

# 谐波齿轮传动中柔性轴承的寿命计算

昆明物理研究所 任德清

## 摘 要

本文从一般滚动轴承寿命公式的基本前提条件出发,指出用一般滚动轴承的寿命公式计算柔性轴承寿命的不合理性,同时推导了柔性轴承的寿命计算公式,使之更加符合其受力情况。

## 一、引 言

谐波齿轮是一种新型的传动机构。由于它具有一系列优点,近年来在国内得到了推广和运用。然而由于谐波传动本身的复杂性,许多问题还有待于进一步的研究。

柔性轴承是谐波齿轮传动中的关键零部件之一。在使用中常常发现柔性轴承的早期破坏。接触疲劳破坏是其主要破坏形式之一。因此对柔性轴承的使用寿命进行深入的研究是势在必行。

目前对柔性轴承进行寿命计算的方法较多,但都有其局限性,较多的是直接引用一般滚动轴承的寿命计算公式对其进行计算。本文在充分考虑柔性轴承的受力条件下,推导了柔性轴承的寿命计算公式,使之更加符合其受力情况,并且能解释柔性轴承早期破坏的原因。

## 二、柔性轴承的寿命计算

一般对滚动轴承进行寿命计算时,都是假定只受单向载荷,如图1所示。这时寿命计算公式为:

$$L_n = \frac{10^6}{60n} \left( \frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (1)$$

式中  $L_n$ ——滚动轴承的额定寿命(小时);

$C$ ——额定动负荷(N),见文献[1];

$n$ ——滚动轴承的转速(r/min);

$P$ ——当量动负荷(N);

$\epsilon$ ——寿命指数。

值得注意的是,滚动轴承的额定动负荷 $C$ 是在以下条件下确定的[1]:

1. 内圈相对于负荷向量旋转,外圈相对于负荷向量静止;

2. 轴承的使用可靠度  $S = 99\%$ ;

3. 额定寿命为  $L = 1$ (百万转);

4. 轴承承受单向载荷,载荷分布参数为0.5。

然而在谐波齿轮传动中,其柔性轴承(又称薄壁轴承)承受双向载荷[1]。由于其结构的对称性,这种双向载荷也是对称的。这时若仍沿用(1)式对柔性轴承进行寿命计算,其结果将引起明显的误差。因此,对于柔性轴承,其寿命计算公式必须在式(1)的基础上,根据其受力情况的不同,作必要的修正。

为了说明载荷对寿命的不同影响,对图1和图2所示的轴承的使用可靠度进行分析比较。图1为承受单向载荷的一般滚动轴承,图2为承受双向载荷的柔性轴承。严格地说,柔性轴承在使用过程中内外圈要发生变形,其变形近似椭圆。然而由于其变形量较小,进行寿命计算时可以忽略不计,仍可沿用一般滚动轴承的寿命计算方法对其进行分析[1]。

为便于比较,假设图1和图2所示的轴承的几何尺寸、旋转速度等均相同,所受的径向载荷的大小也相同,不同之处只是前者受单向载荷,而后者受双向载荷。

我们知道,伦得伯格(G.Lundberg)和帕尔格恩(A.Palmgren)的轴承寿命计算公式(1)是建立在统计接触疲劳问题的指数方程上的。此指数方程为[1]:

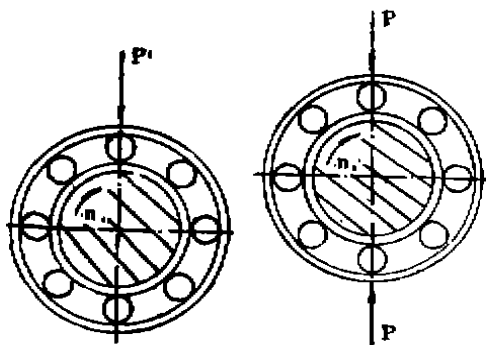


图 1

图 2

$$\lg \frac{1}{S} \propto \frac{\tau_0^c N^e}{Z_0^h} V \quad (2)$$

式中  $S$ ——为材料能经受  $N$  (百万转) 应力循环的使用可靠度;

$N$ ——应力循环次数 (百万转);

$\tau_0$ ——为接触表面下与滚动方向平行的剪应力幅值;

$Z_0$ ——为  $\tau_0$  所处的深度;

$V$ ——应力所及的体积;

$e$ ——韦布尔分布斜率。对滚动球轴承,

$$e = \frac{10}{9}$$

$C$ ——待定指数;

