

# 高阶变性椭圆齿轮的研究与设计

张 瑞, 吴序堂, 聂 钢, 李建刚

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 在综合研究高阶椭圆和变性椭圆生成机理的基础上, 提出了一种新型非圆齿轮形式——高阶变性椭圆齿轮。采用数学推导与数值计算相结合的方法, 建立了以高阶变性椭圆为基础的椭圆族数学模型, 提出了最小传动比位置偏移率的概念, 以表征周期内传动比曲线的不对称性。研究了在以高阶变性椭圆为节曲线的齿轮传动副中, 主动轮与从动轮的转角关系、传动比关系、曲率半径及弧长计算等问题, 得到了设计高阶变性椭圆齿轮所需各种参数的求解方法, 采用这些方法并结合实际情况, 即可设计出满足要求的高阶变性椭圆齿轮副。该设计方法对于普通椭圆齿轮的设计计算也同样适用, 因此统一了各种椭圆齿轮的设计过程。

**关键词:** 齿轮; 椭圆齿轮; 变性椭圆

**中图分类号:** TH132 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)07-0726-05

## Study and Design on High-Order Deformed Elliptic Gears

Zhang Rui, Wu Xutang, Nie Gang, Li Jiangan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Synthesized the creating mechanism of high-order ellipse and deformed ellipse, a new non-circular gear form named high-order deformed elliptic gear is put forward, where analytical deducing and numerical calculation are combined to establish the mathematical model of ellipse family on the basis of high-order deformed ellipse. To express the asymmetry of transmission ratio in one period, the concept of excursion ratio of minimum transmission ratio position is introduced. Some features, such as rotation angle relation, transmission ratio, curvature radius, arc length calculation etc., are investigated in high-order deformed elliptic gear pairs. The calculating methods of each parameter are adopted comprehensively to design high-order elliptic gears to meet the individual engineering requirements. This design method is naturally suitable for common elliptic gears.

**Keywords:** gears; elliptic gears; deformed ellipse

在普通椭圆的基础上保持向径不变, 而将椭圆极角缩小整数倍, 就可演变出高阶椭圆。另一方面, 若将 2 个阶数不同(且可以不是整数)的椭圆组成连续封闭的曲线就可以形成变性椭圆<sup>[1,2]</sup>。高阶椭圆齿轮在旋转一周的过程中, 传动比将发生多个对称的变化周期, 而变性椭圆齿轮副传动比则具有不对称性。

受高阶椭圆演变过程的启发, 希望能设计出一种新型的齿轮, 这种齿轮在旋转一周的过程中, 传动

比曲线也产生多个变化周期, 同时在每个周期内传动比曲线都具有不对称的特征, 但关于这方面的情况还未见有文献报道。对这种新型齿轮进行深入研究, 将会扩展非圆齿轮的应用范围, 同时也将改变在生产实际中遇到这类问题时的设计思路。为此, 本文针对这一问题, 对高阶变性椭圆齿轮的生成与性质进行了研究, 得到了其设计所需的关键参数和设计方法, 并且这种设计方法对各种椭圆齿轮的设计均是适用的。

# 1 高阶变性椭圆齿轮的生成机理

若把普通一阶椭圆称为基椭圆,在保持对应点向径不变的前提下,将基椭圆的极角  $\varphi(0\sim 2\pi)$  调整为新椭圆的极角  $\varphi_1(0\sim 2\pi/n_1)$ ,即可得到  $n_1$  阶高阶椭圆.变性椭圆是将基椭圆在  $\varphi=\pi$  处分段,将  $\varphi(0\sim \pi)$  按变性系数  $m_{11}$  调整为变性椭圆的  $\varphi_1(0\sim \pi/m_{11})$ ;将  $\varphi(\pi\sim 2\pi)$  调整为变性椭圆的  $\varphi_1(\pi/m_{11}\sim 2\pi)$ ,令该段的极角变化值为  $\pi/m_{12}$ ,则相应的变性系数  $m_{12}$  与  $m_{11}$  的关系为( $m_{12}$  与  $m_{11}$  的值不限于整数)

