

不均布行星齿轮传动装置设计的几个问题

株洲航空动力机械研究所 章永锋**

【摘要】 推导了不均布行星传动的装配条件; 提出了不均布所带来的各行星轮合力及工作过程中的动不平衡离心力的计算公式; 推荐了使其合力为零或减至最小的方法; 得出了行星轮不均布的行星传动装置的使用条件和设计时应注意的几个问题。

主题词: 行星齿轮传动 装配条件 设计考虑
分类号: TH132.41

1 前 言

行星轮均布的行星齿轮传动设计, 国内外都进行了深入的研究, 并有丰富的使用经验。但由于行星轮不均布的行星传动具有的优点, 所以在实际中得到了应用^[1,2]。其齿数选择基本上不受限制可以实现装配要求, 所以能得到所要求的传动比; 可以充分利用空间, 在同样的空间内安排更多个行星轮, 以使减速器能传递更大的功率, 也就是提高了功率/质量比; 特别对航空减速器是很有意义的。使用不均布行星传动的结构, 需解决这种结构的几个特殊问题。第一, 由于行星轮不均布, 使得行星轮径向力、圆周力合力不平衡; 第二, 由于行星轮不均布, 行星系质心不在旋转中心线上, 行星架旋转时将产生动不平衡离心力。对于这几个问题, 设计中应采取措施使之尽量向均布行星传动接近。

2 不均布行星传动装配条件

2K-H 行星传动结构的典型形式, 有代表性的主要几种示于图 1。假设: 不是每行星轮之间的中心角都相等; 两个中心轮 (即轮 a 、轮 b) 同时与各行星轮啮合; 各行星轮完全相同。

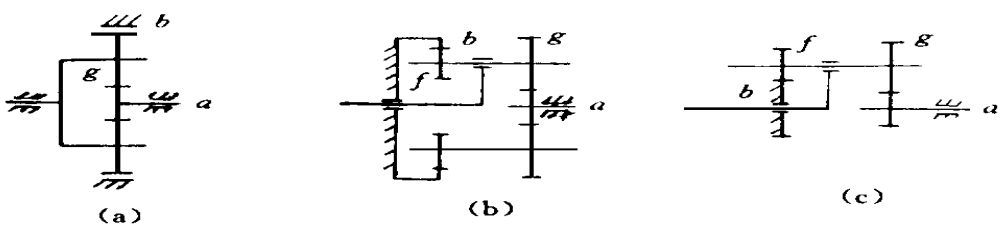


图 1 2K-H 典型传动形式

由上述假设可知, 各双联行星轮完全相同, 即各双联行星轮上两个齿轮具有相同的角向差。定义轮 g 与轮 f 上各相邻齿之间的角向差为错位角, 记为 δ_{ef} 。如果 $\delta_{ef} = 0$, 称为零错位。除零错位 $\delta_{ef} = 0$ 外, 必有一个最小错位角。 $\delta_{ef \min} = 2\pi d / (Z_g Z_f)^{[3]}$ 。式中 d 为 Z_g 、 Z_f 的公约数。

以 3 个行星轮 2 级外啮合的结构为例 (如图 2)。中心轮为 a 、 b , 行星轮为 g 、 f , 3 个行星轮不均布。I 号行星轮的零错位与 $O I$ 线重合, 设轮 a 上的 k_a 与 II 号行星轮 g 上的 k_g 齿啮合。 $\psi_a = 2\pi N_a / Z_a$, 式中 N_a 为正整数, ψ_a 为 $O I$ 线与所研究齿 k_a 齿对称线之夹角。所以

$$\delta_a = \psi_a - \alpha = 2\pi N_a / Z_a - \alpha \quad (1)$$

又

$$\delta_g = \delta_a Z_a / Z_g \quad (2)$$

从轮 b 与轮 f 啮合再来分析 δ_f 。因 I 号行星轮零错位与 $O I$ 重合, 从而确定了轮 b 的角向位置。同样分析可得:

$$\delta_b = \psi_b - \alpha = 2\pi N_b / Z_b - \alpha \quad (3)$$

$$\delta_f = \delta_b \cdot Z_b / Z_f \quad (4)$$

综上所述, 为保证装配要求, 需要轮 g 相对于 $O II$

偏转 δ_g , 需要轮 f 相对于 $O II$ 偏转 δ_f , 则轮 g 与轮 f 的相对角度 (即错位角) 为 $\delta_g - \delta_f$ 。如果轮 g 和轮 f 的所有错位角中有一个与上述 $\delta_g - \delta_f$ 值相等, 即下式成立, 可保证装配。

$$[2\pi d / (Z_g Z_f)] (Z_f q / d - Z_g p / d) = \delta_g \pm \delta_f \quad (5)$$