$h$ ——待定指数;

由于在推导一般轴承寿命公式时假定<sup>[3]</sup>: 滚动体由于与内圈滚道接触的破坏概率与内圈滚道的破坏概率相等; 滚动体由于与外圈滚道接触的破坏概率与外圈的破坏概率相等。因此在下面的讨论中, 我们只讨论内圈和外圈的破坏概率。

对于图 1 所示的内圈, 由式(2)得:

$$\lg \frac{1}{S_i} = K_i \frac{\tau_{0i}^c N_i^e}{Z_{0i}^h} V_i \quad (3)$$

其中下标  $i$  表示内圈

对于外圈, 同样得:

$$\lg \frac{1}{S_e} = K_e \frac{\tau_{0e}^c N_e^e}{Z_{0e}^h} V_e \quad (4)$$

其中下标  $e$  表示外圈。

对于图 2 所示柔性轴承的内、外圈, 同样得:

$$\lg \frac{1}{S_i'} = K_i' \frac{\tau_{0i}'^c N_i'^e}{Z_{0i}'^h} V_i' \quad (5)$$

$$\lg \frac{1}{S_e'} = K_e' \frac{\tau_{0e}'^c N_e'^e}{Z_{0e}'^h} V_e' \quad (6)$$

式中上标 ' 表示与一般轴承受力不同的柔性轴承。

由于图 1 和图 2 的轴承的几何尺寸及在受载区内的受力情况相同, 故得:

$$\begin{cases} \tau_{0i}' = \tau_{0i} & \tau_{0e}' = \tau_{0e} \\ V_i' = V_i & V_e' = V_e \\ Z_{0i}' = Z_{0i} & Z_{0e}' = Z_{0e} \end{cases} \quad (7)$$

此外, 对于图 2 所示的柔性轴承, 由于有两个受载区, 而图 1 所示的轴承只有一个受载区, 因此当其它条件相同时, 柔性轴承的应力循环次数应是一般轴承的两倍。即得:

$$\begin{cases} N_i' = 2N_i \\ N_e' = 2N_e \end{cases} \quad (8)$$

设图 2 所示的整个轴承的使用可靠度为  $S'$ , 图

1 所示的整个轴承的使用可靠度为  $S$ 。则由<sup>[3]</sup>知:

$$\begin{cases} S' = S_i' \cdot S_e' \\ S = S_i \cdot S_e \end{cases} \quad (9)$$

把式(5)和式(6)代入上式, 整理后得:

$$S' = 10^{-K_i \frac{\tau_{0i}'^c N_i'^e}{Z_{0i}'^h} V_i' - K_e \frac{\tau_{0e}'^c N_e'^e}{Z_{0e}'^h} V_e'} \quad (10)$$

同样可以推得:

$$S = 10^{-K_i \frac{\tau_{0i}^c N_i^e}{Z_{0i}^h} V_i - K_e \frac{\tau_{0e}^c N_e^e}{Z_{0e}^h} V_e} \quad (11)$$

解式(7)、(8)、(10)、(11)得:

$$S' = (S)^{2e} \quad (12)$$

式(12)就是本文要推导的主要结论。

由式(12)可以看出, 由于一般轴承的使用可靠度  $S < 1$ , 所以  $S' < S$ 。即在其它条件相同时, 柔性轴承由于承受双向载荷将引起使用可靠度的降低。因此, 一般轴承的寿命计算公式(1)如果直接用于计算柔性轴承, 将使柔性轴承对应的使用可靠度低于假设的 90%。为了保证柔性轴承的使用可靠度为 90%, 式(1)必须进行适当的修正, 才能用于计算柔性轴承的寿命。其公式应为:

$$L_h = K_a \frac{10^6}{60n} \left( \frac{C}{P} \right)^e \quad (13)$$

式中  $L_h$ ——柔性轴承的额定寿命  $h$ ;

$C$ ——额定动负荷,  $N$ ; 与一般轴承的计算相同。见<sup>[1][2]</sup>;

$n$ ——柔性轴承内圈的转速,  $r/min$ ;

$e$ ——寿命指数。由于柔性轴承为球轴承,  $e = 3$ ;

$K_a$ ——考虑柔性轴承的使用可靠度低于一般轴承的使用可靠度而引入的可靠度修正系数。

据文献<sup>[1][2]</sup>, 柔性轴承的当量动负荷  $P$  可用下式计算:

$$P = 1.15 K_i \frac{T}{d_1} \quad (14)$$

其中

$K_i$ ——传力系数, 可取  $K_i = 0.35$ ;

