

④ 二齿差摆线齿轮成形磨齿新技术研究

18-24

New Technology of Profile Grinding
for Two Teeth Difference Cycloidal Gear

TG61

黄天铭 严勇 梁锡昌 詹捷
Huang Tianming Yan Yong Liang Xichang Zhan Jie

(重庆大学机械传动国家重点实验室)

摘要 二齿差摆线齿轮是摆线针轮减速机的关键基础件。国内广泛采用的展成磨齿法加工精度和效率极低,是行业中亟待解决的共同问题。本文研究的成形磨齿技术经生产验证表明,是一种高效、优质、经济的加工方法。

关键词 摆线齿轮; 成形磨齿; 二齿差

中国图书资料分类法分类号 TH132.414; TG580.38

ABSTRACT Two teeth difference cycloidal gears are the key parts in cycloidal reducer. The plate abrasive wheel method which is widely used at home has very low precision and productivity. So it's the common problem to be immediately solved. The profile grinding technology discussed in this paper has been proved by practical production to be an efficient and economical cycloidal gear manufacturing method.

KEY WORDS cycloidal gear; profile grinding; two teeth difference

0 引 言

由于摆线针轮传动具有一系列优点,摆线减速机获得了迅速的推广应用,截至1988年,全国生产厂家猛增至100多家,在1979年到1989年短短10年间,其产量以年平均23.5%高速增长着,成为机械行业发展最快的产业之一。

摆线齿轮,作为关键基础件,其质量对整机的工作性能和使用寿命影响极大。国内摆线齿廓的加工普通采用展成法,加工质量不高,生产效率低。至于二齿差摆线齿轮的加工质量和效率低更是行业亟待解决的共同问题。

1 二齿差摆线齿廓及现行工艺分析

一齿差摆线针齿行星减速机构的速比范围通常在11~87之间,当速比小于11时,齿面常发生胶合失效,采用二齿差传动可较好的解决这一问题。

* 收文日期 1992-07-13

二齿差摆线齿廓实质上相当于两个齿数为 Z_0 ，相位差为 $360^\circ/2Z_0$ 的一齿差齿廓迭加相交削去齿顶后所得到的曲线，其形成原理如图 1 所示，在一齿差摆线针齿行星传动的每两个针齿间增加一个针齿，便能实现二齿差摆线针齿行星传动。根据啮合原理可知，在 τ_0 圆上 $cc_1, c_1c_2 \dots$ 之间增加点 $c', c'_1, c'_2 \dots$ ，并使这些点位于各段弧的中点，即 $cc' = c'_1c_1 = c'_2c_2 \dots$ 则当 τ_0 沿 τ_0 作纯滚动时， $c, c', c_1, c'_1 \dots$ 便构成两组相交的整枝外摆线，其相位差为 $360^\circ/2Z_0$ ，(Z_0 为一齿差传动时摆线轮的齿数)，这两组外摆线齿顶相互削去后的非整枝短幅外摆线的等距离曲线即为二齿差摆线齿轮的齿廓线。