$$m_{12} = m_{11}/(2m_{11} - 1) \quad (1)$$

结合高阶椭圆和变性椭圆的生成原理,将高阶椭圆一个周期内的极角变化( $0\sim 2\pi/n_1$ )分成两段,每段均按变性系数进行角度调整,令两段的变性系数为  $m_{11}$  和  $m_{12}$ ,并使其极角遵循如下关系,就形成了高阶变性椭圆

$$\pi/(n_1 m_{11}) + \pi/(n_1 m_{12}) = 2\pi/n_1 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,  $m_{11}$  和  $m_{12}$  仍满足式(1).

# 2 高阶变性椭圆的方程表示

由椭圆的生成机理,在基椭圆极坐标方程表达式的基础上,可分别得到高阶椭圆和变性椭圆的极坐标方程式<sup>[1]</sup>

$$r_1 = p_1/(1 - k_1 \cos n_1 \varphi_1), \quad p_1 = A(1 - k_1^2) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= p_1/(1 - k_1 \cos m_{11} \varphi_1) \\ &(0 \leq \varphi_1 \leq \pi/m_{11}) \\ r_{12} &= p_1/(1 - k_1 \cos(m_{12}(2\pi - \varphi_1))) \\ &(\pi/m_{11} \leq \varphi_1 \leq 2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

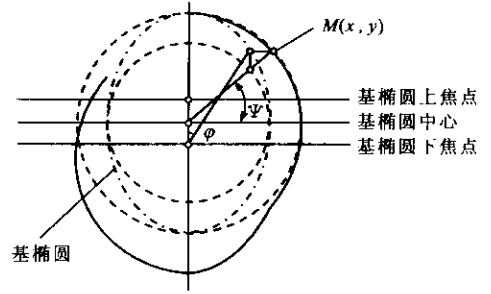
式中:  $k_1$  是椭圆的偏心率;  $A$  是椭圆的长轴半径.

当  $n_1=1$  时,高阶椭圆就成为基椭圆.当  $m_{11}=1$  时,  $m_{12}=1$ ,变性椭圆两段曲线形状相同,也还原为基椭圆.根据式(3)、式(4)可得高阶变性椭圆在一个周期内两段曲线的极坐标方程表达式为

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= p_1/(1 - k_1 \cos n_1 m_{11} \varphi_1) \\ &(0 \leq \varphi_1 \leq \pi/(n_1 m_{11})) \\ r_{12} &= p_1/(1 - k_1 \cos(n_1 m_{12}(2\pi/n_1 - \varphi_1))) \\ &(\pi/(n_1 m_{11}) \leq \varphi_1 \leq 2\pi/n_1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从式(5)中可以得出:当  $\varphi_1=0$  和  $2\pi/n_1$  时,  $r_{11}=r_{12}=p_1/(1-k_1)$ ;当  $\varphi_1=\pi/(n_1 m_{11})$  时,  $r_{11}=r_{12}=\dots$

$p_1/(1+k_1)$ . 因此,两段曲线在  $\varphi_1$  为 0 和  $2\pi/n_1$  及  $\pi/(n_1 m_{11})$  处是相切的,所以以  $2\pi/n_1$  为周期将式(5)所表示的曲线头尾相接形成封闭的曲线是完全可行的.若将一个高阶变性椭圆一个周期的节曲线称为一瓣,则  $n_1$  阶变性椭圆的节曲线由  $n_1$  瓣组成.图 1 所示为  $n_1=2, m_{11}=0.625$  时的高阶变性椭圆.



