

# 固定式端面弧齿联轴节的加工方法

黄登红<sup>1</sup> 王志永<sup>2</sup> 曾 韬<sup>3</sup>

1. 空军航空维修技术学院,长沙,410124
2. 中南林业科技大学,长沙,410004
3. 中南大学,长沙,410083

**摘要:**为了在国产数控螺旋锥齿轮加工机床上实现端面弧齿联轴节的加工,对固定式端面弧齿联轴节的加工方法进行了研究。分析了端面弧齿联轴节的切齿原理和切齿方法,根据固定式端面弧齿联轴节的调整计算卡,建立了刀盘半径、刀齿顶宽、切削刃压力角、刀尖圆角半径的计算方法。基于端面弧齿联轴节的切齿原理以及国产数控螺旋锥齿轮加工机床的结构,建立了弧齿联轴节切齿加工机床调整参数的计算方法,给出了相关的计算公式并开发了端面弧齿联轴节设计、加工参数计算软件。在国产H350G型数控螺旋锥齿轮磨齿机上,基于软件计算得到的机床调整参数进行了实际的磨齿加工,通过实际的接触区检测和几何参数检测,验证了切齿加工参数计算方法的正确性。

**关键词:**端面弧齿联轴节;切除原理;加工方法;机床调整参数

**中图分类号:**TH161.5

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2013.14.007

## Manufacturing Method for Fixed Curvic Coupling

Huang Denghong<sup>1</sup> Wang Zhiyong<sup>2</sup> Zeng Tao<sup>3</sup>

1. Air Force Aviation Repair Institute of Technology, Changsha, 410124
2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, 410004
3. Central South University, Changsha, 410083

**Abstract:** In order to manufacture the curvic coupling on a homemade CNC spiral bevel gear cutting or grinding machine, the manufacturing method for fixed curvic coupling was investigated. The cutting principle and cutting method of fixed curvic coupling was analyzed. According to the calculation cards of fixed curvic coupling, the method for determining cutter radius, blade point width, pressure angle of cutter blade and cutter profile radius were put forward. Based on the cutting principle and the configuration of CNC spiral bevel gear grinding machine, a method for determining the machine setting parameters was built and the calculation formulae was provided. Software for calculating the geometrical parameters and machine setting parameters for fixed curvic coupling was developed. According to calculation results of the software, a fixed curvic coupling was machined on H350G CNC spiral bevel gear grinding machine. The method for calculating the machine setting parameters was validated by the inspection of practical contact pattern and geometrical parameters.

**Key words:** curvic coupling; cutting principle; manufacturing method; machine setting parameter

## 0 引言

端面弧齿联轴节是指在与联轴节轴线垂直的平面上,轮齿沿圆周均匀分布并具有弧形齿线特征的齿形连接元件。端面弧齿联轴节具有承载能力高、自动定心性能好等优点,主要用于精密数控机床的分度机构、大型柴油发动机的曲轴、航空和工业用燃气轮机或蒸汽轮机的涡轮转子和压缩机转子等<sup>[1-6]</sup>。端面弧齿联轴节的发展源于螺旋锥齿轮,因此,端面弧齿联轴节可在加工螺旋锥齿轮的铣齿机或磨齿机上进行加工,有着与螺旋锥齿轮相同的加工优点,具有较高的加工效率和加工精度。端面弧齿联轴节包括三种基本类型:固定式弧齿联轴节、半万向弧齿联轴节、离合式弧齿联轴节。在实际的工业产品中,主要采用固定式端

面弧齿联轴节,其作用相当于精密端面花键,将两个或多个零件或部件连接成为单一工作整体。

目前,美国 Gleason 公司和德国 Klingelnberg 公司的铣齿机和磨齿机都具备加工端面弧齿联轴节的功能,国内的航空发动机和机床制造企业进口了这两家公司的设备用于端面弧齿联轴节的加工。为了在国产数控螺旋锥齿轮机床上实现端面弧齿联轴节的加工,本文分析了端面弧齿联轴节的加工原理和加工方法,结合端面弧齿联轴节的调整计算卡<sup>[7]</sup>,基于国产数控螺旋锥齿轮加工机床,建立了固定式端面弧齿联轴节铣齿或磨齿加工机床调整参数的计算方法,并在国产数控螺旋锥齿轮磨齿机上通过实际的磨齿加工试验进行了验证。

## 1 端面弧齿联轴节的加工原理

端面弧齿联轴节利用端面铣刀盘或杯形砂轮

收稿日期:2012-04-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2005CB724100)

