

# 基于质量流模型的关联多工序制造过程加工质量研究

王菲<sup>1</sup>,陈明<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学 计算机科学学院,陕西 西安 710600; 2. 湖南云箭集团有限公司,湖南 长沙 410000)

**摘要:**为了提升智能车间工件加工质量的合格率,考虑到相邻工序间的加工质量传递的影响,提出一种基于质量流模型的关联多工序制造过程加工质量分析模型。根据工件加工流程建立多工序制造过程质量流模型,识别出影响制造过程质量的瓶颈工序;根据制造过程参数提出了加工质量修改建议;通过某智能车间零部件工作缸的生产过程进行验证,由该模型计算出的工件加工合格率与历史数据相比,相对误差为0.35%。实验表明,该模型可以反映实际生产制造的过程,验证了模型的实用性。

**关键词:**智能车间;制造过程;质量分析;质量流模型

中图分类号:TH161 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)02-0022-03

## Machining Quality Analysis Based on Quality Flow Model in Correlation Multi-process System

WANG Fei<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>

(1. Xi'an Polytechnic University, School of Computer Science, Xi'an 710600, China;  
2. Hunan Yunjian Group Co., Ltd., Changshan 410000, China)

**Abstract:** To improve the qualified product rate in intelligent workshop, considering the influence of each process on the machining product quality, this paper proposes a quality analysis model based on quality flow model. The quality flow model for multi-process manufacturing process is established according to the parts processing process. The bottleneck process that affects the quality in the manufacturing process is identified. And, according to the parameters of the manufacturing process, suggestions for modification of processing quality are made. Then, the model is verified in the production process of working cylinder for parts in the intelligent workshop. The qualified product rate calculated by this model is compared with the historical data, its error rate is 0.35%. Experiments show that the model can be used to reflect the actual manufacturing process, and its practicability is verified.

**Keywords:** smart workshop; manufacturing process; quality analysis; quality flow model

## 0 引言

在多工序制造系统中,制造过程质量控制的研究是当前质量管理研究的一个热点。制造过程中最基本的单元是工序,对各工序的质量实施管理是提高产品设计质量的有力保证。

对于多工序制造过程的研究主要分为两类:一是考虑过程相关性而建立的多工序误差传递状态空间模型,可用于统计过程控制或全面质量管理<sup>[1-2]</sup>;另一类是建立加工过程模型,以研究制造系统设计对产品质量的影响<sup>[3-4]</sup>。KIM等<sup>[5]</sup>采用产品的合格率来预测系统的加工质量;WANG等<sup>[6]</sup>研究了质量的非单调性,也就是说,质量性能不会随制造系统某一参数的变化而单调变化。张伟<sup>[7]</sup>等根据多指标分析生产工序,应用 Witness 仿真软件,并结

实例进行研究,结果表明该方法可以更加准确地找出影响生产过程质量的因素。但是,基于这些模型的研究前提是假设工序间是独立存在的,是不相互影响、不相互关联的,即没有考虑工序间质量误差的传递,使得模型的适用范围受到限制。JU等<sup>[8-9]</sup>以转移概率为基础建立了三状态质量流模型,其三状态涉及到“合格”、“修复过合格”和“不合格”3种状态,但是实际生产中要在每一道工序后对产品加工状态质量进行检查再进行缺陷修理,极大地增加了成本并降低了生产效率,使模型受到限制。

通过上述分析,本文在权衡目前工序状态和上道工序产品质量的基础上,从工序之间关联性的角度研究了机械产品工件制造过程特性在工序间的相关性和变化关系,并推论出最终工件加工过程的质量模型,从制造过程参数的角度提出制造系统加工质量的改进建议。

# 1 关联多工序制造过程的质量流模型建模

## 1.1 模型假设

本文采取质量流模型对产品加工过程建立模型,构建模型的前提假设如下:

1) 当设备处于无故障运行状态时,生产的产品质量状态合格与不合格的情况是随机分布的。制造过程的相邻工序间存在质量传递,经过第  $i$  道工序的产品质量不仅受到自身工序的影响,而且还受到上道工序产品质量的影响。

2) 以产品质量衡量工序的加工状态,在  $t$  时刻,若工序  $M_i$  生产的产品质量合格,则认为  $t$  时刻  $M_i$  处于  $g_i$  (第  $i$  道工序产品质量为合格) 状态;同理,若工序  $M_i$  生产的产品质量不合格,则认为  $t$  时刻  $M_i$  处于  $d_i$  (第  $i$  道工序产品质量为合格) 状态。

