

机械加工尺寸的预测控制研究*

郑 堤 张立斌 于骏一 李月潭
(吉林工业大学) (吉林职业师范学院)

提 要 将机械加工过程中的加工尺寸预测与工艺能力预测结合起来, 提出对加工尺寸进行反馈补偿控制的原理和方法, 并在加工实验的基础上利用计算机进行了仿真研究。结果表明, 通过反馈补偿控制可有效地将加工尺寸控制在公差范围内, 避免不合格品的产生。

关键词 加工尺寸 工艺能力指数 预测 反馈补偿控制

Study on Forecasting and Control of Finish Size of Machined Parts

Zheng Di Zhang Li-bin Yu Jun-yi Li Yue-tan
(Jilin University of Technology, Changchun) (Jilin Vocational Normal College)

Abstract Combining the forecasting of finish size of machined parts with the forecasting of process capability in a machining process, a principle and method of feed-back compensative control is proposed in this paper. The results of computer simulation on an experimental machining data series show that the finish size can be effectively controlled within desired tolerance, and the occurrence of unqualified products can be avoided.

Key words Finish size Process capability index Forecasting Feed-back compensative control

1 引 言

保证零件加工尺寸精度的途径主要有两条: 一条是提高加工设备的精度和自动化程度, 另一条是在加工过程中对加工尺寸进行检测和控制。前者成本较高, 且并不能完全消除导致不合格品产生的因素^[1]。理论和实践都表明, 后一条途径是比较经济和有效的, 因而受到人们普遍的重视和采用。统计质量控制(SQC)是其中应用最为广泛的一种方法^[2], 它主要利用控制图来对加工过程的变化情况进行分析和调整, 但其不足之处是所实施的调控不够及时, 往往要以一定数量不合格品的积累作为基础。为了防止不合格品的产生, 人们正积极探索其它更有效的方法, 如在主动测量的基础上对机床进行反馈补偿控制^[3]及采用卡尔曼滤波法对加工尺寸进行预测控制^[4]等, 但这些方法中有的应用场合受到局限, 有的没有充分考虑加工系统的工艺能力随加工进行而发生变化的情况。

收稿日期: 1996-12-25

* 吉林省科技发展计划项目

郑 堤, 副教授, 长春市人民大街142号 吉林工业大学工程机械系, 130025

实际上在机械加工过程中, 影响加工尺寸精度的因素中既有随机性因素, 也有系统性因素, 而且往往有些系统性因素是与随机性因素互相关联的。如刀具的磨损将引起具有时变性质的系统性误差, 而且由于刀具磨损的加剧, 将导致切削条件恶化, 振动加剧, 使随机性误差也随之增大, 因而使得系统工艺能力降低, 出现不合格品的概率增加。图1是在加工中心机床上进行铣槽加工, 并用数控三坐标测量机按等时间间隔(即等间距)测得的槽宽尺寸数据图线。由图可见, 随着加工过程的进行, 不但加工尺寸的均值呈现趋向性变化, 而且其分布散度也呈现趋向性变化。因此, 在对加工尺寸进行预测控制时, 必须同时考虑这两种趋向性变化, 将加工尺寸预测与工艺能力预测结合起来, 才能获得更有效的控制策略, 提高零件的加工质量。

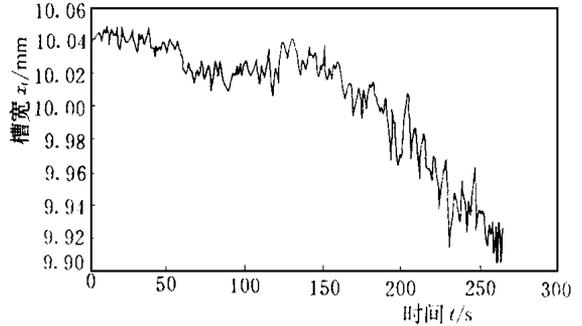


图1 铣槽加工实验的槽宽尺寸数据图线

2 加工尺寸的预测

将通过在线测量获得的加工尺寸数据序列 $\{x_t\}$ 作为一个时间序列, 采用适当的在线建模方法可以建立起相应的自回归滑动平均模型 ARMA $(n, n-1)$:

$$x_t - \varphi x_{t-1} - \dots - \varphi_n x_{t-n} = \alpha - \theta \alpha_{t-1} - \dots - \theta_{n-1} \alpha_{t-n+1} \quad (1)$$

