

螺旋面成形加工误差与补偿

ERRORS AND COMPENSATION OF FORM CUTTING HELICAL

肖 涤 尘 梁 锡 昌 张 济 生

Xiao Dichen Liang Xichang Zhang Jisheng

(机 械 工 程 一 系)

摘 要 本文用计算机模拟螺旋面成形加工;定量分析成形刀具制造及安装、机床螺旋运动等偏差对螺旋面成形加工的截形、截形位置等误差的影响;用优化技术调整可调参数作误差最佳补偿。具有工程普遍实用意义。

关键词 成形切削;误差;补偿;计算机辅助设计;螺旋齿轮/螺旋面
中国图书资料分类法 分类号 TG506.6

ABSTRACT A method which uses computer to model the form cutting of helical is presented and quantitatively analysed the errors of the profile shape and its position from the deviations of manufacturing and installing of the forming cutter and helical movement of the machine tools are quantitatively analysed, the optimum technique is used to revise the adjustable parameters for compensating the error. It is valuable in engineering application.

KEY WORDS form cutting, errors, compensation, computer aided design, spiral gears / helical

加工圆柱螺旋面(包括其端截形为修形渐开线或任意曲线点列)的成形刀具廓形设计、检验及数控加工已经解决^{[1]~[4]}。但在螺旋面实际加工中,不可避免地存在成形刀具制造偏差和磨损,及其在机床中安装偏差,机床运动偏差,机床、刀具、工件等工艺系统的振动、弹塑性及热变形等,必将产生螺旋面成形加工误差,如截(齿)形误差、截(齿)形位置误差及螺旋角误差(如螺旋齿轮公法线长度误差及齿向误差)等,从而影响螺旋面工作质量和寿命等。本文首次定量研究成形刀具制造偏差和磨损,及其安装偏差、机床螺旋运动偏差等对螺旋面成形加工的截(齿)形、截(齿)形位置(螺旋齿轮公法线长度)等误差的影响,并提出误差最佳补偿方式。由于直接推导螺旋面成形加工误差函数表达式较繁,又考虑到螺旋面截(齿)形检查是在其端截面进行,本文采用计算机模拟其成形加工,用数值计算技术由成形刀具设计廓形反算存有某些偏差时工件螺旋面实际端截形,且绘之;再与原给

收文日期 1989-08-29

定螺旋面端截形比较, 直观定量地得出偏差对螺旋面的截形、截形位置等误差的影响。再应用优化技术, 以实际误差获得最小为目标函数, 寻找出有关可调参数的最佳调整量, 通过调整, 使误差控制在最小范围, 即螺旋面成形加工误差的最佳补偿。

1 螺旋面成形加工的计算机模拟^{[1]-[3]}

计算出的成形刀具廓形点列或函数曲线都可以用最佳一致逼近分段圆弧拟合为刀具设计廓形^{[2][3]}。不用由刀具设计廓形反算工件螺旋面端截形方法计算存有某些偏差时实际加工的工件螺旋面端截形^[3]。设成形刀具设计廓形的圆弧段上的点在刀具坐标系坐标为:

$$\begin{cases} X' = R_i \cdot \cos \varphi_i \\ Y' = R_i \cdot \sin \varphi_i \\ Z' = f(R) = \pm \sqrt{R_{c_i}^2 - (R_i - y_{c_i})^2} + x_{c_i} \end{cases}$$

其中, $x_{c_i}, y_{c_i}, R_{c_i}$ 为设计廓形的圆弧圆心和半径。其在工件坐标系坐标:

$$\begin{aligned} x' &= a - X' \\ y' &= -Y' \cdot \cos \Sigma - Z' \cdot \sin \Sigma \\ z' &= -Y' \cdot \sin \Sigma + Z' \cdot \cos \Sigma \end{aligned}$$

令: $B_1 = a + tg \Sigma; \quad B_2 = -(R_i - y_{c_i}); \quad B_3 = \sqrt{R_{c_i}^2 - B_2^2};$

$$B_4 = \pm \frac{B_2}{B_3}; \quad B_5 = \pm B_3 + x_{c_i} + \frac{R_i}{B_4}; \quad B_6 = \frac{P - a \cdot tg \Sigma}{B_4};$$