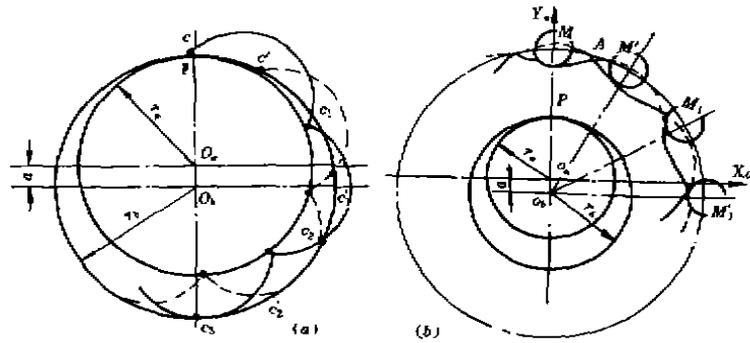


图 1

目前国内普通采用的展成法磨齿，先间齿磨出第一条齿廓，然后脱开挂轮或转动拨齿盘使工件转位 $360^\circ/2Z_0$ ，闭合挂轮或插上插销再间齿磨齿第二条齿廓。由于齿顶成尖点，需修形，必须重新装夹工件磨削齿顶修形圆弧。此外又由于砂轮磨削轨迹系逐点形成的螺旋线，工件需转多圈才能磨出整个齿长，因而生产率和加工精度皆低，齿顶过渡不圆滑，表面呈鳞斑状，表面粗糙度差。

2 成形磨齿法

将砂轮截形修整成与工件齿廓吻合的形状，对工件进行单齿分度磨削。此法具有机床结构简单，价格低廉，调整操作方便，生产率和加工精度高，表面粗糙度好，可加工任意廓形等优点。

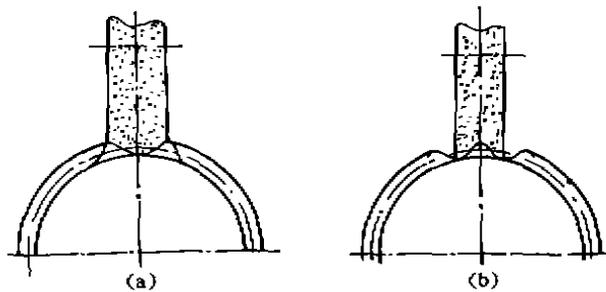


图 2

摆线齿轮的成形磨削可有图 2(a), (b) 两种方案。两者各有优缺点。从滚轮磨损情况和磨削或砂轮修整工作条件来看，方案(a)较好，我们采用了(a)方案。

砂轮的修整成形及成形精度是成形磨削的关键。常用的修整方法可归结为运动轨迹法和滚轮挤压法两大类。前者借助仿形装置、靠模、数控装置等,利用金刚石笔的运动轨迹修出砂轮廓形,此法需复杂的装置,费用高,效率低,要求操作者有较高的技术水平。滚轮法则无需复杂的装置,操作简便,效率高,但需高精度的滚轮。鉴于数控加工技术的日益普及,滚轮廓形的加工已不再是难题,经全面分析后决定采用滚轮修整法。

3 滚轮的研制

3.1 滚轮材料的选定

常见的滚轮有金刚石滚轮和钢质滚轮(高速钢、高碳钢、铬钨锰钢)两类。采用金刚石滚轮,在修整砂轮过程中,滚轮须由单独的驱动装置驱动以便根据加工要求改变滚轮转速和进给量($V_{滚}/V_{砂} = 0.4 \sim 0.7$,切入进给量 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}/\text{砂轮每转}$);金刚石滚轮的优点是寿命长(但国内由于金刚石磨粒质量和电镀水平等原因,其寿命并不理想),缺点是需要单独的驱动装置(驱动电机,进给电机和机应的传动装置);价格昂贵(据市场调查,每个滚轮价格约 5000 ~ 10000 元),适用于大批量生产。用高速钢滚轮修整砂轮时,砂轮降速到 $1 \sim 2 \text{ m/s}$,滚轮以 $0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/mm}$ 的压力靠紧砂轮,由砂轮带动旋转。

由于高速钢滚轮造价低廉,勿须专门的驱动装置,使用方便,适于多品种中小批量的生产,针对我国国情,决定采用高速钢滚轮。

3.2 滚轮廓形设计

在摆线针轮行星传动中,为了补偿制造误差、便于装拆,保证良好的润滑和提高传动效率,摆线轮齿和针轮齿之间应有一定啮合间隙,因此必须对齿形进行修正。一齿差摆线轮的各种修正方法,皆可概括其通用齿形方程为