式中 φ ——自回归参数; θ ——滑动平均参数; n ——模型阶次; α ——残差, 代表在 t 时刻进入系统的随机冲击或干扰, 服从 $N(0, \sigma_\alpha^2)$ 分布。

在此模型基础上, 利用沃尔得(Wold)分解定理^[5], 可得到在 t 时刻对 $t+l$ 时刻(即超前 l 步)的加工尺寸的最小均方差预测 $\hat{x}_t(l)$ 、预测误差 $e_t(l)$ 及其方差 $Var[e_t(l)]$ 分别为

$$\hat{x}_t(l) = \sum_{i=0}^{l-1} G_{l-i} \alpha_{t-i} \quad (2)$$

$$e_t(l) = \sum_{i=0}^{l-1} G_i \alpha_{t+l-i} \quad (3)$$

$$Var[e_t(l)] = \sum_{i=0}^{l-1} G_i^2 \sigma_\alpha^2 \quad (4)$$

式中 G_i ——格林函数, 反映系统对以前的冲击或干扰 α 的记忆程度, 可由所建 ARMA $(n, n-1)$ 模型的参数 φ, θ 求得^[5], 且 $G_0 = 1$ 。

将式(1)和(2)结合起来, 可同时实现加工尺寸数据序列 $\{x_t\}$ 的建模和预测。图2示出了采用 ARMA $(4, 3)$ 模型对图1所示实验数据(细实线)进行超前一步(即 $l=1$)预测的数据序列 $\{\hat{x}_t(l)\}$ 的图线(粗实线), 图中光滑的粗、细实线分别是 $\{x_t(l)\}$ 和 $\{\hat{x}_{t+1}(l)\}$ 的多项式拟合曲线。显然, 预测结果与实验数据吻合得很好, 说明采用 ARMA 模型对加工尺寸数据序列进行建模和预测是有效的。

3 系统工艺能力的预测

系统工艺能力是指系统加工过程中保证加工质量的实际加工能力^[6], 常用工艺能力指

数 C_p 来描述:

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \quad (5)$$

式中 T ——零件尺寸公差; σ ——加工尺寸分布的标准差。

为了在 t 时刻预测系统在 $t+1$ 时刻的瞬时工艺能力指数 $\hat{C}_{pt}(l)$, 必须首先预测出在 $t+1$ 时刻加工尺寸分布的标准差 $\hat{\sigma}_t(l)$ 。

根据式(3)、(4), 在 t 时刻超前一步预测误差及其方差分别为

$$e_t(l) = G_0\alpha_{t+1} = \alpha_{t+1}$$

$$Var[e_t(l)] = G_0^2\sigma_\alpha^2 = \sigma_\alpha^2$$

对 x_{t+1} 预测的95% 概率极限为

$$\hat{x}_t(l) \pm 1.96\sqrt{Var[e_t(l)]} = \hat{x}_t(l) \pm 1.96\sigma_\alpha$$

显然, 残差 α 的均方差 σ_α 也同时反映了 $\hat{x}_t(l)$ 的分布情况, 即在 $t+1$ 时刻加工尺寸的分布情况。但是由图1可见, 加工尺寸的分布散度具有趋向性变化, 采用常规方法求取的 σ_α 不能反映这种变化, 因而也不能用来准确预测系统在 $t+1$ 时刻的瞬时工艺能力。为此, 本文利用最新 r 个残差数据, 采用滑动平均滤波的方法来预测在 $t+1$ 时刻加工尺寸分布的标准差, 即:

$$\hat{\sigma}_t(l) = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_{t-i}^2} \quad (6)$$

式中, 最新残差数据个数 r 可视具体情况取值。将 $\hat{\sigma}_t(l)$ 代入式(5)便可预测出在 $t+1$ 时刻系统的瞬时工艺能力指数:

$$\hat{C}_{pt}(l) = \frac{T}{6\hat{\sigma}_t(l)} \quad (7)$$

根据式(6)、(7), 在给定公差 T 的条件下, 针对图1所示加工尺寸数据序列所作的超前一步系统工艺能力指数预测示于图3。可见, 随着加工的进行, 系统的工艺能力指数逐渐减小, 因而出现不合格品的概率逐渐增加。

