

文章编号: 1673-5196(2011)03-0028-06

多工序制造过程误差传递分析与建模

赵家黎^{1,2}, 梁角虎^{1,2}, 薛盼^{1,2}

(1. 兰州理工大学 数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过用误差流理论, 得到多工序制造过程中最终产品尺寸误差是由各道工序产品尺寸误差累积、耦合和传递的结果. 采用控制理论方法将误差传递过程映射到状态空间方程得到误差传递模型. 利用齐次变换方法, 推导出制造过程中基准误差和夹具误差的具体影响, 得到误差传递模型的详细结构. 以制动钳的钳体制造过程为例验证模型的有效性, 为多工序制造过程误差溯源、系统优化评价等提供理论基础和依据.

关键词: 误差传递模型; 多工序制造过程; 尺寸误差; 齐次变换

中图分类号: TH161.5 **文献标识码:** A

Analysis and modeling of variation transmission in multi-stage manufacturing process

ZHAO Jia-li^{1,2}, LIANG Jiao-hu^{1,2}, XUE Pan^{1,2}

(1. Key laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, The Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: A result was obtained by using the theory of stream of variation that the dimensional variation of final products was determined by accumulation, coupling, and transmission of dimensional variation during all stages in multi-stage manufacturing process. A variation transmission model was obtained by using control theory to map the transmission of dimensional variation into the state-space equation. By using homogeneous coordinate transformation method the concrete influence of the datum variation and fixture variation were deduced and a detailed configuration of variation transmission model was obtained. Finally, a body of brake-caliper manufacturing process was given for illustration and verification of the effectiveness of the variation transmission model, providing a theoretic basis for variation source detection and system optimization evaluation.

Key words: variation transmission model; multi-stage manufacturing process; dimensional variation; homogeneous coordinate transformation

一直以来, 传统的 SPC 方法作为主要的质量分析与控制手段应用在制造过程中, 但随着技术的发展和生产方式的改进, 以控制图为主要工具的 SPC 方法逐渐暴露出其不足^[1]. 如 SPC 方法只能在发现问题, 出现质量问题后, 主要是依靠技术人员的经验查找产生质量问题的原因. 最为关键的是 SPC 方法面向的是产品而非过程, 它没有考虑多因素耦合现象的存在, 而仅仅是对各工序的每个产品质量特性

进行独立分析, 忽略了多工序加工过程各类过程参数及其之间的相互关系.

针对 SPC 的不足, 一些学者从误差流的角度出发, 将整个制造过程看成一个动态系统并建立数学模型^[2], 采用控制理论中的概念和数学工具对多因素耦合问题进行研究, 从而对制造过程进行定量的分析、综合与设计来保证和改进产品质量^[3]. 在考虑了多元质量特性之间关系、测量误差及测量数据不完整的基础上对误差流动态特性、产品质量特性误差的预测^[4-5]、工艺方案设计与改进^[6-7]进行了分析. 本文将在上述研究基础上对多工序制造过程中多工序问题进行研究, 建立有效的误差传递模型, 为进一

收稿日期: 2010-08-25

基金项目: 甘肃省自然科学基金(0809RJZA014)

作者简介: 赵家黎(1980-), 男, 河南周口人, 副教授.

步研究误差溯源并确保产品质量打下基础。

1 多工序制造过程误差传递模型

对于结构如图 1 所示的 N 工序制造过程,将工序序列看成时间序列,可视其一维离散时变系统,并采用状态空间方程进行描述^[8],其理想情况如下

式:

$$\begin{cases} X_0(k) = A(k)X_0(k-1) & k = 1, 2, \dots, N \\ Y_0(k) = C(k)X_0(k) & k \in \{1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X^0(k)$ 、 $Y^0(k)$ 分别为经过工序 k 后生成的产品特征尺寸及产品质量特性的理想值。