其中中心距 a , 轴交角 Σ , p 导程, $p = \frac{p_z}{2\pi}$; 则其接触条件式:

$$F(\varphi) = B_1 \cdot \sin \varphi + B_5 \cdot tg \Sigma \cdot \cos \varphi + B_6 = 0$$

可以用牛顿迭代法解得 φ :

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - \frac{F(\varphi_n)}{F'(\varphi_n)}$$

其中 $F'(\varphi) = B_1 \cdot \cos \varphi - B_5 \cdot tg \Sigma \cdot \sin \varphi$; 解得工件端截形

$$\begin{cases} x_B = x' \cdot \cos \theta - y' \cdot \sin \theta \\ y_B = x' \cdot \sin \theta + y' \cdot \cos \theta \\ z_B = z' + p\theta = 0 \end{cases}$$

2 影响螺旋面成形加工误差主要因素

1 成形刀具廓形制造偏差, 包括其设计廓形沿自身径向或轴向平移 ΔR 或 ΔZ ; 和其设计廓形某些点的坐标偏离 ΔR_i 或 ΔZ_i , 见图 1。其中 ΔR 和 ΔZ 可以用包容它们的两条理论廓形 $\Delta R'$ 和 $\Delta R''$ 及 $\Delta Z'$ 和 $\Delta Z''$ 来研究, 本文主要研究其平移偏差 ΔR 、 ΔZ 。

2 成形刀具在机床中安装偏差, 包括其中心距偏差 Δa 和轴交角偏差 $\Delta \Sigma$, 见图 2。其安装水平位置偏差 ΔS 的单边作用效果与 ΔZ 同。

3 机床螺旋运动的螺旋角偏差 $\Delta \beta$ 或导程偏差 Δp_z 。

4 其它偏差, 包括主轴挠曲及热变形, 可以用 $\Delta a, \Delta z, \Delta R$ 来研究; 刀具, 形磨损,

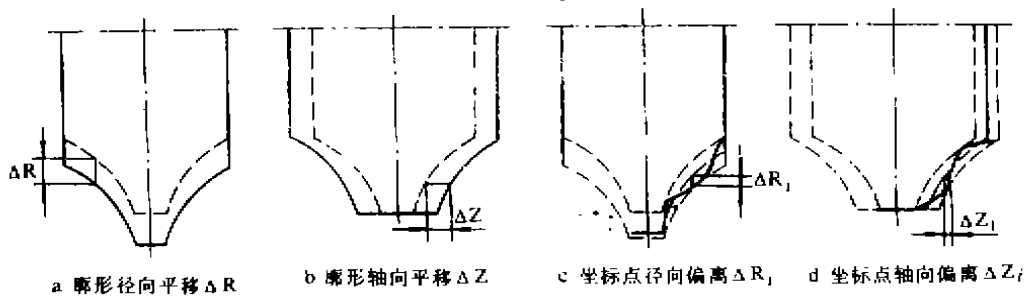
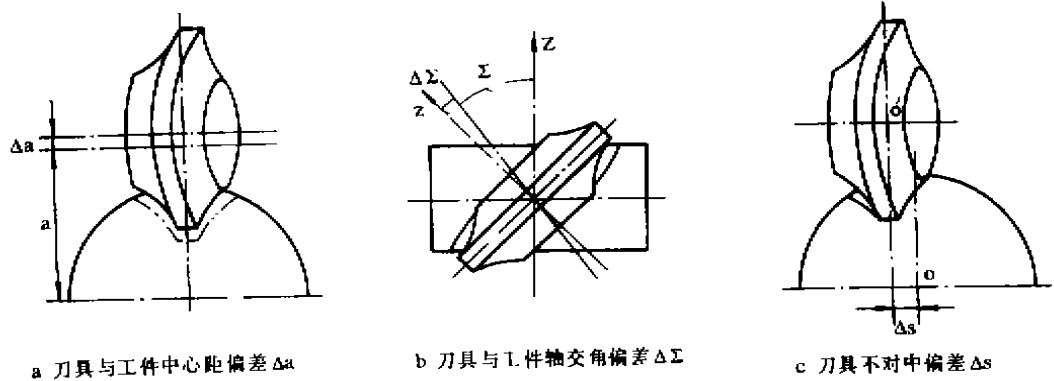


