

# 可靠性驱动装配过程建模方法\*

张根保 葛红玉 王国强 刘佳

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**【摘要】** 针对现有产品装配过程中可靠性难以保证的问题,以灰色系统理论与多色集合理论为建模工具,提出可靠性驱动的产品装配过程建模方法。描述了影响装配过程可靠性主要工步的确定方法,分析了影响各工步的主要因素,详细阐述了各因素与各道工步之间关系矩阵的建立方法及影响装配可靠性主要因素的确定方法,提出了针对各主要影响因素的可靠性控制措施,从而达到产品装配过程可靠性驱动的目的。以某加工中心数控转台可靠性驱动的装配工艺过程控制为例证明了该方法的可行性。

**关键词:** 装配过程 数控转台 可靠性驱动 灰色系统理论 多色集合理论

**中图分类号:** TH165+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0192-05

## Reliability-driven Modeling Approach of Assembly Process

Zhang Genbao Ge Hongyu Wang Guoqiang Liu Jia

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

### Abstract

For the problem of difficulty to guarantee products assembly process reliability, reliability-driven modeling approach of the assembly process was presented based on grey system theory and polychromatic sets theory. A method was described to determine the major assembly process step to public the reliability. Impact factors of each working step were analyzed. The methods to establish the relationship matrix between the various factors and the process step and to determine the main factors of the assembly reliability were elaborated. The control measures for reliability of the main factors were proposed. The purpose of reliability-driven for assembly process was achieved by above methods. An example of controlling assembly process for a machining center NC rotary table reliability-driven showed the feasibility of the method.

**Key words** Assembly process, NC rotary table, Reliability-driven, Grey system theory, Polychromatic sets theory

### 引言

产品的装配过程是产品设计制造过程中花费成本最高、对质量影响最大的一个环节。可靠性是产品的关键质量特性之一,确保装配过程中产品的可靠性对于提高产品装配质量具有非常重要的意义。建立能够准确表示装配过程可靠性与影响因素关系的模型,从而确定驱动装配过程可靠性的元措施,对

产品生产尤为重要,也是目前研究的热点与难点。

对于复杂的产品,影响装配过程可靠性的工步间具有耦合性、复杂性及影响程度的未知性,因此建立精确的模型变得非常困难。目前,利用灰色系统理论和多色集合理论在产品制造过程质量控制中已有一定的研究成果<sup>[1-6]</sup>,在预防、控制产品质量方面提供了有价值的方法和结论,但如何利用灰色系统理论和多色集合理论控制装配过程的可靠性还未见

收稿日期: 2010-11-17 修回日期: 2010-12-23

\* 国家自然科学基金资助项目(50835008)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z119)、国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-016、2009ZX04001-013、2009ZX04001-023)、西交大合作国家重大专项(2010ZX04014-015)和数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助项目

作者简介: 张根保,教授,博士生导师,主要从事现代质量工程、先进制造技术和可重构制造装备等研究, E-mail: gen.bao.zhang@263.net

报道。

基于上述原因,本文采取以下技术路线:首先分解装配工艺到工步级;然后利用灰色系统理论中灰色关联度分析方法,在描述影响装配过程可靠性工步信息动态特征的基础上,确定影响装配过程可靠性的主要工步,达到强化主要因素弱化次要因素的目的,同时大大减小建立模型的困难,增强问题的可解决性;通过对装配过程进行全方位分析,找出影响装配可靠性的主要因素,利用多色集合理论建立所有影响因素与各主要工步之间的关联矩阵;最后通过对关联关系的分析确定主要影响因素,从而确定驱动装配过程可靠性的元措施。

## 1 产品装配过程灰色关联度分析

产品装配过程受多道工序影响,并且影响程度和影响规律未知,因此系统的“贫”信息性使该系统构成了一个灰色系统<sup>[7]</sup>。

灰色关联度分析模型是一种序关系模型,利用灰色关联度顺序来描述各要素与系统关系的强弱,其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。该方法弥补了采用数理统计方法作系统分析所导致的不足,对样本量的多少和样本有无规律都同样适用,而且计算量小。

### 1.1 灰色关联度分析模型

现定义产品装配过程行为序列为母序列,各工步行为序列为子序列,母序列与子序列均为行为时间序列。由于装配过程中各工步行为的目的不同,因此各工步指标值通常具有不同的量纲,如果子序列与母序列的数据大小相差很大,则小数容易被大数掩盖。为保证各工步间具有等效性,需对原始数据进行无量纲化和归一化<sup>[8]</sup>。

