

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.004

# 动态多工位车身串并联混合 装配系统可靠性评估研究

刘景才, 杨 警

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:**针对当前车身装配系统可靠性评估体系对偏差因素、可靠性要素间的相关性、过程衰退等方面的评价不完备的问题,对定位销定位偏差源的组成结构、结合来料零件定位孔、槽的尺寸质量和定位销本身定位能力水平的定位销磨损模型进行了研究。分析了系统要素可靠性间的相关性,根据 Copula 连接函数理论建立了相关性模型;对产品上所有关键产品特性(KPC)点在整体产品尺寸质量可靠性中所占权重进行了分配并建模,基于来料-产出流思想对串并联混合系统进行了简化,最终提出了一种综合考虑各偏差源动态输入的动态多工位车身串并联混合装配系统可靠性评估模型;利用此模型对车身某分总成装配系统进行了制造成本优化分配,并且给出了一套动周期预防性维护策略。研究结果表明:该可靠性模型精确度较高,适用于指导生产制造成本的优化和建立预防性维护策略。

**关键词:** 车身装配; 系统可靠性; 串并联混合装配系统

**中图分类号:** TH161; U463.06

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2018)11-1160-07

## Reliability evaluation of auto body multi-station series-parallel hybrid assembly system

LIU Jing-cai, YANG Jing

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of auto body reliability incomplete evaluation for deviation factors, correlation between reliability factors, process decline, the structure of locating pin deviation source were studied. The locating pin wear model was established according to the dimension of the locating hole, the size and quality of the slot and the positioning ability of the positioning pin. The correlation between the reliability of system elements was analyzed. According to the theory of Copula function, the correlation model was established. Consider the reliability of all KPC points on the product, the weight of the whole product quality reliability was assigned, and the quality reliability of the product was modeled by combining the weight and the quality reliability of a single KPC point. The idea of material incoming-output flow was proposed to simplify the series parallel hybrid system. Finally, a reliability evaluation model of dynamic multi station body serial and parallel hybrid assembly system considering dynamic input of each deviation source was proposed. Taking an assembly system for a car body as an example, the manufacturing cost was optimized based on the proposed reliability model, and a preventive maintenance strategy was presented. The results indicate that the reliability model has a high accuracy and can be used to guide the optimization of manufacturing cost and to contribute preventive maintenance strategy.

**Key words:** auto body assembly; system reliability; series parallel hybrid assembly system

## 0 引 言

车身装配系统可靠性评估对制造成本优化分配和动周期预防性维护而言具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>,因此国内外众多专家学者对其进行了深入的研究。国外 JIN 等<sup>[4]</sup>提出了一个简单的单工位可靠性评估框架;国内刘、文等<sup>[5-6]</sup>在此基础上研究了多工位车身装配系统的可靠性评估方法。然而这些评估方法存在以下几点问题:(1)在定位偏差组成分析上存在不足;(2)在定位销磨损的研究与表达中太过简单,考虑因素不全面;(3)在研究系统要素可靠性时并没有考虑系统要素间的相关性,然而根据文献[7-8]这种相关性是存在的;(4)在研究产品尺寸质量可靠性时过度关注尺寸质量较差的那些 KPC 点,忽略了对大多数尺寸质量良好点的评价,这造成了在评价中一些过程衰退状况无法通过产品质量可靠性衰退曲线图表达出来;(5)国内外对于车身装配系统的可靠性评估建模大多是基于串联系统提出的,而在串并联混合系统的可靠性评估框架上并没有形成一套完整的理论体系。

基于目前车身装配系统可靠性评估研究中存在的缺陷,本文将全面分析定位偏差源的组成,联合来料零件定位孔、槽的尺寸质量和定位销定位能力水平对定位销磨损量进行建模,分析系统要素相关性机理,把车身装配系统中的各系统要素可靠性的相关性分为工位内相关性和工位间相关性,基于 Copula 函数理论<sup>[9-10]</sup>,对这种相关性进行充分地量化表达,根据每个 KPC 点在装配过程中的重要性对其分配权重,结合给出的权重和可靠性评估方法对最终产品尺寸质量可靠性整个衰退周期进行全面地表达;提出来料-产出流的思想,基于这种思想构筑生产链模型,运用生产链模型对串并联混合装配系统进行简化,最终再结合提出的可靠性评估方法对车身装配过程中的串并联混合系统进行可靠性评估。

