

航空发动机主传动弧齿锥齿轮的接触特性研究

西北工业大学 王三民* 袁茹 纪名刚

【摘要】 依据航空弧齿锥齿轮的加工原理,建立了弧齿锥齿轮的切齿共轭方程;在考虑误差和支承刚性的条件下,对航空锥齿轮的接触特性进行了研究,并分析计算了误差及支承刚性对齿轮副的接触印痕和运动曲线的影响。结果表明:弧齿锥齿轮传动对沿主动轮轴向的偏移和轴间夹角的偏移比较敏感。研究问题的方法和所得的结论,为高性能航空锥齿轮传动的研制提供了手段和依据。

关键词: 弧齿锥齿轮 轮齿接触分析 误差 支承刚性

1 前言

弧齿锥齿轮传动的失效往往会造成重大的毁机事故。为了提高航空发动机的推重比和可靠性,迫切需要研制高性能的航空锥齿轮传动。弧齿锥齿轮的接触分析是开展这项研究工作的基础,它将为航空弧齿锥齿轮的最佳几何参数和切齿参数的确定、静态和动态强度的计算、齿面润滑状态和可靠性的分析提供依据。文献[1、2]分别提出了不计载荷和计载荷时的轮齿接触分析法,即TCA和Load-TCA。但由于在分析弧齿锥齿轮的接触特性时,它们皆不考虑误差和支承刚性的影响,故与航空主传动弧齿锥齿轮的实际工况不一致。为了使锥齿轮传动在高温、高速、重载条件下具有良好的工作特性,就需对其进行真实工况下的接触分析。

2 航空弧齿轮接触方程的建立

2.1 切齿啮合方程

为形成两轮齿面,必须依据其切齿工艺,建立齿面点应满足的方程。

对于小轮(右旋)可建立图1所示的坐标系。将描述产形面的几何特征矢量 $t_r^{(c)}$ 、 $n_r^{(c)}$ 和 $R_r^{(c)}$ 写入坐标系 $\Sigma_r = \{o_r, i_r, j_r, k_r\}$ 中后,记为 t_r 、 n_r 和 R_r ,即

$$[t_r, n_r, R_r]^T = M(q_r)M(u_r^{(c)}, \theta)[t_r^{(c)}, n_r^{(c)}, R_r^{(c)}]^T \quad (1)$$

式中, q_r 为摇台瞬时刀位极角, θ 为产形面瞬时轴截面位置角,它们将作为齿面的参变量; $M(q_r)$ 、 $M(u_r^{(c)}, \theta)$ 为坐标旋转矩阵。由图1可得,小轮节锥顶点 o_{br} 到原点 o_r 的径矢 D_r 为

$$D_r = X_{br} \text{ctg} \Gamma_m i_r + E_{mr} j_r \quad (2)$$

式中, X_{br} 和 E_{mr} 分别为加工小轮时的床位和垂直轮位, Γ_m 为安装角。

设瞬时接触点 P 沿 t_r 的反向距刀尖点 P_r 的长度为 b_r ,则由共轭条件可得

$$b_r = [(n_r, g_r + i^{(r)} p_r, R_r) + (n_r, i^{(r)} p_r, D_r)] / (n_r, g_r + i^{(r)} p_r, t_r) \quad (3)$$

式中, g_r 和 p_r 分别为产形轮和小轮轴线上的单位矢量, $i^{(r)}$ 为加工小轮时的滚切比。

由原点 O_r 和顶点 O_{br} 到齿面瞬时接触点 P 的径矢分别为

$$R_{rr} = R_r - b_r t_r, \quad R_{br} = D_r + R_{rr} \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 就是小轮切齿共轭方程。同理可建立大轮 (左旋) 的切齿共轭方程, 它们将与小轮的类似, 只是将各符号中的角标 “ r ” 换为 “ l ”。

