

⑦ 锥齿轮设计制造现代应用技术研究

37-44

Study of Modern Applied Technology for Design
and Manufacture of Spiral Bevel and Hypoid Gears

郭晓东 郑昌启 林超
Guo Xiaodong Zheng Changqi Lin Chao

TG61

(重庆大学机械传动国家重点实验室)

摘要 研究了弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的新切齿计算方法,开发了包含新切齿算法和旧切齿算法的相应程序模块的应用技术软件系统。该系统可完成 SGM、SFM、SGT、SFT、HGM、HFM、HGT、HFT 切齿法的齿坯几何参数、切齿调整参数、轮齿接触分析、磨齿调整参数和根切检验等计算。新切齿算法能指定大轮齿面上接触区中心的位置,该处的接触区长度,接触迹线的方向和轮副相对运动角加速度等参数。系统用户友好,易操作使用。

关键词 齿轮传动; 齿轮成形切削; 锥齿轮 **制造**
中国图书资料分类法分类号 TH132.415; TH132.421

ABSTRACT A new method of computing the cutter specifications and machine settings for the manufacture of spiral bevel and hypoid gears is studied. And a software system which includes the program models of new and old methods is developed. The system can perform the computations such as blank dimensions, cutting and grinding settings, tooth contact analysis and under cut check of SGM, SFM, SGT, SFT, HGM, HFM, HGT, HFT cutting methods. The new method can allow the user to give the position and length of contact pattern, the direction of contact path and the relative angular acceleration. The system can be easily operated.

KEY WORDS gear drives; gear form-cutting; bevel gears

0 前言

弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮被广泛应用于汽车、拖拉机等机械产品,作为其主要驱动元件,它们的设计制造质量直接影响这些产品的工作性能。而由复杂的共轭计算所确定的切齿调整参数保证的齿形精度是提高这类齿轮的质量的关键。著名的美国“格里森”公司(GLEASON WORKS)在该技术领域,已研制了一套包括几何和强度设计、切(磨)调整参数计算、考虑轮齿边缘和轮齿受载的轮齿接触分析和三维接触有限元应力应变分析的计算机软件系统,为保证齿形精度提供了计算分析的工具。

我国于70年代初开始引进“格里森”弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮设计制造技术,现已能

* 收文日期 1992-07-21

生产先进的机床和刀具。但生产上广泛使用的设计制造计算卡及计算机软件仍停留于70年代初期的水平：切齿计算不能任意指定接触区中心的位置；不能准确地控制接触区的方向、大小和轮副的运动精度；小轮齿面控制参数多，不易操作使用，计算结果在很大程度上取决于计算者的经验和技术水平。此外，依据计算卡进行手工计算易出错，且不能预示轮副接触传动性能；现有的计算机软件则因用户接口设计不太合理等原因而未能在生产中发挥广泛的作用。

本文研究了可适合于各种常用切齿方法的新切齿算法，开发了一套包含新切齿算法和旧切齿算法相应程序模块的应用技术软件系统。该系统计算分析功能完善，用户接口友好，操作使用简便。

1 新切齿算法的理论基础及技术特点

1.1 大轮齿面接触区中心处的几何特性

在锥齿轮切齿计算中，总是先确定大轮齿面的几何结构，这由大轮切齿调整参数确定。大轮可用滚切法或成形法切齿，对于滚切法的准双曲面齿轮，其大轮可偏置或不偏置。切齿调整参数是根据保证轮副在设计基准点处的螺旋角、压力角以及共轭传动的充分条件求得。