在螺旋锥齿轮铣齿机或磨齿机上进行加工,可采用从整体齿坯上切削或切削后再磨削的加工工艺,也可由整体齿坯上直接磨削加工制造。

端面弧齿联轴节由凹齿件和凸齿件构成,凹齿件利用端面铣刀盘或杯形砂轮的外切削刃加工,从而形成凹齿,如图 1 所示;凸齿件利用端面铣刀盘或杯形砂轮的內切削刃加工,从而形成凸齿,如图 2 所示。

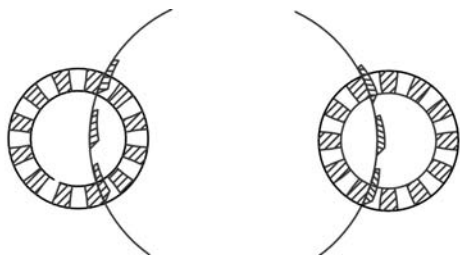


图 1 外切刀齿加工凹齿件

图 2 内切刀齿加工凸齿件

端面弧齿联轴节采用切入法(也称为成形法)加工,刀齿或砂轮的切削刃通过联轴节的端面,在每一次切入进给过程中,加工一轮齿的一侧齿面和另一轮齿的相对侧齿面,工件转动一周即可完成整个工件的加工。

## 2 加工调整参数的计算方法

固定式端面弧齿联轴节的切齿加工调整参数包括刀具参数和机床调整参数。其中刀具参数主要指刀具的刀盘半径、切削刃的压力角、刀齿顶宽、刀尖圆角半径等。对于机床调整参数,由于端面弧齿联轴节采用切入法加工,因此,在数控螺旋锥齿轮铣齿机或磨齿机上加工时,只需给出基本的机床调整参数即可,包括径向刀位、角向刀位、床位、轮坯安装角等。

### 2.1 刀具参数的确定

#### 2.1.1 刀盘半径

图 3 是采用外切刀齿加工凹齿件时,刀盘与工件相对位置关系的示意图。图中,  $A$  为弧齿联轴节的中点半径,  $r$  为刀盘半径。假定弧齿联轴节的齿数为  $N$ , 刀盘切削刃形成的圆锥面所包容的半周节数为  $n_x$ , 令  $n_i = N - n_x$ 。

为了使轮齿和齿槽形成向联轴节中心锥缩的锥度,一般情况下,刀盘半径  $r$  应近似等于弧齿联轴节外径  $D$  的一半,即  $r \approx 0.5D$ 。设刀盘半径的初始值为  $r'$ ,则由图 3 可知:

$$\alpha' = \arctan(A/r') \quad (1)$$

$$n'_i = N\alpha'/90^\circ \quad (2)$$

$n'_i$  应大于或等于 1。由于  $n_i$  必须为正整数,因此,根据  $n'_i$  的值进行圆整,当  $N$  为偶数时,取  $n_i$  为

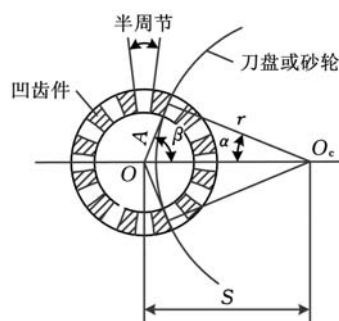


图 3 凹齿件切齿加工示意图

奇数;  $N$  为奇数时,取  $n_i$  为偶数。

当  $n_i$  确定后,由式(1)、式(2)和图 3 可知:

$$\alpha = 90^\circ \times n_i/N \quad (3)$$

$$r = A/\tan\alpha \quad (4)$$

#### 2.1.2 刀齿顶宽 $w_{bx}$ 和 $w_{bc}$

端面弧齿联轴节上相邻两轮齿间的齿槽是在两个不同的切入进给加工过程中形成的,轮齿和齿槽都存在着向联轴节中心锥缩的锥度。因此,切齿刀盘或砂轮的顶宽必须具有一定的宽度,以使其能够大于外径处齿底槽宽的一半,并且要小于内径处的齿底槽宽,这样就可以保证在外径齿底处不会由于未切除的材料形成“尖脊”而影响联轴节两元件的配合,在内径处不会由于过分切除材料而破坏对侧已成形的齿面。

