

多工序制造过程中的质量监控策略

孔德洋¹, 王兆卫², 刘健²

(1. 同济大学汽车学院, 201804 上海, kongdeyang@126.com; 2. 同济大学经济与管理学院, 201804 上海)

摘要: 为了减少质量指标之间的误差传播对制造工序质量监控系统中监控点配置决策的影响, 在综合分析监控点配置带来的直接收益和由误差传播带来的间接收益的基础上, 引入动态规划方法, 建立基于动态规划的多工序制造过程质量监控的决策模型. 将监控模型细化到工序质量指标层面, 分析多工序质量指标之间的误差传播关系及其带来的监控收益, 提高质量监控策略的合理性. 实例分析证明了该决策模型对于监控点配置决策的有效性.

关键词: 质量控制; 监控策略; 动态规划; 误差传播

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0087-05

Strategy of quality monitoring and control for a multi-stage manufacturing process based on error propagation

KONG De-yang¹, WANG Zhao-wei², LIU Jian²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, 201804 Shanghai, China, kongdeyang@126.com;

2. School of Economics and Management, Tongji University, 201804 Shanghai, China)

Abstract: To reduce the influence of current allocation strategy of monitoring points for control system of process quality and the influence of error propagation of quality indicators among processes, a decision-making model of quality monitoring and control for a multi-stage manufacturing process based on dynamic programming method is built up. The example analysis proves the validity of the model, and the results show that the model will benefit for monitoring and control and make the strategy formulation more reasonable.

Key words: quality control; strategy of monitoring and control; dynamic programming; error propagation

产品质量受产品各工序加工中误差传播、耦合与累积的影响, 如果不能对这些因素进行有效地监控, 就很难保证加工质量的稳定性; 因此, 全面规划监控策略, 合理设置质量控制点, 构建面向生产全过程的质量监控体系对企业保证制造质量具有重要的意义.

文献[1]研究了全检/不检方式下的监控策略模型, 如图1(a)所示. 文献[2-4]讨论了以spc方法为基础, 兼顾监控点配置的监控策略模型(图1(b)). 这些监控决策模型都是以保证最终的直通率为决策依据, 其决策的对象为工序层面, 而对质量指标之间误差传播关系进行监控带

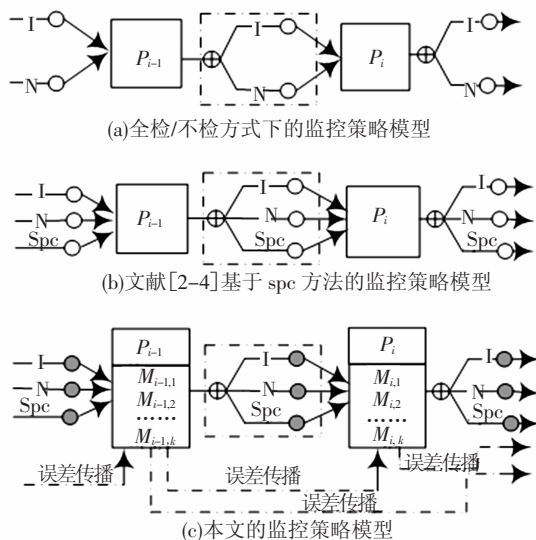
来的收益被忽略. 在多工序制造过程中, 当某个工序的质量指标被监控和改善后, 往往通过质量指标之间的误差传播使得其误差传播路径上的其他质量指标也得到改善, 从而带来间接的监控收益.

本文将分析对象落实到质量指标层次, 将由直通率提升带来的收益和质量指标之间误差传播关系带来的间接收益作为监控点配置决策依据, 构建如图1(c)所示的监控点配置决策模型.

1 多工序加工过程中质量指标间误差传播路径及其对监控决策的影响

多工序加工过程的质量指标之间主要存在基准面误差传播和误差复映两种形式的误差传播路径^[5], 不同工序的质量指标之间通过误差传播关系耦合在一起. 多工序加工过程中质量指标间的

误差传播关系如图2所示。



$P_i(i=1,2,\dots,n)$ 为工序编号; I 代表全检; N 代表不检;
Spc 表示基于 spc 方法的监控策略; 方块代表工序;
○ 代表直接的监控收益; ● 代表直接和间接的监控收益工序

