

整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工

徐彦伟¹, 张连洪¹, 魏巍¹, 刘德全², 王威²

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津第一机床总厂, 天津 300180)

摘要: 弧齿锥齿轮铣齿机结构和加工原理复杂, 是复杂制造装备的典型代表, 因此, 提高中国弧齿锥齿轮铣齿机的制造水平具有重要意义。通过分析弧齿锥齿轮加工原理和凤凰 II 型弧齿锥齿轮铣齿机结构及运动关系, 推导了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机各轴运动参数的计算方法, 利用 VERICUT 三维仿真加工软件平台, 建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型, 并对一对给定几何参数的弧齿锥齿轮进行了虚拟加工。仿真结果表明, 机床各运动模块与切齿刀盘在虚拟加工过程中没有出现干涉等设计缺陷, 虚拟加工结果满足弧齿锥齿轮铣齿机功能性验证要求。弧齿锥齿轮铣齿机仿真加工可以为弧齿锥齿轮铣齿机设计提供参考依据。

关键词: 弧齿锥齿轮铣齿机, 加工模型, 整体结构, 虚拟加工

中图分类号: TH132.42, TP391.73

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0071-05

徐彦伟, 张连洪, 魏巍, 等. 整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 71-75.

Xu Yanwei, Zhang Lianhong, Wei Wei, et al. Virtual machining on monolithic structure spiral bevel gear milling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 71-75. (in Chinese with English abstract)

0 引言

弧齿锥齿轮具有轮齿强度高、运行平稳、重合度高、承载能力强等特点, 广泛用于汽车、拖拉机、工程机械、航空、航天、船舶等^[1,2]。弧齿锥齿轮的制造精度和质量直接影响设备的传动效率、噪声、运动精度和使用寿命等性能。格里森公司凤凰 II 型整体结构式机床代表当今弧齿锥齿轮机床领域先进技术^[3,4], 当前国内弧齿锥齿轮机床主要以 Free-form 型铣齿机进行研究^[5-8], 与国际先进水平尚有一定差距。研究整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型对提高中国弧齿锥齿轮铣齿机的设计制造水平具有重要意义。

虚拟加工 (virtual machining, VM) 是实际加工在虚拟环境下的映射, 虚拟加工可对加工过程的各个环节进行评价、预测, 优化加工过程^[9], 将虚拟加工技术应用于机床开发, 可在设计阶段预测机床性能, 提高设计精度, 改善机床质量^[10,11]。近年来, 国内不少研究成果报道了弧齿锥齿轮仿真加工的方法^[12-15], 但基本都是在 AutoCAD 环境下以 Free-form 型铣齿机进行研究。本文利用数控机床仿真加工软件 VERICUT 建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型, 并对一对给定几何参数的弧齿锥齿轮进行了虚拟加工。利用整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型, 可同时进行刀具轨迹和机床运动仿真, 清晰地看到机床和刀具以及工件在加工过程中的运

动情况, 检测机床在加工过程中存在的缺陷^[16]。

1 整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机加工模型

1.1 弧齿锥齿轮加工原理

弧齿锥齿轮通常按照“假想平顶齿轮”原理进行加工^[17]。在机械摇台式机床中, 假想平顶齿轮与机床摇台同心, 切齿刀盘偏心地安装在机床摇台上并随摇台一起摆动, 刀盘绕自身轴线旋转形成内、外两个切削刃锥面, 切削刃锥面的一部分代替假想平顶齿轮 (产形轮) 与工件齿轮相啮合的齿, 假想平顶齿轮与工件齿轮绕各自轴线按一定滚比旋转, 做无隙啮合, 刀盘切削刃在工件齿轮毛坯上逐渐切出齿形。摇台摆动一次切齿刀盘在工件齿轮毛坯上切出一个齿槽, 然后摇台反转到初始位置, 同时工作台后退, 完成一个切齿循环。工件齿轮毛坯转过分齿角度, 重复上述运动切出下一个齿槽, 反复进行即可切出整个齿轮。图 1 为假想平顶齿轮加工弧齿锥齿轮的切齿原理示意图^[3]。

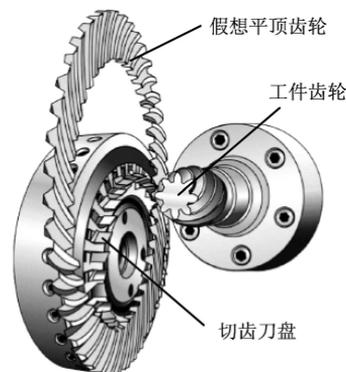


图1 弧齿锥齿轮切齿原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of machining on spiral bevel gears with imaginary crown generating gear

