

二轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性法铣齿研究^{*}

张 华 邓效忠 徐增军

【摘要】 参照 Gleason 磨齿机的变性法加工原理,推理工件与摇台间变性法展成运动的滚比变化关系。编制数控程序,在两轴数控螺旋锥齿轮铣齿机上实现变性展成运动。利用该方法切制准双曲面齿轮,实验结果表明,此方法完全可行。

关键词: 二轴数控螺旋锥齿轮铣齿机 变性法加工 准双曲面齿轮

中图分类号: TH132.421 **文献标识码:** A

Modified-roll Method Study about 2-axis CNC Spiral Bevel Gear Machine

Zhang Hua Deng Xiaozhong Xu Zengjun
(He'nan University of Science and Technology)

Abstract

Referring to the modified-roll theory of Gleason's grinder, the transmission relation between machine cradle and workpiece was gained. By using a 2-axis CNC spiral bevel gear machine, the relation by NC program could be realized. With a machining experiment on 2-axis CNC spiral bevel gear machine, a valuable conclusion could be obtained—the hypoid gear could be manufactured with the modified-roll method.

Key words 2-axis CNC spiral bevel gear machine, Modified-roll method, Hypoid gear

引言

螺旋锥齿轮磨齿加工时砂轮与齿面的啮合应该模拟铣齿加工时刀具切削面与齿面的啮合,故磨齿机的设计原理应该与铣齿机相同,只是用砂轮代替了刀盘。参照磨齿机的工作原理,寻求数控螺旋锥齿轮铣齿机上产形轮与工件间的相对运动关系,就可以实现准双曲面齿轮的变性法铣齿。

本文以 Gleason 公司的 No. 463 磨齿机为例,分析其变性机构的工作原理,并以此推导产形轮与工件间的展成运动关系。经实验,在摇台式数控螺旋锥齿轮铣齿机上,通过数控系统驱动工作轴实现该运动关系。

1 变性法展成运动方程式

利用变性法进行切齿时,机床在整个展成运动中的切齿滚比是变化的,而不是恒定的^[1~2]。根据 Gleason 的实践,工件和摇台之间的运动联系可以用 5 阶泰勒级数来描绘。小轮转角 ϕ_1 和摇台转角 ϕ_p 之间的旋转角度可以用非线性方程来表示^[3]

$$\phi_1 = f(\phi_p) \quad f \in C^K \quad (K \geq 3) \quad (1)$$

假设,当 $\phi_p = 0$ 时, $\phi_1 = 0$, 在 $\phi_p = 0$ 的邻域中可以用泰勒级数展开为

$$\phi_1 = f'(0)\phi_p + \frac{1}{2!}f''(0)\phi_p^2 + \dots \quad (2)$$

由于

$$\frac{d\phi_1}{d\phi_p} = f'(\phi_p) \quad (3)$$

收稿日期: 2006-03-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50675061)和河南省重点科技攻关项目(项目编号:0523021100)

张 华 河南科技大学机电工程学院 讲师 博士生(江苏大学), 471003 洛阳市

邓效忠 河南科技大学机电工程学院 教授

徐增军 河南科技大学机电工程学院 实验师

$$1 + \frac{K \cos \psi}{r_u + \Delta T} = R_{ac} \quad (20)$$

$$2C = \frac{R_{ac} - 1}{R_{ac}} \tan \psi \quad (21)$$

$$6CX = \frac{1 + 3(2K) \tan \psi + \frac{(1 - R_{ac})^3}{K \cos \psi} \left(\frac{r_u^3}{K^2} + \Delta T \right)}{1 + \frac{r_u + \Delta T}{K \cos \psi}} \quad (22)$$

在实际的机床调整中,如式(9)选择在初始调整位置时,即当 $\phi_p = 0, \phi_1 = 0$ 时,确定该位置的 R_{ap} 、 $2C$ 和 $6CX$,借助于这3个参数的值来选择合适的凸轮。通过式(19)可求得 R_{ac} ,但关键是如何确定调整值 r_u 、 ψ 和 ΔT 。也就是,如何求解式(20)~(22)组成的方程组,该方程组里有 r_u 、 ψ 和 ΔT 共3个未知量,从理论上说这个方程组有唯一的解,但是在机械式机床的凸轮机构里,凸轮半径有一系列的固定值,因此实际上不能同时满足这3个方程。