图1 监控点配置决策模型演化

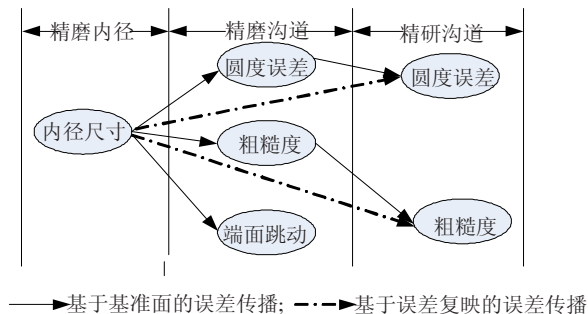


图2 某轴承外沟道磨削加工过程中质量指标之间的误差传播关系

当其中一个质量指标被监控和改善后,质量指标之间的误差传播关系使得其误差传播路径上的其他质量指标不合格率事件的发生概率降低,产品的不合格率降低,直通率增加,从而为企业带来间接的监控收益.因此,在多加工工序的监控系统决策中,需要将监控对象细化到质量指标层次,充分考虑质量指标之间的误差传播关系对监控收益的影响,使监控决策结果更加符合企业的实际情况。

2 基于误差传播关系的监控配置决策模型研究

多加工工序的监控系统的决策问题是一个典型的二阶动态规划问题,可以利用动态规划方法^[6]进行监控点设置决策分析和计算.动态规划决策网络的构成要素包括决策阶段、决策变量、决策路径及每条决策路径相应的决策收益。

2.1 监控决策模型中决策阶段、决策变量的定义和决策路径分析

为了简化计算,在构建动态规划的决策网络时,将每个工序定义为一个决策阶段,设决策阶段 T 内质量指标数目为 N_i ,则决策变量数目为 2^{N_i} ,决策变量 $x_{is}(s=1,2,\dots,2^{N_i})$ 定义为决策阶段 T 内的第 s 个决策变量.它的意思是对工序内的 i 个质量指标进行监控($0 \leq i \leq S_i$).决策变量集合 $D_i(x_i)$ 为阶段 T 内质量指标的全组合.每个决策变量对应于一条决策路径,决策路径的数目为 2^{N_i} .

2.2 监控点决策模型中阶段决策函数构建

根据动态规划理论,阶段函数为决策路径所产生的监控收益与成本之差。

2.2.1 直接监控收益 I_1 计算

设决策阶段 T 的工件数为 g_{t-1} 、其合格率为 $f_{(gt-1)}$.当对决策变量 x_{is} 中的一个质量指标 M_{ii} 进行监控和改善后,直接监控收益 I_1 计算如下:

1) 决策阶段 T 输出的合格率 f_{gt} 对质量指标 M_{ii} 进行监控后,其对应的不合格事件的发生概率发生变化,根据全概率公式,决策阶段 T 输出的不合格概率

$$f_{gt}^i = \sum_{i=1}^k P(A_i)P(B/A_i).$$

事件集合 A 为决策阶段内 i 个关键质量指标不合格事件的全组合.例如,如果决策阶段内有 3 个关键质量指标 M_{i1} 、 M_{i2} 和 M_{i3} .其相应的不合格事件分别为 A_{i1} 、 A_{i2} 、 A_{i3} .则事件集合 A 为

$$A = \{A_0 = (A_{i1}), A_1 = (A_{i2}), A_2 = (A_{i3}), A_3 = (A_{i1}A_{i2}), A_4 = (A_{i1}A_{i3}), A_5 = (A_{i2}A_{i3}), A_6 = (A_{i1}A_{i2}A_{i3}), A_7 = (\emptyset)\}.$$

2) 决策阶段 T 流出的工件数 g_t 对质量指标 M_{ii} 进行监控时,设进入到监控点的产品比例为 d_{ii} ,则进入到监控点的工件数量为 $(g_{t-1} * d_{ii})$,在监控点,不合格产品的报废率为 f_{tpi} ,则被报废工件数 g_d

$$g_d = g_{t-1} * d_{ii} * f_{tpi} * f_{gt}^i.$$

因此,决策阶段 T 流出的工件数:

$$g_i = g_{t-1} - g_{t-1} * d_{ii} * f_{tpi} * f_{gt}^i = g_{t-1}(1 - d_{ii} * f_{tpi} * f_{gt}^i).$$

根据决策变量的定义,其中往往包括多个关键质量指标,因此,决策阶段 T 流出的工件数:

$$g_t = g_{t-1}(1 - d_{ik} * f_{tkl} * f_{gt}^k)(1 - d_{il} * f_{tpi} * f_{gt}^l) \cdots (1 - d_{ip} * f_{tpi} * f_{gt}^p).$$

(1)

其中, $k, l, \dots, p$ 为决策变量中内相应的关键质量

指标的编码.