收稿日期: 2007-12-26 修订日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875182); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2006AA04Z127, 2007AA042005); 天津市先进制造技术与装备重点实验室开放课题资助项目

作者简介: 徐彦伟 (1978-), 男, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事弧齿锥齿轮铣齿机精度设计, 虚拟仿真加工研究等。天津市南开区卫津路 92 号 天津大学机械工程学院机器人与汽车技术研究所, 300072。

Email: xuyanweiluoyang@163.com

1.2 整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机运动参数

整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机采用整体立柱式床身设计，刀盘由直接驱动轴马达驱动，并可随主轴箱一起绕固定在 Z 工作台上的 B 轴旋转，同时随 Z 工作台沿床身立柱侧面前后移动；固定在 X 工作台上的 A 轴可实现工件转动，X 工作台可沿床身立柱侧面左右移动，并随 Y 工作台上下移动。机床结构简图如图 2。

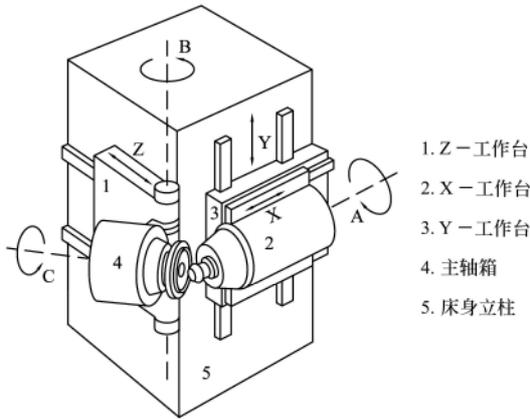


图 2 整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机结构简图
Fig.2 Structure sketch of monolithic structure spiral bevel gear milling machine

弧齿锥齿轮加工的实质是实现切削刀盘和工件的相对运动^[1]。整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机并没有改变弧齿锥齿轮的加工原理，依然采用假想平顶齿轮原理进行切齿加工，只是在机床上很难看到假想平顶齿轮的概念。切齿加工时刀具、假想平顶齿轮和工件的相对位置组成一个可随机床一起运动的切齿加工集合。通过确定 X、Y、Z 工作台和 A、B 旋转轴在切齿过程中每一时刻的位置，控制刀具和工件的相对位置及相对运动，使其在运动的

切齿加工集合中满足弧齿锥齿轮加工原理即可实现弧齿锥齿轮切齿加工。

图 3 为整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机运动参数计算原理图。图 3a 为机床初始状态。坐标系 Σ_m 、 Σ_k 和 Σ_w 分别与机床、刀盘及工件固连，旋转轴 B 在初始状态和 Y_m 轴重合， O_w 为工件齿轮节锥顶点， ΔX 为刀盘轴线和旋转轴 B 轴心线之间的距离， ΔZ 为刀尖平面和刀盘底面之间距离，刀盘底面和旋转轴 B 轴心线在机床初始状态共面， ΔX_w 为工件齿轮坐标系原点和机床坐标系原点在机床初始状态时的距离。

将刀盘和主轴箱一起绕 B 轴旋转 δ_m (根锥角) 角度，同时和 Z 工作台沿 Z_m 轴反方向移动 ΔZ_1 距离；工件和 X 工作台一起沿 X_m 轴反方向移动 ΔX_1 距离，使得刀盘轴线 Z_k 和工件齿轮节锥顶点相交于 O_w 点，刀尖平面和与之平行且与工件齿轮根锥面相切的平面之间的距离等于 f_0 ，如图 3b。 f_0 值变化实现工件进给， f_0 等于工件齿轮全齿高 h 时刀尖平面和工件齿轮外圆相切， f_0 等于零时刀尖平面和工件齿轮根锥面相切。

$$\Delta Z_1 = \Delta X \sin \delta_m + (\Delta Z + f_0) \cos \delta_m \quad (1)$$

$$\Delta X_1 = \Delta X \cos \delta_m - (\Delta Z + f_0) \sin \delta_m + \Delta X_w \quad (2)$$