3) 工序  $M_i$  的加工状态不受下一道工序的生产状态的影响,即若  $t$  时刻  $M_i$  处于  $g_i$  状态,则在  $t+1$  时刻,它有  $\eta_i$  (工序维持  $g_i$  的概率) 概率维持  $g_i$  状态,有  $1-\eta_i$  的概率转移到  $d_i$  状态;同理,如果  $t$  时刻  $M_i$  处于  $d_i$  状态,则在  $t+1$  时刻,它有  $\nu_i$  的 (工序维持  $d_i$  的概率) 概率维持  $d_i$  状态由  $1-\nu_i$  率转移到  $g_i$  状态。

4) 工序  $M_i$  ( $i \geq 2$ ) 在  $t$  时刻的上游产品质量取决于  $M_{i-1}$  在  $t-1$  时刻的状态,若  $M_{i-1}$  在  $t-1$  时刻处于状态  $g_{i-1}$ ,则  $M_i$  在  $t$  时刻的上游产品质量是合格的;同理,若  $M_{i-1}$  在  $t-1$  时刻处于状态  $d_{i-1}$ ,则  $M_i$  在  $t$  时刻的上游产品质量是不合格的。

当上道工序产品质量合格时,若  $M_i$  在  $t$  时刻处于  $g_i$  状态,则在  $t+1$  时刻由  $\beta_i$  (第  $i$  道工序产品质量由合格转化为不合格的概率) 的概率转移到  $d_i$  状态,有  $\alpha_i$  (第  $i$  道工序产品质量维持合格率) 的概率维持  $g_i$  状态;当上游产品质量不合格时,若  $M_i$  在  $t$  时刻处于  $d_i$  状态,则在  $t+1$  时刻由  $\lambda_i$  (第  $i$  道工序产品质量由不合格转化为合格的概率) 的概率转移到  $g_i$  状态,有  $\delta_i$  (第  $i$  道工序产品质量维持不合格率) 的概率维持  $d_i$  状态。

## 1.2 关联多工序的质量流加工模型

多工序加工系统中的产品加工过程质量传递具有很大的复杂性,除了在单个工序上的各种影响因素之外,相连工序之间存在复杂的相互联系,工序之间可能引入各种误差,导致产品的加工质量下降并随工序不断积累,因此,在加工过程中,相邻工序间质量的传递尤为重要。

在产品加工过程中,来料在经过某道工序后的质量可能会出现由合格变为不合格(质量损失)或由不合格变为合格(质量补偿)的现象。因此,每道工序加工后的产品质量与目前工序状态和上道工序产品质量都紧密相关。在文献[8-9]提出的模型基础上并综合当前设备状态和上道工序产品质量因素的影响,提出关联多工序制造系统的加工过程转移概率图如图1所示。

由图1可推导出关联多工序产品制造过程的质量流

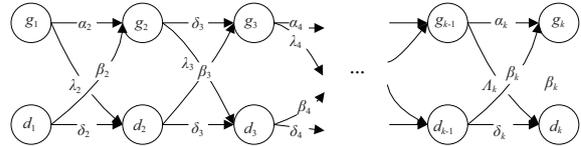


图1 关联多工序转移概率图

模型如下:

两道工序产品质量模型:

$$p(g_1) = p(g_0) \alpha_1 + p(d_0) \lambda_1 \quad (1)$$

$$p(d_1) = p(g_0) \beta_1 + p(d_0) \delta_1 \quad (2)$$

多道工序产品质量模型:

$$p(g_k) = p(g_{k-1}) \alpha_k + p(d_{k-1}) \lambda_k \quad (3)$$

$$p(d_k) = p(g_{k-1}) \beta_k + p(d_{k-1}) \delta_k \quad (4)$$

## 2 案例分析

### 2.1 案例描述

以某公司高压开关操动机机构智能车间生产零部件工作缸的生产过程来验证多工序质量流模型的有效性。工作缸的生产过程主要包括粗车、热处理、精车、去毛刺、阳极氧化和研磨清洗等,加工内容如表1所示,工作缸的剖面图如图2所示(左为小端,右为大端)。