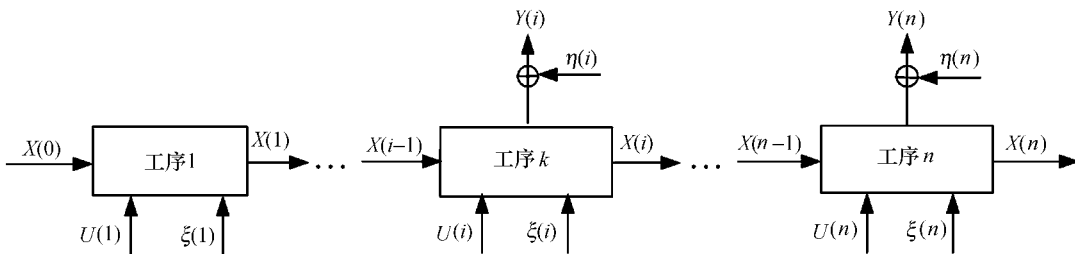


图 1 多工序制造过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-stage manufacturing process

而实际制造过程中,由于随机误差和系统误差的存在,系统模型则为

$$\begin{cases} X(k) = A(k-1)X(k-1) + B(k)U(k) + \xi(k) \\ Y(k) = C(k)X(k) + \eta(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X(k)$ 、 $Y(k)$ 分别为工序 k 后产品特征尺寸及产品质量的实际值。

将式(2)与式(1)相减,则可得到多工序制造过程的误差传递模型:

$$\begin{cases} x(k) = X(k) - X_0(k) = \\ A(k)x(k-1) + B(k)U(k) + \xi(k) \\ y(k) = Y(k) - Y_0(k) = C(k)x(k) + \eta(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A(k)$ 为系统矩阵,表示工序 $k-1$ 与工序 k 之间的关系,反映了产品在工序间的转换情况; $U(k)$ 为工序 k 上的主要误差输入; $C(k)$ 为观测矩阵,对应传感器的数目和所测量的位置,当该工位不进行测量时,为零矩阵; $\xi(k)$ 和 $\eta(k)$ 分别为生产噪声和测量噪声,各工位互相独立,且均值为零。

对于不同类型的制造过程,由于结构和机理的不同,模型中各符号对应的形式也不尽相同,下面详细阐述制造过程的误差传递模型。

2 误差传递模型结构

2.1 定义坐标系

定义 3 个坐标系(见图 2),坐标系的含义如下: $o_M(x_M, y_M, z_M)$ 为机床坐标系, $o_F(x_F, y_F, z_F)$ 为夹具坐标系, $o(x, y, z)$ 为零件坐标系。

2.2 零件模型

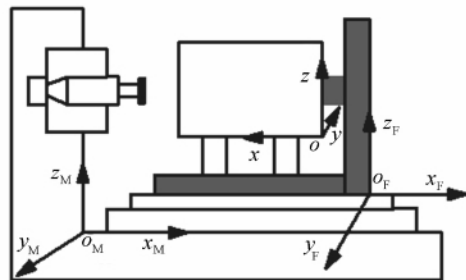


图 2 坐标系的建立

Fig. 2 Setting-up of system of coordinates

个零件有 n 个表面,第 i 个表面 x_i 能够通过它的表面方向矢量 $f_i (f_{ix}, f_{iy}, f_{iz})^T$ 、定位方向矢量 $p_i (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz})^T$ 和尺寸向量 $d_i (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im})^T$ 表示(见图 3),即 x_i 可以表示为维数是 $6+m$ 的矢量:

$$x_i = (f_i^T, p_i^T, d_i^T)_{(6+m) \times 1}^T \quad (4)$$

所以零件模型可以表示为

$$X = (x_1^T, L, x_i^T, L, x_n^T)^T \quad (5)$$

故整个零件的误差为

$$x = \Delta X = (\Delta x_1^T, \dots, \Delta x_i^T, \dots, \Delta x_n^T)^T \quad (6)$$