现设作为母序列的装配过程系统行为时间序列为

$$X_0' = \{x_0'(1), x_0'(2), \dots, x_0'(n)\}$$

作为子序列的各工步行为时间序列分别为

$$X_1' = \{x_1'(1), x_1'(2), \dots, x_1'(n)\}$$

⋮

$$X_m' = \{x_m'(1), x_m'(2), \dots, x_m'(n)\}$$

式中  $n$ ——时间数  $m$ ——工步数

此处用区间化变换方式对各行为序列无量纲化,无量纲化后各序列分别用  $X_0, X_1, \dots, X_m$  表示,区间变换公式为

$$x_i(j) = \frac{x_i'(j) - \min_j x_i'(j)}{\max_j x_i'(j) - \min_j x_i'(j)} \quad (i=0, 1, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

则各子序列对母序列在  $j$  点的关联系数为

$$\gamma(x_0(j), x_i(j)) = \frac{\min_i \min_j |x_0(j) - x_i(j)| + \xi \max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|}{|x_0(j) - x_i(j)| + \xi \max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|} \quad (i \neq 0) \quad (2)$$

式中  $\xi$ ——分辨系数,  $\xi \in (0, 1)$ , 通常  $\xi$  取 0.5

两序列间的灰色关联度可用两序列中各对应点的灰色关联度系数的平均值来计算<sup>[9]</sup>,即各子序列对母序列的灰色关联度为

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(x_0(j), x_i(j)) \quad (i \neq 0) \quad (3)$$

### 1.2 数控转台部件装配过程灰色关联度分析

现以某机床厂加工中心主要功能部件数控转台为例,对系统灰色关联度分析方法进行详细阐述。数控转台系统装配过程中的主装配线上工步有 17 道:①收集零件,按一定的清洁度清洗零件。②在回转体上装上轴承,按一定的力矩拧紧安装螺钉。③校轴承回转中心与轴的同轴度,配做定位销。④将定位套与回转体进行刮削配合,用蜗轮配刮定位套面确保与轴承回转轴心达到一定垂直度。⑤校正定位套上孔与回转轴线同轴度,配做定位销。⑥校正蜗轮节圆对轴承回转中心的圆跳动,配做定位销。⑦拧紧蜗轮安装螺钉,施加力矩。⑧在回转体装校组件上装上心轴,校心轴与轴承回转中心同轴度,配做定位销。⑨在滑座上装上感应开关支架,拧紧螺钉,四组螺钉锁紧缸组件预装在回转体上。⑩将回转体组件装至滑座上,确保螺钉锁紧缸组件装入滑座。⑪拧紧轴承安装螺钉,施一定力矩。⑫装夹制动片组件,检查组件间隙的一致性。⑬测量心轴上肩隔面至圆光栅安装面尺寸。⑭装上圆光栅,确保圆光栅上内圈零件与回零感应开关的相位差。⑮拧紧安装板。⑯蜗轮蜗杆副安装。⑰转台电动机安装。

上述 17 道工序都有其一定的指标数据,部分原始数据如表 1 所示。

现从该机床厂资料数据得到的数控转台装配过程系统历年的可靠度序列,即母序列为

$$X_0' = \{0.762, 0.753, 0.765, 0.781, 0.772, 0.734\}$$

该母序列数据是利用数控转台装配过程各道工序合格率直接相乘得到,各道工序合格率是通过分析多次装配过程的各基础工步行为合格次数与总次数之比得到。

将表 1 中数据与母序列数据利用式(1)~(3)计算出各子序列对于母序列的灰色关联度分别为

表1 数控转台装配过程各道工序指标值部分原始数据

Tab.1 Part original data of index value of NC rotary table assembly process steps