## 1 系统要素可靠性评估建模

### 1.1 偏差建模

因为在车身装配中 72% 的尺寸问题是由夹具因素导致的<sup>[11]</sup>,由此可简化系统要素为夹具系统。在单工位中定位销对来料薄板件定位时产生的定位偏差主要由两大因素导致:(1)指定位销本身,该因素贡献的偏差源包括定位销的安装误差、定位销的制造误差即圆度公差和定位销在长期使用中磨损导致的径向尺寸的降低;(2)指来料零件质量,在研究定位销定位偏差

组成时所指的来料零件的质量主要指定位孔和定位槽处的质量,该因素贡献的偏差源包括来料零件定位孔、槽的位置度公差,定位孔的圆度公差或者定位槽的平面度公差。

此外,影响最终单工位定位销定位偏差的因素还有配合间隙的设计,因此单工位中定位销的定位偏差可以表示为数学模型,四向定位销定位误差图如图 1 所示。

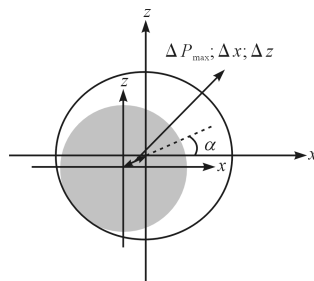


图 1 四向定位销定位误差图

定位销的最大定位误差为:

$$\Delta P_{\max} = T_{H1} + T_{H2} + w_p + T_{H3} + T_{H4} + g \quad (1)$$

四向定位销在两个方向的定位偏差分量为:

$$\Delta x = (T_{H1} + T_{H2} + w_p + T_{H3} + T_{H4} + g) \cos \alpha$$

$$\Delta z = (T_{H1} + T_{H2} + w_p + T_{H3} + T_{H4} + g) \sin \alpha \quad (2)$$

两向定位销在两个方向的定位偏差分量为:

$$\Delta x = (T_{H1} + T_{H2} + w_p + T_{H3} + T_{H4} + g) e \cos \beta$$

$$\Delta z = - (T_{H1} + T_{H2} + w_p + T_{H3} + T_{H4} + g) e \sin \beta \quad (3)$$

式中:  $T_{H1}$ —定位销的圆度公差;  $T_{H2}$ —安装时定位销的位置度公差;  $w_p$ —定位销的磨损量;  $T_{H3}$ —来料零件定位孔、槽的圆度或者平面度公差;  $T_{H4}$ —来料零件定位孔、槽的位置度公差;  $g$ —设计配合间隙;  $\alpha, \beta$ —定位销与定位孔、槽的配合夹角;  $e$ —由定位槽和两向定位销定位时的接触点决定的系数。

$\Delta x, \Delta z$  的取值如图 2 所示。

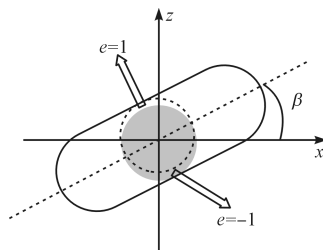


图 2 两向定位销定位误差图

### 1.2 定位销磨损量建模

定位销磨损量的累积不仅仅由其所承受的装配次数决定,还会受到来料零件定位孔、槽质量的影响和定位销自身定位质量水平的影响,因为不同的定位销定位质量水平和来料零件定位孔、槽质量决定了定位销和定位孔、槽之间的干涉程度,不同的干涉程度决定了

配合时摩擦力的大小,从而产生了相对应的磨损量。本文用定位销在长期使用过程中径向尺寸的减小量来间接表示定位销的磨损量,因为定位销的单次磨损量很小,根据经验在初始阶段是  $10^{-6}$  级别的,且在实际生产中来料零件定位孔、槽的质量和定位销的定位质量水平本身也是相对控制在比较高的状态,这两方面的因素对单次磨损量的影响并不是很明显;并且单次磨损量不可能是一个定值,在整个使用过程中伴随装配次数增加,由此假设定位销的磨损率(单次磨损量)服从正太分布,即:

$$\Delta w_l = f_w(w_{l-1}, u_{1l}, \sigma_{1l}, u_{2l}, \sigma_{2l})$$
$$w_l = w_{l-1} + \Delta w_l \tag{4}$$

$$\mu_{\Delta w_l} = f_{\mu_l}(w_{l-1}, u_{1l}, \sigma_{1l}, u_{2l}, \sigma_{2l})$$
$$\sigma_{\Delta w_l}^2 = f_{\sigma_l^2}(w_{l-1}, u_{1l}, \sigma_{1l}, u_{2l}, \sigma_{2l}) \tag{5}$$

$$\sigma_{1l} = \left[ \frac{T_{H1}}{6} \quad \frac{T_{H2}}{6} \right]; u_{1l} = [0 \quad 0]$$

$$\sigma_{2l} = \left[ \frac{T_{H3}}{6} \quad \frac{T_{H4}}{6} \right]; u_{2l} = [0 \quad 0] \tag{6}$$