图1 成形刀具廓形制造偏差

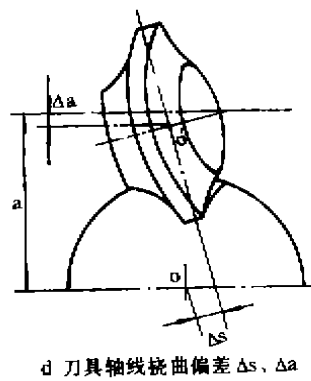
----- 理论廓形 ———— 实际廓形



a 刀具与工件中心距偏差 Δa

b 刀具与工件轴交角偏差 $\Delta \Sigma$

c 刀具不对中偏差 Δs



d 刀具轴线挠曲偏差 Δs 、 Δa

图2 成形刀具安装偏差

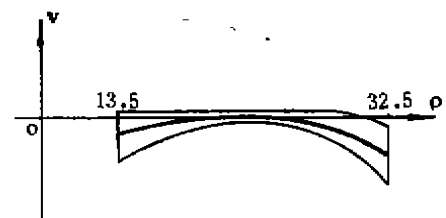


图3 工件设计端截形—修形渐开线

----- 齿形公差框图 ———— 理论齿形(端截形)

与 a 同；主轴轴线与工作台纵向运动角度偏差，与 $\Delta \Sigma$ 同；主轴径向和轴向跳动与 ΔR 和 Δz 同，但如果刀具在动态旋转下成形则此偏差可忽略。

综上所述，本文主要研究 ΔR 、 Δz 、 Δa 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \Sigma$ 及其综合偏差对螺旋面成形加工的截形误差 Δf (螺旋齿轮齿形误差)、截形位置误差 $1L$ (齿轮公法线长度) 和齿形倾角误差 $\Delta \alpha$ (齿轮压力角) 等的影响。

3 主要偏差对螺旋面成形加工误差影响

以实例(3)定量分析。已知给定螺旋面端截形为修形渐开线(见图3,螺旋角 $\beta=16^\circ$ (右旋),取中心距 $a=100$,轴交角 $\Sigma=74^\circ$,仅以其端截形右支研究。由给定端截形 (ρ, J) ,按文献[3]计算出由10段圆弧组成的成形刀具设计廓形,用其成形加工该螺旋面,当存有主要偏差时,加工出实际端截形与给定的比较,研究其加工误差;单偏差 ΔR 、 ΔZ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\Sigma$ 、 Δa 对 ΔJ 、 ΔL 、 $\Delta\alpha$ 影响见图4。其中:

$$\Delta J = |J_{i+0.02} - J_{i-0.02}|;$$

$$\Delta\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{V_m - V_{m-1}}{\rho_m - \rho_{m-1}} \right);$$