2.2 传动啮合方程

将两轮切齿啮合时的各矢量写入同一坐标系中。由两轮理论安装位置, 并计入装配误差和支承变形的影响, 得两轮切齿坐标系 Σ_l 和 Σ_r 间的关系, 如图 2。

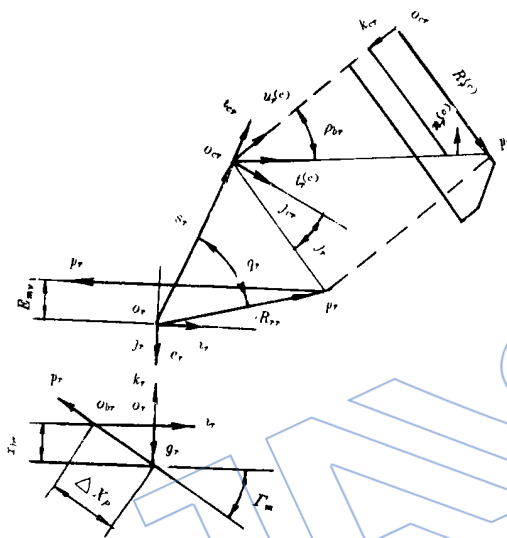


图 1 小轮切齿啮合坐标系

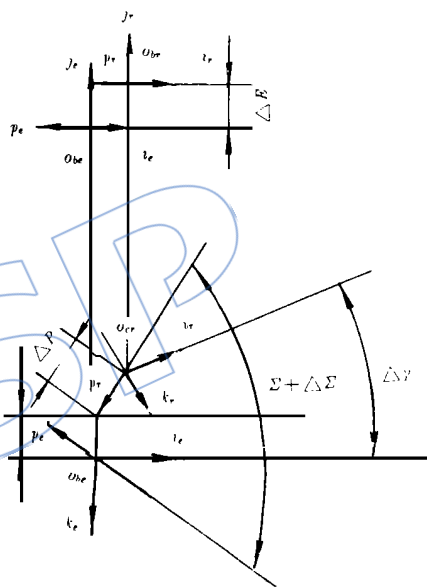


图 2 两轮切齿坐标系间的关系

将小轮切齿啮合中的各矢量 t_r , n_r , p_r , R_{br} 写入 Σ_l 坐标系中, 并分别记为 $t_r^{(l)}$, $n_r^{(l)}$, $p_r^{(l)}$, $R_{br}^{(l)}$, 则

$$[t_r^{(l)}, n_r^{(l)}, p_r^{(l)}]^T = M(-\Delta Y) [t_r, n_r, p_r]^T \quad (5)$$

$$R_{br}^{(l)} = \Delta E j_l + \Delta G p_l - \Delta P p_r^{(l)} + M(-\Delta Y) R_{br}$$

式中, ΔY 为两轮根锥母线间夹角, 即 $\Delta Y = \delta_{p_r} + \delta_{g_l} + \Delta \Sigma$; 而 ΔE , ΔG , ΔP , $\Delta \Sigma$ 是小轮相对大轮的位置变化量, 其值由装配误差和支承变形量确定; δ_{p_r} 和 δ_{g_l} 为小轮和大轮的齿根角。

两轮啮合传动时, 共轭接触点还应满足下列条件

$$n_l = n_r^{(l)} \quad (6)$$

$$\Delta m = V_{12} \cdot n_l = 0 \quad (7)$$

$$R_{bl} = R_{br}^{(l)} \quad (8)$$

式中, V_{12} 为两轮接触点间的相切速度。

若式 (7) 不满足, 则说明接触点非共轭点, Δm 反映其传动误差。若式 (8) 不满足, 则说明由参数 q_r , θ_r , q_l , θ_l 确定的两轮切齿共轭点, 在实际工作中不能接触, 它们间的距离矢量为

$$\Delta R = R_{bl} - R_{br}^{(l)} = -H p_r^{(l)} - J p_l - V e_l \quad (9)$$

式中, H , J , V 分别为小轮相对大轮沿方向 $p_r^{(l)}$, p_l , e_l 的微增量。

3 航空弧齿锥齿轮接触特性分析

(1) 确定齿轮副的相对位置变化量。通过对航空锥齿轮的装配精度和支承挠度进行计算分析, 确定小轮相对大轮的位置变化量 ΔE 、 ΔG 、 ΔP 和 ΔY 。(2) 确定无载情况下齿面共轭接触点。借助式 (1) ~ (9), 求解下列方程组

$$|H - H_0| = 0 \quad |V - V_0| = 0 \quad |J - J_0| = 0 \quad |\Delta_m| = 0 \quad (10)$$

