

# 三波谐波齿轮传动的计算机辅助设计

钟 健

**摘要:** 本文对三波谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算方法进行了深入地研究, 就三波谐波齿轮传动的几何计算、结构设计和强度计算等问题作了较系统地阐述。文中还介绍了三波谐波齿轮传动的计算辅助设计软件系统, 以及通过对三波谐波齿轮传动啮合性能的分析, 所得出的一些重要规律和结论。

## 一、前 言

谐波齿轮传动的发展已有近三十年的历史, 三十年来尽管国内外有关专家、学者对多种谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算方法进行了深入系统的研究, 但大多数都是针对双波谐波齿轮传动的, 而对三波谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算方法, 直到目前为止尚未见到详细报道。

三波谐波齿轮传动同双波谐波齿轮传动相比, 具有同时啮合齿数多、啮合深度大、承载能力强、自动定心性好等优点。因而, 可使传动系统易于实现高精度, 并能保持良好的刚度和运转平稳性。所以, 它在精密工程和高科技领域的数控系统中将是一种理想的新型传动。

## 二、三波谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算理论

### 1. 啮合分析理论

啮合分析理论是研究谐波齿轮传动的理论基础, 所以, 为便于三波谐波齿轮传动的深入研究, 本文对三波谐波齿轮传动的柔轮变形规律、共轭齿廓方程、侧隙方程等啮合分析理论进行了探讨。

由壳体理论可知, 当柔轮变形时柔轮齿圈中性圆上任意一点 $H$ , 将产生径向变形 $W$ 、切向变形 $V$ 和轴向变形 $U$  (因影响很小, 可不考虑)。而中性线外与 $H$ 点处于同一半径上的任意点, 除产生上述变形外, 还将相对于 $H$ 点产生转角为 $\mu$ 的附加转动, 因此, 三波谐波齿轮传动的柔轮变形规律的计算公式如下:

$$W = \Delta \cdot m a \sum_{n=3,9,15,\dots}^{\infty} [\cos(n\phi)/(n^2 - 1)^2]$$

$$V = -\Delta \cdot m a \sum_{n=3,9,15,\dots}^{\infty} [\sin(n\phi)/n(n^2 - 1)^2]$$

$$\mu = -\text{arc tg}[V/(r + W)]$$

式中:  $\Delta$ ——径向变形量系数;

$m$ ——模数;

$a$ ——与三波发生器有关的常数  $r$ ——中性圆半径

空间啮合状态下的三波谐波齿轮传动共轭齿廓的相对运动方程:

$$X_K = (r + W) \sin \Delta\phi + (R_{KR} - r) \sin(\Delta\phi - \mu) - 0.5 S_{KR} \cos(\Delta\phi - \mu) \\ Y_K = (r + W) \cos \Delta\phi + (R_{KR} - r) \cos(\Delta\phi - \mu) - 0.5 S_{KR} \sin(\Delta\phi - \mu) \\ - 0.75 BW / 2L$$

侧隙方程:  $C_n = (X_K - 0.5 S_{Kg}) \cos \alpha_{Kg}$

式中:  $\Delta\phi$ ——齿圈  $H$  点的向径相对刚轮轮齿对称轴线的旋转角度

$S_{KR}$ 、 $S_{Kg}$ ——柔轮、刚轮  $K$  点的弧齿厚;  $B$ ——齿宽;  $L$ ——柔轮长度

## 2. 设计计算理论

谐波齿轮传动的设计计算是设计过程中的关键环节, 本文从三波谐波齿轮传动的啮合分析理论出发, 在两轮齿均采用渐开线齿廓的情况下, 通过计算、分析获得了一些重要的设计数据和资料, 并对三波谐波齿轮传动的结构设计、几何尺寸的计算等问题作了系统的阐述, 同时对三波发生器的结构作了进一步的探讨, 并阐述了选择三波发生器的原则。最后为了校验三波谐波齿轮传动的柔轮强度, 建立了柔轮的计算模型, 对三波谐波齿轮传动的柔轮应力状态从理论上进行了较深入的研究, 得到了一些重要的规律及相应的强度计算公式。