1.1.1 任意指定的接触区中心

在齿坯几何参数设计计算中，已确定了齿面的有效范围。如图1， P 为设计基准点（亦即节点）， C 为任意指定的接触区中心。 C 的位置是由两个参数确定：由 P 点至 C 点沿齿长方向的移动量 X_k 和沿齿高方向的移动量 R_k 。这样由 C 点至大轮轴线上轮副的轴交点 O_r 的径向与轴向距离 R_c, L_c 为：

$$\begin{cases} d_c = d - (0.5 - X_k) \cdot F \cdot \operatorname{tg} \alpha_s \\ a_c = a - (0.5 - R_k) \cdot F \cdot \operatorname{tg} \alpha_s \\ R_c = (A_m + X_k \cdot F) \cdot \sin \Gamma - R_k \cdot (b_c - a_c) \cdot \cos \Gamma / 2 \\ L_c = R_c / \operatorname{tg} \Gamma_n - (b_c - 0.5 \cdot (b_c - a_c)) \cdot R_k \cdot \cos \alpha_s - Z_R \end{cases} \quad (1)$$

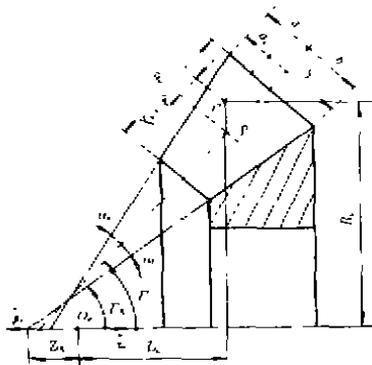


图1

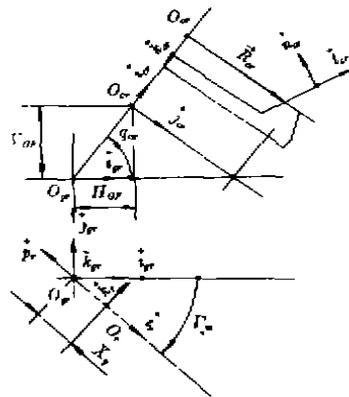


图2

式中， A_m 为大轮中点锥距。 X_k 为正时接触区中心移向大端，为负时则移向小端； R_k 为正时接触区中心移向齿根，为负时则移向齿顶。而当 X_k 及 R_k 均取零时，接触区中心的位置与旧

算法一致。在软件操作中,用户也可直接给定 R_c 及 L_c 的。

1.1.2 几何特性参数

当大轮采用成形法切齿时,大轮齿面的几何形状与切齿刀盘的刃锥面相同。图2所示为大轮切齿时的几何关系。

在坐标系 $\sum_{\sigma} = \{o_{\sigma}; \vec{i}_{\sigma}, \vec{j}_{\sigma}, \vec{k}_{\sigma}\}$ 中:

$$\begin{cases} \vec{R}_{\sigma}^{(\sigma)} = (0, R_{CN}, 0) \\ \vec{n}_{\sigma}^{(\sigma)} = (0, -\cos\Phi_{\sigma 0}, -\sin\Phi_{\sigma 0}) \\ \vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)} = (0, \sin\Phi_{\sigma 0}, -\cos\Phi_{\sigma 0}) \\ R_{CN} = R_N \pm W_0/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, R_N 为大轮精切刀盘名义半径; W_0 为其刀尖错距; $\Phi_{\sigma 0}$ 为其刀齿齿形角,凸面取正值,凹面取负值。

大轮齿面上任一点 M 由两个参数确定: M 点所在的刀盘轴截面的相位角 $\theta_{\sigma r}$ 和 M 点至刀尖的距离 $b_{\sigma r}$ 。即大轮的齿面方程 $\vec{R}_{\sigma}^{(\sigma)}$ 、 M 点的法矢 $\vec{n}_{\sigma}^{(\sigma)}$ 、沿直母线方向的切矢 $\vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)}$ 为:

$$\begin{cases} \vec{R}_{\sigma}^{(\sigma)} = M(\vec{k}_{\sigma}, \theta_{\sigma r})\vec{R}_{\sigma}^{(\sigma)} - b_{\sigma r}\vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)} \\ \vec{n}_{\sigma}^{(\sigma)} = M(\vec{k}_{\sigma}, \theta_{\sigma r})\vec{n}_{\sigma}^{(\sigma)} \\ \vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)} = M(\vec{k}_{\sigma}, \theta_{\sigma r})\vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)} \end{cases} \quad (3)$$