由式(21)可以确定导板角

$$\psi = \arctan \left(\frac{2CR_{ac}}{R_{ac} - 1} \right) \quad (23)$$

由式(20)可知,凸轮节圆半径 r_u 和偏置距 ΔT 需满足

$$r_u + \Delta T = \frac{K \cos \psi}{R_{ac} - 1} \quad (24)$$

通过计算可求得 r_u 的理论值, r_u 值的详细计算过程参考文献[1]。在实际选择时,可以选择比较靠近该值的实际凸轮半径,这样实际得到的 $6CX$ 比较符合理论值。如所得的结果不理想,通过式(19)改变跨齿数 k 后重新计算。当确定凸轮节圆半径 r_u 后,偏置距 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{K \cos \psi}{R_{ac} - 1} - r_u \quad (25)$$

由实际凸轮半径 r_u ,可以查得相应的凸轮安装值 T_1 ,则实际的凸轮安装位置调整值 T 为

$$T = T_1 + \Delta T \quad (26)$$

3 铣齿实验

3.1 实验原理

在数控机床中,由于没有凸轮机构,因此也就没有凸轮尺寸对于方程组解的限制。可以构造任意假想“理想凸轮”,该凸轮尺寸完全满足式(20)~(22)所组成的方程组。也就是说,从3个方程所组成的方程组中,直接求出 r_u 、 ψ 和 ΔT 共3个未知量的精确值。将这3个值代入式(17),就确定了摇台与工件间的展成关系。

3.2 铣齿加工参数设计举例

以一对准双曲面齿轮为例,其基本参数见表1。

为保证加工效率,利用 Gleason HFM 法调整计算,即大轮采用成形法拉齿,小轮采用变性法铣齿。大轮拉齿数据从略,小轮的切齿刀盘参数和机床调整数据如表2所示。

表1 准双曲面齿轮副的轮坯参数

Tab. 1 Parameters of the hypoid gear

参数	数值	
	小轮	大轮
齿数	10	41
节圆直径/mm		195.38
偏置距/mm	31.8	
齿面宽/mm		28
名义中点螺旋角/(°)	50	
旋向	左旋	右旋
轴交角/(°)		90
平均压力角/(°)		20.5
轮齿收缩方式		标准收缩

表2 小轮切齿刀盘参数与 GH-35 机床调整参数

Tab. 2 Parameters of pinion cutter and parameters of GH-35 machine setting

参数	数值		
	小轮粗切	小轮凹面	小轮凸面
刀盘直径/mm	190.5	202.18	192.28
刀盘错刀距/mm	1.31		
刀盘齿形角/(°)	内: -27 外: 14	10	-28
机床安装角/(°)	14.53	14.53	14.53
偏角/(°)	77.36	97.17	88.66
摇台角/(°)	185.59	216.755	220.659
调整位置滚比 R_{ap}	4.352 5	5.406	4.596
二阶变性系数 $2C$		0.245 3	-0.141 4
三阶变性系数 $6CX$		0.180 5	0.06
垂直轮位/mm	32.08	44.5	44.5
水平轮位/mm	0.03	8.72	6.23
跳齿数	9	9	9

首先计算 No. 463 磨齿机上的凸轮的参数,以小轮的凹面为例,按表2中的数据,算得导板安装角为 16.399° ,理论凸轮半径为 72.743 mm,理论凸轮安装修正量为 0.261 mm;在 No. 463 磨齿机上,选择与理论值最接近的凸轮号为22号,其相应凸轮半径为 73.086 mm,凸轮安装修正量 -0.083 mm,则实际使用 $2C$ 为 $0.245 3$, $6CX$ 为 $0.268 1$ 。

将磨齿机的导板安装角、理论凸轮尺寸、实际凸轮尺寸、安装修正量分别代入式(17),结合式(18),

得到工件转角 ϕ_1 和摇台转角 ϕ_p 之间的展成函数关系式为

$$\sin 16.399 + \sin \left[\frac{72.743}{381} \left(\phi_p - \frac{10}{9} \phi_1 \right) \right] + \sin \left(\phi_p - 16.399 \right) + \frac{0.261}{381} \sin \left(\phi_p - \frac{10}{9} \phi_1 \right) = 0 \quad (27)$$

$$\sin 16.399 + \sin \left[\frac{73.086}{381} \left(\phi_p - \frac{10}{9} \phi_1 \right) \right] + \sin \left(\phi_p - 16.399 \right) - \frac{0.083}{381} \sin \left(\phi_p - \frac{10}{9} \phi_1 \right) = 0 \quad (28)$$