在不设置监控点情况下,不合格产品流入后续工序中会导致无效的加工费用. 在监控点设置后,节省了相关的无效费用^[4-5],即直接收益 I_1 :

$$I_1 = g_{t-1}(1 - d_{ik} * f_{ik1} * f_{gt}^{ik})(1 - d_{ii} * f_{ipi} * f_{gt}^{ii})L(1 - d_{ip} * f_{ip1} * f_{gt}^{i1}) * C_{T+1}, \\ (T \leq (N - 1)).$$

其中 C_{T+1} 为工序 $(T + 1)$ 内的标准综合费用.

2.2.2 监控点设置后间接收益 I_2 分析

当质量指标 M_{ti} 被监控和改善后,通过指标之间的误差传播关系,使得其误差传播路径上的其他质量指标也得到间接的改善,从而使企业获得间接的监控收益. 其计算过程如下.

1) 确定被监控质量指标 M_{ti} 误差传播路径上的质量指标集合 $\{M_{t1}, M_{t2}, \cdots, M_{tK}\}$. 以图 2 中的案例所示,当内径尺寸的不合格率降低后,通过误差传播使得精磨沟道和精研沟道的多个质量指标得到改善;

2) 确定 M_{ti} 与质量指标 $M_{js}(S \leq K)$ 之间的误差传播路径集合 $RD_{IS} \{rd_{is1}, rd_{is2}, \cdots, rd_{isn}\}$. 其中,误差传播路径的确认方法为从质量指标 M_{ti} 出发,到质量指标 M_{js} 之间质量指标顺序集合. 以图 2 中精研沟道工序的粗糙度质量指标为例,它与精磨内径之间的误差传播路径: $RD = \{(精磨内径, 内径尺寸) \rightarrow (精研沟道, 粗糙度)\} \cup \{(精磨内径, 内径尺寸) \rightarrow (精磨沟道, 粗糙度) \rightarrow (精磨内径, 内径尺寸)\}$;

3) 计算质量指标修正. 根据质量指标之间的误差传播路径,利用 Dempster 合成法则^[3,7-8] 从质量指标 M_{ti} 开始对误差传播路径上的质量指标进行修正.

Dempster 合成法则不仅充分考虑了已知证据,并且充分考虑质量专家的知识丰富性,对不同专家的评价结果进行综合权衡. 使其评估结果具有相对较高的可信性:

① 确定关键质量指标之间的误差传播路径集合,即质量指标 M_{ti} 与 $\{R_{x1}, R_{x2}, \cdots, R_{xK}\}$ 之间的误差传播关系;

② 评估关键质量指标之间的关联强度. 此处采用九级法对其关联强度进行赋值,分别用 $\{0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$ 来表示质量指标之间的关联强度;

③ 构建专家信度分配表. 设共有 K 个领域专家,根据每个专家相关领域的知识丰富度,在专家信度分配表中为每个专家分配信度权重因子 E_i . 引入 mass 函数对每个专家的评估数值进行归一

化处理和合成^[3,5,9],选择结构具有最高的信度函数值作为关联强度,即: $\{\xi_{x1}, \xi_{x2}, \cdots, \xi_{xk}\}$,如表 1 所示.

表 1 基于 Dempster 合成法则的关联因子的专家评分表

专家	ξ_{A1}	ξ_{A2}	ξ_{A3}	$\cdots$	ξ_{AK}
E_1	$e_1 m_1(A_1)$	$e_1 m_1(A_2)$	$e_1 m_1(A_3)$	$\cdots$	$e_1 m_1(A_4)$
E_2	$e_2 m_2(A_1)$	$e_2 m_2(A_2)$	$e_2 m_2(A_3)$	$\cdots$	$e_2 m_2(A_4)$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
E_N	$e_N m_N(A_1)$	$e_N m_N(A_2)$	$e_N m_N(A_3)$	$\cdots$	$e_N m_N(A_4)$
合成	$m(A_1)$	$m(A_2)$	$m(A_3)$	$\cdots$	$m(A_4)$

利用关联因子 $\{\xi_{x1}, \xi_{x2}, \cdots, \xi_{xk}\}$ 可得到不同因素对质量指标 M_{xs} 不合格事件发生概率影响的修正值为 $\{p'_{x1}, p'_{x2}, \cdots, p'_{xk}\}$. 然后利用全概率公式计算工序 P_T 修正后的工序产品合格率值,作为监控收益计算的依据.

4) 计算质量指标 M_{ti} 误差传播路径上的质量指标 M_{js} 间接监控收益 I_{IS} :

$$I_{IS} = \sum_{rd=1}^p g_s \times f_s \times C_{s+1}. \tag{2}$$

其中: g_s 为工序 S 的输入工件数量,可由式(1) 计算; f_s, C_{s+1} 分别为质量指标 M_{js} 不合格概率的改善值和 $(S + 1)$ 工序内单件工件的加工费用. 若 S 为最后一道工序,则 C_{s+1} 为工件报废费用.