在坐标系 $\sum_r = \{O_r; \vec{i}_r, \vec{j}_r, \vec{k}_r\}$ 中表示为:

$$\begin{cases} \vec{R}_{\sigma}^{(r)} = -X_0\vec{i}_r + M(\Gamma_n)_j(\vec{S}_r + M(q_{\sigma r})_k\vec{R}_{\sigma}^{(\sigma)}) \\ \vec{n}_{\sigma}^{(r)} = M(\Gamma_n)_j M(q_{\sigma r})_k \vec{n}_{\sigma}^{(\sigma)} \\ \vec{i}_{\sigma}^{(r)} = M(\Gamma_n)_j M(q_{\sigma r})_k \vec{i}_{\sigma}^{(\sigma)} \\ \vec{S}_r = (H_{\sigma r}, -\Gamma_{\sigma r}, 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中, X_0 为水平轮位; M 为矢量旋转和坐标变换矩阵。

大轮齿面上任意一点 M 至轮副轴交错点 O_r 的轴向与径向距离 L, R 则为:

$$\begin{cases} L = \vec{R}_{\sigma}^{(r)} \cdot \vec{i}_r = L(Q_{\sigma r}, b_{\sigma r}) \\ R = |\vec{R}_{\sigma}^{(r)} \times \vec{i}_r| = R(\theta_{\sigma r}, b_{\sigma r}) \end{cases} \quad (5)$$

根据已给定的接触区中心 C 处的 L_c, R_c , 以 $\theta_{\sigma r}, b_{\sigma r}$ 为变量解方程:

$$|L_c - L| + |R_c - R| \leq 0.01 \quad (6)$$

同时可求解得 C 点的径矢 $\vec{R}_c^{(r)}$ 、法矢 $\vec{n}_c^{(r)}$ 及切矢 $\vec{i}_c^{(r)}$ 以及 C 点处的法曲率 $K_{\sigma r}, K_{\gamma r}$ 和扭曲率 $G_{\sigma r}$ 等参数。

$$\begin{cases} K_{\sigma r} = \frac{\cos\Phi_{\sigma 0}}{R_{CN} - b_{\sigma r} \cdot \sin\Phi_{\sigma 0}} \\ K_{\gamma r} = 0 \\ G_{\sigma r} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, X 方向为与刀盘直母线垂直的切线方向。

当大轮采用滚切法切齿时,大轮齿面

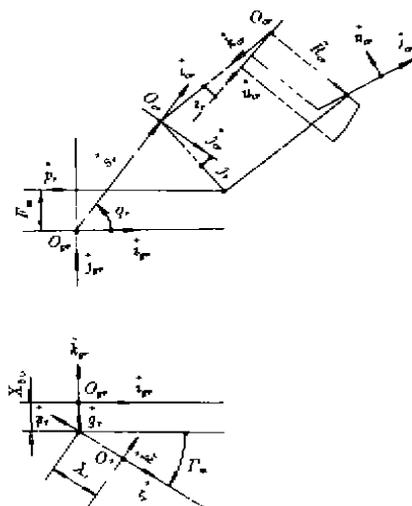


图3

是由刀盘在与大轮的相对滚切运动中展成。图3为滚切展成时的几何关系。

与成形法大轮类似,可写出大轮齿面上任意一点 M 的径矢 $\vec{R}_c^{(r)}$ 、法矢 $\vec{n}_c^{(r)}$ 和切矢 $\vec{i}_c^{(r)}$ 的计算公式:

$$\begin{cases} \vec{R}_c^{(r)} = \vec{D}_c^{(r)} + \vec{A}_c^{(r)} - b_n \vec{i}_c^{(r)} \\ \vec{D}_c^{(r)} = M(\Gamma_n), (X_b \vec{p}_c^{(r)} - X_{10} \vec{g}_c^{(r)} + E_n \vec{e}_c^{(r)}) \\ \vec{A}_c^{(r)} = M(\Gamma_n), (\vec{S}_c^{(r)} + M(q_r)_* M(\dot{u}_c^{(r)}, \theta_\sigma) M(-j_r)_* M(i_r)_* \vec{R}_c^{(r)}) \\ \vec{S}_c^{(r)} = S_r (\cos q_r, -\sin q_r, 0) \\ \vec{n}_c^{(r)} = M(\Gamma_n), M(q_r)_* M(\dot{u}_c^{(r)}, \theta_\sigma) M(-j_r)_* M(i_r)_* \vec{n}_c^{(r)} \\ \vec{i}_c^{(r)} = M(\Gamma_n), M(q_r)_* M(\dot{u}_c^{(r)}, \theta_\sigma) M(-j_r)_* M(i_r)_* \vec{i}_c^{(r)} \end{cases} \quad (8)$$

式中, S_r 为大轮切齿时的径向刀位。

同时刀盘刃锥面与大轮齿面上的接触点还应满足啮合方程:

$$\begin{cases} \vec{V}_c^{(r)} \cdot \vec{n}_c^{(r)} = 0 \\ \vec{V}_c^{(r)} = \vec{p}_c^{(r)} \times \vec{R}_c^{(r)} + \vec{g}_c^{(r)} \times (\vec{A}_c^{(r)} - b_n \vec{i}_c^{(r)}) / R_{cp} \end{cases} \quad (9)$$

可解得:

$$b_n = [\vec{p}_c^{(r)} \times (\vec{D}_c^{(r)} + \vec{A}_c^{(r)}) + (\vec{g}_c^{(r)} \times \vec{A}_c^{(r)}) / R_{cp}] \cdot \vec{n}_c^{(r)} / (\vec{n}_c^{(r)} \cdot \vec{g}_c^{(r)} / R_{cp} + \vec{p}_c^{(r)} \cdot \vec{i}_c^{(r)}) \quad (10)$$

式中, R_{cp} 为大轮切齿时的瞬时滚比。因而,

$$\begin{cases} \vec{R}_c^{(r)} = \vec{R}_c^{(r)}(q_r, \theta_\sigma) \\ \vec{n}_c^{(r)} = \vec{n}_c^{(r)}(q_r, \theta_\sigma) \\ \vec{i}_c^{(r)} = \vec{i}_c^{(r)}(q_r, \theta_\sigma) \end{cases} \quad (11)$$

据上式,并运用 Baxter 公式可求得滚切法大轮齿面接触区中心 C 以及该处的几何特性参数。

1.2 轮副的接触传动特性

锥齿轮副为点接触啮合,运用轮齿接触分析(TCA)技术得到的轮齿接触区图形和运动误差曲线如图4所示。其接触区中心处的啮合性能可用下述参数定量描述。

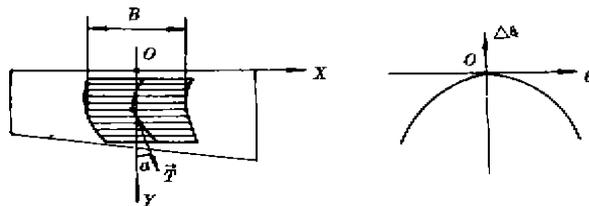


图4

1.2.1 接触区长度

接触区长度 B 由接触区长度系数 B_f 确定,即:

$$B = B_f \cdot F / \cos \varphi_{0n} \quad (12)$$

式中, φ_{0n} 为大轮根锥螺旋角。

1.2.2 接触迹线的方向

接触迹线的方向由计算点处接触迹线的切线矢量 \vec{T} 确定。即给定角度 α , 亦即给定了对角接触方向。

1.2.3 相对运动角加速度

轮副单齿共轭传动时形成的运动误差曲线的函数为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_r = \theta_r - \frac{n}{N}\theta_i \\ \theta_r = \theta_r(\theta_i) \end{cases} \quad (13)$$

式中, θ_r 、 θ_i 分别是大轮和小轮的实际工作转角, n 、 N 分别是小轮和大轮的齿数。令小轮转速为1, 即:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = 1 \quad (14)$$