$\varphi$ : 基椭圆极角;  $\Psi$ : 基椭圆极径与短轴的夹角;

$M$ : 高阶变性椭圆上的点

图 1 高阶变性椭圆

由式(5)可以看出,高阶椭圆和变性椭圆均为高阶变性椭圆的特例:当  $n_1=1$  时,即为变性椭圆;当  $m_{11}=1$  时,即为高阶椭圆.因此,式(5)可作为椭圆族统一的数学表达式.

# 3 高阶变性椭圆齿轮副的设计

## 3.1 高阶变性椭圆基本关系的确定

根据齿轮啮合的基本要求,从动轮节曲线向径为<sup>[3]</sup>

$$\left. \begin{aligned} r_2 &= a - r_1 \\ \varphi_2 &= \int_0^{\varphi_1} \frac{1}{i_{12}} d\varphi_1 = \int_0^{\varphi_1} \frac{r_1(\varphi_1)}{a - r_1(\varphi_1)} d\varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $a$  是中心距;  $i_{12}$  是主动轮相对于从动轮的传动比.以高阶变性椭圆为节曲线的齿轮副必须满足以下基本啮合条件.

(1)节曲线封闭条件.对主动轮 1,  $i_{12}$  是  $\varphi_1$  的周期函数,且在  $\varphi_1=0\sim 2\pi$  范围内,  $i_{12}$  变化的周期数为整数(以  $n_1$  表示),则  $r_1$  也变化  $n_1$  个周期.对从动轮 2,传动比  $i_{21}$  是转角  $\varphi_2$  的周期函数,且在  $\varphi_2=0\sim 2\pi$  范围内,  $i_{21}$  变化的周期数为整数(以  $n_2$  表示),则向径  $r_2$  也变化  $n_2$  个周期.  $n_1, n_2$  也对应于主动轮 1 和从动轮 2 的阶数.

(2)周长限制条件.  $L = \pi m z$ , 其中  $L$  为节曲线周长,  $m$  为模数,  $z$  为齿数.据此得到高阶变性椭圆齿轮副从动轮转角应满足的关系为

$$\left. \begin{aligned} \pi/(n_2 m_{21}) &= p_1 \pi / (n_1 m_{11} ((a - p_1)^2 - a^2 k_1^2)^{1/2}) \\ \pi/(n_2 m_{22}) &= p_1 \pi / (n_1 m_{12} ((a - p_1)^2 - a^2 k_1^2)^{1/2}) \\ m_{12} &= m_{11} / (2m_{11} - 1) \\ m_{22} &= m_{21} / (2m_{21} - 1) \end{aligned} \right\} (7)$$

根据啮合条件,同时  $a$  应保持不变,可得

$$m_{11} = m_{21}; \quad m_{12} = m_{22}$$

$$a = A((n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2} + 1); \quad n = n_2/n_1$$

主动轮与从动轮的转数与它们的阶数成反比,且阶数应为整数.若转数比为  $c_1/c_2$ ,则阶数之比为  $n_2/n_1 = c_1/c_2$ .

### 3.2 从动轮节曲线方程的表示

由  $r_2 = a - r_1$  及式(6)和式(7)可得单瓣节曲线内两段转角的关系为

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_1}{2}\right) &= \left(\frac{a - p_1 + ak_1}{a - p_1 - ak_1}\right)^{1/2} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \\ \alpha_1 &= n_1 m_{11} \varphi_1; \quad \beta_1 = n_2 m_{21} \varphi_2 \\ \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_2}{2}\right) &= \left(\frac{a - p_1 + ak_1}{a - p_1 - ak_1}\right)^{1/2} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \\ \alpha_2 &= n_1 m_{12} \left(\frac{2\pi}{n_1} - \varphi_1\right) \\ \beta_2 &= n_2 m_{22} \left(\frac{2\pi}{n_2} - \varphi_2\right) \end{aligned} \right\} (8)$$