$$\Delta L = \Delta V_m;$$

$$\Delta V_i = V_i - V_{0i}.$$

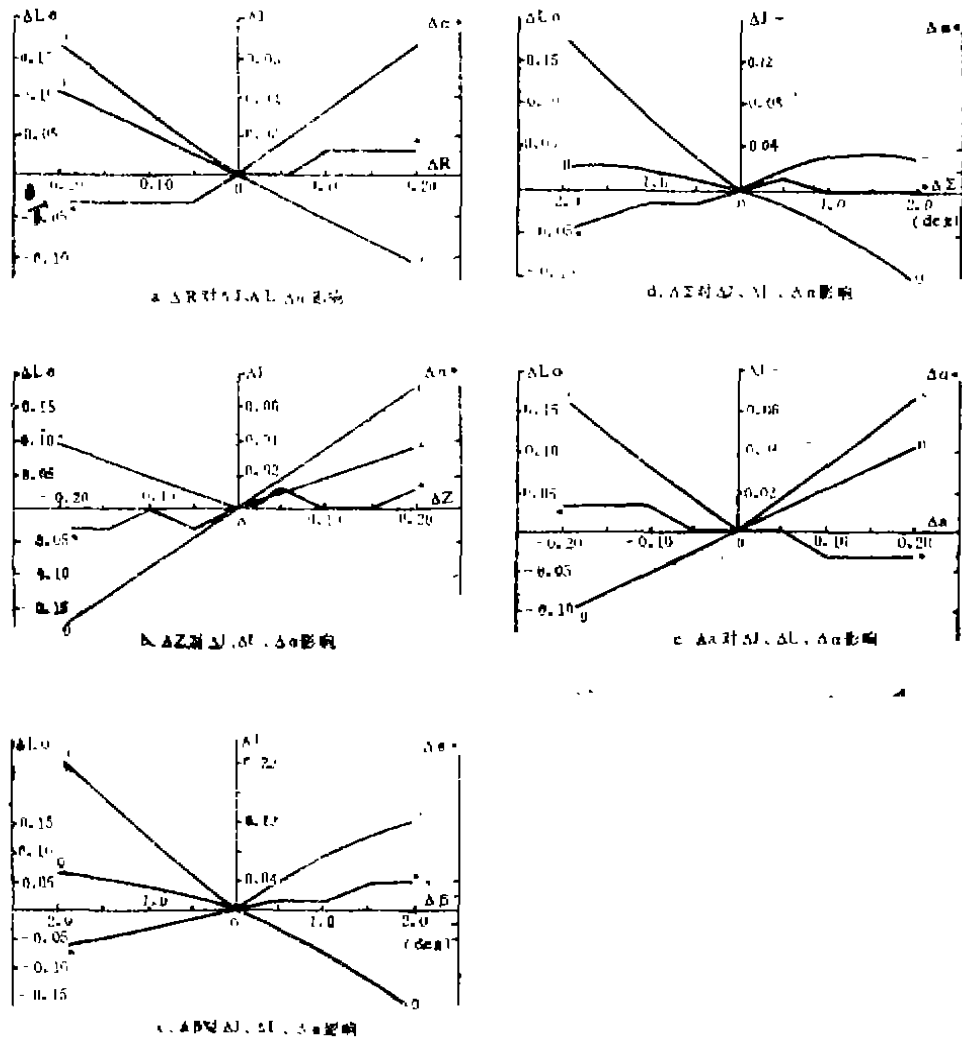


图4 单偏差对 ΔJ 、 ΔL 、 $\Delta\alpha$ 影响

其中 V_m 为端截形中部纵坐标。(双偏差 $\Delta R \cdot \Delta a$ 、 $\Delta R \cdot \Delta Z$ 、 $\Delta \beta \cdot \Delta \Sigma$ 对 ΔJ 、 ΔL 、 Δa 影响见图 5。多偏差 $\Delta \beta \cdot \Delta R \cdot \Delta a$ 、 $\Delta \beta \cdot \Delta R \cdot \Delta \Sigma$ 、 $\Delta R \cdot \Delta Z \cdot \Delta a$ 、 $\Delta \beta \cdot \Delta R \cdot \Delta Z$ 、 $\Delta \beta \cdot \Delta R \cdot \Delta a \cdot \Delta Z$ 和 $\Delta \beta \cdot \Delta R \cdot \Delta Z \cdot \Delta a \cdot \Delta \Sigma$ 对 ΔJ 、 ΔL 、 Δa 影响见图 6。