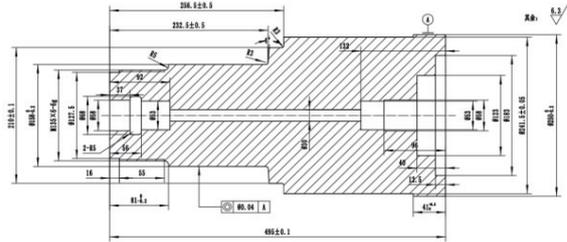


图2 工作缸剖面图(示意图)

表1 工作缸加工过程

工序	工序名称	工序内容
1	粗车	按具体尺寸以探伤面作为零件螺纹端进行加工,切除大部分余量
2	热处理	对零件进行调质和表面渗氮处理
3	半精车	对零件进行半精加工,使尺寸大小接近零件规定尺寸
4	精车	把零件加工到图样规定要求
5	去毛刺	去各相贯孔毛刺,对螺丝孔深度不够进行修理
6	阳极氧化	硬质阳极氧化 50 μm, 除 φ35.03 ± 0.01、φ55.075 ± 0.01 孔外其余孔
7	研磨清洗	超声波旋转清洗: φ45 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.01</sub> (小端)、φ45 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.01</sub> (大端)

本文提出了基于各工序设备状态和上道工序工件质量关联多工序加工过程质量模型,实验中采用如下方法获取参数:1)在无故障运作阶段,收集经过各道工序加工后的工件质量状况,并以零部件质量“合格”和“不合格”

进行记录和区分。2)对某道工序的加工工序  $M_i$  分别在上游零部件质量合格、不合格的情况下,统计以下情况的占比:①上道工序加工的工件  $i-1$  质量合格且此工件质量也合格;②上道工序加工的工件  $i-1$  质量合格而此工件质量不合格;③上道工序加工的工件  $i-1$  质量不合格而此工件质量合格;④上道工序加工的工件  $i-1$  质量不合格且此工件质量也不合格。

对于工序  $M_i (i \geq 2)$ , 在上道工序工件质量合格时,情况①、②所占比例对应转移概率  $\alpha_i, \lambda_i$ , 在上道工序工件质量不合格时,情况③、④所占比例对应转移概率  $\beta_i, \delta_i$ ; 而对于工序  $M_1$ , 其上道工序工件质量经过检验都合格, 因此情况①、②所占比例对应转移概率  $\eta_i, \nu_i$ 。

### 2.2 生产瓶颈识别

通过收集工作缸加工过程的各个工序加工后工件质量参数的测试数据, 对每道工序进行了 5 组测试, 每组包括 1000 个工作缸零部件, 统计计算所得实际各设备对应工序的参数如表 2 所示。将表 2 的数据带入工序加工过程的质量流模型式 (3) 中, 进行计算得出经过各工序后的工作缸合格率如图 3 所示。

表 2 制造系统的设备对应的工序参数

工序	$\eta_i$	$\nu_i$	$\lambda_i$	$\alpha_i$	$\delta_i$	$\beta_i$
1	0.94	0.06				
2			0.96	0.94	0.04	0.06
3			0.98	0.93	0.02	0.07
4			0.95	0.92	0.05	0.08
5			0.98	0.92	0.02	0.08
6			0.97	0.93	0.03	0.07
7			0.95	0.93	0.05	0.07

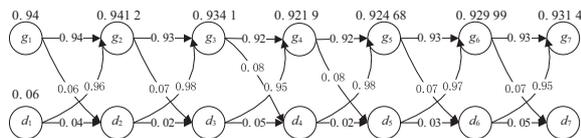


图 3 工作缸加工过程转移概率图

根据建立的质量流模型所得工作缸经过该制造过程的各道工序后工件加工质量合格率变化趋势如图 4 所示。

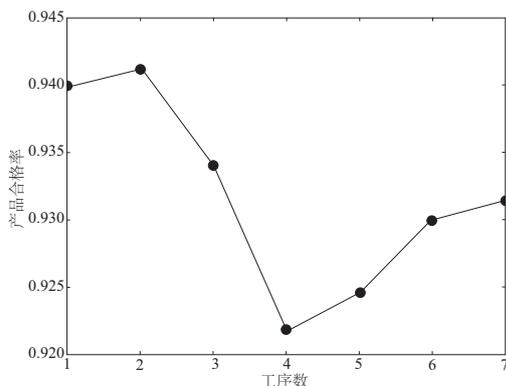


图 4 产品加工过程合格率变化图

经过第  $i$  道工序后, 工作缸加工合格变化量  $\Delta p(g_{i+1})$  (此道加工工序的零件合格率与上一道工序加工合格率的差值) 为:

$$\Delta P(g_{i+1}) = P(g_{i+1}) - P(g_i)$$

由此可计算出:

$$\Delta P(g_2) = 0.00120, \Delta P(g_3) = -0.00710,$$

$$\Delta P(g_4) = -0.01220, \Delta P(g_5) = 0.00278,$$

$$\Delta P(g_6) = 0.00531, \Delta P(g_7) = 0.00141.$$

由图 4 和  $\Delta p(g_{i+1})$  得出, 从第 4 道工序后, 工作缸加工合格率出现了较大幅度下降, 因此, 系统中最需得到质量提升的工序为工序 4。将表 2 中的参数带入建立的质量流模型中, 通过模型计算得到该加工制造过程的合格率为 0.9314, 历史数据中实际加工工件合格率为 0.9349, 相对误差为 0.35%, 证明此模型可以应用于该实际加工过程。

第 4 道工序的相关参数有  $\lambda_4, \alpha_4, \delta_4$  和  $\beta_4$ , 在当前真实值的基础上, 分别对这些变量进行单因素变化, 观察在第 4 道工序时零部件加工合格率的变化, 由图 5 可见  $\alpha_4$  的变化对该制造过程合格率影响最大, 在变化相同值的情况下, 提高  $\alpha_4$  的值能够最大程度地提高该制造过程的合格率。

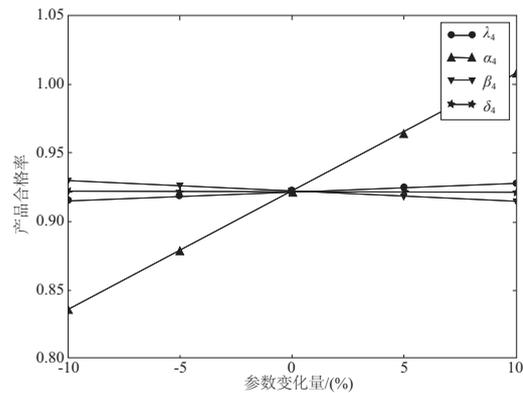


图 5  $M_4$  的参数与产品加工合格率的变化关系

通过该模型找到了工作缸加工制造过程的质量瓶颈工序和质量瓶颈加工参数, 并得出了加工参数对零部件合格率的影响规律。在该加工过程中, 需要整改的是第 4 道工序, 其瓶颈参数为  $\alpha_4$ 。因此, 在加工前 5M1E (操作人员、加工设备、工件材料、工艺方法、现场环境和测量方式) 是符合加工标准要求的前提下, 对第 4 道工序相关的工艺系统 (机床、刀具、夹具、工件和切削液) 在加工过程中的受力变形、受热变形等原因进行主要排查, 使第 4 道工序不再是加工质量的瓶颈工序, 从而提高产品的合格率。

### 3 结语

生产过程管理问题是工业生产的重点, 在生产过程中, 各工序间加工质量的传递会影响最终产品的质量, 从而影响企业的经济效益, 制约企业的生产发展, 所以在生产过程中, 及时找出生产瓶颈十分重要。本文对制造系统的加工过程进行分析, 综合权衡上道工序产品质量和目前

(下转第 59 页)