式中: $l$ — 该定位销承受的第  $l$  次装配; $u_{1l}, \sigma_{1l}$ — 此时定位销定位水平能力; $u_{2l}, \sigma_{2l}$ — 此时定位孔、槽的尺寸质量水平; $\Delta w_l$ — 相对应的磨损率; $w_l$ — 相对应的磨损量。

基于经验公式,给出一个具体的定位销磨损率的分布公式为:

$$\mu_{\Delta w_l} = [\varphi_1(u_{1l} + u_{2l})^T + \varphi_2(\sigma_{1l} + \sigma_{2l})^T + \varphi_3 w_{l-1}] 10^{-6} + [\varphi_4(u_{1l} + u_{2l})^T + \varphi_5(\sigma_{1l} + \sigma_{2l})^T + \varphi_6 w_{l-1}] 10^{-6} \exp(-10^{-3} l) \text{mm}$$
$$\sigma_{\Delta w_l}^2 = [\varphi_7(u_{1l} + u_{2l})^T + \varphi_8(\sigma_{1l} + \sigma_{2l})^T + \varphi_9 w_{l-1}] 10^{-9} \text{mm}^2 \tag{7}$$

式中: $\varphi$ — 相对应的系数向量。

$\varphi$  作为一个标定量适应不同材料来做修正,车用定位销材料较为单一,多为碳素工具钢 T8,该标定量是一张基于装配次数的 Map 图。

标定完该 Map 图之后,实际磨损测量值和公式拟合值的对比如图 3 所示。

实线为公式拟合值,虚线为实际磨损测量值。  
测量方法为定位销每使 1 000 次用 CMM 在定位销周向测量 10 个点取均值和方差。

对于定位销系统来说定位销的定位误差不是一个定值,可以通过 Monte Carlo 仿真计算出一个均值,其相对应的定位偏差均值的阈值可以根据工程经验给出,表达成两个向量:

$$[\Delta x_1 \quad \Delta z_1 \quad \Delta x_2 \quad \Delta z_2 \quad \cdots \quad \Delta x_i \quad \Delta z_i \quad \cdots \quad \Delta x_n \quad \Delta z_n]^T$$
$$[\eta x_1 \quad \eta z_1 \quad \eta x_2 \quad \eta z_2 \quad \cdots \quad \eta x_i \quad \eta z_i \quad \cdots \quad \eta x_n \quad \eta z_n]^T \tag{8}$$

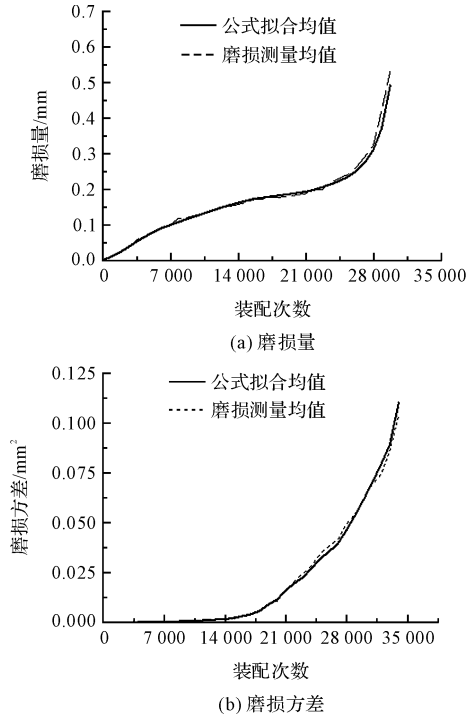


图 3 定位销磨损模型验证

如果该销子定位误差的均值在相对应的方向上超出阈值,那么可以得出该销子在相对应方向上的可靠性为 0,否则该销子的可靠性为:

$$R_{fi} = \frac{\left( \frac{1 - \Delta xi}{\eta xi + 1 - \Delta zi} \right)}{2} \eta zi \tag{9}$$