$T$ ——谐波齿轮的输出扭矩,  $N \cdot mm$ ;

$d_1$ ——柔性齿轮的分度圆直径,  $d_1 = mZ_1$ , 其中  $Z_1$  为柔性齿轮的齿数,  $m$  为模数。

对于柔性轴承,  $e = \frac{10}{9}$ 。据式(12)计算的一

(下转第 5 页)

重要一环，而实施各项标准是标准化建设的关键。根据我们的经验，执行标准，必须“三抓”。一是抓好中层干部和网络人员的培训，提高对实施管理标准重要性的认识；纠正“额外任务”，“怕麻烦”等不正确认识；二是要以典型示范、知识竞赛、智力测验等群众喜闻乐见的形式宣传标准内容，使大家掌握标准；三是定期抽查、考核，做到奖惩分明。对全厂贯彻执行标准的工作，我们采取分层次负责。班组、个人标准的执行情况，由各部门、车间负责教育、考核向归口部门提供信息；各部门、车间的标准执行情况，由归口部门负责教育、考核，并汇总信息，提出修改增订计划，不断完善。

我们感到管理标准化是一个过程，即使形成了体系，也会由于生产经营实践的发展，国内外先进科学技术和管理经验吸收，以及企业内外环境的变化，而需要不断改进完善。

#### 四、体 会

管理标准化是一个过程，包括设计、制

订、贯彻和修改，在这个过程中，始终要坚持从需要出发，解决实际问题。如材料文库，近几年逐步完善的文库管理标准，是为解决文库管理被动局面而制订的，按标准办事，使物资供给率达100%，帐、片、物三相符合率达到99%，1988年压缩核定资金20%。装配车间由于工人结构变化，操作技术参差不齐，影响产品质量的提高，车间领导对先进工人的操作法进行分析整理——群众修改——操作验证——编写定稿——逐步推广，完成了装配流水十一道工序的工艺纪律、安全纪律于一体的工作标准基础——操作标准。实施标准后，装配质量稳定提高。近三年我厂产品质量，经行业测评均保持第一。

管理标准化是一项综合性很强的科学管理。各类标准从需要出发，经简化、统一、协调、优化，规定了各个子系统的功能，有了各个子系统的正确无误的运转，总的管理系统功能就能得到充分有效的发挥。

(上接第31页)

组结果见表1。

表1 使用可靠度对照

S	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
S'	1	0.90	0.80	0.70	0.62	0.54	0.46

据以上的推导过程可知，表1即为单向受载的一般轴承与双向受载的柔性轴承在额定寿命相同时的使用可靠性的对应值。由表中可看出，一般轴承95%的使用可靠度对应于柔性轴承为90%的使用可靠度。因此，若沿用一般轴承的寿命计算公式计算柔性轴承，只有沿用使用可靠度为95%的寿命计算公式，才能保证柔性轴承的使用可靠度为90%。而式(1)为使用可靠度为90%的一般轴承的寿命计算公式，若直接用来计算柔性轴承，其使用可靠度将降为80%(见表1)。这就是要在式(13)中加可靠度修正系数的原因。

由文献[3]知，可靠度修正系数  $K_a$  可由表2查得。

由表2可知，使用可靠度为95%所对应的可靠度修正系数为

$$K_a = 0.62 \quad (15)$$

表2 可靠性系数

S, %	90	95	96	97	98	99
$K_a$	1.00	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

据式(13)、(14)、(15)即可计算柔性轴承的寿命。

#### 三、结束语

由于篇幅所限，本文不可能对其它许多影响柔性轴承寿命的因素进行详细的讨论，有关细节请参阅[2]。本文对柔性轴承的使用可靠度进行的分析研究，能够很好地解释柔性轴承早期破坏的原因，与实验较接近，这已为实验所证实。对于其它受力较复杂的类似轴承的寿命计算，本文所提供的分析方法也是行之有效的。

#### 参 考 文 献

- [1] 沈允文、叶庆泰 编著《谐波齿轮传动的理论和设计》，机械工业出版社，1985
- [2] 任德清，谐波齿轮传动中柔性轴承的寿命研究，华东工学院硕士学位论文，1987
- [3] 刘泽九、贺士荃著《滚动轴承的额定负荷与寿命》，机械工业出版社，1982