$\varphi_1$  的取值范围分别是  $[0, \pi/n_1 m_{11}]$  和  $[\pi/n_1 m_{11}, 2\pi/n_1]$ , 即  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的取值范围均为  $[0, \pi]$ . 从式(8)中,可得到  $\varphi_2$  的取值范围分别是  $[0, \pi/n_2 m_{21}]$  和  $[\pi/n_2 m_{21}, 2\pi/n_2]$ , 即  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的取值范围也均为  $[0, \pi]$ . 由此可进一步推导出从动轮的节曲线方程表达式为

$$\left. \begin{aligned} r_{21} &= \frac{p_2}{(1 + k_2 \cos \beta_1)}; \quad p_2 = \frac{(n^2 p_1)}{(n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2}} \\ r_{22} &= \frac{p_2}{(1 + k_2 \cos \beta_2)}; \quad k_2 = \frac{k_1}{(n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2}} \end{aligned} \right\} (9)$$

当主动轮与从动轮阶数相同时(即  $n=1$ ),主动轮与从动轮的节曲线形状是完全一样的,只是由于  $\varphi_2$  的

起始位置与  $\varphi_1$  不同,在节曲线方程表达式的分母中会相差一个正/负符号.

### 3.3 高阶变性椭圆的传动比

令  $\omega_2$  和  $\omega_1$  分别表示从动轮和主动轮的角速度,则由  $i_{21}$  和式(9)得到的两段传动比曲线分别为

$$\left. \begin{aligned} i_{21}^{(1)} &= (k_1(k_1 + \cos \beta_1) + (1 + k_1 \cos \beta_1) \cdot \\ &\quad (n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2}) / (n^2(1 - k_1^2)) \\ i_{21}^{(2)} &= (k_1(k_1 + \cos \beta_2) + (1 + k_1 \cos \beta_2) \cdot \\ &\quad (n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2}) / (n^2(1 - k_1^2)) \end{aligned} \right\} (10)$$

当  $\beta_1, \beta_2 = 0$  时,  $i_{21}$  为最大值,即

$$i_{21\max} = (k_1 + (n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2}) / (n^2(1 - k_1^2)) \quad (11)$$

当  $\beta_1, \beta_2 = \pi$  时,  $i_{21}$  为最小值,即

$$i_{21\min} = ((n^2 - k_1^2(n^2 - 1))^{1/2} - k_1) / (n^2(1 + k_1^2)) \quad (12)$$

设计时可根据式(11)、式(12)中的最大、最小传动比来确定椭圆齿轮的偏心率.

为了表示传动过程中每个周期内传动比曲线所具有的不对称性,引入一个新的术语——最小传动比位置偏移率  $s$ . 该术语的定义是以最大传动比位置为周期起点,在  $i_{21}$  变化一个周期范围内,最小传动比所在位置与该周期中心位置的角度之差与传动比变化周期的角度之比(参见图2). 由式(10)可知,当  $\beta_1, \beta_2 = \pi$ , 即  $\varphi_2 = \pi/n_2 m_{21}$  时,  $i_{21}$  取最小值.  $i_{21}$  的变化周期为  $2\pi/n_2$ , 其中心位置的对应角度为  $\pi/n_2$ . 因此

$$s = \frac{\pi/n_2 m_{21} - \pi/n_2}{2\pi/n_2} \times 100\% = \frac{1 - m_{21}}{2m_{21}} \times 100\% \quad (13)$$

在设计时,可根据传动所要求的  $s$  值来确定椭圆的变性系数.