$$\begin{aligned} Xa &= [R_z - \Delta R_z - (r_z + \Delta r_z)\Phi^{-1}(K_1, \varphi)]\sin[(1 - i^H)\varphi - \delta] \\ &+ \frac{a}{R_z - \Delta R_z} [R_z - \Delta R_z - Z_0(r_z + \Delta r_z)\Phi^{-1}(K_1, \varphi)]\cos[i^H\varphi + \delta] \\ Ya &= [R_z - \Delta R_z - (r_z + \Delta r_z)\Phi^{-1}(K_1, \varphi)]\cos[(1 - i^H)\varphi - \delta] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 R_z — 针齿中心圆半径(mm); a — 偏心距(mm)

r_z — 针齿圆弧半径(有针齿套时为针齿套半径)(mm);

Z_0 — 摆线轮齿数(为二齿差摆线轮齿数的一半);

Z_0 — 针轮齿数(为二齿差针轮齿数的一半);

i^H — 摆线轮和针轮的相对传动比, $i^H = Z_b/Z_a$;

K_1 — 短幅系数, $K_1 = aZ_b/(R_z - \Delta R_z)$;

φ — 针轮相对于转臂的转角(度);

$\varphi(k_1, \varphi) = (1 + k_1^2 - 2k_1\cos\varphi)^{-1/2}$;

ΔR_z — 移距修正量(mm); Δr_z — 等距修正量(mm); δ — 转角修正量(度)。

二齿差摆线齿轮的齿形,如前述,实为两个一齿差轮错位相交并削去顶部所得到的廓形,其齿顶移至两者的交点 A (见图 1b),该点有方程:

$$Ye = Xe \operatorname{Ctg} \lambda \quad (2)$$

式中 Ye, Xe — 齿顶点 A 的坐标; λ — 二齿差摆线轮齿半角;

联解式(1),(2)即可求出点 A 坐标。

为使齿顶尖点过渡圆滑,必须对齿顶进行修形。目前采用的方法一是由人工用砂轮修磨,一是将顶圆先行车小,以小段圆弧代替尖点。此外,也可在展成磨齿机上进行。用一个一齿差摆线轮(齿数为二齿差摆线轮的 2~3 倍)的顶部齿形作为二齿差轮的顶部齿形。这种修形方法要求修顶摆线与二齿差轮齿顶在交点处斜率差尽可能小,交点在最远啮合点之外,二曲线不得干涉等。此法存在着对工人技术要求高,质量不稳定,修顶曲线与工作齿廓相交,过渡不圆滑等缺点。以上各法的共同问题是顶部出现棱痕,啮合时引起振动和噪声。鉴于在砂轮修整过程中,滚轮同砂轮各接触点的磨损量是变化的,为掌握滚轮磨损规律,进行了模拟试验研究。结果表明,在滚动瞬心圆附近(廓形中部)滚轮磨损小,顶部和根部磨损较大,呈鼓形趋势。为提高滚轮耐用度,宜让瞬心圆位于最大受力点处。

为克服上述齿顶修形方法的缺点,并兼顾啮合间隙的要求,在滚轮设计中我们研究、采用了对整个齿廓的最佳复合修形技术,并编制出相应的计算程序(程序略)。

3.3 廓形的加工和检测

关键工序是廓形曲面的车削及淬火后的磨削加工。这两道工序皆在 XK5040-1 型三坐标数控铣床上进行。工件装在主轴上,车刀装置和磨头安装在铣床工作台上,由刀具(或磨轮)按所编的数控加工程序完成所需的运动。为此我们研制了车刀装置,磨头及磨轮的修整装置。编制了专用处理复杂曲线的双圆弧样条自动编程软件。在车削后,热处理前,加工误差控制在 0.05mm 左右。齿廓磨削后,先后用 F604 型三坐标测量机,万能工具显微镜和 757A 型表面粗糙度轮廓仪检测,其形状误差在 ± 0.01 mm 以内,表面粗糙度为 $Ra = 0.5 \mu\text{m}$ 。