当刀盘半径和联轴节几何参数确定后,凹齿件外径处的齿底槽宽  $w_{oc}$  和内径处的齿底槽宽  $w_{ic}$  分别为

$$w_{oc} = \frac{\pi D}{2N} - 2h_f \tan\alpha_n - \frac{b^2}{6r} \quad (5)$$

$$w_{ic} = \frac{\pi(0.5D - b)}{N} - 2h_f \tan\alpha_n - \frac{b^2}{6r} \quad (6)$$

式中,  $b$  为联轴节的齿面宽;  $h_f$  为联轴节的齿根高;  $\alpha_n$  为联轴节压力角。

凸齿件外径处的齿底槽宽  $w_{ox}$  和内径处的齿底槽宽  $w_{ix}$  分别为

$$w_{ox} = \frac{\pi D}{2N} - 2h_f \tan\alpha_n + \frac{b^2}{6r} \quad (7)$$

$$w_{ix} = \frac{\pi(0.5D - b)}{N} - 2h_f \tan\alpha_n + \frac{b^2}{6r} \quad (8)$$

对于加工凹齿件的刀盘或砂轮的顶宽  $w_{bc}$ , 应满足  $0.5w_{oc} < w_{bc} < w_{ic}$ ; 对于加工凸齿件的刀盘或砂轮的顶宽  $w_{bx}$ , 应满足  $0.5w_{ox} < w_{bx} < w_{ix}$ 。如果这两个条件不能满足,则应改变刀盘半径  $r$  或齿面宽  $b$  和外径  $D$  重新计算。

#### 2.1.3 切削刃的压力角 $\alpha_b$

由于端面弧齿联轴节采用切入法加工,因此,应使刀盘或砂轮切削刃的压力角等于联轴节的压力角  $\alpha_n$ ,即  $\alpha_b = \alpha_n$ 。

### 2.1.4 刀尖圆角半径 $r_{bx}$ 和 $r_{bc}$

当刀盘刀齿的顶宽  $w_{bx}$  和  $w_{bc}$  确定后,可利用以下三个公式计算相应的刀尖圆角半径<sup>[8]</sup>:

$$r_1 = (w_b - 0.381)(1 - \sin\alpha_n) / \cos\alpha_n \quad (9)$$

$$r_2 = (w_i - w_b)(1 - \sin\alpha_n) / \cos\alpha_n \quad (10)$$

$$r_3 = c / (1 - \sin\alpha_n) \quad (11)$$

式中, $r_1$ 为铣刀盘刀齿能够制造的最大刀尖圆角半径; $r_2$ 为不破坏齿根圆角完整性的最大刀尖圆角半径; $r_3$ 为联轴节齿顶间隙  $c$  所允许的最大刀尖圆角半径。

对联轴节的凸齿件和凹齿件应分别利用式(9)~式(11)进行计算。若联轴节采用端面铣齿刀盘加工,则选择  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  中的较小值作为刀齿的圆角半径;若联轴节采用砂轮磨削加工,则选择  $r_3$  作为砂轮的圆角半径。

### 2.1.5 实现局部接触的刀盘刀尖半径 $r_{cpx}$ 和 $r_{cpc}$

对于固定式端面弧齿联轴节,一般应使凹齿件与凸齿件在较轻负荷下啮合时呈现局部接触。为了实现局部接触,可通过改变  $n_x$  来实现,也就是加工凸齿件和凹齿件时采用不同的  $n_x$  值,以使加工凹齿件的刀盘半径大于加工凸齿件的刀盘半径。

若  $n_x$  减少两个半周节数(相当于  $n_i + 2$ ),则由式(3)、式(4)和图3可知:

$$\alpha_{m1} = 90^\circ \times (n_i + 2) / N \quad (12)$$

$$r_{m1} = A / \tan\alpha_{m1} \quad (13)$$

则凸齿件和凹齿件由于齿长曲率差所形成的接触区长度与齿宽的比值为

$$B_{01} = \sqrt{\frac{0.0508rr_{m1}}{b^2(r-r_{m1})}} \quad (14)$$

若  $n_x$  增加两个半周节数(相当于  $n_i - 2$ ),则由式(3)、式(4)和图3可知:

$$\alpha_{m2} = 90^\circ \times (n_i - 2) / N \quad (15)$$

$$r_{m2} = A / \tan\alpha_{m2} \quad (16)$$

则凸齿件和凹齿件由于齿长曲率差所形成的接触区长度与齿宽的比值为

$$B_{02} = \sqrt{\frac{0.0508rr_{m2}}{b^2(r_{m2}-r)}} \quad (17)$$

根据  $B_{01}$  和  $B_{02}$  的值,可按以下三种情况确定实现局部接触的刀尖半径  $r_{cpx}$  和  $r_{cpc}$ 。

(1)  $B_{01}$  和  $B_{02}$  的值都小于 0.3。加工凸齿件和凹齿件的刀盘半径均为  $r$ ,且加工凹齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpc}$  和加工凸齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpx}$  分别为

$$r_{cpc} = r + \frac{b^2}{24r} - h_f \tan\alpha_n \quad (18)$$

$$r_{cpx} = r + \frac{b^2}{24r} + h_f \tan\alpha_n \quad (19)$$

(2)  $B_{01}$  的值大于 0.3。加工凹齿件的刀盘半

径为  $r$ ,加工凸齿件的刀盘半径为  $r_{m1}$ ,则加工凹齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpc}$  按照式(18)计算,加工凸齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpx}$  为

$$r_{cpx} = r_{m1} + \frac{b^2}{24r} + h_f \tan\alpha_n \quad (20)$$

(3)  $B_{02}$  的值大于 0.3。加工凹齿件的刀盘半径为  $r_{m2}$ ,加工凸齿件的刀盘半径为  $r$ ,则加工凸齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpx}$  按照式(19)计算,加工凹齿件的刀盘刀尖半径  $r_{cpc}$  为

$$r_{cpc} = r_{m2} + \frac{b^2}{24r} - h_f \tan\alpha_n \quad (21)$$

## 2.2 机床调整参数的确定

固定式端面弧齿联轴节在机床上加工时,工件、刀盘在机床上的安装位置以及相应的机床调整参数如图4所示。具体机床调整参数的计算方法如下。

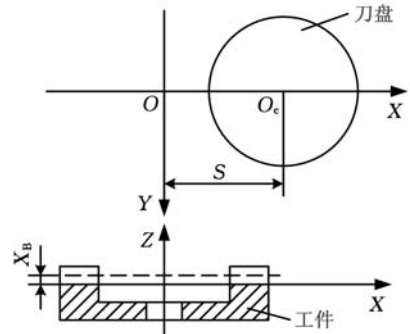


图4 工件和刀盘在机床上的安装位置及机床调整参数

### 2.2.1 径向刀位 $S$

径向刀位  $S$  就是刀盘中心  $O_c$  与机床中心  $O$  的距离。根据计算刀尖半径  $r_{cpx}$  和  $r_{cpc}$  的三种情况,径向刀位也需按照以下相对应的三种情况来确定:

(1)  $B_{01}$  和  $B_{02}$  的值都小于 0.3。加工凸齿件的径向刀位和加工凹齿件的径向刀位为

$$S = A / \sin\alpha \quad (22)$$

(2)  $B_{01}$  的值大于 0.3。加工凹齿件时的径向刀位按照式(22)计算,加工凸齿件时的径向刀位为

$$S = A / \sin\alpha_{m1} \quad (23)$$

(3)  $B_{02}$  的值大于 0.3。加工凸齿件时的径向刀位按照式(22)计算,加工凹齿件时的径向刀位为

$$S = A / \sin\alpha_{m2} \quad (24)$$

### 2.2.2 角向刀位 $q$

角向刀位  $q$  是刀盘中心  $O_c$  与机床中心  $O$  的连线与  $X$  轴的夹角,由图1、图2和图4可知,加工凹齿件时,角向刀位  $q=0^\circ$ ;加工凸齿件时,角向刀位  $q=180^\circ$ 。

### 2.2.3 床位 $X_B$

无论是加工凸齿件还是加工凹齿件,床位等于联轴节的齿根高,即  $X_B = -h_f$ 。

### 2.2.4 轮坯安装角 $\delta_M$

轮坯安装角  $\delta_M$  是联轴节轴线与  $X$  轴的夹角,因此,无论是加工凸齿件还是加工凹齿件,轮坯安装角  $\delta_M$  均为  $90^\circ$ 。

### 2.2.5 其他机床调整参数

除了以上机床调整参数外,其他机床调整参数如刀倾角  $i$ 、刀转角  $j$ 、水平轮位修正量  $X_p$ 、垂直轮位  $E_m$ 、滚比  $R_a$  均为 0。