式(27)为理论关系式,式(28)为选择凸轮后磨齿机应采用的关系式。在数控铣齿机上由于不受凸轮尺寸的限制,就可以直接实现式(27)所确定的展成关系。在数控铣齿机上其数控插补的步长为0.001,给定一摇台转角 ϕ_p ,求得对应的工件转角 ϕ_1 ,得到一系列切削滚比随摇台角变化的离散点。为了对展成关系进一步研究,可以对这些离散点利用最小二乘法进行多项式拟合。图2为这些离散点的连线,曲线1为理论上工件与摇台间的展成滚比变化曲线,曲线2为计算 No. 463 磨齿机工作时的展成滚比变化曲线。由图可见,两者非常接近。

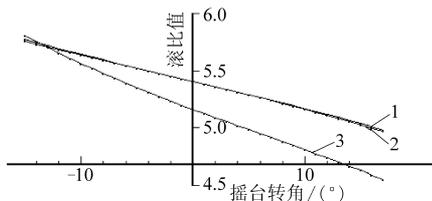


图2 展成滚比变化曲线

Fig. 2 Varying curves of generate roll ratio

3.3 铣齿实验

实验采用 GH-35 型摇台式数控螺旋锥齿轮铣齿机。其在原有机械机构的基础上,去除滚比、分齿传动链,采用两轴数控,即摇台与工件直接由伺服电动机驱动^[5]。用液压缸驱动床位来实现铣削所需的辅助运动。这种改装并没有从根本上改变机械式机床的铣齿模式。对于铣齿之后的接触区修正,除了对于滚比的修正,其他各种对于接触区的修正调整方式还是和机械式机床相同。但是,摇台与工件间的展成运动关系是靠数控轴间的相对运动来实现的,这就为变性法铣齿提供了可能。利用图2曲线1、表2,编制数控程序^[6],对小轮的凹面进行铣齿实验。

由于 HFM 调整卡中有变性系数计算的精度问题,在实验的过程中发现:

(1) 开始时接触区呈现比较严重的对角接触,即在小轮凹面小端顶部和大端根部同时呈现一条线形印痕,在滚动检验机上噪声严重,是严重的边缘接

触。这说明在小端时切削滚比太小,而大端太大,因此需要调整二阶变性系数 $2C$ 。根据经验并结合图形将 $2C$ 以 0.04 为增幅逐步增大,每一次试切后对角接触的程度便会减小,接触印痕从小轮两端向齿面中部靠拢,规律非常明显。当将 $2C$ 增至 0.40 时,两端的接触印痕集中在中部,呈现出“工”字形过宽接触,相应大轮凸面的接触印痕拓印如图3所示。

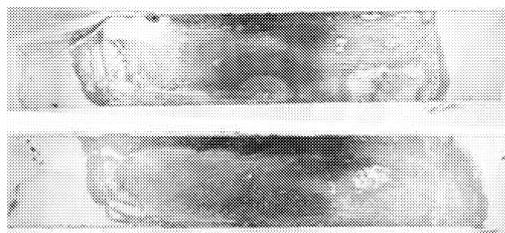


图3 $2C$ 修正后过宽的接触区拓印

Fig. 3 Wide tooth bearings rubbings after correcting $2C$

(2) 当小轮凹面接触区集中在齿面中部后,出现了接触区过宽的不良接触。利用常规的对接触区过宽的修正方法,按一定比例对铣齿机的各调整项进行修正。经计算,对宽接触区修正的比例为:垂直轮位每增大 1 mm,偏心角减小 1.3° ,水平轮位增大 1.1 mm,切削滚比减小 0.04。按照此规律,当切削量很小时,明显地看到刀齿会沿着齿面的顶部和根部切掉薄薄的一层,留下中部窄而长的带状红丹粉区域。最后大轮接触区拓印如图4所示。