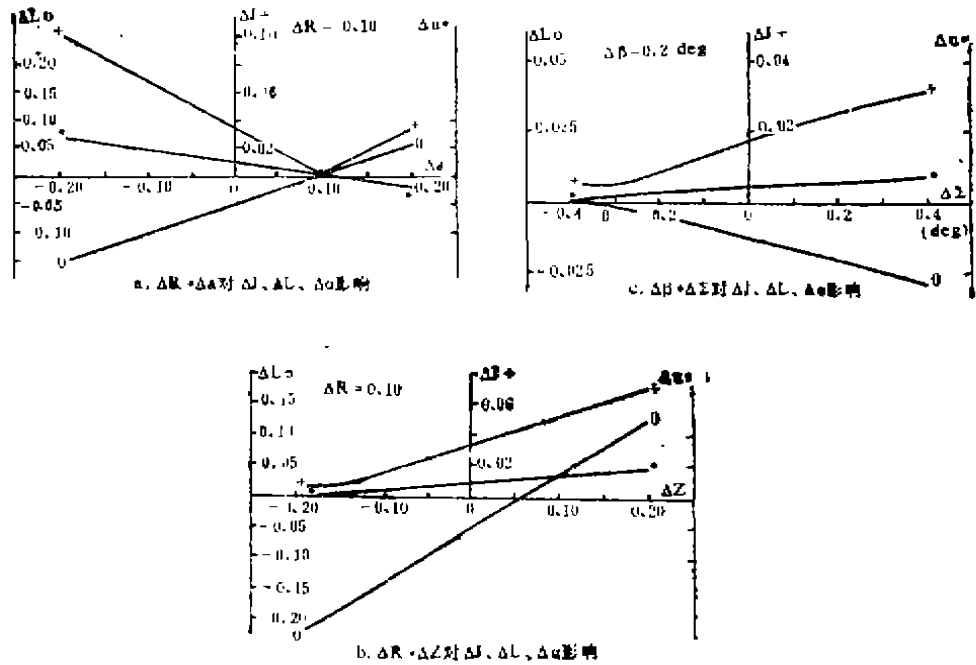


图 5 双因素偏差对 ΔJ 、 ΔL 、 Δa 影响

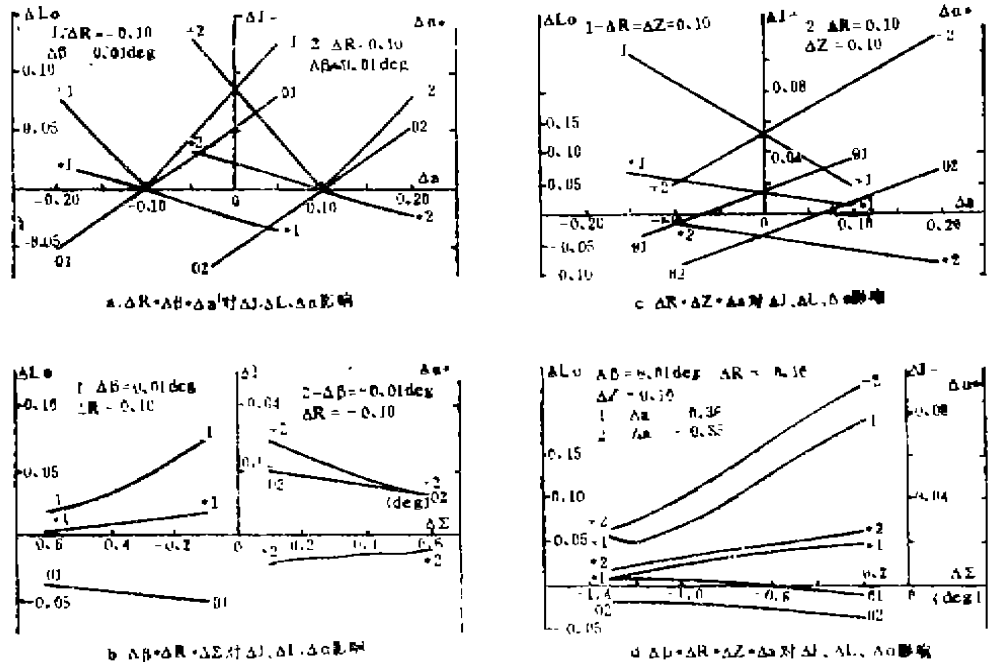


图 6 多因素偏差对 ΔJ 、 ΔL 、 Δa 影响

4 螺旋面成形加工误差最佳补偿

当存有某一个或几个偏差时,采取调整可调参数,如中心距 a 、轴交角 Σ 、成形刀具轴 $-Z$ 向位移(这时刀具刃形单边切削)等方法,可将其截形误差 ΔJ (包括 $\Delta\alpha$)和截形位置误差 ΔL 的综合误差控制在最小范围,其原理是:以可调参数 a 、 Σ 、 Z 的调整量 δa 、 $\delta \Sigma$ 、 δZ 为变