为了获得准确的测量结果,我们对平面曲线的测量方法和数据处理进行了专题研究,并编制了相应的数据处理程序(程序略)。

4 加工精度的分析研究

影响加工精度的因素众多,根据成形磨削的特点和课题任务,我们着重研究了滚轮制造和安装精度对齿形加工精度的影响及规律问题。

4.1 摆线齿轮齿形误差检测

按国标 1183-80 形状和位置公差(术语及定义),对齿廓误差应定义为沿理想廓法向的误差。由于摆线齿廓齿与齿之间的过渡是连续的,在用小型工具显微镜或三坐标机等对摆线轮单齿进行检测时,齿形误差的数据处理非常复杂。为此,本文采用的工件检测坐标为(如图 3 所示):以过齿顶的弦长为 X_i 坐标,与之垂直的轴线为 Y_i 坐标,坐标原点 O_i 为在检测仪器量程范围内某点。则测得的摆线轮齿形误差为当工件检测坐标 X_i 与摆线轮设计理想齿廓的计算坐标 $X_a O_a Y_a$ 的 X_a 轴平行,且误差平方和为最小的齿形误差。以在小型工具显微镜上检测为例:调整两齿顶在纵向等高后,测取工件实际齿廓上每点的坐标 (X_k, Y_k) 。数据处理时,将工件检测坐标平移到 $X_a O_a Y_a$ 中:

$$X_i = X_a + A \quad Y_i = Y_a + B \quad (2)$$

式中: A, B —工件检测坐标原点在 $X_a O_a Y_a$ 中坐标。

计算 (X_k, Y_k) 到理想齿廓的法向距离 δ_k (算法略)。改变 A, B 进行二维搜索,使误差平方和为最小。

即: $\Delta = \max \delta_i$

$$S. t \quad \min \left(\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \right) \quad (3)$$

式中: n —测量点数;

Δ 即为摆线轮齿形最大误差值, δ_i 为各测量点齿形误差。对应齿槽宽方向长度, 便可作出齿形误差曲线, 如图 5.6.7 等所示。

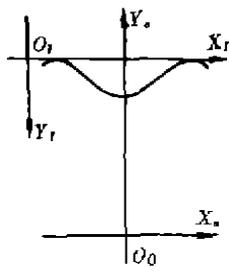


图 3 工件检测坐标

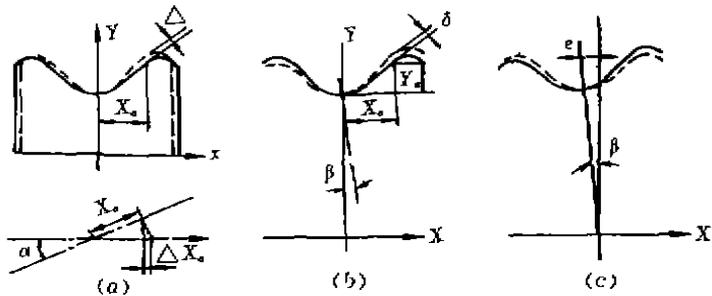


图 4 滚轮安装位置误差对齿形精度的影响

4.2 滚轮安装位置误差对齿形精度的影响

4.2.1 滚轮轴线的水平转角对齿形精度的影响

滚轮轴线与砂轮主轴轴线在水平方向不平时, 将引起工件齿形发生如图 4a 虚线所示的变化, 设水平转角 α , 引起的齿形误差为:

$$\Delta \approx \max \left[X_a (1 - \cos \alpha) \frac{dY_a/d\varphi}{\sqrt{(dX_a/d\varphi)^2 + (dY_a/d\varphi)^2}} \right] \quad (4)$$