### 3.4 角速度的计算

在一些应用场合,需要对齿轮传动的动态性能进行分析,就需要知道齿轮副传动角加速度的变化

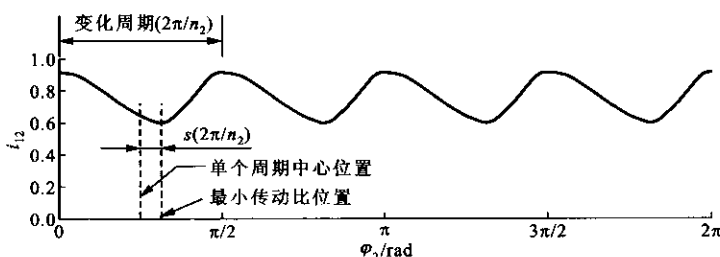


图2 最小传动比位置偏移率示意图

情况.由传动比可推出角加速度

$$\epsilon_a = (\omega_1^2 i_{21})/d\varphi_1 \quad (14)$$

根据式(10),可得出单瓣高阶变性椭圆两段角加速度的计算方法为(在传动时,主动轮一般以匀角速度转动,可取  $\omega_1 = 1 \text{ rad/s}$ )

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a^{(1)} &= -n_2 m_{21} k_1 (1 + (n^2 - k_1^2 (n^2 - 1))^{1/2}) \cdot \\ &\quad i_{21}^{(1)} \sin\beta_1 / (n^2 (1 - k_1^2)) \\ \epsilon_a^{(2)} &= n_2 m_{22} k_1 (1 + (n^2 - k_1^2 (n^2 - 1))^{1/2}) \cdot \\ &\quad i_{21}^{(2)} \sin\beta_2 / (n^2 (1 - k_1^2)) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

### 3.5 高阶变性椭圆的曲率半径

根据微分几何中曲线上各点曲率半径的计算公式<sup>[1,3]</sup>,对式(5)求一阶、二阶导数,可得主动轮的曲率半径表达式为

$$\left. \begin{aligned} \rho_{11} &= \frac{p_1 ((1 - k_1 \cos\alpha_1)^2 + n_1^2 m_{11}^2 k_1^2 \sin^2 \alpha_1)^{3/2}}{(1 - k_1 \cos\alpha_1)^3 (1 + (n_1^2 m_{11}^2 - 1) k_1 \cos\alpha_1)} \\ \rho_{12} &= \frac{p_1 ((1 - k_1 \cos\alpha_2)^2 + n_1^2 m_{12}^2 k_1^2 \sin^2 \alpha_2)^{3/2}}{(1 - k_1 \cos\alpha_2)^3 (1 + (n_1^2 m_{12}^2 - 1) k_1 \cos\alpha_2)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在  $\alpha_1 = 0$  和  $\alpha_1 = \pi$  处,  $\rho_{11}$  取得极值  $p_1 / (1 + (n_1^2 m_{11}^2 - 1) k_1)$  和  $p_1 / (1 - (n_1^2 m_{11}^2 - 1) k_1)$ . 因此,当  $(n_1^2 m_{11}^2 - 1) k_1 \leq 1$  时,第 1 段的曲率  $R_{11} = 1/\rho_{11} \geq 0$ ,该段无内凹,由此得出主动轮第 1 段节曲线的凸凹性判断条件为

$$k_1 \leq 1 / (n_1^2 m_{11}^2 - 1) \quad (17)$$

同理,可得出主动轮第 2 段节曲线的凸凹性判断条件为

$$k_1 \leq 1 / (n_1^2 m_{12}^2 - 1) \quad (18)$$

与主动轮凸凹性判断条件的推导过程类似,对式(9)求一阶、二阶导数,可得到主动轮的曲率半径表达式.将式(17)和式(18)中的阶数和变性系数换成从动轮的参数,即可得到  $k_2$  应满足的凸凹性判断条件.对于主动轮或从动轮,当  $k_1$  或  $k_2$  不满足凸凹性判断条件时,主动轮或从动轮节曲线将出现内凹现象.此时,不仅要两节曲线最小凸曲率半径处进行根切校验,还要对最小凹曲率半径处进行插齿刀干涉校验,即插齿刀半径要小于最小凹曲率半径.

### 3.6 节曲线弧长的计算

节曲线封闭的非圆齿轮的基本设计任务之一是要保证轮齿在节曲线上的均匀分布,也就是要满足第 3.1 节中的啮合条件(2).