以图 3b 中 O_k 为坐标原点建立辅助坐标系 Σ_1 并在其中建立辅助坐标系 Σ_c ， $X_1O_1Y_1$ 和 $X_cO_cY_c$ 与刀尖平面共面，径向刀位 S_r 和角向刀位 q 决定 O_c 点在坐标系 Σ_1 中的位置。将工件沿 X、Y、Z 工作台平移 ΔX_2 、 ΔY_2 和 ΔZ_2 距离，使其坐标系原点和 Z_c 轴相交于 O_w 点， O_c 和 O_w 点之间的距离等于 f_0 ，如图 3c。

$$\Delta Y_2 = S_r \sin q \quad (3)$$

$$\Delta X_2 = S_r \cos q \cos \delta_m \quad (4)$$

$$\Delta Z_2 = S_r \cos q \sin \delta_m \quad (5)$$

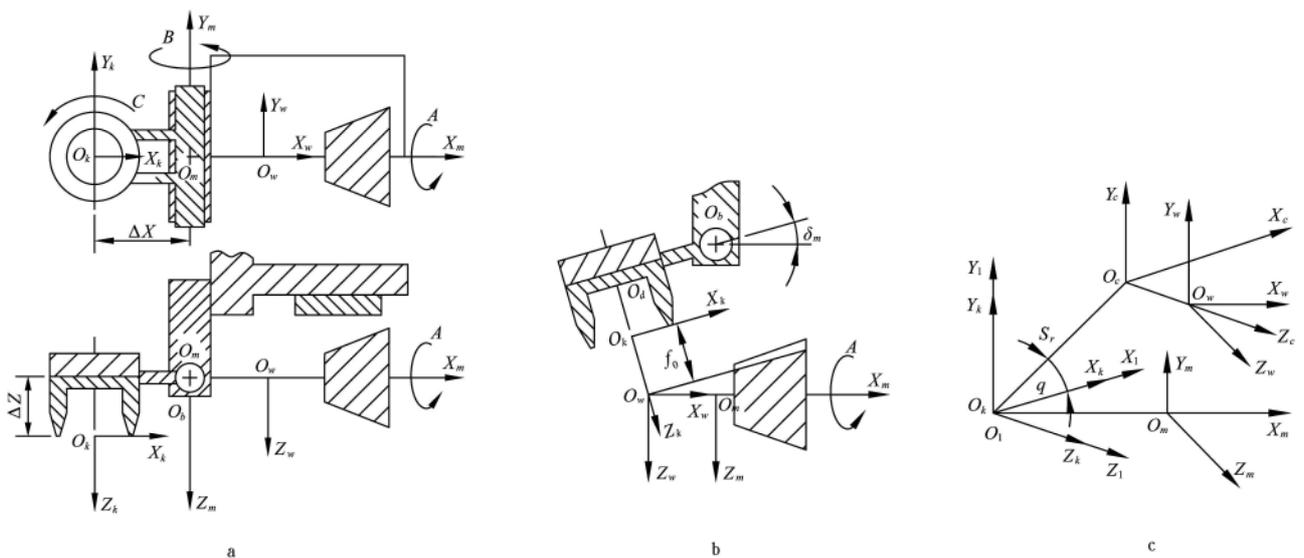


图 3 整体结构式弧齿锥齿轮机床运动参数计算原理图
Fig.3 Schematic diagram of motion parameters calculation of monolithic structure spiral bevel gear machine tool

设在切齿过程中某一时刻假想平顶齿轮与工件齿轮的瞬时滚比为 m_{cw} ，摇台转角瞬时增量为 $d\phi_c$ ，工件齿轮

转角相应增量为 $d\phi_w$ ，则 X、Y、Z 工作台的瞬时变化量 ΔX_3 、 ΔY_3 和 ΔZ_3 为

$$\Delta Y_3 = S_r \sin(\varphi_c + d\varphi_c) - S_r \sin \varphi_c \quad (6)$$

$$\Delta X_3 = [S_r \sin(\varphi_c + d\varphi_c) - S_r \sin \varphi_c] \cos \delta_m \quad (7)$$

$$\Delta Z_3 = [S_r \sin(\varphi_c + d\varphi_c) - S_r \sin \varphi_c] \sin \delta_m \quad (8)$$

$$d\varphi_c = m_{cw} d\varphi_w \quad (9)$$

在切齿过程中，假想平顶齿轮角速度 ω_c 和工件齿轮角速度 ω_w 满足一定的函数关系 F 。加工大轮时 F 一般为线性关系，采用变性法修正加工小轮时， F 为二次或高次函数关系。