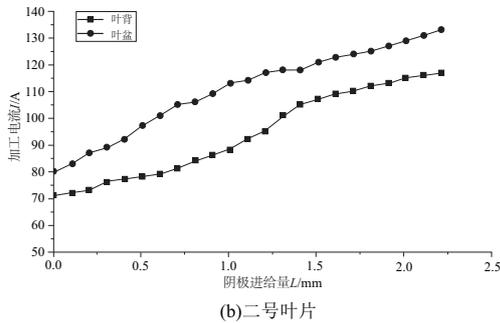


图 12 加工电流随进给量变化曲线

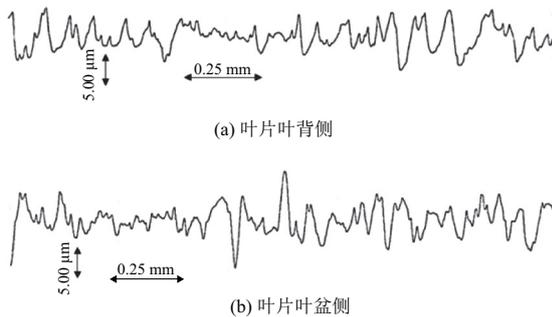


图 13 扩压器叶片表面粗糙度测量结果

## 5 结语

1) 扩压器叶片长宽比达到 11 : 1, 侧流式流场难以满足加工区流速要求, 在反 W 流场的基础上, 提出了一种阴极交叉结构设计, 解决了反 W 型流场中漏液情况。

2) 针对侧流式、反 W 型和改进后的反 W 型流场分别

开展了仿真分析, 仿真结果表明, 改进后的反 W 型流场改善了前两种流场的缺陷, 符合电解加工要求。

3) 为了验证仿真结果的正确性和流场设计的有效性, 开展了改进后反 W 型流场的扩压器电解加工试验, 试验结果显示该流场具有较好的加工稳定性。

### 参考文献:

- [1] 张明岐, 傅军英. 高温合金整体叶盘精密振动电解加工方法的应用分析[J]. 航空制造技术, 2009(22):26-29.
- [2] 徐家文, 云乃彰, 王建业, 等. 电化学加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008:3-5.
- [3] 张矿磊, 曲宁松, 朱栋, 等. 整体叶盘叶栅通道电解加工流场仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(6):98-101.
- [4] 刘嘉, 徐正扬, 万龙凯, 等. 整体叶盘叶型电解加工流场设计及实验[J]. 航空学报, 2014, 35(1):259-267.
- [5] ZHOU ZHI GU, DONG ZHU, TINGYU XUE, et al. Investigation on flow field in electrochemical trepanning of aero engine diffuser[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1/2/3/4):877-884.
- [6] L. Tang, W. M. Gan. Utilization of flow field simulations for cathode design in electrochemical machining of aerospace engine blisk channels[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(9/10/11/12):1759-1766.
- [7] KLOCKE F, ZEIS M, KLINK A. Interdisciplinary modelling of the electrochemical machining process for engine blades[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64(1):217-220.
- [8] F. Klocke, M. Zeis, T. Herrig, et al. Optical in situ measurements and interdisciplinary modeling of the electrochemical sinking process of inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 24:114-119.

收稿日期:2018-12-17

(上接第 24 页)

工序状态两个影响因素, 构建了生产线传递的关联多工序制造过程的质量流模型, 强调加工质量传递对产品质量的影响, 结合智能车间的工件工作缸加工过程案例, 找出了瓶颈工序及瓶颈参数, 验证了模型的实用性, 并给出了加工质量改进建议。

### 参考文献:

- [1] JOSE' V. Abellan - Nebot, LIU J, FERNANDO Romero Subiro'n, et al. State space modeling of variation propagation in multistation machining processes considering induced variations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(2):21002.
- [2] 姚旭峰, 杜世昌, 王猛, 等. 航天阀门多工序加工过程误差传递分析与建模[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1):113-121.
- [3] INMAN R R, BLUMENFELD D E, HUANG N, et al. Survey of recent advances on the interface between production system design and quality[J]. IIE Transactions, 2013, 45(6):557-574.
- [4] COLLEDANI M, TOLIO T. Joint design of quality and produc-

tion control in manufacturing systems[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4(3):281-289.

- [5] KIM J, GERSHWIN S B. Analysis of long flow lines with quality and operational failures[J]. IIE Transactions, 2008, 40(3):284-296.
- [6] WANG J, JINGSHAN L I, ARINEZ, et al. Quality analysis in flexible manufacturing systems with batch productions: performance evaluation and nonmonotonic properties[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2008, 7(3):671-676.
- [7] 张伟, 鲍敏, 冯世扣. 一种作业车间综合瓶颈辨识方法的研究[J]. 机电工程, 2016, 33(1):52-56.
- [8] JU F, LI J, XIAO G, et al. A quality flow model in battery manufacturing systems for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(1):230-244.
- [9] JU F, LI J, XIAO G, et al. Quality flow model in automotive paint shops[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(21):6470-6483.

收稿日期:2019-11-27