式中, H_0 、 V_0 、 J_0 为微调量初值。可得齿面在无载时的共轭接触点。

(3) 计算轮齿刚度。利用赫兹公式和Westign-house 悬臂梁公式^[2], 分别计算轮齿的接触变形和弯曲变形, 据此求得轮齿刚度。(4) 确定载荷在啮合齿对间的分配规律。依据轮齿刚度, 通过迭代计算, 求得各对啮合齿间的作用载荷。(5) 绘制齿轮副的接触印痕和传动曲线。将各接触点的接触区按求得的方位和大小绘制在齿面上即得接触印痕; 将各点的传动误差与主动轮转角关系绘成曲线即得传动曲线。接触印痕和传动曲线描述了弧齿锥齿轮的接触特性。

4 结果与讨论

用前述分析方法, 对某航空发动机主传动弧齿锥齿轮的接触特性进行了分析计算。该齿轮副的模数 3mm, 螺旋角 35°, 压力角 20°, 齿宽 20mm, 大轮齿数 53, 小轮齿数 47。大轮主动, 输入转速 13350rpm, 功率 294kW。图 3 是部分计算结果。这些结果是在将大

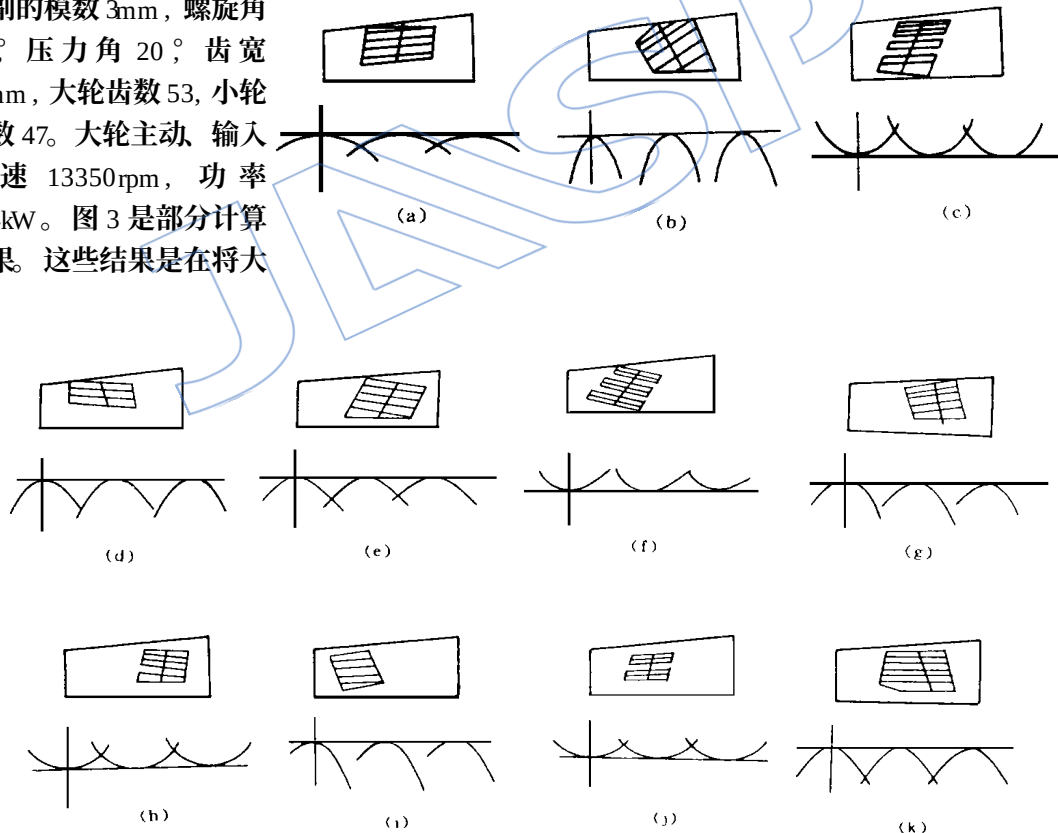


图 3 弧齿锥齿轮的接触印痕和传动曲线

轮计算参考点取为其节锥齿宽中点, 且各微调量初值取为零的情况下求得的小轮齿面接触印痕和齿轮副的传动误差曲线。

图 3 (a) 是齿轮副在其理论安装位置时的接触特性。由于齿轮几何参数和切齿参数是在理论状态下确定的, 故此时齿轮副具有较合理的接触特性。图 (b)、(c) 是只有 ΔE 方向的相对位置变化时齿轮副的接触特性, 其中图 (b) 的 $\Delta E = 0.1\text{mm}$, 图 (c) 的 $\Delta E = -0.1\text{mm}$ 。由图可知, 此时接触印痕沿齿长方向发生偏移, 且出现了对角接触和边缘接触。这主要是因为 ΔE 将引起接触点处的螺旋角发生变化。图 (d)、(e) 是只改变 ΔP 的结果, 其中图 (d) 的 $\Delta P = 1.0\text{mm}$, 而图 (e) 的 $\Delta P = -1.0\text{mm}$ 。由于 ΔP 将引起接触点处的模数发生变化, 故接触印痕沿齿长和齿高方向都发生了变化, 但对运动曲线的影响较小。图 (f)、(g) 是 ΔG 对接触特性的影响情况, 其中图 (f) 的 $\Delta G = 0.05\text{mm}$, 而图 (g) 的 $\Delta G = -0.05\text{mm}$ 。由于 ΔG 主要改变接触点处的压力角, 故接触印痕主要沿齿高方向发生偏移, 运动曲线也发生了较大变化。图 (h)、(i) 是 $\Delta \Sigma$ 的影响, 其中图 (h) 的 $\Delta \Sigma = 2.0'$, 而图 (i) 的 $\Delta \Sigma = -1.5'$ 。