$$\omega_c = F(\omega_w) \quad (10)$$

设假想平顶齿轮初始转角为 φ_{c1} ，工件齿轮初始转角为 φ_{w1} ，则由上述机床调整计算公式和整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机结构与几何关系及切齿过程中假想平顶齿轮与工件齿轮须满足弧齿锥齿轮切齿加工原理的约束条件，可以求得整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机 X、Y、Z 工作台与 A、B 旋转轴在加工过程中的运动参数，即整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机数字加工模型。

$$\angle B = \delta_m \quad (11)$$

$$\angle A = \varphi_{w1} \pm \int_0^t \omega_w dt \quad (12)$$

$$X = \Delta X_w + \Delta X \cos \angle B - (\Delta Z + f_0) \sin \angle B + S_r \cos \varphi_{c1} \cos \angle B + S_r \cos \left(\int_0^t F(\omega_w) dt \right) \cos \angle B \quad (13)$$

$$Y = \pm S_r \sin \varphi_{c1} \mp S_r \sin \left(\int_0^t F(\omega_w) dt \right) \quad (14)$$

$$Z = -(\Delta X \sin \angle B + (\Delta Z + f_0) \cos \angle B + S_r \cos \varphi_{c1} \sin \angle B + S_r \cos \left(\int_0^t F(\omega_w) dt \right) \sin \angle B) \quad (15)$$

式中 加工左旋齿轮时取“－”，右旋时取“＋”。

从以上模型可以求得整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机 X、Y、Z 工作台以及与之联动的 A、B 旋转轴在虚拟加工过程中的瞬时位置，将其编辑为数控加工代码，即可为机床各部件提供仿真加工过程中的运动控制依据。

2 整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工

本文在建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机数字加工模型的基础上，通过 VERICUT 虚拟加工软件平台，建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟机床模型，并编写了机床控制文件；数字加工模型与虚拟机床模型共同组成整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型。利用切削刀盘参数计算公式^[17]计算了刀盘的几何参数，并利用 VERICUT 虚拟加工软件平台建立了刀盘三维模型；通过 Pro/Einger 建立了一对给定几何参数的弧齿锥齿轮的齿坯三维模型，并将其导入 VERICUT 虚拟加工环境；利用 MATLAB 计算了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机的 X、Y、Z 工作台及 A、B 旋转轴在切齿加工过程中的相对运动参数，并将其转变为数控加工程序代码，对给定的弧齿锥齿轮进行虚拟加工。弧齿锥齿轮加工的双面切削刀盘基本参数，虚拟加工大轮的机床调整参数及工件齿轮的基本几何参数如表 1。

表 1 基本参数

Table 1 Basic parameters

项 目	参 数	项 目	参 数	
双面	刀盘直径/mm	304.8	内切刀尖直径/mm	300.3
切削	刀顶距/mm	4.5	内切刃压力角/(°)	21
刀盘	外切刀尖直径/mm	309.3	外切刃压力角/(°)	-19
机床调整	径向刀位/mm	149.326	水平轮位修正量	0
	角向刀位/(°)	56.50	床位	0
	垂直轮位	0	工件安装角/(°)	68.66
工件齿轮	齿数	15(小轮), 46(大轮)	螺旋角/(°)	35
	分度圆直径/mm	123.3(小轮)	齿顶高/mm	9.85(小轮)
		378.12(大轮)	齿顶高/mm	4.12(大轮)
	分锥角/(°)	18.06(小轮)	齿根高/mm	5.67(小轮)
		71.94(大轮)	齿根高/mm	11.4(大轮)
	模数/mm	8.22	压力角/(°)	20
	齿宽/mm	57.15	轴交角/(°)	90
	工作齿高/mm	13.974	锥距/mm	198.86
	全齿高/mm	15.519	齿距/mm	25.82

2.1 虚拟加工机床运动参数

根据整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机运动参数计算公式，通过分析切齿加工过程中机床运动循环关系，依据整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟机床的初始位置（图 3a 中 ΔX 、 ΔZ 的值分别为 300、150 mm； ΔX_w 在加工大轮和小轮时的值分别为 300、100 mm），利用 MATLAB 计算了虚拟加工过程中 X、Y、Z 轴及 A、B 旋转轴的运动参数，并将其转变为 NC 加工程序。采用一次进刀连续切齿方式加工大轮第 13 个齿的机床运动参数如表 2。