S. t $0 \leq \varphi \leq \varphi_r$

式中, Δ —水平转角引起的最大齿形误差; φ_r —齿顶处针轮相对于转臂的转角。

对 B5 型 $Z_a = 22$ 二齿差摆线齿轮, 最大齿形误差发生在 $\varphi = 1.415^\circ$ 附近, $X_a = 17.76$ 处, 当水平转角 $\alpha = 1^\circ$ 时, $\Delta = 1.14 \times 10^{-3} \text{ mm}$; $\alpha = 3^\circ$ 时, $\Delta = 1.27 \times 10^{-2} \text{ mm}$; $\alpha = 5^\circ$ 时, $\Delta = 2.85 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 可见, 水平转角误差对齿形误差影响较小。且滚轮安装时, 在滚轮侧面容易打表找正, 有助于减小此项误差。

4.2.2 滚轮偏角对齿形精度的影响

滚轮偏角(即滚轮轴线与砂轮主轴在工件轴线垂直平面内转角)对齿形误差的影响较大, 如图 4b 所示。滚轮偏角 β 引起的齿形误差为:

$$\delta \approx \beta \cdot \sqrt{X_a^2 + Y_a^2} \quad (5)$$

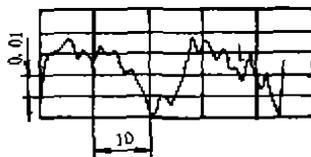


图 5 存在滚轮偏角时误差

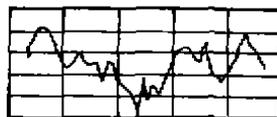


图 6 滚轮轴截形误差

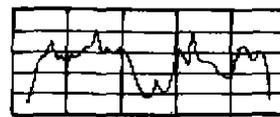


图 7 摆线齿轮齿形误差

当滚轮存在图 4b 所示的偏角 β 时, 由于滚轮左低右高, 修整出的砂轮在磨齿时使左齿顶被削去, 右齿顶升高, 齿形误差发生倾斜变化, 如图 5 实际检测工件的齿形误差所示。根据

测得的齿形误差,即可调整滚轮偏角,使得齿顶过渡非常光滑,控制滚轮偏角对齿形误差的影响。

4.2.3 滚轮中心与砂轮中心位置偏差对齿形粗度的影响

由于摆线齿廓在齿顶连续过渡,滚轮中心与砂轮中心位置偏差 e 引起的齿形误差,实质上相当于一个等量的滚轮偏角引起的齿形误差,如图4c所示。

$$\beta = e / r_f \quad (6)$$

式中, e —滚轮中心与砂轮中心位置偏差(mm); r_f —摆线轮齿根圆半径(mm)。

4.3 滚轮制造误差对齿形精度的影响

在滚轮安装找正后,影响齿形精度的主要是滚轮轴截形制造误差和滚轮到工件的复映误差。本文的试验研究表明:滚轮轴截形制造误差将全部进入摆线齿轮齿形误差,滚轮到工件的复映误差很小($<0.01\text{mm}$),对齿形精度几乎没有影响。图6是在成形磨削B5型1:11减速机二齿差摆线轮时,用刻线 0.01mm 的小型工具显微镜对滚轮轴截形某次检测得到的齿形误差曲线,图7是用该滚轮修整砂轮时,对被磨工件摆线齿轮齿形误差的检测结果。由图可见,工件误差曲线与滚轮误差曲线高度一致。以不同精度的滚压轮修整砂轮后,磨出的工件齿形误差与滚轮截形误差的关系如图8所示。可见,从滚轮到工件的复映误差很小,不超过小型工具显微镜的最小刻度。

4.4 机床误差对磨齿精度的影响

机床误差主要对周节误差、齿向误差产生影响。由于成形磨齿机结构简单,运动链少、精度较高。以重庆大学和重庆机床厂联合研制了Y7332成形磨齿机为例,机床工件主轴轴线对主柱滑板移动的平行度为 a 向 $0.008/1000\text{mm}$, b 向 $0.002/1000\text{mm}$;在 $\phi 35\text{mm}$ 圆上,周节偏差 0.01mm ,周节累积误差 0.015mm ,完全满足摆线齿轮磨齿要求。实验研究表明滚轮的形状误差基本上是线性