此外, 由于加工过程中某些系统性时变因素的影响, 使得加工尺寸的均值常常偏离公差带中心, 因此仅用工艺能力指数 C_p 还不能充分反映系统实际保证加工质量

的能力, 还应在 C_p 的基础上结合单边工艺能力指数 C_{pk} 来共同描述系统的工艺能力。在 t 时刻对系统在 $t+1$ 时刻的单边工艺能力指数的预测可表达成:

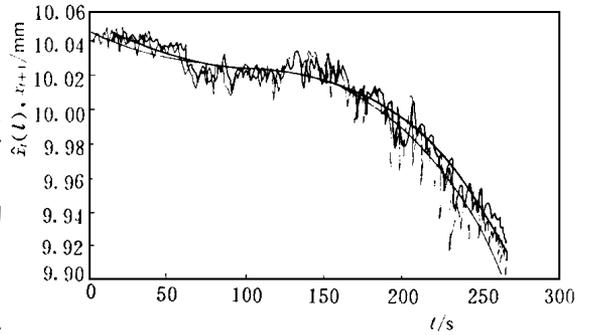


图2 预测数据序列与实验数据序列对比

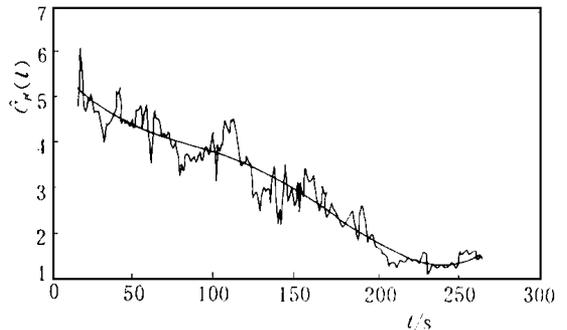


图3 系统工艺能力指数的超前一步预测

$$\hat{C}_{pki}(l) = \frac{T/2 - |M - \hat{x}_i(l)|}{3\sigma_i(l)} \quad (8)$$

式中 M —— 零件公差带中心所对应的尺寸值。

这样便将系统的实际加工情况与零件的加工精度要求紧密地联系起来, 为进一步实现反馈补偿控制奠定了基础。

4 加工尺寸的反馈补偿控制

预测的最终目的是控制。根据预测得到的加工尺寸 $\hat{x}_i(l)$ (相当于在 $t+1$ 时刻加工尺寸的均值) 与工艺能力指数 $\hat{C}_{pt}(l)$ 、 $\hat{C}_{pki}(l)$ 的不同组合情况 (如图4所示), 可提出下述反馈补偿控制策略:

1) 当 $\hat{C}_{pt}(l) > 1.33$, 且 $\hat{C}_{pki}(l) > 1.33$ 时, 说明系统的瞬时工艺能力足够, $\hat{x}_i(l)$ 相对于公差带中心偏离的距离较小, 系统处于比较理想的加工状态, 继续加工不会产生不合格品, 因而无需进行反馈补偿。

2) 当 $\hat{C}_{pt}(l) > 1.33$, 但 $1 < \hat{C}_{pki}(l) < 1.33$ 时, 说明系统工艺能力足够, 但由于系统性因素的影响, $\hat{x}_i(l)$ 偏离公差带中心的距离较大, 继续加工下去会有产生不合格品的危险, 因而应进行反馈补偿,

补偿方向为减小此偏移距离的方向 (如图4所示, 当 $\hat{x}_i(l) < M$ 时, 应向上补偿; 当 $\hat{x}_i(l) > M$ 时, 应向下补偿), 补偿量大小 Δ 按下式确定:

$$\Delta = \frac{3}{2} |\hat{x}_i(l) - M| \quad (9)$$

3) 当 $1 < \hat{C}_{pt}(l) < 1.33$, 且 $\hat{C}_{pki}(l) > 1$ 时, 说明系统工艺能力尚可, $\hat{C}_{pki}(l)$ 系统性因素对 $\hat{x}_i(l)$ 的影响不大, 但随机性因素的影响加剧, 虽然还可继续加工而不必补偿, 但可能有少量不合格品产生。

4) 当 $1 < \hat{C}_{pt}(l) < 1.33$, 但 $\hat{C}_{pki}(l) < 1$ 时, 继续加工下去会有一定量不合格品产生, 应进行反馈补偿, 补偿量仍按式(9)确定。

5) 当 $\hat{C}_{pt}(l) < 1$ 时, 无论 $\hat{C}_{pki}(l)$ 大小如何, 都说明系统的工艺能力已经不足, 继续加工下去会有较大量不合格品产生, 因而应发出警告, 停机调整。