将(13)式求导数可得:

$$\frac{d^2\Delta\theta_r}{d\theta_i^2} = \frac{d^2\theta_r}{d\theta_i^2} \left/ \left(\frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 \right. = \frac{d^2\theta_r}{dt^2} = \varepsilon \quad (15)$$

式中, ε 为大轮相对于小轮的瞬时角加速度。

在接触区中心 C 处, 通常要求轮副的瞬时传动比等于其理论传动比, 故:

$$\frac{d\Delta\theta_r}{d\theta_i} = \frac{d\theta_r}{d\theta_i} - \frac{n}{N} = 0$$

由微分几何可知, C 处的 ε 即为运动误差曲线在该点的曲率。这样, 可通过给定 C 处的 ε 的方法来控制运动误差曲线的弯曲程度, 亦即控制轮副的运动精度。

1.3 小轮齿面计算点及其几何特性参数

图5为大小轮位于工作安装位置时的几何关系。

1.3.1 小轮齿面计算点

令大轮绕其轴线旋转 β 角度与小轮齿面于 C 点满足共轭接触条件:

$$\begin{aligned} \vec{R}_i &= \vec{R}_s + \vec{R}_r \\ \vec{V}_n \cdot \vec{n}_r &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

即:

$$\begin{cases} \vec{R}_r = M(\vec{i}_r, \beta) \vec{R}_r^{(r)} \\ \vec{R}_s = E \vec{j}_r \\ \vec{n}_r = M(\vec{i}_r, \beta) \vec{n}_r^{(r)} \\ \vec{V}_n = \dot{\vec{p}}_r \times \vec{R}_r - \dot{\vec{p}}_i \times \vec{R}_i \\ \vec{P}_r = -\vec{i}_r \\ \vec{P}_i = \frac{N}{n} (\cos \Sigma, 0, \sin \Sigma) \end{cases} \quad (18)$$

式中, Σ 为大小轮的轴交角, E 为小轮偏置距。

以 β 为自变量用迭代法求解(17)式的第二式后同时也可得小轮齿面计算点 C 处的径矢 $\vec{R}_i^{(i)}$ 、法矢 $\vec{n}_i^{(i)}$ 、切矢 $\vec{t}_i^{(i)}$ 为:

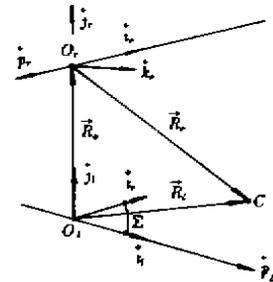


图 5

$$\begin{cases} \vec{R}_i^{(0)} = M(-\sum), \vec{R}_i \\ \vec{n}_i^{(0)} = M(-\sum), \vec{n}_i \\ \vec{i}_i^{(0)} = M(-\sum), M(\dot{i}, \beta) \vec{i}_i^{(0)} \end{cases} \quad (19)$$

1.3.2 小轮齿面计算点处的几何特性参数

小轮齿面计算点处的几何特性参数一曲率参数,在旧算法中是将与大轮齿面作线共轲的小轮齿面的曲率参数进行一定的修正而得到的。这种方法的缺点是不能直接地控制实际切齿后轮副的啮合特性。

根据 1.2 中描述的轮副的共轲接触特性,给定 B_f, α, ϵ 可确定唯一组小轮齿面的曲率参数。

1.4 小轮切齿调整参数

小轮可用刀倾修正法、滚切修正法或普通滚切法切齿加工。根据以上确定的小轮齿面计算点的位置,该处的法矢和曲率参数可求得相应切齿法的切齿调整参数。除以上给定的一阶控制参数 X_s, R_s , 二阶控制参数 B_f, α, ϵ 外,还有一些用以控制接触区形状的三阶控制参数。三阶控制参数可运用 TCA 技术进行优选以得到满意的接触传动质量。