## 3 端面弧齿联轴节的加工实例

为了验证端面弧齿联轴节切齿加工机床调整参数计算方法的正确性,开发了端面弧齿联轴节设计、加工参数计算软件,软件的界面如图 5 所示。

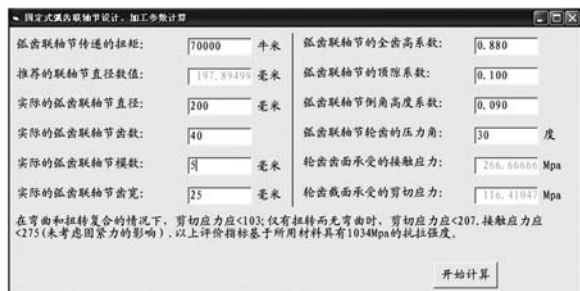


图 5 端面弧齿联轴节设计、加工参数计算软件的界面

基于所开发的软件,根据某型精密数控机床端面弧齿联轴节的参数,设计制造了齿坯并在国产 H350G 型数控螺旋锥齿轮磨齿机上进行了磨齿加工,表 1 所示是固定式端面弧齿联轴节的基本参数,表 2 所示是利用软件计算得到的机床调整参数;图 6 所示是在机床上实际加工的情况,图 7 所示是实际加工完成的端面弧齿联轴节,左边的零件为凸齿件,右边的零件为凹齿件。

表 1 端面弧齿联轴节的基本参数

齿数 $N$	端面模数 $m_{et}$ (mm)	压力角 $\alpha_n$ ( $^\circ$ )	外径 $D$ (mm)	齿面宽 $b$ (mm)
40	5	30	200	25

表 2 加工弧齿联轴节的机床调整参数和刀具参数

参数	凹齿件	凸齿件
径向刀位 $S$ (mm)	141.336	141.336
角向刀位 $q$ ( $^\circ$ )	0	180
轮坯安装角 $\delta_M$ ( $^\circ$ )	90	90
床位 $X_B$ (mm)	-2.45	-2.45
砂轮刀尖半径 $r_{cp}$ (mm)	109.80	112.65
砂轮顶宽 $w_b$ (mm)	2.1	3.5
砂轮刃角 $\alpha_b$ ( $^\circ$ )	30	30

对于试验加工的固定式端面弧齿联轴节,理论设计全齿高为 4.40mm,凸齿件的齿厚为

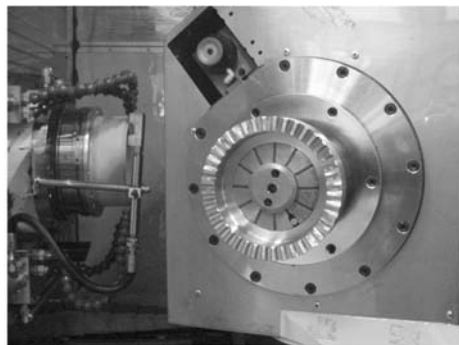


图 6 端面弧齿联轴节的磨齿加工



图 7 磨齿加工后的端面弧齿联轴节

6.962mm,凹齿件的齿厚为 6.274mm。工件实际加工后,测量的实际全齿高为 4.406mm,凹齿件的实际齿厚为 6.268mm,凸齿件的实际齿厚为 6.956mm,实际测量值与理论设计值的差值是由测量误差、机床加工误差造成的。

通过实际的齿面啮合着色检查,轮齿齿面的啮合接触区如图 8 所示。在齿长方向上,接触区的长度约为齿面宽的 40%,在齿高方向上,接触区的宽度约为齿高的 70%,与设计计算时确定的接触区形状基本一致,验证了机床调整参数计算方法的正确性。



图 8 端面弧齿联轴节的齿面接触区

## 4 结论

(1)分析了端面弧齿联轴节的加工原理和加工方法,并根据固定式端面弧齿联轴节的调整计算卡,建立了切齿加工机床调整参数的计算方法。

(2)通过实际的磨齿加工试验,对固定式端面弧齿联轴节进行了磨齿加工,验证了切齿加工机床调整参数计算方法的正确性。

(3)本文建立的切齿加工机床调整参数计算方法为应用国产数控螺旋锥齿轮加工机床制造固定式端面弧齿联轴节奠定了技术基础。(下转第 1885 页)

由图 12 结果可知,剑头剑带质量增加 92%,引纬机构系统动能最大值提高约 16.4%,主轴上的惯性力矩极值提高约 18.6%,剑头剑带的惯性力极值提高约 92%。