此外, 在有些加工过程中 (如车削、镗削、磨削、定尺寸成型加工过程中), 刀具磨损是影响加工尺寸精度的主要因素。对于这样的加工过程, 有时刀具并未因磨损而达到切削意义上的寿命, 但却因刀具磨损而使系统工艺能力不足, 表明刀具已达到精度意义上的寿命, 这时也应及时发出换刀控制信号; 有时虽然预测的系统工艺能力足够, 但因刀具磨损而使预测的加工尺寸分布标准差 $\hat{\sigma}_i(l)$ 超过某一依据实验或经验所预定的极限值, 这表明刀具已剧烈磨损, 继续加工会有打刀危险, 因此从刀具使用寿命和防止故障的角度考虑, 同样应及时发出

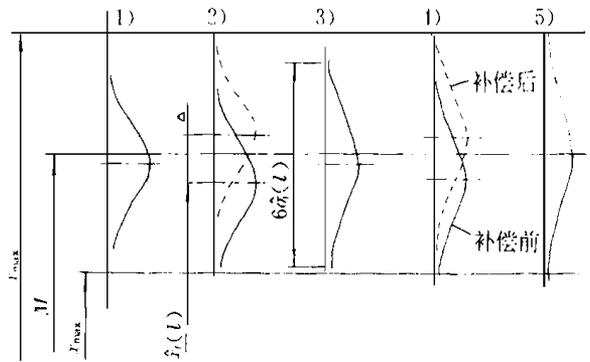


图4 反馈补偿控制原理

换刀控制信号。可见,通过将加工尺寸预测和系统工艺能力预测结合起来,还可为刀具寿命管理提供更合理的依据。

根据上述反馈补偿控制原理,在计算机上对图1所示实验数据进行在线建模、预测和反馈补偿控制仿真的结果示于图5,其中细实线为原始实验数据;粗实线为预测值 $\hat{x}_i(t)$ 的多项式拟合曲线,曲线上的阶跃变化是由补偿控制引起的,阶跃变化量即为补偿量;正态分布曲线表明在 t 时刻超前一步预测的尺寸分布情况;上、下两条虚线代表上、下公差限或控制限。由图5可见,反馈补偿控制的效果是非常明显的,被加工零件尺寸基本上都被控制在公差带内,且分布在公差带中心附近,显著地提高了零件加工质量,并为零件的互换性装配创造了良好的条件。

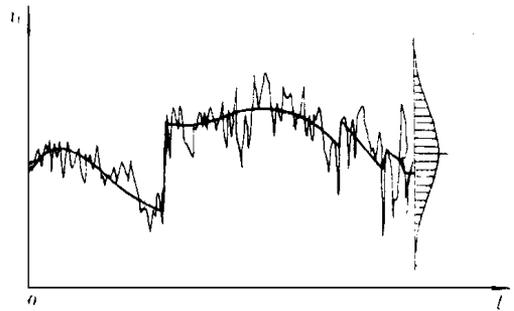


图5 反馈补偿控制仿真结果

5 结 论

1) 采用时间序列分析的方法将加工尺寸预测和系统工艺能力预测结合起来,可以更准确地反映和预测系统加工过程的状况及其保证零件加工质量的能力,为进一步实施反馈补偿控制奠定基础,同时也为某些加工过程中的刀具寿命管理提供更合理的依据。

2) 本文所提出的反馈补偿控制策略便于实施,且可在很大程度上改善加工尺寸的分布状况,有效地防止不合格品的产生,可应用于数控机床或自动化生产线上。

参 考 文 献

- 1 M Ercole FM S: zero QC v/s advanced integrated QC; is 'zero defects' really possible? Proc 6th Int Conf Flexible Manufacturing Systems, 1987. 301~ 310
- 2 W inco K C Yung An integrated model for manufacturing process improvement Journal of Material Processing Technology 61, 1996 39~ 43
- 3 H Kato. Measuring and control systems of precision machining of fitting parts Proc 6th Int Conf Flexible Manufacturing Systems, 1987. 311~ 320
- 4 吴振华. 卡尔曼滤波法在加工尺寸预测控制中的应用. 组合机床与自动化加工技术, 1988(2): 32~ 36
- 5 杨叔子, 吴 雅. 时间序列分析的工程应用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991. 1~ 396
- 6 严圣武. 质量控制. 北京: 北京理工大学出版社, 1986. 36~ 39