以上所述新切齿算法,所有计算过程均采用精确算法,具有小轮齿面控制参数少,且三阶控制参数完全不影响给定的二阶啮合特性的技术特点。

2 应用技术软件系统的设计

2.1 系统的设计

在设计系统时,主要考虑了两方面的技术要求:

2.1.1 系统的计算分析功能完善、可靠、算法先进。系统包含了上述新算法的所有过程。此外,考虑到旧算法的手算卡和电算程序已为一些用户所熟悉,为使用户掌握新算法,系统还包含了旧算法的相应程序模块。同时,系统还可进行各种收缩制的齿坯参数设计、轮齿接触分析和齿面有效工作边界分析的计算。为使系统具有高可靠性,在程序设计时完全采用结构化、模块化程序设计技术,专门设计了标准子程序库,如矢量的一般运算、矢量的旋转、坐标变换、相对速度参数及法曲率参数计算、非线性方程组的解等子程序,从而使系统结构清晰、易于维护。

2.1.2 用户接口友好。作为一个成功的软件产品,必须具有优良的人机界面。众所周知,FORTRAN 语言易于实现科学计算,而 C 语言则常用于设计人机接口和处理图形。在设计本系统时,我们采用了 FORTRAN 和 C 语言混合编程技术,用 C 语言设计了可由 FORTRAN 调用的字符读入、显示、文本编辑、图文彩色显示和打印输出、窗口开闭和滚动等专用函数,实现了运行过程菜单驱动、人机对话;数据自由格式输入和编辑,前后翻页;高分辨率彩色图形和文字显示等功能。此外,系统的全部显示和打印均以汉字形式输出,便于国内用户使用。

2.2 系统主要功能

2.2.1 齿坯几何参数设计

本系统可按“格里森”公司 1971 年修订标准进行准双曲面齿轮三种轮齿收缩制度和弧齿锥齿轮六种轮齿收缩制度的齿坯几何参数设计。

的方式分析计算大轮齿面中部、小端、大端位置上的接触区图形、运动误差曲线以及各计算点的运动参数和啮合特性参数。齿面有效工作边界分析可计算大小轮的根切判别曲线、刀尖轨迹以及刀尖园角连接点轨迹等。

2.3 系统运行框图和运行环境

系统的运行框图如图6所示。

系统采用 UC DOS 作为计算机操作系统,可在具有 VGA 图形显示器和1MB 内存的286 以上档次的微机上运行,支持 LQ-1600K、STAR AR、CR 系列等打印机。在带80387数学协处理器的386机型上一次运行全部程序的时间一般不超过5秒钟。

3 应用和结论

我们研制的锥齿轮应用技术软件系统,现已转让给第一汽车制造厂、第一拖拉机制造厂、四川齿轮厂、南汽齿轮厂、徐州工程机械厂、青岛第二齿轮厂等厂家,并在长江起重机厂、重庆机床厂等厂家也实际应用。实际切齿应用表明,用新算法计算的切齿调整参数进行切齿,一般不需调整或作微量调整即可获得较满意的轮齿接触区,且运转平稳。本系统算法先进、功能完善、用户友好,已达到国内1990年引进的“格里森”G-Comp 系统的同类计算功能的技术水平。

参 考 文 献

- 1 郑昌启. 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮. 北京:机械工业出版社,1988
- 2 曾韬. 螺旋锥齿轮的设计与加工. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989
- 3 吴序堂,王小椿. 点啮合共轭齿面失配传动性能的预控. 齿轮,1988,Vol. 12(3)
- 4 齿轮手册委员会. 齿轮手册. 北京:机械工业出版社,1990
- 5 长春第一汽车制造厂工艺处. 圆弧伞齿轮加工手册. 吉林:吉林人民出版社,1980
- 6 郭晓东. 锥齿轮微机应用软件的研制及轮齿接触整体综合计算法的研究(学位论文). 重庆大学,1985
- 7 郭晓东. 锥齿轮设计制造应用技术软件系统使用说明书. 重庆大学,1992
- 8 Gleason Works, G-Comp System, Gleason Works, 1987