由于  $\varphi_1$  与  $\varphi$  有倍数对应关系,根据图 1,  $\varphi_1$  与  $\Psi$  的关系为

$$\cos(n_1 m_{11} \varphi_1) = (\sin\Psi + k_1) / (1 + k_1 \sin\Psi)$$

$$\sin(n_1 m_{11} \varphi_1) = (1 - k_1^2)^{1/2} \cos\Psi / (1 + k_1 \sin\Psi)$$

根据第 2 类椭圆积分公式<sup>[4]</sup>,可推出高阶变性椭圆主动轮单瓣两段节曲线的弧长  $l_{11}$ 、 $l_{12}$  和节曲线周长,即

$$\left. \begin{aligned} l_{11} &= 2A \frac{(1 + k_1 (n_1^2 m_{11}^2 - 1))^{1/2}}{n_1 m_{11}} \cdot \\ &\quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( 1 - \frac{n_1^2 m_{11}^2 k_1^2}{1 + k_1^2 (n_1^2 m_{11}^2 - 1)} \sin^2 \Psi \right)^{1/2} d\Psi \\ l_{12} &= 2A \frac{(1 + k_1 (n_1^2 m_{12}^2 - 1))^{1/2}}{n_1 m_{12}} \cdot \\ &\quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( 1 - \frac{n_1^2 m_{12}^2 k_1^2}{1 + k_1^2 (n_1^2 m_{12}^2 - 1)} \sin^2 \Psi \right)^{1/2} d\Psi \\ L &= n_1 (l_{11} + l_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在确定了模数、齿数、中心距、阶数、偏心率、变性系数和插齿刀参数之后,即可设计出所要求的齿轮副.相应的椭圆类齿轮 CAD 设计软件已编制完成,该软件所生成的数据文件在 CAM 系统<sup>[5]</sup>中进行了模拟加工与仿真.

## 4 设计实例

在某应用场合,齿轮传动应满足的条件为  $m = 2.5$ ,  $c_1/c_2 = 3/4$ ,  $a = 180 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ,最大传动比与最小传动比的比值为 1.3,  $s = (20 \pm 1)\%$ .根据本文第 3 节中的分析,并应用椭圆类齿轮 CAD 设计软件,得到了该齿轮副所需的设计参数,如表 1 所示.图 3 为所生成的齿轮,其传动比和角加速度变化曲线如图 4 所示.

表 1 齿轮副的设计参数

模数 $m/\text{mm}$	2.5
中心距 $a/\text{mm}$	181.472 3
主动轮阶数 $n_1$	3
从动轮阶数 $n_2$	4
主动轮齿数 $z_1$	42
从动轮齿数 $z_2$	56
偏心率 $k_1$	0.074 8
变性系数 $m_{21}$	0.718 2
齿顶高系数 $h_a$	1.0
插齿刀齿形角 $\alpha_0/(\circ)$	20
插齿刀齿顶高系数 $h_{a0}$	1.25

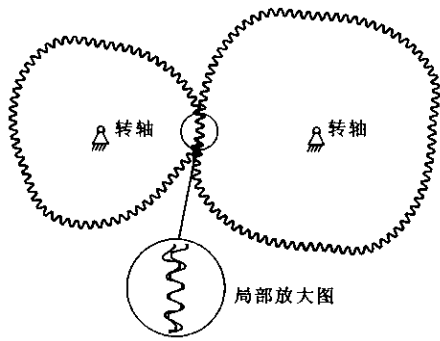
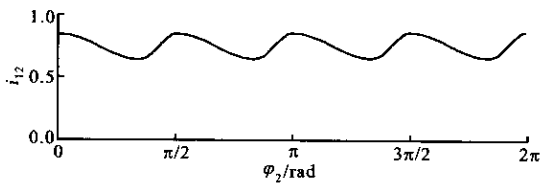
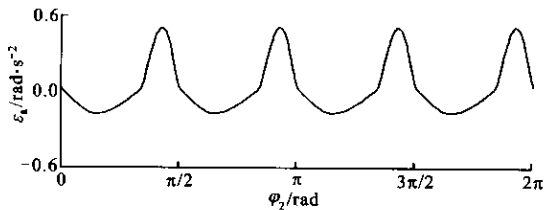