表 2 加工大轮第 13 个齿机床运动基本参数

Table 2 Motion parameters of machine tool on cutting the thirteenth tooth of bull spiral bevel gear

No.	X/mm	Y/mm	Z/mm	$\angle A/(^\circ)$	$\angle B/(^\circ)$
N3330	290.000	-105.589	-432.367	-93.913	68.659
N3340	306.285	-105.589	-432.367	-94.988	68.659
N3350	306.949	-103.730	-434.069	-96.063	68.659
N3360	307.601	-101.840	-435.740	-97.138	68.659
N3370	308.241	-99.918	-437.381	-98.213	68.659
N3380	308.869	-97.966	-438.990	-99.289	68.659
N3390	309.484	-95.984	-440.566	-100.364	68.659
N3400	310.087	-93.973	-442.111	-101.439	68.659
N3410	310.677	-91.934	-443.622	-102.514	68.659
N3420	311.253	-89.866	-445.100	-103.589	68.659
N3430	311.817	-87.771	-446.544	-103.589	68.659
N3440	312.367	-85.649	-447.954	-105.740	68.659
N3450	312.903	-83.502	-449.329	-106.815	68.659
N3460	313.426	-81.328	-450.670	-107.890	68.659
N3470	313.935	-79.130	-451.974	-108.965	68.659
N3480	314.430	-76.908	-453.243	-110.041	68.659
N3490	314.911	-74.663	-454.475	-111.116	68.659
N3500	315.378	-72.394	-455.670	-112.191	68.659
N3510	315.830	-70.104	-456.829	-113.266	68.659
N3520	316.267	-67.792	-457.950	-114.341	68.659
N3530	316.690	-65.460	-459.033	-115.416	68.659
N3540	317.098	-63.107	-460.079	-116.492	68.659
N3550	317.490	-60.736	-461.086	-117.567	68.659
N3560	317.868	-58.346	-462.054	-118.642	68.659
N3570	318.231	-55.938	-462.983	-119.717	68.659
N3580	318.578	-53.513	-463.873	-120.792	68.659
N3590	318.910	-51.072	-464.723	-121.868	68.659
N3600	290.000	-51.072	-464.723	-121.868	68.659

2.2 虚拟加工结果与分析

在 VERICUT 环境下可不考虑切削力和进给量的大小。弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工时,可采用一次进刀切出整个齿形,也可根据给定的进给量,分次循环进刀切出整个齿形。利用整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工模型,采用一次进刀虚拟加工小轮结果如图 4,利用凤凰 II 型弧齿锥齿轮铣齿机加工小轮的情况如图 5 所示。

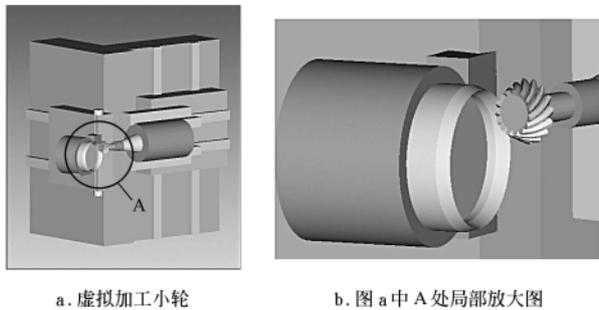


图 4 虚拟仿真加工小轮

Fig.4 Virtual simulation machining on pinion spiral bevel gear

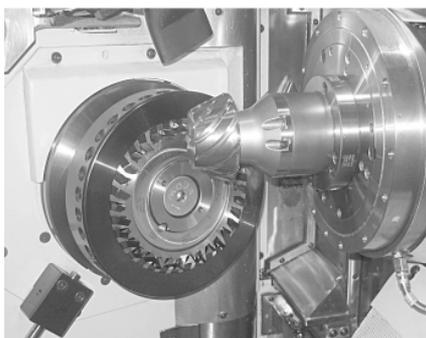


图 5 凤凰 II 型弧齿锥齿轮铣齿机加工小轮

Fig.5 Machining on pinion spiral bevel gear by PHOENIX® II

VERICUT 虚拟加工软件平台不仅可以进行虚拟仿真加工,而且可以输出虚拟仿真加工过程的视频文件。通过观察机床与刀盘在弧齿锥齿轮虚拟加工过程中的运动情况及虚拟仿真加工结果可以看出,整体结构整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟机床模型及工件齿轮在虚拟加工过程中没有出现干涉等设计缺陷,由弧齿锥齿轮小轮虚拟加工结果与凤凰 II 型弧齿锥齿轮铣齿机实际加工小轮情况对比可以看出,虚拟加工结果满足预期要求。