式中: $i$ — 第  $i$  个定位销; $\eta \cdot$ — 相对应的阈值; $R_{fi}$ — 第  $i$  个定位销的可靠性。

1.3 系统要素可靠性评估

工位内定位销的可靠性是相互影响的,定位销间定位能力水平的相关性如图 4 所示。

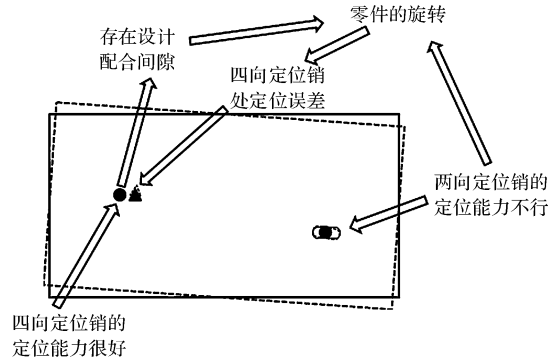


图 4 定位销间定位能力水平的相关性

图 4 中,设定四向定位销的定位能力水平很高,而两向定位销的定位能力水平偏低。由于定位配合间隙的设计存在定位能力差的定位销会影响到定位能力强的定位销的定位质量,且其定位误差与来料零件质量

有关。

对于工位间也存在这种相关性,因为上一个工位的产品是下一个工位来料零件的主要组成部分,为了描述这种相关性,可以用 Copula 函数来表达,该函数中存在一个系数来描述这种相关性,这种相关性可以表达如下:

$$a = \begin{cases} f_{a1}(w, u, \sigma) \\ f_{a2}(u, \sigma) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $a$ —Copula 系数,其值的大小介于  $(0, 1]$  之间,当这个值增加的时候其相关性就增加;  $f_{a1}$ —工位内的相关性函数;  $f_{a2}$ —工位间的相关性函数;  $u, \sigma$ —来料零件定位孔、槽的质量和定位销的定位能力水平向量。

因为各因素对相关性的影响都比较小,伴随着装配次数的增加,单个定位销的突然断裂、弯曲、松动的概率在增加,这导致系统突然失效的概率对单个定位销的定位状态相关性增大,由此相关性是一个伴随装配次数持续上升的一个指标,可以用指数函数来拟合相关性系数,其拟合公式如下:

$$\begin{aligned} f_{a1}(w, u, \sigma) &= 1 - \exp(\Re_1 w + \Re_2 |u| + \Re_3 \sigma) \\ f_{a2}(u, \sigma) &= 1 - \exp(\Re_4 |u| + \Re_5 \sigma) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\Re_i$ —相对应的系数。

根据 Copula 函数理论可以分别计算出工位内的系统要素可靠性和工位间的系统要素可靠性,其计算公式如下:

$$\begin{aligned} R_{f_{1/2}} &= \text{Prob}(\Delta x_1 \leq \eta x_1, \Delta z_1 \leq \eta z_1, \\ \Delta x_2 \leq \eta x_2, \Delta z_2 \leq \eta z_2) &= \hat{C}(R_{f_1}, R_{f_2}) = \\ R_{f_1} + R_{f_2} - 1 + C(1 - R_{f_1}, 1 - R_{f_2}) & \quad (12) \\ C(1 - R_{f_1}, 1 - R_{f_2}) &= \end{aligned}$$

$$\exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^2 (-\ln(1 - R_{f_i}))^a \frac{1}{a}\right]^a\right\} \quad (13)$$

式中:  $\hat{C}(\cdot, \cdot)$ —相对应的联合概率分布;  $C(\cdot, \cdot)$ —某个中间计算指标。

将式(13)代入到式(12)中可得:

$$\begin{aligned} R_{f_{1/2}} &= R_{f_1} + R_{f_2} - 1 + \\ \exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^2 (-\ln(1 - R_{f_i}))^a \frac{1}{a}\right]^a\right\} & \quad (14) \end{aligned}$$