图3 齿轮副外形图



(a) 传动比曲线



(b) 角加速度的变化曲线

图4 高阶变性椭圆设计实例图

## 5 结论

本文提出的高阶变性椭圆齿轮从理论上将各种椭圆齿轮的数学模型统一了起来,在该数学模型的基础上,通过推导并研究高阶变性椭圆齿轮副主动轮和从动轮的节曲线表达、中心距、变性系数关系、转角关系、传动比、曲率半径和节曲线弧长等问题,给出了高阶变性椭圆设计参数的求解方法和设计过程,并使各种椭圆齿轮可用统一的设计方法进行设计.同时,本文还通过实例说明了将高阶变性椭圆齿轮应用于实际是完全可行的.

## 参考文献:

- [1] 吴序堂,王海贵. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997. 17-56.
- [2] 贺敬良,吴序堂. 变性椭圆齿轮连杆机构的运动特性及齿轮副设计[J]. 机械工程学报,2004,40(1):62-65.
- [3] Litvin F L. Gear geometry and applied theory [M]. New Jersey:PTR Prentice Hall,1994. 346-381.
- [4] Michal K. Designing elliptical gears[J]. Machine Design, 1988,60(7): 116-118.
- [5] 熊镇芹. 非圆齿轮 CAD/CAM 关键技术及其应用研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2004.

(编辑 管咏梅)

## 本刊 2005 年第 3 期论文全部被 Ei 收录

本刊 2005 年第 3 期发表的 25 篇论文全部被 Ei COMPENDEX 数据库收录. 被收录论文的第一作者/篇名如下:

何雅玲/脉管制冷机的热力学第一定律和第二定律分析 刘圣华/压缩比对均质充量压缩着火发动机性能影响的研究 李惠珍/开缝翅片流动和传热性能的实验研究及数值模拟 黄卓勇/改进二甲醚燃料润滑性能的研究 吕友军/农业生物质在超临界水中气化制氢的实验研究 祁明旭/透平动叶顶部间隙流的表现形式及其对透平性能的影响 张艳/用 Langevin 理论研究回热式室温磁制冷循环性能 李建华/基于综合导向的轮式移动机器人自适应轨迹跟踪控制 白志峰/电动汽车驱动与再生制动的  $H_\infty$  鲁棒控制 李崇晟/基于混沌和符号序列统计的滚动轴承故障诊断 徐秀芬/气液联控伺服系统的工作性能分析及试验研究 马骊溟/模式识别在多视角下数据拼接中的应用 张早校/二氧化碳输送过程的优化 赵敬忠/ $\text{SiO}_2$  对 Al-Zn-Si 合金直接熔融氧化的影响 皇志富/重熔时间对半固态过共晶高铬铸铁初生相的影响 郭玉琴/用模糊推理及分级优化确定板料冲压的工艺条件 胡桥/经验模式分解模糊特征提取的支持向量机混合诊断模型 范虹/用混合编码遗传算法实现匹配追踪算法 余志壮/内燃机增压与扩缸对活塞横向运动影响的数值分析 周涛/低温供热堆换热器的实时仿真研究 田文喜/中国先进研究堆自然循环程序的开发及应用 谢应明/四氢呋喃水合物换热管外结晶分解动力学研究 李跟宝/二甲醚发动机中燃料与橡胶密封件的相容性研究 刘宇杰/描述 T225NG 钛合金高温单轴棘轮行为的黏塑性本构模型 陈丽/ $\text{Ag}$  和  $\text{Au}$  弹性常数对纳米器件的适用性研究