## 三、三波谐波齿轮传动的计算机辅助设计软件系统

基于上述理论, 为便于实现三波谐波齿轮传动的自动设计, 作者提出了人机图形对话设计方法、优化设计方法和计算机图形分析法, 并开发了相应的计算机辅助设计软件系统。

由谐波齿轮传动的啮合理论可知, 评价其传动性能的主要质量指标是啮合侧隙和啮合深度。因此, 三波谐波齿轮传动也以此作为评价指标。

人机图形对话设计方法: 由设计人员根据实际经验输入给计算机一组参数, 经分析、计算后, 将评价指标及时显示到屏幕上供观察、分析、判断其结果是否满足实际要求, 如不满足要求, 则根据实际需要, 将输入数据修正后, 重新计算直到满意为止。

优化设计计算: 在三波谐波齿轮传动中, 由于柔轮中的应力较大, 因而强度问题就显得更为突出。为此, 针对这一特点, 为保证既能获得最佳的传动工作性能, 又能保证传动装置的可靠性等综合因素, 在优化设计计算时, 选定啮合侧隙、啮合深度和柔轮强度为三波谐波齿轮传动优化设计的目标, 以保证在满足一定的条件下, 使传动既具有最小的啮合侧隙  $C_n(x)$ 、最大的啮合深度  $H_n(x)$ , 同时又能使柔轮具有较高的强度  $\sigma(x)$ , 为此建立了如下目标函数  $F(x)$ :

$$F(x) = \lambda_1 C_n(x) + \lambda_2 / H_n(x) + \lambda_3 \sigma(x)$$

式中:  $\lambda_i$ ——权系数;  $x$ ——设计变量

显然, 该优化设计问题是一个具有不等式约束的非线性规划问题, 为此, 程序设计中采用了可靠性、速度性和稳定性较高的增广乘子法的优化方法来解决这个优化问题。

计算机图形分析法: 是通过变化结构、啮合参数、经过计算机计算、分析后, 将啮合性能指标或应力指标以图形曲线的方式在屏幕上显示出来, 然后再经过观察、分析相应的曲线, 找出谐波齿轮传动的结构, 啮合参数与评价指标的内在联系和规律性。

该软件系统包括: 设计计算程序 (人机图形对话设计程序、优化设计程序、柔轮应力计

算程序);性能分析程序(啮合性能的分析程序、应力状态分析程序、图形显示程序)以及文件编辑软件。

特点:该软件系统采用了模块化程序设计结构,菜单驱动命令的方式。且根据各模块的功能要求,分别采用了不同语言编程。其中计算模块采用计算能力强的 FORTRAN 语言,主控程序和图形显示程序采用了图形、对话功能较强的 BASIC 语言。在程序设计过程中,将高级 DOS 操作、批处理和数据文件等多种技术巧妙地结合起来,从而解决了在主控程序下随意调用任意一个功能模块,调用后且可自动返回到主控程序的菜单状态下的问题。因此,该软件系统的功能开发不受语言限制,可方便地实现软件的移植及版本的更新。

#### 四、三波谐波齿轮传动的啮合性能分析

由三波谐波齿轮传动的啮合分析理论可知,影响啮合性能的主要因素有,径向变形量系数、变位系数、压力角、齿圈厚度等因素。为找出各参数与啮合性能的内在联系及其规律性,本文运用软件系统中的计算机图形分析法对三波谐波齿轮传动的啮合性能进行了分析,得到如下一些规律和结论。

径向变形量系数对侧隙的影响最大。一般情况下径向变形量系数  $\lambda = 1.1 \sim 1.3$  时,能获得较好的啮合性能。

柔轮的变位系数增大时,侧隙值减小。而刚轮变位系数增大时,则侧隙值增大。为此,在设计过程中当确定径向变形量系数时,可通过调整柔轮和刚轮变位系数之间的关系以获得较好的啮合性能,一般可取  $\alpha_r = \alpha_g + (0.1 \sim 0.3)$ 。

压力角在  $18^\circ \sim 22^\circ$  之间变化时,侧隙值变化较平稳,啮合性能较好,所以,在具体设计中可采用  $20^\circ$  压力角。

#### 五、结 束 语

本文中建立的三波谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算理论为三波谐波齿轮传动的研制,开发提供了理论依据,发展、充实了谐波齿轮传动的啮合分析理论和设计计算理论。开发的三波谐波齿轮传动的计算机辅助设计软件系统具有良好的实用性、灵活性和可靠性。

### A Computer-aided Design of the Harmonic Gear Drive with Three-wave Wavegenerator

Zhong Jian

#### Abstract

This paper describes the meshing analysis theory and a design calculation method of the harmonic gear drive, introducing a CAD software and analyzing the meshing performance.