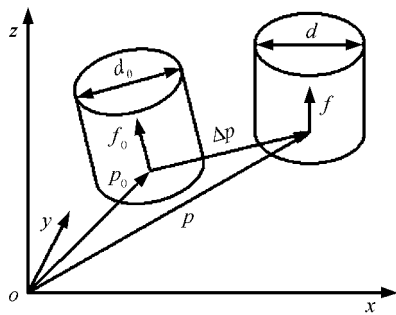


图 3 零件模型

2.3 夹具定位

对于刚性零件,采用“3-2-1”定位,即通常所说的“一面两销”(见图 4),即只需 6 个方向定位就能限制零件位置。

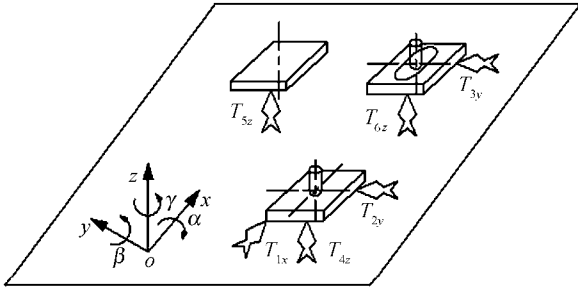


图 4 夹具结构图

Fig. 4 Structural diagram of fixture

图 4 中,假定 T_{1x} 、 T_{2y} 、 T_{3y} 、 T_{4z} 、 T_{5z} 和 T_{6z} 6 个位元素限定零件,使用向量 T_E 表示夹具,则

$$T_E = [T_{1x}, T_{2y}, T_{3y}, T_{4z}, T_{5z}, T_{6z}]^T$$

夹具误差可表示为

$$\Delta T_E = [\Delta T_{1x}, \Delta T_{2y}, \Delta T_{3y}, \Delta T_{4z}, \Delta T_{5z}, \Delta T_{6z}]^T$$

2.4 制造过程中各误差的影响

由上述可知零件误差的数学表达式:

$$x(k) = (x_1(k), \dots, x_i(k), \dots, x_n(k))^T$$

式中: $x_i(k)$ 为工序 k 上零件 i 的误差,具体形式如下:

$$x_i(k) = (\Delta p_{ix}, \Delta p_{iy}, \Delta p_{iz}, \Delta \alpha_{ix}, \Delta \beta_{ix}, \Delta \gamma_{ix})^T$$

本文考虑的误差主要是夹具误差 $F(k)$ 和定位基准误差 $L(k)$ 。

2.4.1 夹具误差造成的影响

假设与夹具各定位点 $T_1 \sim T_6$ 接触的零件上的各点记为 $T_1' \sim T_6'$ 。

首先,选取点 T_1' 作为零件和夹具之间建立联系的关键点,其误差与夹具误差之间的关系:

$$\Delta T_1' = \Phi(k) \Delta T_E$$

式中

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_x(T_1, T_2)}{L_x(T_2, T_3)} & \frac{L_x(T_1, T_2)}{L_x(T_2, T_3)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{L_x(T_4, T_1)}{L_x(T_4, T_5)} & \frac{L_x(T_4, T_1)}{L_x(T_4, T_5)} - \frac{L_y(T_5, T_1)}{L_y(T_5, T_6)} & \frac{L_y(T_5, T_1)}{L_y(T_5, T_6)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_y(T_5, T_6)} & -\frac{1}{L_y(T_5, T_6)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_x(T_4, T_5)} & -\frac{1}{L_x(T_4, T_5)} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_x(T_2, T_3)} & \frac{1}{L_x(T_2, T_3)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

夹具误差 ΔT_E 与其造成的误差 $F(k)$ 之间的关系:

$$F(k) = Q(k) \Delta T_E$$

式中: $Q(k)$ 为坐标转换矩阵,将 6 个定位点的错误尺寸转换成所定位零部件的平移和旋转,形式为

$$Q(k) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_z(P, T_1)}{L_x(T_2, T_3)} & \frac{L_z(P, T_1)}{L_x(T_2, T_3)} & -\frac{L_y(P, T_1)}{L_x(T_4, T_5)} & \frac{L_y(P, T_1)}{L_x(T_4, T_5)} & 0 \\ 0 & Q_{22} & Q_{22} & 0 & \frac{L_x(P, T_1)}{L_y(T_5, T_6)} & -\frac{L_x(P, T_1)}{L_y(T_5, T_6)} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{34} & Q_{34} - Q_{36} & Q_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_y(T_5, T_6)} & -\frac{1}{L_y(T_5, T_6)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_x(T_4, T_5)} & -\frac{1}{L_x(T_4, T_5)} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_x(T_2, T_3)} & \frac{1}{L_x(T_2, T_3)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中 } Q_{22} &= -\frac{L_z(P, T_1) - L_x(T_1, T_2)}{L_x(T_2, T_3)} \\
 Q_{34} &= -\frac{L_y(P, T_1) - L_x(T_4, T_1)}{L_x(T_4, T_5)} \\
 Q_{36} &= \frac{L_y(T_5, T_1) + L_x(P, T_1)}{L_y(T_5, T_6)}
 \end{aligned}$$

2.4.2 定位基准误差造成的影响

对于工序 k , 定位基准误差 $L(k)$ 具体形式如下:

$$L(k) = (D(K) \quad G(K)) \begin{bmatrix} \Delta T_{a1}' \\ \Delta T_{b1}' \end{bmatrix}$$

$$D(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & A_1 & 0_{6 \times 3} \\ 0 & A_2 & 0 \\ A_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$G(k) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0_{6 \times 3} & 0 & 0 & -A_1 \\ 0 & -A_2 & 0 & 0 \\ -A_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中 } A_1 &= -\frac{1}{L_y(T_{a1}', T_{b1}')} \\
 A_2 &= -\frac{1}{L_x(T_{a1}', T_{b1}')} \\
 A_3 &= -\frac{1}{L_z(T_{a1}', T_{b1}')}
 \end{aligned}$$

2.5 模型详细结构

根据对制造过程误差源影响的分析, 可得到状态方程(3)各项的具体结构:

$$A(k) = I_{6n \times 6n} + \begin{bmatrix} (D(k)G(k))_{6 \times 6} & 0_{6i \times 6(n-i)} \\ 0_{6(n-i) \times 6i} & 0_{6(n-i) \times 6(n-i)} \end{bmatrix}_{6n \times 6n}$$

$$B(k) = \begin{bmatrix} Q_{p_1, T_{E1}}(k) & \cdots & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{p_1, T_{E1}}(k) & \cdots & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} & \cdots & Q_{p_{i+1}, T_{E2}}(k) & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} & \cdots & Q_{p_{i+t-1}, T_{Et}}(k) \end{bmatrix}$$

式中: t 为工序 k 上夹具的数目, 形式如下:

$$\begin{aligned}
 U(k) &= (\Delta T_{E1}, \dots, \Delta T_{Ej}, \dots, \Delta T_{Et})^T \\
 C(k) &= \text{diag}(C_1(k), \dots, C_i(k), \dots, C_n(k))
 \end{aligned}$$

式中: $C_i(k)$ 为 $3 \times (6+m)$ 块矩阵, 当第 i 个表面没有测量点时为零矩阵, 反之形式如下:

$$C_i(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -C_{15} & C_{16} \\ 0 & 1 & 0 & C_{42} & 0 & -C_{16} & 0_{3 \times m} \\ 0 & 0 & 1 & -C_{42} & C_{15} & 0 & \end{bmatrix}$$

式中: $C_{42} = L_x(M_i, p_i)$, $C_{15} = L_y(M_i, p_i)$, $C_{16} = L_z(M_i, p_i)$. M_i 为测量点, p_i 为第 i 个表面的点. $\xi(i)$ 和 $\eta(i)$ 分别表示生产噪声和测量噪声, 各工位互相独立, 且均值为零.