根据式(12 ~ 14)的计算方法可以得到:

$$\begin{aligned} [Y_m(1, 1) \quad Y_m(2, 1) \quad \cdots \quad Y_m(\kappa, 1) \quad Y_m(\kappa + 1, 1) \quad \cdots \quad Y_m(2n - 1, 1) \quad Y_m(2n, 1)]^T \\ [\eta Y_m(1, 1) \quad \eta Y_m(2, 1) \quad \cdots \quad \eta Y_m(\kappa, 1) \quad \eta Y_m(\kappa + 1, 1) \quad \cdots]^T \end{aligned} \quad (18)$$

$$R_{q\kappa} = 1 - \frac{Y_m(\kappa, 1)}{\eta Y_m(\kappa, 1)} \quad (19)$$

式中:  $m$ —总工位数;  $Y_m(\cdot, \cdot)$ —相对应的偏差均值;  $\eta Y_m(\cdot, \cdot)$ —相对应的阈值;  $R_{q\kappa}$ —相应的点的可

$$R_{f_{1/2f_3}} = R_{f_{1/2}} + R_{f_3} - 1 + C(1 - R_{f_{1/2}}, 1 - R_{f_3}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} R_f &= R_{f_{1/2} \cdots f_{\lambda}} = \\ R_{f_{1/2} \cdots f_{\lambda-1}} + R_{f_{\lambda}} - 1 + C(1 - R_{f_{1/2} \cdots f_{\lambda-1}}, 1 - R_{f_{\lambda}}) &= \\ R_{f_{1/2} \cdots f_{\lambda-1}} + R_{f_{\lambda}} - 1 + \exp\left\{-\left[\left(-\ln(1 - R_{f_{1/2} \cdots f_{\lambda-1}})\right)^a \frac{1}{a} + \left(-\ln(1 - R_{f_{\lambda}})\right)^a \frac{1}{a}\right]^a\right\} & \quad (16) \end{aligned}$$

## 2 产品质量可靠性建模

### 2.1 产品偏差建模

在多工位装配系统中,零件在工位间经过加载、定位、装配、卸载的过程中偏差源包括单工位中的定位偏差和工位间的重定位偏差,且对于不同的夹具布局产品质量偏差对夹具定位偏差的敏感程度不同,因此可以运用状态空间模型来描述这种偏差传递与累积过程<sup>[12]</sup>,如图5所示。

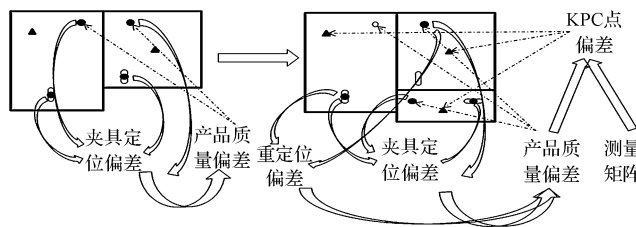


图5 状态空间模型

$$D(1) = B(1)U(1) + \omega(1)$$

$$D(j) = A(j-1)D(j-1) + B(j)U(j) + \gamma(j)$$

$$Y_j = C(j)D(j) \quad (17)$$

式中:  $B$ —敏感程度矩阵;  $U$ —定位偏差矩阵;  $D$ —产品偏差矩阵;  $A$ —重定位矩阵;  $C$ —观测矩阵;  $Y$ —KPC点偏差矩阵。

### 2.2 产品质量可靠性建模

对于通过状态空间模型得出的偏差值在指定的装配次数下不是一个确定值,进行 Monte Carlo 仿真的时候在指定的装配次数下存在着相对应的偏差均值,对于这样的偏差均值和相对应偏差均值的阈值可以通过向量表示,如果偏差的均值超出阈值,那么该 KPC 点在这个方向的产品质量可靠性为 0,否则表达式如下:

可靠性。

为了全面地评价产品的质量可靠性,本研究给每一个 KPC 点一个相对应的权重值,来描述其在总体产品质量可靠性中的重要性。由此产品质量可靠性可以

表达为:

$$R(q) = \sum_{\kappa=1}^{2n} K_{\kappa} R_{q\kappa} \tag{20}$$

3 多工位串并联混合系统可靠性评估建模

在实际生产加工中,由于各工位工作量和加工速度的差异,并联结构在车身薄板件装配系统中是很常见的,一个简单的串并联混合系统如图 6 所示。

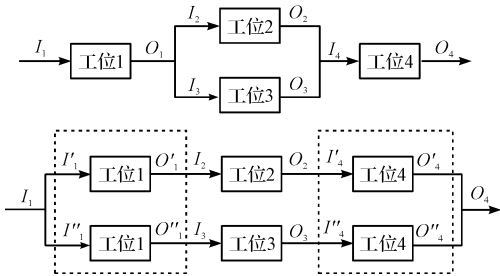


图 6 串并联系统的生产链模型

该系统由 4 个工位组成,其中工位 2 和工位 3 组成一个并联结构,与另外两个工位串联而成。根据来料 - 产出流的思想本研究引入生产链模型,整个系统的来料 - 产出流主要形成两条生产链,该两条生产链表达如下:

$$\begin{aligned} I_1 &\rightarrow O_1 \rightarrow I_2 \rightarrow O_2 \rightarrow I_4 \rightarrow O_4 \\ I_1 &\rightarrow O_1 \rightarrow I_3 \rightarrow O_3 \rightarrow I_4 \rightarrow O_4 \end{aligned} \tag{20-1}$$