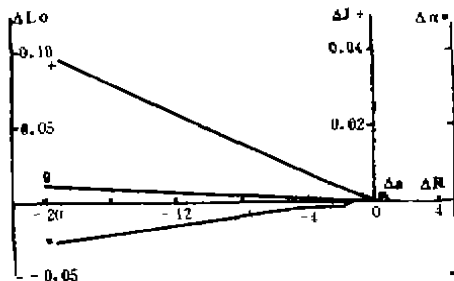


图7 $\delta a = \Delta R$ 的补偿后误差

量,使存在偏差且可调参数参与调整后的工件加工误差 ΔJ 和 ΔL 的综合误差获得最小的双目标函数优化,考虑到与螺旋齿轮的齿形误差和公法线长度误差的关系概念一致,而作线性加权因子 K 的处理,即:

$$\min(\Delta J + K \cdot |\Delta L|)$$

$$\begin{pmatrix} \delta_{a_{min}} \\ \delta_{\Sigma_{min}} \\ \delta_{Z_{min}} \end{pmatrix} < \begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_{\Sigma} \\ \delta_Z \end{pmatrix} < \begin{pmatrix} \delta_{a_{max}} \\ \delta_{\Sigma_{max}} \\ \delta_{Z_{max}} \end{pmatrix}$$

其中: $\Delta J = g_1(\delta a, \delta \Sigma, \delta Z)$; $\Delta L = g_2(\delta a, \delta \Sigma, \delta Z)$; 考虑到 ΔL 的公差一般比 ΔJ 的公差大数倍,一般取 $K = 0 \sim 1$ 。其误差最佳补偿的优化计算结果见表。

当采用 $\delta a = \Delta R$ 来补偿 ΔR 时,其对 ΔJ 、 ΔL 、 $\Delta\alpha$ 影响见图7。当 ΔR 不太大时,可以近似地以此补偿 ΔR ; 当 ΔR 较大或要求补偿后误差较小时,应采用最佳补偿;甚至需根据减小的中心距重新计算成形刀具设计廓形,或者用一定方法使成形刀具径向胀大后成形,来保证刀具磨损后的刀具半径不变^[5]。当 $\Delta\beta$ 不太大时,可近似地采用 $\delta z = k_z \cdot \Delta\beta$ 线性补偿 $\Delta\beta$, 本例中可取 $k_z \approx -1.8$; 当多偏差 ΔR 、 ΔZ 、 $\Delta\beta$ 等不太大时,采用 δa 、 $\delta \Sigma$ 、 δZ 最佳补偿,可达较为理想的效果。

表

序 号	偏差因素			补偿参数			目标函数 $F = DJ + K \cdot DL$		补偿后误差		
	DR	DB, deg	DZ	da	dc(deg)	dz	K	F	DJ	DL	DAF
1	-2			-2.0117			.0	.00013	.00013	-.00051	-
2	-2			-2.0061			.4	.00032	.00023	-.00021	-
3	-1.0			-1.00583			.0	.00065	.00065	-.00255	-
4	-1.0			-1.00305			.4	.00159	.00116	-.00107	-
5	-5.0			-5.02913			.0	.00328	.00328	-.01272	-
6	-5.0			-5.01694			.4	.00795	.00545	-.00627	-
7	-10.0			-10.00818			.0	.00661	.00661	-.02539	-
8	-10.0			-10.00388			.4	.01597	.01096	-.01253	/
9	-20.0			-20.00777			.4	.03219	.02218	-.02502	/
10	-20.0			-20.11603			.0	.01344	.01344	-.05061	-
11	-20.0			-20.11603			.2	.02356	.01344	-.05061	-
12	-20.0			-20.00777			.4	.03219	.02218	-.02562	/
13	-20.0			-20.02070			.0	.03365	.03365	.00000	/