当行星架固定, 输入输出同向时, 式中右边用 “-” 号, 反之用 “+” 号。 $q Z_f / d - p Z_g / d$ 为整数, 将 (1) - (4) 式代入 (5) 式, 整理得

$$(Z_a Z_f + Z_b Z_g) \alpha / (2\pi d) = N \quad (6)$$

当 $Z_g = Z_f$ 时, 最大公约数 $d = Z_g = Z_f$, 这就是简单行星轮传动, 上式可变为:

$$(Z_a + Z_b) \alpha / (2\pi) = N \quad (7)$$

当 (6)、(7) 式中的 $2\pi \alpha$ 等于整数时, 该两式分别等价于单级行星传动 (如图 1a) 和具有双联行星轮的行星传动 (如图 1b、c) 装配条件:

$$(Z_a + Z_b) / n = N, \quad (Z_a \cdot Z_f \pm Z_b \cdot Z_g) / (nd) = N$$

因此 (6) 式是 2K-H 行星传动装配条件的通用公式, 而不论行星轮是否均布。

3 行星轮合力不均平衡系数

行星轮均布时, 在不考虑制造误差的情况下, 各行星轮径向力 F_r 、圆周力 F_t 都能相互抵消, 合力为零。对于斜齿轮, 其轴向力的合力与旋转中心重合。但行星轮不均布时, 除各行星轮对称分布, 径向力、圆周力能各自抵消外, 一般情况下径向力、圆周力的合力均不等于零。

n 个行星轮有 n 个中心角, 通常这些中心角分为两种, 一种是与均布时的中心角 $\alpha_0 = 2\pi/n$ 较接近, 记为 α 与 α_0 相差较大者记为 α , 并将 α 的个数记为 m_s 。

行星轮分布形式如图 3、图 4 ($\alpha_s = \alpha$), 将 α 关于 Y 轴对称分布, 所以 X 方向合力为零。

$$\Delta F_r = 2F_r \left[\sum_{i=1}^{n/2-1} \cos \sum_{j=1}^i \alpha_j \right] \quad \text{令} \quad K_{rt} = 2 \left[\sum_{i=1}^{n/2-1} \cos \sum_{j=1}^i \alpha_j \right]$$

行星轮径向力、圆周力不均平衡系数 K_{rt} 分析结果列于表 1。

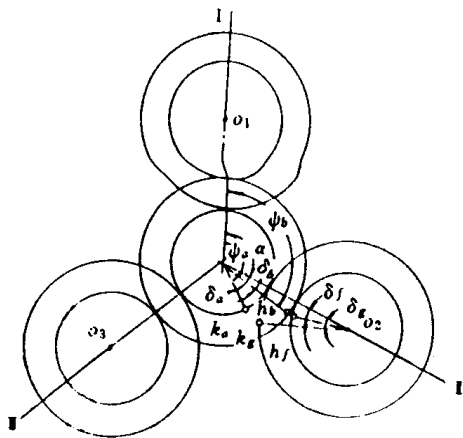
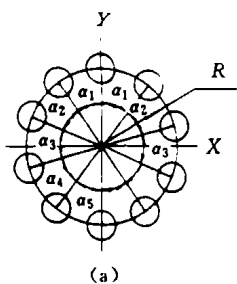
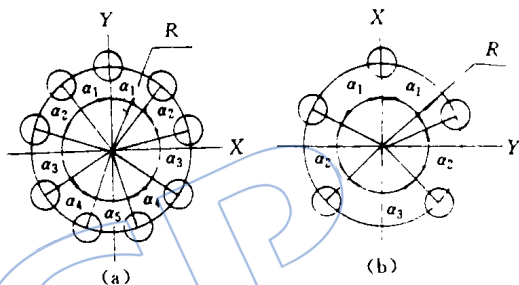
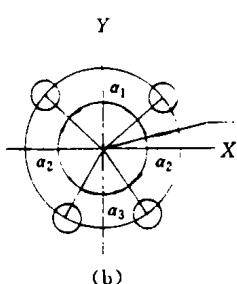


图 2 两级外啮合双联行星轮

表 1 行星轮径向力、圆周力不平衡系数 K_{rt}

行星轮数 n 为偶数 (图 3)		行星轮数 n 为奇数 (图 4)	
$m_s > 1$	$K_{rt} = 2 \left[\sum_{i=1}^{n/2-1} \cos \sum_{j=1}^i \alpha \right]$	$K_{rt} = 1 + 2 \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \cos \sum_{j=1}^i \alpha$	
$m_s = 1$	$K_{rt} = 2 \sum_{i=1}^{n/2} \cos (i - 0.5) \alpha$	$K_{rt} = 1 + 2 \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \cos i \alpha$	

图 3 行星轮径向力、圆周力 (n 为偶数)图 4 行星轮径向力、圆周力 (n 为奇数)