根据式(2),质量指标 M_{ti} 监控和改善后带来的间接收益为

$$I_2 = \sum_{D=1}^k I_{ID} = I_{IS} = \sum_{D=1}^k \sum_{rd=1}^p g_s \times f_s \times C_{s+1}. \tag{3}$$

2.2.3 监控点设置后成本分析

选择决策变量 x_{tm} 后,监控收益的计算方法如式(1)、(2) 所分析. 企业付出的成本为

$$C_T = C_H + C_R + C_W = \sum_{s=1}^i (g_{t-1} \times d_{ts} \times C_{ls}) + \sum_{s=1}^i (g_{t-1} \times d_{ts} \times f_{ls1} \times C_{Rs}) + \sum_{s=1}^i (g_{t-1} \times d_{ts} \times f_{ls2} \times C_{ls}). \tag{4}$$

其中: C_H 为监控点设置及运营成本,例如硬件购置、维护等相关成本; C_R 为部分不合格工件的修复成本; C_W 为工件报废的成本,这个成本构成较为复杂,在文献[4] 中有详细分析; C_{ls} 为单件工件的监控费用; C_{Rs} 为单件不合格工件的修复费用; C_{ls} 为单件工件报废的损失.

根据公式(3)(4),阶段决策函数表达为

$$V_T(x_t) = (I_1 + I_2) - C. \tag{5}$$

根据动态规划理论,最优指标递推函数 $f_i(d_i)$ 为所有阶段决策函数的和,因此,最优递推函数为

$$f_i(d_i) = \max\{v_i(x_i) + f_{i+1}(d_{i+1})\}. \quad (6)$$

将式(4)、(5)带入(6),则最优指标递推函数为

$$\begin{aligned} f_k(d_k) = & \max\{g_{t-1}(1 - d_{ts} \times f_{tsl} \times P(B_{ts})) \times \\ & C_{t+1} + \sum_{D=1}^k \sum_{rd=1}^p g_s \times f_s \times C_{s+1} - \\ & \sum_{s=1}^i g_{t-1} \times d_{ts} \times C_I - \sum_{s=1}^i g_{t-1} \times \\ & d_{ts} \times f_{ts1} \times C_R - \sum_{s=1}^i g_{t-1} \times \\ & d_{ts} \times f_{ts2} \times C_L + f_{k+1}(d_{k+1})\}. \end{aligned}$$

约束条件:最终的产品合格率不小于最低合格

率的要求,即 $T_F \geq T_{\min}$ ($T_{\min}$ 为最低合格率要求).

3 应用案例

以图 2 中所示的某系列深沟球轴承加工为例,目前某轴承生产企业由于内套圈精磨内径工序加工能力较低,导致成品直通率无法达到设计要求,给其带来了较大的经济损失. 因此企业拟在套圈精磨工序增加 ZKJ-405F 型套圈内径尺寸在线检验仪. 此处需要评估自动仪设置的经济性,其基础数据为企业财务部门提供,如表 2 所示. 由于轴承是大批量生产,单件经济价值较低,不考虑产品的返修. 以两年为时间段进行评估.

表 2 工序关键质量指标及其相关成本

指标/工序	加工节拍/(件·h ⁻¹)	加工成本/ (分·件 ⁻¹)	检测成本/ (分·件 ⁻¹)	报废成本/(分·件 ⁻¹)
内径尺寸/精磨内径	450	3.593 40	1.197 08	20.203 5
圆度误差、粗糙度、端面跳动/精磨沟道	280	3.353 84	1.437 36	21.401 3
粗糙度、圆度误差/精研沟道	240	3.426 54	1.068 42	22.834 9

由图 2 可知,质量指标之间的误差传播路径包括精磨内径工序的内径尺寸与精磨和精研沟道两道工序的中的沟道圆度误差质量指标、断面跳动质量指标之间存在基于基准面的误差传播路径;精磨沟道和精研沟道两个工序的圆度误差质量指标和粗糙度误差质量指标之间存在基于误差复映的误差传播路径.

为了考核内径尺寸监控点的设置是否符合企业需求,本文分析各工序的关键质量指标之间的误差传播路径,根据前面提出的监控点配置决策模型实现方法,从精磨内径工序出发,将精磨内孔、精磨沟道和精研沟道各定义为一个决策阶段. 其中,精磨内孔决策阶段决策变量取值为 $\{Y$ (设立自动检测仪); N (不设立自动检测仪) $\}$. 精磨和精研沟道阶段,决策变量为关键质量指标的全组合,分别为 8 个和 4 个. 决策网络的初始输入是流入到精磨内孔工序的工件数量、产品合格率.