3 结论

1) 本文利用 VERICUT 三维仿真加工软件平台,建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟机床模型,通过计算铣齿机各部件运动参数,建立了整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机数字加工模型。

2) 借助虚拟加工模型,对一对给定参数的弧齿锥齿进行了轮虚拟仿真加工。仿真加工过程中,切齿刀盘和机床各运动部件没有出现干涉等设计缺陷,虚拟加工结果满足弧齿锥齿轮铣齿机功能性验证要求。

3) 通过整体结构式弧齿锥齿轮铣齿机虚拟加工,可以在设计阶段预测机床的性能,检测机床在加工过程中存在的缺陷,为弧齿锥齿轮铣齿机的设计提供参考依据。

[参 考 文 献]

- [1] 李 铭, 梁 睦, 武良臣, 等. 弧齿锥齿轮数控加工技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [2] 王裕清, 武良臣. 弧齿锥齿轮接触区理论与切削过程仿真 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
- [3] Fan Q. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by gleason face hobbing process[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128: 1315—1327.
- [4] 樊 奇, 让德福. 格里森制造专家系统 (GEMS) 开创弧齿锥齿轮及准双曲面齿轮数字化制造新纪元[J]. 世界制造技术与装备市场, 2005, (4): 87—93.
- [5] 苏智剑, 吴序堂. 基于计算机数字控制弧齿锥齿轮加工机床的准双曲面齿轮的制造[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 57—63.
- [6] 张 华, 邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变学法铣齿研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(14): 903—906.
- [7] 魏冰阳, 任东峰, 方宗德, 等. 传统机床与 Free-form 型机床运动的等效转换[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4): 425—428.
- [8] 王延忠, 周云飞, 李左章, 等. 基于通用五坐标数控机床螺旋锥齿轮 NC 加工研究[J]. 中国机械工程, 2001, 12(8): 903—906
- [9] 肖田元. 虚拟制造[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 严隽琪, 范秀敏, 蒋祖华. 虚拟制造的理论和技术基础研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(9): 1068—1071.
- [11] 李荣彬, 李建广, 张志辉. 虚拟精密加工系统开发的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(6): 66—71.
- [12] 郭晓东, 张明德, 梁 伟. 基于 AutoCAD 的锥齿轮切齿过程仿真及软件开发[J]. 现代制造工程, 2002, (10): 34—36.
- [13] 殷盛福, 曾 韬. 弧齿锥齿轮的加工仿真研究[J]. 机械与电子, 2004, (1): 66—68.
- [14] 熊越东, 王太勇, 张 威. 螺旋锥齿轮数控加工三维仿真研究[J]. 制造业自动化, 2005, 27(6): 21—23.
- [15] 张林家. 弧齿锥齿轮的三维加工仿真[J]. 煤矿机械, 2005, (8): 73—74.
- [16] 李云龙, 曹 岩. 数控机床加工仿真系统 VERICUT[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [17] 北京齿轮厂. 螺旋锥齿轮[M]. 北京: 科学出版社, 1974.

Virtual machining on monolithic structure spiral bevel gear milling machine

Xu Yanwei¹, Zhang Lianhong¹, Wei Wei¹, Liu Dequan², Wang Wei²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin No.1 Machine Tool Works, Tianjin 300180, China)

Abstract: Spiral bevel gear milling machine is a typical representative of complex manufacturing equipments with complex structure and machining mechanism. It is important to improve the manufacturing capacity of spiral bevel gear milling machine in China. The motion parameters' design procedures of every axis of the monolithic structure spiral bevel gear milling machine are derived by analyzing the machining mechanism of the spiral bevel gear and the relationships between the structure and motion of the PHOENIX[®]II spiral bevel gear milling machine. The virtual machining model of the monolithic structure spiral bevel gear milling machine is built using three-dimensional machining simulation software VERICUT, and the virtual machining on one pair of given spiral bevel gears is also carried out. The simulation results indicate that there are no design flaws such as interference and so on among the cutter head and the moving parts of the spiral bevel gear milling machine, and the functional verification requirement of spiral bevel gear milling machine can be satisfied. The virtual machining method can provide reference for designing the spiral bevel gear milling machine.

Key words: spiral bevel gear milling machine, machining model, monolithic structure, virtual machining