布的小齿轮的变形值, 在整个齿宽上按相反方向对齿面进行修正, 这样, 在计算工况下可得到轮齿载荷均布, 故最为理想, 但工艺比较复杂。修正后小齿轮原来的一些重要数据(如基节及螺旋角)不再保留。

② 整个齿面直线修正。整个齿面按上述①法修正曲线与每半人字齿两端交点的联结直线进行修正。这种修正形式的工艺比①法简单, 轮齿载荷分布也较均匀。见图 9 虚线所示。修正直线的斜率可按下式计算:

左半人字齿(自由端)齿面修正直线的斜率为:

$$[Y_{(x-\frac{F}{2})} - Y_{(x=0)}] / F/2 = \frac{qF}{2J_p} \left\{ -\frac{3}{E} \left[\frac{7F^2}{96} + \frac{aF}{4} - \frac{Fl}{8} - \frac{al}{2} \right] - \frac{Y^2}{2G} \right\}$$

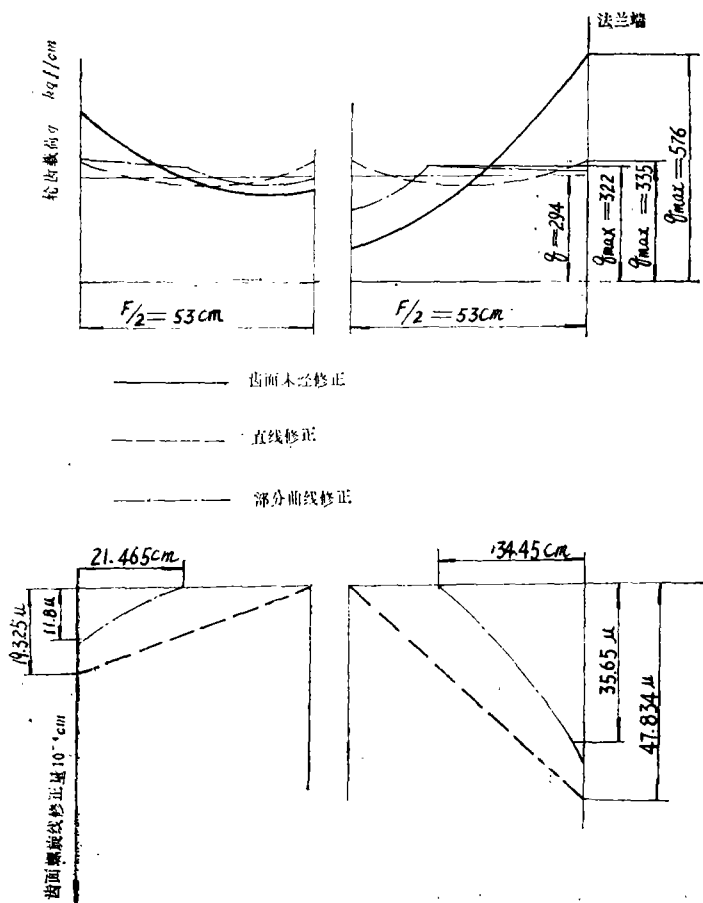


图 9 经螺旋线修正后轮齿载荷的分布

右半人字齿（法兰端）齿面修正直线的斜率为：

$$Y_{(x-\frac{F}{2}+s)} / \frac{F}{2} = \frac{qF}{2J_p} \left\{ \frac{1}{E} \left[\frac{5F^2}{48} + \frac{Fa}{2} + \frac{Fg}{4} + ag \right] + \frac{3r^2}{2G} \right\}$$

③ 齿面局部修正。齿面局部修正的宽度占每半人字齿的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ ，与未修正的齿面光滑过渡，其优点是工艺简单，修正后小齿轮原来的一些重要数据得到保留，缺点是轮齿载荷分布不如①②法均匀。但还是比较理想（见图9点划线所示）。将以上三种修正形式应用到上述机组高压第Ⅱ级正车110%工况，可得到以下结果。

修正形式	(1) 整个齿面曲线修正	(2) 整个齿面直线修正	(3) 齿面局部修正
修正前轮齿最大载荷	5645N/cm		
修正后轮齿最大载荷	2881N/cm	3283N/cm	3156N/cm
修正效果	5645/2881=1.96	5645/3283=1.72	5645/3156=1.79

可见，采用螺旋线修正可以减小齿面载荷集中，效果是明显的。

以上例举的螺旋线修正例子，只考虑了小齿轮变形引起的载荷分布不均匀，影响轮齿载荷沿齿宽分布的其它因素：大、小齿轮温度差、齿轮的X、Y方向轴线的不平行度，外加于人字齿的轴向力等，亦可以在螺旋线修正中加以考虑。螺旋线修正改善因上述因素引起齿面载荷不均匀的效果，取决于在修正前齿面载荷分布的不均匀程度。当小齿轮的齿宽与直径的比值 F/d 较小或上述其它因素造成的轮齿载荷不均匀度较小时，采用螺旋线修正的效果不明显，反之则明显。

此外，螺旋线修正值取决于某个具体使用工况。对于按具体工况设计的修正齿轮，在非设计工况运行时，使用效果就降低。军舰由于运行范围广，在大多数情况下，修正值以全功率考虑，但如果动态特性充分清楚，并且在全功率没有超载，则修正可针对某一具体的运行条件来选择。

本文在某部份计算方法、电子计算机源程序的编制和上机操作曾得到况季孙，张玉璟等同志的帮助，对此表示衷心感谢。

参 考 文 献

1. Корниенко: “提高透平齿轮减速器制造质量及运行性能的一些途径” Энергомашиностроение 1959.2
2. “对日IHI公司（石川岛播磨）中速柴油机主减速装置座谈技术总结”（对日IHI技术座谈小组 1979.10）
3. “Progress and development in naval propulsion gears 1946~1962” I.M.E. Transaction vol 75, No. 3
4. “高速齿轮的热变形及其修形” 郑州机械研究所译

（渠源沂 编辑）