式中: $I^*$ —相对应工位的来料; $O^*$ —相对应工位的产出。

假设工位 1 和工位 2 如图 6 虚线框内所示,则该系统的生产链可以清晰地表达出来,从而完成对系统的简化,即:

$$\begin{aligned} I_1 &\rightarrow I'_1 \rightarrow O'_1 \rightarrow I_2 \rightarrow O_2 \rightarrow I'_4 \rightarrow O'_4 \rightarrow O_4 \\ I_1 &\rightarrow I''_1 \rightarrow O''_1 \rightarrow I_3 \rightarrow O_3 \rightarrow I''_4 \rightarrow O''_4 \rightarrow O_4 \end{aligned} \tag{20-2}$$

进一步深化生产链思想,把任意多工位串并联成混合生产系统,标准生产链模型如图 7 所示。

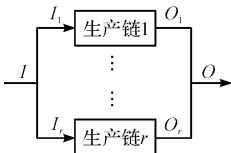


图 7 标准生产链模型

每一条生产链的链可靠性可以表示为:

$$R_{\zeta}(t) = R_{q_{\zeta}} \cdot R_{f_{\zeta}} \tag{21}$$

式中: $\zeta$ —第  $\zeta$  条生产链; $R_{\zeta}(t)$ — $t$  时刻该生产链的链可靠性; $R_{q_{\zeta}}$ —该时刻生产链的产品质量可靠性; $R_{f_{\zeta}}$ —

该时刻生产链的系统要素可靠性。

再根据图 6 可以得出串并联混合系统的系统可靠性为:

$$R(t) = \sum_{\zeta=1}^r \frac{I_{\zeta}}{I} R_{\zeta}(t) \tag{22}$$

4 串并联混合系统可靠模型的应用

4.1 成本优化分配

本文定义制造成本为薄板件的加工成本和定位销的加工成本,对于这些加工成本是和制造精度成正比的,精度越高成本越高,其表达式为:

$$C_p = \frac{\varphi_p}{T_H}; C_f = \frac{\varphi_f}{T_H} = \frac{\varphi_{f1}}{T_{H3}} + \frac{\varphi_{f2}}{T_{H4}} \tag{23}$$

$$C = C_p + C_f \tag{24}$$

式中: $\varphi$ —相对应的系数。

对于一条生产线的设计而言,如何在规定的总成本下合理地分配制造成本,是一个重要问题。不同的成本分配对应着不同的系统可靠性衰退曲线图,本文提出的面向可靠性最优化的制造成本分配模型表达式为:

$$\begin{aligned} T_H^* &= \arg \max \{ R(t_{5000}) \} \\ \text{st. } C &\leq C_{UP} \end{aligned} \tag{25}$$

因为影响产品尺寸质量可靠性的根源是定位销定位偏差的增大,且这也是影响产品质量可靠性的主要原因,所以式(25)可以简化为:

$$\begin{aligned} T_H^* &= \arg \min \{ T_H + T_{H3} + T_{H4} \} \\ \text{st. } C &\leq C_{UP} \end{aligned} \tag{26}$$

4.2 动周期预防性维护策略

在实际生产中产品质量的控制是很重要的。正确的生产线维护理念是在实现产品质量控制的基础上对产品质量水平和产线工装运转状态进行预测,在产品质量没有出现问题 and 工装没有失效之前就进行维护。系统可靠性综合评价了系统要素状态和产品质量状态两个重要的方面,可以通过基于系统可靠性进行预防性维护。为了能够较好地同时控制系统要素的状态和系统质量的状态,本文给可靠性设定了 3 个阈值分别为系统要素可靠性阈值、产品质量可靠性阈值和系统可靠性阈值。一旦其中一个可靠性值小于阈值系统就要采取相应的维护,根据可靠性对每一个定位销磨损的敏感程度、每一个定位销的磨损状态动周期和不定数量的更换失效的定位销,同时监控来料零件质量,一旦来料零件质量过差,系统就会报警,更换来料零件,即:

$$R_q \leq R_q^*; R_f \leq R_f^*; R \leq R^* \tag{27}$$

## 5 实例应用

某合资汽车车架分总成的装配流程图如图 8 所示。

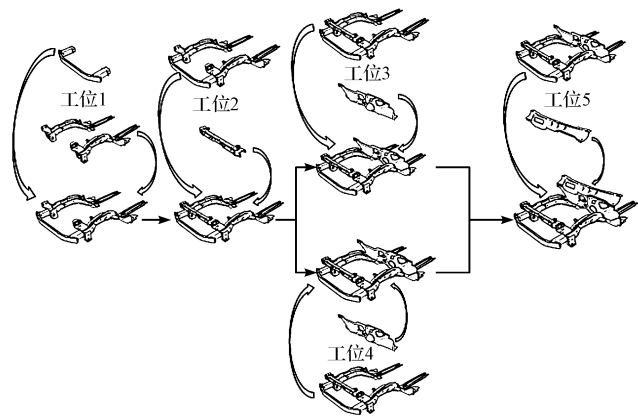


图 8 装配流程图

工位 1—前纵梁与前保险杠装配工位;工位 2—水箱横梁和工位 1 生产的产品装配工位;工位 3, 工位 4—前围板下板和工位 2 生产的产品装配工位;工位 5—前围上板与工位 3、工位 4 生产的产品装配工位,最终组成成分总成

案例中设定的  $\varphi$  参数和  $T_{H2}, g$  参数如下:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= [250 \ 250] & \varphi_2 &= [120 \ 120] & \varphi_3 &= [110] \\ \varphi_4 &= [350 \ 350] & \varphi_5 &= [330 \ 330] & \varphi_6 &= [220] \\ \varphi_7 &= [120 \ 120] & \varphi_8 &= [55 \ 220] & \varphi_9 &= [330]; \\ T_{H2} &= 0.048 \text{ mm}; g = 0.01 \text{ mm}. \end{aligned}$$

定位销和输入零件的制造成本模型中的参数设定值如下:

$$C_T = C_L + C_p + C_f = \frac{\varphi_p}{T_{H1}} + \frac{\varphi_{\rho 1}}{T_{H3}} + \frac{\varphi_{\rho 2}}{T_{H4}} = \frac{7}{T_{H1}} + \frac{200}{T_{H3}} + \frac{93}{T_{H4}}$$
$$C_{UP} = 6\,000 \text{ RMB} \tag{28}$$

根据式(26),通过 Matlab 中 Fmincon 函数优化后的结果如下: $T_{H1} = 0.018\,55 \text{ mm}$ ;  $TH_3 = 0.064\,51 \text{ mm}$ ;  $TH_4 = 0.036\,87 \text{ mm}$ 。

根据式(22),其可靠性衰退过程如图 9 所示。

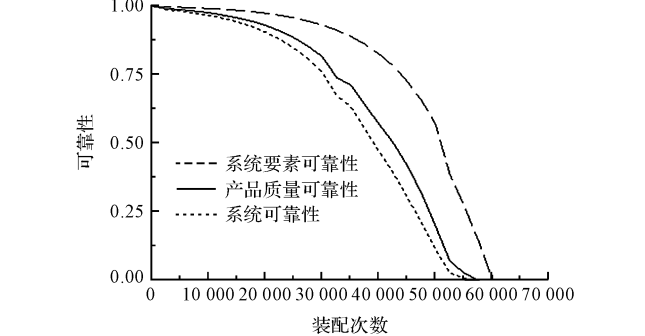


图 9 可靠性衰退过程图

由图 9 可知:在没有对产线进行维护的情况下系统各方面的可靠性都伴随装配次数的增加而降低,3 条曲线显示初期各可靠性下降比较平缓,但是随之装配次数的增加,到后期下降速度明显加快,原因在于此时定位磨损在过了正常磨损阶段之后进入急剧磨损阶段导致的;曲线中部分阶段不是很平滑,原因在于相应的装配次数下对应的某定位销或 KPC 点的可靠性已经降低到零,不能持续下降导致。