行星轮径向力、圆周力不平衡系数大小相同, 而行星轮径向力、圆周力相互垂直作用于同一平面, 且 $F_r = F_t \tan \alpha$ (α 为分度圆端面压力角), 故其综合不平衡系数

$$K = K_{rt} \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}$$

4 行星轮轴向力合力偏心距、行星轮组合动不平衡质量偏心距

当行星轮为斜齿轮且不均布时, 行星轮轴向力的合力作用线与旋转中心线不重合, 其距离称为轴向力偏心距。行星轮数 n 为偶数 (图 3)。结构形式如图 3, 图中圆圈表示轴向力 F_a , 方向垂直于纸面, R 表示中心轮节圆半径, 轴向力合力应在 Y 轴上 a 处, 其 Y 坐标为 y_a 。

根据静力平衡条件 $\sum M_x = 0$, 如图 3 (a)

$$2F_a \cdot R \left[\cos \alpha + \cos (\alpha + \alpha) + \cdots + \cos \sum_{i=1}^{n/2-1} \alpha \right] - y_a \cdot n \cdot F_a = 0$$

$$y_a = 2R/n \cdot \sum_{i=1}^{n/2-1} \cos \sum_{j=1}^i \alpha$$

如图 3 (b), $m_s = 1$ 只有一个中心角为 α

$$y_a = 2R/n \cdot \sum_{i=1}^{n/2} \cos (i - 0.5) \alpha$$

行星轮数 n 为奇数 (图 4)

$$y_a = 2R/n \left[1 + \sum_{i=1}^{n/2} \cos i \alpha \right]$$

行星轮均布时, 在不考虑制造误差及材料不均匀性的情况下, 行星架组件质心与旋转中心重合, 质心偏心距为零。但当行星轮不均布时, 行星架组件的质心偏离行星架的旋转中心,

在工作时产生动不平衡离心力。

为了求出行星架组件的质心偏心距, 将行星架组件质量分为两部分, 第一部分为质量关于旋转中心对称的部分; 第二部分为具有质量偏心的部分, 称之为行星轮组合 (包括行星齿轮、支承及行星架凸爪等)。分析方法与轴向力的合力偏心距方法相同, 结果如表 2 所列。

表 2 行星轮组合的质心偏心距 y_c

行星轮数 n 为偶数 (图 3)		行星轮数 n 为奇数 (图 4)	
$m_s > 1$	$y_c = 2R/n \sum_{i=1}^{n/2-1} \cos \sum_{j=1}^i \alpha_j$	$y_c = \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \cos \sum_{j=1}^i \alpha_j \right] R/n$	
$m_s = 1$	$y_c = 2R/n \left[\sum_{i=1}^{n/2} \cos (i - 0.5) \alpha_i \right]$	$y_c = \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{n/2-1} \cos i \alpha_i \right] R/n$	

当行星轮质心偏心距不为零时, 行星架以角速度 ω 旋转时将产生动不平衡离心力

$$F_c = n \cdot m \cdot y_c \cdot \omega^2 \quad (\text{单位: } F_c - \text{N}, m - \text{kg}, y_c - \text{m}, \omega - 1/\text{s})$$

5 不均布行星齿轮传动设计中应注意的问题

行星齿轮传动中的动力学问题, 如各齿轮间的均载等在均布或不均布时是共同的, 解决的方法亦相同。而要做好行星轮不均布的设计, 应注意如下几个特殊问题: (1) 应使行星轮中心角 α 尽量接近于 α_0 , 即 $\alpha \approx \alpha_0 = 2\pi/n$ 。中心角越接近 α_0 , 则径向力、圆周力合力综合不平衡系数及偏心距越小。(2) 尽量利用对称分布。首先应尽量利用成组对称分布, 即将行星轮分成若干组, 以组为单位关于旋转中心对称分布, 其使用条件是行星轮数为合数。此时, 径向力、圆周力合力综合不平衡系数 $K = 1$, 轴向力偏心距、行星轮组合质心偏心距等于零。行星轮均布与不均布二者是相同的。其次, 采用两个中心角 α (即 $m_s = 2$) 关于 Y 轴对称分布。这种结构形式可使径向力、圆周力合力不平衡系数 K 尽量小, 轴向力、行星轮组合质心偏心距也尽量小。(3) 应对径向力、圆周力合力不平衡系数及轴向力偏心对结构的影响作出定量分析, 对行星轮组合质量偏心产生的动不平衡离心力进行计算, 看是否满足要求。由实例计算可知, 只要安排合理, 行星轮径向力、圆周力不平衡系数很小, 动不平衡离心力也很小。(4) 行星组输出转速高的行星传动使用不均布行星传动时, 应充分注意动不平衡离心力问题。

参 考 文 献

- 1 航空工业部 608 研究所二室. 减速器图册. 北京: 国防工业出版社, 1983
- 2 张国瑞, 张展. 行星传动技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- 3 章永锋. 行星齿轮传动装配条件及斜齿双联行星轮传动的齿数选择. 齿轮, 1989, 13 (1)

(责任编辑 魏星禄)