根据本文提出的计算方法和相关的基础数据,由边界条件得到所有满足条件的状态变量集合 $D_3(x_3)$,求解出相对应的 $V_3(d_3)$ 以及 $f_3(d_3)$. 计算最后一道工序加工后可能出现的合格品数,对于那些不满足最小直通率的情况,可以不予考虑,这样将大大减少计算量. 接着考虑 $K=2$ 时的情况,由状态变量 $D_2(x_2)$,对可能的决策,算出

$V_2(d_2)$,再由递推公式 $f_2(d_2) = V_2(d_2) + f_3(d_3)$,选择最大值. 依次类推,计算各阶段的情况.

上述计算过程是一个迭代计算过程,利用 MATLAB 软件的迭代计算模块来实现其计算过程,其计算过程包括如下几个步骤:

1) 决策变量的表示. 将每个决策变量产生的收益相应地存储到 $f_1[i], f_2[j], f_3[x]$ 3 个数组. 其中, $f_3[x]$ 存储的是决策路径带来的监控收益, $f_2[j]$ 存储的是选择决策变量所获得的监控收益,而 $f_1[i]$ 存储参数为 $\{i_1 =$ (设置内径在线监控仪), $i_2 =$ (不设置在线监控仪) $\}$ 所获得的监控收益. 其中 $f=1,2;s=1,2,\cdots,8;k=1,2,3,4$.

2) 根据设定的最终合格率条件,将 $f_3[x]$ 中小于设置条件的决策路径排除. 其计算量大大降低.

3) 调用 MATLAB 中的动态规划计算模型,实施迭代算法. 由最终合格率条件得到所有满足条件的决策变量集合 $D_3(x_3)$,计算得到相对应的 $V_3(d_3)$ 和 $f_3(d_3)$. 然后分析 $K=2$ 条件下的阶段决策函数,由决策变量集合 $D_2(x_2)$,对所有可行的决策路径,计算 $V_2(d_2)$,再由最优指标递推函数 $f_2(d_2) = V_2(d_2) + f_3(d_3)$,选择阶段最大收益结果. 同理,以此计算各阶段的收益. 最后得到的最优监控点设置组合如表 3 所示.

表3 监控点配置方案

加工工序	质量指标	监控规则	监控方法 / (件·h ⁻¹)
精磨内径	内径尺寸	全检	450
精磨沟道	圆度误差	抽检	8
	粗糙度	抽检	5
精研沟道	粗糙度	抽检	5
	圆度误差	抽检	5

设置内孔自动监测仪后,直通率由 80.936% 提高到 85.843%. 每台内孔自动监控带来的收益为 22.45 万元/年,大于仪器购置及其维护成本 9.4 万元/年. 因此内孔在线监控点的配置是合理的.

4 结 论

- 1) 本文综合分析监控点配置带来的直接收益和监控误差传播带来的间接收益,使得监控点的配置决策结果更具有科学性.
- 2) 在监控点配置决策算法中,引入了动态规划方法,同时,通过设置最终产品合格率为约束,在计算中可以尽早将不符合条件的决策路径排除. 与穷举法相比,具有更好的可实现性.

参考文献:

[1] ZHAO F, XU Xun, XIE S Q. Computer-aided inspection planning-the state of the art[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(3): 233 – 238.

[2] OPPERMANM M, SAUER W, WOHLRABE H. Optimization of inspection strategies by use of quality cost model and SPC[C]//ISSE. Calimanesti-Caciulata, Romania:[s. n.], 2004.

[3] NAIDU N V R. Mathematical model for quality cost optimization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(6): 811 – 815.

[4] 赵家黎, 郭 伟, 牛占文, 等. 基于误差流理论的多工位装配过程质量稳定性[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 88 – 93.

[5] FERREIRA R J P, DE ALMEIDA A T. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 24(6): 905 – 912.

[6] CRISTOBAL M P, ESCUDERO L F, MONGE J F. On stochastic dynamic programming for solving large-scale planning problems under uncertainty[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(8): 2418 – 2428.

[7] 王兆卫. 问题驱动的制造企业质量改进技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

[8] CHIN K S, DUAN Guijiang, TANG Xiaoqing. A computer integrated framework for global quality chain management[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 27: 547 – 560.

[9] JIE C, GREINER R, KELLY J, et al. Learning Bayesian network from data: an information-theory based approach[J]. Artificial Intelligence, 2002, 137: 43 – 90.

(编辑 杨 波)