案例中设定的可靠性阈值为: $R_q^* = 0.85$ ;  $R_f^* = 0.725$ ;  $R^* = 0.75$ 。

根据式(27)经历过系统要素可靠性失效维护,产品质量可靠性失效维护和最终系统失效维护后,整个过程中系统可靠性的曲线变化如图 10 所示。

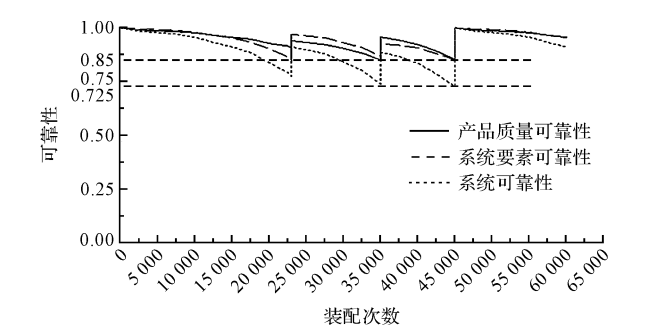


图 10 维护过程可靠性变化流程图

由图 10 可见:经过维护后各可靠性有较好的提升,这是因为被选择更换的定位销磨损量较大,且产品质量 KPC 点处的偏差对其很敏感,产品质量可靠性的提升和系统可靠性的提升比系统要素可靠性的提升明显很多,这是由于各可靠性设定阈值相差较大导致的。

## 6 结束语

本文全面地分析了定位销定位误差的组成,结合来料零定位孔、槽的尺寸质量和定位销的定位能力水平对定位销磨损量进行了量化建模,分析了系统要素可靠性的相关性的产生过程,把这种相关性分成工位内和工位间两个部分,通过 Copula 函数理论对这种相关性进行了充分地量化表达,在评价产品质量可靠性的时候充分考虑了产品上每一个 KPC 点的可靠性,通过分配权重的方法对产品质量可靠性进行了评估;提出了来料-产品流的思想从而引入了生产链模型,通过生产链模型很好的简化了串并联混合系统,完成了动态多工位串并联混合系统的可靠性评估建模。

最终,本文通过某车身分总成对提出的可靠性评估模型和应用方法分别在制造成本优化分配和系统周期预防性维护两个方面进行了应用,为提高汽车薄板件装配质量提供了一个新的思路。

## 参考文献 (References):

- [1] HE Y, HE Z, WANG L, et al. Reliability modeling and optimization strategy for manufacturing system based on RQR chain[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2015 (15):1-13.
- [2] SRIKANTH D, KULKARNI M S. Quality, reliability and maintenance (q, r & m) issues in reconfigurable manufacturing systems (RMS)[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2011(110-116):1442-1446.
- [3] CHEN Yong, JIN Jiong-hua, SHI Jian-jun. Integration of dimensional quality and locator reliability in design and evaluation of multi-station body-in-white assembly processes[J]. **Iie Transactions**, 2004, 36(9):827-839.
- [4] JIN J, CHEN Y. Quality and reliability information integration for design evaluation of fixture system reliability[J]. **Quality and Reliability Engineering International**, 2001, 17(5):355-372.
- [5] 刘银华,纪飞翔,叶夏亮. 车身多工位装配系统可靠性评估与维护策略研究[J]. 中国机械工程,2016,27(2):273-277.
- [6] 文泽军,刘继军,赵延明,等. 薄板装配工艺系统可靠性建模与分析[J]. 中国机械工程,2016,27(3):376-382.
- [7] TAO F H, MOU P B, JIA C Z, et al. The gears system reliability analysis with correlation among the components of gear box in self-propelled gun[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2014(526):230-235.
- [8] YU Y, HAO Z, WANG S, et al. Correlation analysis for screening key parameters for passive system reliability analysis[J]. **Annals of Nuclear Energy**, 2014(77):23-29.
- [9] TANG J Y, HE P, CHENG S J. Copula reliability calculation model for  $k/n(F)$  systems considering failure correlation[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2013(446-447):1045-1051.
- [10] HAN W Q, ZHOU J Y. Fatigue reliability copula model of structural systems with fatigue life correlation[J]. **Advanced Materials Research**, 2011(199-200):548-554.
- [11] CEGLAREK D, SHI Jian-jun. Variation reduction for assembly: methodologies and case studies analysis [R]. Ann Arbor:University of Michigan,1993.
- [12] LIU J, JIN J, SHI J. State space modeling for 3-D variation propagation in rigid-body multistage assembly processes [J]. **IEEE Transactions on Automation Science & Engineering**, 2010, 7(2):274-290.

[编辑:周昱晨]

## 本文引用格式:

刘景才,杨 警. 动态多工位车身串并联混合装配系统可靠性评估研究[J]. 机电工程,2018,35(11):1160-1165.

Reliability evaluation of auto body multi-station series-parallel hybrid assembly system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(11):1160-1165.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>