3 实例验证

本文以制动钳中的钳体制造过程为例, 对模型进行分析验证, 制动钳体的加工经过 3 道工序完成, 图5表示了每道工序要加工的面和相应的定位方式,

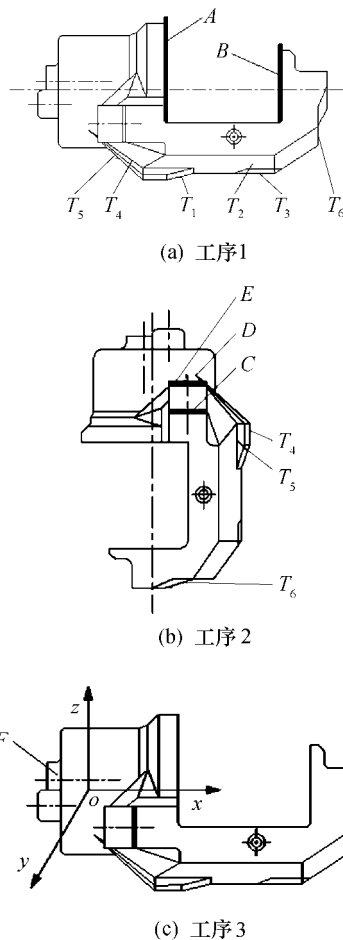


图 5 制动钳加工工序示意图

Fig. 5 Schematic diagram of manufacturing sequence

并在表 1 列出了主要的特征尺寸要求,每道工序的任务和基准面选择. 加工过程误差传递模型验证步骤如下:

按照式(4~6)建立零件模型(见表 2).

系统噪声的确定和误差模型的建立(见表 3).

首先对夹具和刀具进行多次测量,确定它们的可重复度,正确制造过程中只存在自然波动,因此可假设夹具和刀具噪声服从均值为零的正态分布,标准差为各自对应的可重复度(见表 3).

在制动钳体试制过程中,由于工序 2 上的夹具

在制造中存在错误,使得定位点 T_6 在 x 方向上超出了设计要求,造成了一批产品出现了误差,最终经工艺和生产人员分析找到了原因,将 T_6 磨减到设计位置,从而消除了产品的误差.

上述情况为制造的错误情况,也即工序 2 上 $\Delta T_6=0.74$ mm,根据定位点的误差建立制动钳的误差传递模型.

计算各关键尺寸模型值与实际测量数据的均值并进行比较,结果见表 4.

表 1 制动钳工艺方案

Tab. 1 Scheme of manufacturing process of brake-caliper

工序	定位基准	加工描述	主要特征尺寸	设计尺寸/mm
1	$T_1 \sim T_6$	活塞孔端面 A 与受力面 B	面 A 与 B 之间的距离(l_{AB})	60.5 ± 0.2
2	$B+(T_4 \sim T_6)$	加工等高面 C 与 D	面 C 与 D 之间的距离(l_{CD})	13.9 ± 0.1
		联接孔 E	孔 E 的直径(d_E)	$\phi 12.5 \pm 0.05$
3	$B+D+E$	车活塞孔 F	孔 F 的直径(d_F)	$\phi 61.1 \pm 0.15$

表 2 零件模型

Tab. 2 Model of workpiece

x_i	f_x/rad	f_y/rad	f_z/rad	p_x/mm	p_y/mm	p_z/mm	d_1/mm
面 A	1	0	0	42.4	0	0	0
面 B	-1	0	0	102.9	0	0	0
面 C	-1	0	0	28.2	0	-15.5	0
面 D	-1	0	0	14.3	0	-15.5	0
孔 E	-1	0	0	14.3	58.2	-15.5	12.5
孔 F	1	0	0	0	0	0	61.1

表 3 坐标关系及系统噪声

Tab. 3 Coordinates relationship and system noise

位置分量	$Q_F \rightarrow o_M$	$Q \rightarrow o_F$	夹具噪声 /dB	刀具噪声 /dB
α/rad	0	0	0.001	0.001
β/rad	0	π	0.001	0.001
γ/rad	0	0	0.001	0.001
p_x/mm	100	-62	0.010	0.010
p_y/mm	60	0	0.010	0.010
p_z/mm	80	50	0.010	0.010

表 4 模型数据与实际情况对比

Tab. 4 Comparison of model data with actual data mm

关键尺寸	实际测量数据均值		模型数据均值	
	正常情况	错误情况	正常情况	错误情况
l_{AB}	60.50	60.51	60.40	60.40
l_{CD}	13.91	13.74	13.85	13.73
d_E	12.50	12.42	12.48	12.42
d_F	61.13	60.86	61.08	60.85