## 5 结论

在引纬机构中瞬时速度较高的零件是剑头、剑带、剑轮,它们的重量、转动惯量对主轴的驱动载荷影响较大,在设计时,应尽量减小剑头剑带的重量和传剑轴上零件的转动惯量。

### 参考文献:

- [1] 中国纺织工业协会. 纺织工业“十二五”科技进步纲要[R]. 北京:中国纺织工业协会,2010.
- [2] 陈建能,赵雄,张国凤,等. 基于改进 NSGA-II 算法的新型引纬机构的参数优化[J]. 纺织学报,2008,29(1):110-113.  
Chen Jianneng, Zhao Xiong, Zhang Guofeng, et al. Parameter Optimization of a Weft Insertion Mechanism Based on Improved NSGA-II [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(1): 110-113.
- [3] 周香琴. 球面 4R 机构运动特性研究及其应用探索[J]. 中国机械工程,2011,22(2):153-158.  
Zhou Xiangqin. Kinematics Characteristics Research of Spherical 4R Mechanism and Its Application Explore [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2): 153-158.
- [4] Zhu Zhichao, Fang Zhihe. Optimization Design of a Weft Insertion Mechanism for Rapier Looms [J]. Journal of Dong Hua University(English Edition), 2003, 3(20): 38-41.
- [5] Li Kerang, Chen Ming. Analysis of the Orthogonal Crank-rocking Lever Spatial Mechanism for the Weft Insertion in Rapier Looms [J]. Journal of Dong Hua University(English Edition), 2001, 18(1): 27-31.
- [6] 周骏彦,郑建荣,刘小平,等. 基于虚拟样机技术的剑杆织机研究[J]. 上海纺织科技,2008,36(6):11-13.  
Zhou Junyan, Zheng Jianrong, Liu Xiaoping, et al. Study on Rapier Loom Based on Virtual Prototype Technology [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2008, 36(6): 11-13.
- [7] 周香琴,万祖干. 一种特宽幅剑杆织机引纬驱动装置:中国,ZL200910095257.9[P],2011-06-22.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:周香琴,女,1965年生。浙江理工大学机械与自动控制学院高级工程师。主要研究方向为剑杆织机的研究开发和机

构学。发表论文9篇。张雷,男,1974年生。浙江理工大学机械与自动控制学院副教授。

(上接第 1880 页)

### 参考文献:

- [1] Stadtfeld H J. Handbook of Bevel and Hypoid Gears [M]. New York: Rochester of Institute of Technology, 1993.
- [2] 张伯鹏,周凯. 加工精度自生成及其在端齿盘对研加工中的应用[J]. 中国机械工程,2006,17(22): 2311-2315.  
Zhang Bopeng, Zhou Kai. Investigation on Self-generation of Machining Precision and Its Application for Mutual Lapping Machining of End-tooth Indexing Table [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(22): 2311-2315.
- [3] 李业明,张红军,姚远. 大功率机车驱动系统联轴器弧齿端齿盘结构性能分析及参数优化[J]. 铁道机车车辆,2009,29(6):31-33.  
Li Yeming, Zhang Hongjun, Yao Yuan. Structure Performance Analysis and Parameter Optimization for the Arc Tooth Transverse Teeth Gear of High-power Locomotive Drive System Coupling [J]. Railway Locomotive & Car, 2009, 29(6): 31-33.
- [4] Richardson I J, Hyde T M, Becker A A, et al. A Three-dimensional Finite Element Investigation of the Bolt Stresses in an Aero-engine Curvic Coupling under a Blade Release Condition [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2000, 214(4): 231-245.
- [5] Choi Jihwan, Kim Chaesil. A Study on the Stability of Curvic Coupling for Distance to Disk in a Mill Turret [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 110: 1498-1505.
- [6] Pisani S R, Rencis J J. Investigating Curvic Coupling Behavior by Utilizing Two- and Three-dimensional Boundary and Finite Element Methods [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2000, 24(3): 271-275.
- [7] 北京齿轮厂. 格利森锥齿轮技术资料译文集(第二分册)[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [8] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 黑龙江:哈尔滨工业大学出版社,1989.

(编辑 苏卫国)

作者简介:黄登红,男,1973年生。空军航空维修技术学院机械制造工程系副教授。主要研究方向为数控加工技术。发表论文30余篇。王志永,男,1973年生。中南林业科技大学机电工程学院副教授。曾韬,男,1945年生。中南大学机电工程学院教授、博士研究生导师。