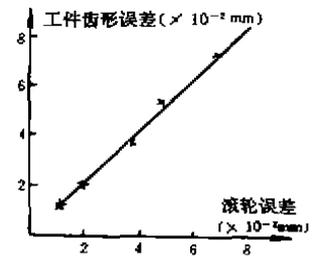


图8 滚轮工件误差复映规律

地复映在工件上,在滚轮的安装误差中,水平转角偏差由于不在误差的敏感方向,所以对形状精度影响不大;滚轮中心与砂轮中心的位置偏差对顶根距的影响极微,但对形状精度影响较大,因此应加控制,滚轮安装偏角对形状和粗糙度的影响很大,必须严加控制。

5 加工表面质量的实验研究

我们采用正交设计就磨削深度、纵向进给量、砂轮修整进刀量等三因素对表面粗糙度和显微硬度及磨削功率的影响进行了试验研究。结果表明,磨削深度对表面粗糙度的影响最大,纵向进给量次之,砂轮修整进给量的影响最小。最佳的参数为磨削深度 $0.01\sim 0.02\text{mm}$,纵向进给量 $0.75\sim 1.5\text{m}/\text{r}\cdot\text{min}$ 。

磨削深度和纵向进给量对表面显微硬度的影响基本上呈线性关系,但前者的影响较后者显著。

试验结果表明,磨削深度对磨削功率的影响最大,其次为纵向进给量,砂轮修整进给量的影响较小。

综上所述,可以看出,精磨时,为了取得较好的表面质量,磨削深度宜在 $0.01\sim 0.02\text{mm}$,进

给量在0.07~1.5 m/min 范围内。粗磨时,为了提高生产率可取磨削深度 $a=0.05\sim 0.1$ mm,进给量 $f=3\sim 10$ m/min。

6 成形磨削法的技术经济效益

表 1 摆线齿线检测结果

检测项目		展成磨齿法	成形磨齿法
齿形误差		0.06 mm	0.01 mm
周节偏差		0.10~0.12 mm	0.01~0.02 mm
周节累积误差		0.10~0.12 mm	0.03~0.04 mm
齿圈跳动		0.05 mm	0.03 mm
棒距误差		0.10 mm	0.05 mm
根距误差		0.10 mm	0.05 mm
顶距误差		0.01 mm	0.05 mm
表面粗糙度	Ra	0.24~0.72 μm	0.08~0.48 μm
	Rz	1.24~6.92 μm	0.56~3.44 μm
	Rmax	2.32~10.52 μm	0.88~5.64 μm
磁力控伤		无烧伤裂纹(1级)	无烧伤裂纹(1级)
齿顶修形		不圆滑	过渡圆滑
整机噪声		76 dB	74 dB

本研究成果于1992年4月通过由重庆市科委组织的技术鉴定,此前,已用于重庆传动机械厂的生产,取得了巨大的效益:

(1)生产率:每次装夹6个工件,磨削时间为1~1.5小时,单件工时为10~15分钟;

原用展成法磨削时每次只能装夹两件,磨削时间需3小时,单件工时为90分钟;

同展成法相较,成形磨法提高生产率6~9倍。

(2)加工质量:检测结果(见表1)表明成形磨法显著地提高了加工质量,如齿形误差由原来的0.06 mm 减小到0.01 mm;表面粗糙度由 $Ra=0.24\sim 0.72 \mu\text{m}$ 减小到 $Ra=0.08\sim 0.48 \mu\text{m}$;齿顶修形由不圆滑变得过渡圆滑;整机噪声由76 dB 降至74 dB。

(3)加工成本较原方法降低2~3倍。

参 考 文 献

- 1 冯澄宙.二齿差摆线针轮行星传动原理与几何计算.齿轮,1986,(3),1~3
- 2 李力行等.摆线针轮行星传动中通用的摆线轮齿形方式.齿轮,1980,1