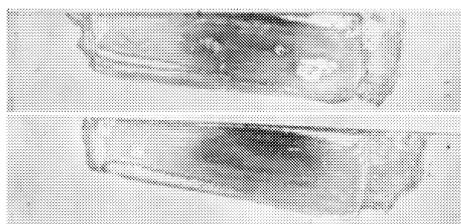


图4 修宽后的接触区拓印

Fig. 4 Tooth bearings rubbings after correcting width

(3) 最后修正后 $2C$ 为 0.40, $6CX$ 为 0.180 5, 调整后滚比 $R_{ab} = 5.156$ 。图2中,曲线3为修正后的展成滚比变化曲线。在滚动检验机上,滚动检验后的大轮凸面照片如图5所示,图4就是该齿面的拓印。此时可以利用常规的修正方法,对接触区作进一步修正,使得接触印痕更加理想。

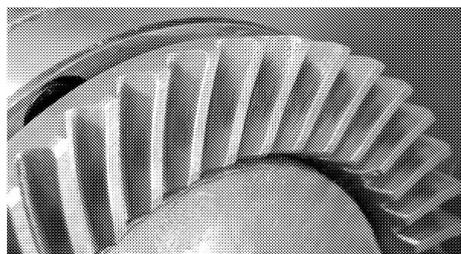


图5 最后的大轮凸面接触印痕

Fig. 5 Final tooth bearings on gear convex

度,然后用本文算法进行光顺,可得较为理想的结果。

6 结束语

在总结出较全面的平面曲线光顺准则基础上,提出了基于曲率单调均匀变化约束的平面 B 样条曲线光顺算法,该算法与文献[7]的光顺算法相比,

由于用到了能反映设计意图的目标曲率云图,因而使得曲线的光顺过程更直观、形象,容易让人理解;且考虑了曲线段曲率变化的均匀性,修改了曲线段曲率单调变化约束条件,使得光顺结果曲线在保证曲率按设计意图单调变化的情况下,不会出现曲率变化率为零的情况,同时曲率均匀变化,因而能得到更为理想的光顺曲线。

参 考 文 献

- 1 Farin G, Sapidis N. Curvature and the fairness of curves and surfaces curvature[J]. IEEE Comput. Graph. Appl., 1989, 9(2):52~57.
- 2 Nowacki H, Liu D, Lu X. Fairing Bezier curves with constraints[J]. CAGD, 1990, 7(1~4):43~55.
- 3 Sapidis N S, Frey W H. Controlling the curvature of quadratic Bezier curve[J]. CAGD, 1992, 9(2):85~91.
- 4 Mineur Y, Lichah T, Castelain J M, et al. A shape controlled fitting method for Bezier curves[J]. CAGD, 1998, 15(9):879~891.
- 5 Frey W H, Field D A. Designing Bezier conic segments with monotone curvature[J]. CAGD, 2000, 17(6):457~483.
- 6 王玉林,汪叔淳,李迪,等. 二次有理 Bezier 曲线曲率单调条件的研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(7): 508~511.
- 7 Wang Yulin, Zhao Bingyan, Zhang Luzou, et al. Designing fair curves using monotone curvature pieces[J]. CAGD, 2004, 21(5):515~527.
- 8 Pottmann H. Curves and tensor product surfaces with third order geometric continuity[C]. Proceedings of Third International Conference on Engineering Graphics and Descriptive Geometry, 1988.

(上接第 140 页)

(4) 由于展成过程中滚比的实时变化,可以灵活地利用滚比修正接触区。特别是对于常规方法难以修正的“对角接触”,可以轻易地利用滚比的变化来修正,且效果非常明显。

4 结束语

针对当前的加工现状,利用明确的理论和方法,

在采用 HFM 法的基础上,使得摇台式数控螺旋锥齿轮铣齿机能够加工准双曲面齿轮。该方法不增加任何成本,充分挖掘机床自身的潜力,提升了机床的加工性能。

参 考 文 献

- 1 曾韬. 螺旋锥齿轮的设计和加工[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.
- 2 郑昌启. 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- 3 Litvin F L. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gear[R]. NASA, CR, 4342, 1991.
- 4 田行斌. 弧齿锥齿轮啮合质量的计算仿真和控制[D]. 西安:西北工业大学, 2000.
- 5 陈安久. 弧形伞齿轮铣齿机的改造[C]//第三届全国现代设备管理及应用技术研讨会交流论文集, 2004.
- 6 张华,邓效忠,曹雪梅. 二轴数控螺旋锥齿轮铣齿机的加工程序编制[J]. 机械制造与自动化, 2004, 33(2): 30~31.
- 7 张华,邓效忠. 基于局部综合的非零变位弧齿锥齿轮切齿仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5):204~206.