沈

续表

14	-20.0			-20.02070		1.	.03365	.03365	.00000	/	
15	-.2	.01		-.19853		.0	.00014	.00014	.00031	-	
16	-.2	.01		-.19893		.4	.00025	.00021	.00010	-	
17	.1	.10		-.12635		.0	.00013	.00013	.00802	-	
18	.1	.10		-.12623		.4	.00333	.00013	.00799	-	
19	-.2	-.10		-.22761		.0	.00016	.00016	-.00892	-	
20	-.2	-.10		-.22739		.4	.00370	.00017	-.00881	-	
21	-.1		.1	-.04453		.0	.00199	.00199	.11836	-	
22	-.1		.1	-.05281		.4	.04913	.00349	.11409	-	
23	.1		.1	.15664		.0	.00212	.00212	.11887	-	
24	.1		.1	.14800		.4	.04944	.00372	.11430	-	
25	-.2		-.1	-.25717		.0	.00221	.00221	-.11910	-	
26	-.2		-.1	-.24830		.4	.04962	.00386	-.11441	-	
27	-.2		-.1	-.03340		1.	.07361	.07361	.00000	/	
28	-.1	.01	.1	-.04189		.0	.00199	.00199	.11919	-	
29	-.1	.01	.1	-.05006		.4	.04944	.00394	.11488	-	
30	-.1	.01	.1	-.26864		1.	.07594	.07594	.00000	/	
31	-.2	-.01	.1	-.14776		.0	.00194	.00194	.11728	-	
32		.01			-.0183	.0	.00018	.00018	.00003	-	
33		-.10			.1856	.0	.00186	.00186	-.00059	-	
34	-.1	-.01			1.0941	.0	.01001	.01001	.00639	-	
35	-.1	.01	.1		.3325	.0	.00122	.00122	.12948	-	
36	-.1	.01	.1		2.4564	.4	.01077	.01077	.00000	-	
37	-.2	-.01	.1		1.2722	.0	.01759	.01759	.13835	-	
38	-.1					-.0598	.4	.04426	.04426	.00000	/
39	-.1	.10				-.0531	.4	.03451	.03451	.00000	/
40	-.1	.10	.1			-.1521	.4	.03451	.03451	.00000	/
41	-.1	.10	.1			-.0105	.2	.03341	.00806	.12678	-
42	-.2	.01		-.20117	-.0183	.0	.00006	.00006	-.00050	-	
43	-.2	.10		-.20118	-.1810	.0	.00171	.00711	-.00050	-	
44	-.3	-.01	.1	-.24573	.0182	.0	.00168	.00168	.11782	-	
45	-.3	.10	.1	-.19712	.1874	.0	.00021	.00021	.13101	-	
46	-.3	.10	.1	-.24581	-.1820	.2	.02728	.00370	.11789	-	
47	-.3	.10	.1	-.50927	-1.3681	.4	.02091	.02091	.00000	-	

5 结论

1. 本文用计算机模拟螺旋面成形加工,定量分析了刀具制造偏差 ΔR 、 ΔZ ,刀具安装偏差 ΔS 、 Δa 和机床螺旋运动偏差 β 等对螺旋面成形加工的截形误差 ΔI (包括 $\Delta \alpha$)和截形位置误差 ΔL 等影响。

2. 本文以 $F = \Delta J + K \cdot |\Delta L|$ 为双目标函数, 根据不同的使用要求, 确定加权因子 K , 优化计算且调整可调参数 δ_x 、 δ_y 、 δ_z , 对偏差 ΔR 、 ΔZ 、 $\Delta \beta$ 等作误差最佳补偿, 可达较为理想的效果。当偏差不太大时, 可作近似线性补偿, 用 $\delta_x = k_x \cdot \Delta R$ 补偿 ΔR ; $\delta_y = k_y \cdot \Delta \beta$ 补偿 $\Delta \beta$ 等。本文计算机软件适用于任意螺旋面成形加工误差分析和误差补偿, 具有普遍的工程实用意义。

参 考 文 献

- [1] 吴序堂. 齿轮啮合原理. 机械工业出版社, 1982.1
- [2] 肖涤尘、梁锡昌. 最佳一致逼近及容差平滑圆弧拟合平面点列. 重庆大学学报, 1989(3)
- [3] 肖涤尘、梁锡昌. 修形渐开线螺旋面成形刀具CAD. 重庆大学学报, 1990, (1)
- [4] 肖涤尘、王序进、詹捷. 斜齿轮成形刀具CAD/CAM. 四川省兵工学会暨重庆市机械工程学会'89会议论文, 1989.10
- [5] 肖涤尘. 可变直径砂轮及其实验研究. 磨床与磨削, 1986, (2)