由于 $\Delta \Sigma$ 引起接触点的模数、压力角和螺旋角的变化, 它将使齿轮副的接触特性发生较大的变化。图 (j)、(k) 是各方向位置变化量皆存在时, 齿轮副接触特性的变化情况。其中图 (j) 的 $\Delta E = 0.1\text{mm}$, $\Delta P = 1.0\text{mm}$, $\Delta G = 0.01\text{mm}$, $\Delta \Sigma = 1.5'$; 而图 (k) 的 $\Delta E = -0.1\text{mm}$, $\Delta P = -1.0\text{mm}$, $\Delta G = -0.01\text{mm}$, $\Delta \Sigma = -1.0'$ 。上述结果, 与文献 [3] 提供的计算结果和文献 [4] 提供的实验结果是一致的。

5 结 论

(1) 本文针对航空主传动弧齿锥齿轮的工况条件, 建立了一套计载荷、误差和支承刚度等因素影响的接触特性分析方法。

(2) 利用本文方法, 分析计算了某航空锥齿轮传动的接触特性, 研究了两轮相对位置的改变对其接触特性的影响。

(3) 弧齿锥齿轮传动对各方向位置变化的敏感程度是不相同的, 在装配和支承设计时, 应保证在敏感方向上具有较高精度和较大刚度。

(4) 为了设计和制造高性能航空弧齿锥齿轮, 就需通过接触分析, 掌握齿轮副在实际工况下的接触特性, 并据此对齿轮的几何参数和切齿参数进行优化选择。

参 考 文 献

- 1 Baxter M L. Basic Geometry and Tooth Contact of Hypoid Gears. Industrial Mathematic, 1961, (2)
- 2 Krenzer T T. 在载荷作用下弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮轮齿接触分析. 齿轮, 1986, 10 (5)
- 3 Mark W D. Effects of Bearing Offset and Flexibility on the Mesh Force Distribution of Spiral Bevel Gears. Transactions of A S M E, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, June, 1988, 110
- 4 Akamatsu T. Single Flank Rolling Tests of Hypoid Gears. J S M E, 1975, 9 (750)

(责任编辑 魏星禄)