由表 1 和表 4 可知,在正常情况下,即工序 2 上的夹具在制造中没有误差. 零件经过工序 1, l_{AB} 实际测量数据和模型数据分别为 60.50 mm 和 60.4 mm,

皆满足设计要求 60.5 ± 0.2 mm,在公差允许范围内,且 $|\Delta l_{AB}|=0.1$ mm, $|\Delta|$ 为实际测量数据和模型数据的差值;经过工序 2 和 3, l_{CD} 、 d_E 和 d_F 皆满足尺寸设计要求,在公差允许范围内, $|\Delta l_{CD}|=0.01$ mm, $|\Delta d_E|=0$, $|\Delta d_F|=0.01$ mm;在错误情况下,即工序 2 上的夹具在制造中存在误差. 零件经过工序 1, l_{AB} 实际测量数据和模型数据分别为 60.51 mm 和 60.4 mm,皆满足设计要求 60.5 ± 0.2 mm,在公差允许范围内且 $|\Delta l_{AB}|=0.11$ mm;但当经过工序 2, l_{CD} 实际测量数据和模型数据分别为 13.74 mm 和 13.73 mm,皆超出尺寸设计要求 13.9 ± 0.1 mm, $|\Delta l_{CD}|=0.01$ mm; d_E 实际测量数据和模型数据都为 12.42 mm,皆超出尺寸设计要求 $\phi 12.5 \pm 0.05$ mm, $|\Delta d_E|=0$;经过工序 3, d_F 实际测量数据和模型数据分别为 60.86 mm 和 60.85 mm,皆超出尺寸设计要求 $\phi 61.1 \pm 0.15$ mm, $|\Delta d_F|=0.01$ mm,这是由于工序 2 产生的误差累积传递导致工序 3 产生误差. 由 $|\Delta|$ 可知误差传递模型得到的数据与实际测量的数据之间存在很小的差异,

模型可以反映零件的实际制造状态.当零件的误差超出设计要求的公差时,由模型得到的数据可地有效地反映出实际制造过程中出现的错误.

4 结论

本文对多工序制造过程的结构和特点进行了阐述,采用状态空间方程建立多工序制造过程误差传递的基本模型.本模型适用于以夹具误差和定位误差为主的加工和装配过程,并以制动钳体的加工过程为例对所提出的模型进行了分析验证.实例验证表明,制动钳的制造过程没有出现误差时,误差传递模型得到的数据与实际测量的数据对比存在微小的差异,这表明模型可以反映零件在正常情况下的制造过程;当制动钳的制造过程中出现误差时,由误差传递模型得到的数据可以反映出实际制造过程中出现错误,这表明误差传递模型有效地反映零件在制造过程中的状态,从而为多工序制造过程误差溯源、系统优化评价等提供了理论基础和依据.

参考文献:

[1] 钱夕元,荆建芬,侯旭暹.统计过程控制(SPC)及其应用研究

[J].计算机工程,2004,19(10):144-146.

- [2] 罗振壁,汪劲松,贾 焯,等.制造过程加工误差流及其模型的研究[J].机械工程学报,1994,30(1):112-118.
- [3] 赵家黎,郭 伟,于鸿彬.制造过程中误差传播问题研究的进展分析[J].中国机械工程,2006(增刊):445-449.
- [4] JIN J,SHI J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering,1999,121(7):756-762.
- [5] WHITNEY D E,MANTRIPRAGADA R. Toward a theory for design of kinematically constrained mechanical assemblies [J]. International Journal of Robotics Research,1999,18(12):1235-1248.
- [6] LAWLESS J F,MACKAY R J,ROBINSON J A. Analysis of variation transmission in manufacturing processes-part I [J]. Journal of Quality Technology,1999,31(2):131-142.
- [7] AGRAWAL R,LAWLESS J F,MACKAY R J. Analysis of variation transmission in manufacturing processes-part II [J]. Journal of Quality Technology,1999,31(2):143-154.
- [8] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [9] MARTINSEN K. Vectorial tolerancing for all types of surfaces [J]. Advances in Design Automation,1993,65(2):187-198.