工步指标	年份					
	2004	2005	2006	2007	2008	2009
零件清洁合格率	0.821	0.813	0.794	0.834	0.851	0.832
安装轴承的拧紧力矩准确率	0.980	0.990	0.998	0.978	0.996	0.994
回转中心与轴的同轴度	0.015	0.010	0.009	0.013	0.012	0.011
定位套面与轴承轴心垂直度	0.020	0.015	0.018	0.017	0.021	0.013
定位套孔与回转轴线同轴度	0.010	0.009	0.012	0.013	0.015	0.009
蜗轮节圆对轴承回转中心跳动度	0.025	0.020	0.015	0.014	0.012	0.018
拧紧蜗轮力矩准确率	0.970	0.980	0.986	0.995	0.983	0.987
心轴与轴承回转中心同轴度	0.010	0.009	0.011	0.013	0.008	0.012
感应开关之间装配合格率	0.980	0.990	0.975	0.986	0.968	0.987
螺钉锁紧缸组件装配合格率	0.974	0.986	0.975	0.981	0.964	0.968
轴承安装螺钉的施力矩准确率	0.997	0.996	0.987	0.995	0.989	0.998
夹紧制动片组件间隙一致性	0.520	0.530	0.490	0.480	0.500	0.510
肩隔面至圆光栅安装面尺寸/mm	3.010	3.020	2.980	2.990	3.030	2.970
内圈零件与回零感应开关相位差/(°)	16.000	17.000	15.000	14.000	16.000	17.000
拧紧安装板的施力矩准确率	0.986	0.983	0.968	0.976	0.990	0.981
蜗轮蜗杆副安装(轴向窜动)	0.009	0.010	0.012	0.011	0.010	0.013
转台电动机轴与蜗杆轴平行度	0.110	0.090	0.100	0.095	0.120	0.112

$$\gamma = \{\gamma(X_0, X_1), \gamma(X_0, X_2), \dots, \gamma(X_0, X_{17})\} = \{0.646\ 446, 0.666\ 214, 0.824\ 424, 0.644\ 814, 0.528\ 911, 0.707\ 100, 0.695\ 140, 0.646\ 446, 0.606\ 533, 0.792\ 838, 0.739\ 833, 0.710\ 259, 0.605\ 612, 0.643\ 792, 0.739\ 139, 0.663\ 851, 0.644\ 384\}$$

由上述计算出的灰色关联度可看出,与数控转台装配过程可靠性相关性从强到弱的前7道工序分别为③、⑩、⑪、⑮、⑫、⑥、⑦。该结果的得出可以强化主要工步对数控转台装配过程系统可靠性的影响,从而有针对性的控制各主要工步的影响因素,达到数控转台装配过程系统可靠性驱动的目的。下面利用多色集合理论中布尔矩阵表示各主要工步与影响因素之间的关系,并有针对性的确定可靠性驱动元措施。

## 2 产品装配过程多色集合理论建模分析

根据上述分析,确定了该机床厂影响数控转台装配过程可靠性主装配线上前7强工步,要想保证数控转台装配过程可靠性,需确保各工步可靠性,本文主要确定影响前7强工步的因素,通过建立多色集合布尔矩阵,确定各行为因素与装配过程可靠性之间的关系。

### 2.1 多色集合理论分析

多色集合是一种新的信息处理数学工具,对于处理离散事件动态系统理论性的问题具有形式化与柔性化的优势。多色集合理论核心思想是将系统作为一个集合,将系统中因素作为集合元素,各元素都有多个影响因素,这多个影响因素可抽象为集合中

各元素的多种颜色,所发生的影响因素组合成不同的集合颜色,根据集合颜色确定系统颜色,即可确定系统性质<sup>[10-12]</sup>。

针对产品装配过程,将影响装配过程可靠性的主要工步组成一个集合,将装配过程可靠性看成统一颜色,各工步看成集合中的元素,将单工步性质看成个人颜色,某工步的多个影响因素构成该工步个人颜色,组成多色集合的各元素的个人颜色的存在是统一颜色存在的首要原因,用该方法构造装配过程可靠性与各工步影响因素特性之间的布尔关系模型,实现上述信息形式化的描述,确定驱动装配过程可靠性的措施。

现设装配过程系统  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ ,  $a_p$  表示装配过程中的各道工序,  $p = 1, 2, \dots, k$ , 用  $F(A)$  表示装配过程系统统一颜色,即系统行为可靠性;用集合  $F(A) = \{F(a_1), F(a_2), \dots, F(a_k)\}$  表示集合  $A$  中元素个人颜色的集合,其中  $F(a_p)$  表示工步  $a_p$  的个人颜色,即该工步行为可靠性;用  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_l\}$  表示所有影响因素集合,其中  $F_q$  表示各影响因素,  $q = 1, 2, \dots, l$ , 各主要工步可靠性受某因素影响时,可记  $a_p F_q = 1$ , 不受某因素影响时记  $a_p F_q = 0$ 。装配过程某工步行为可靠性  $F(a_p)$  通过各影响因素的逻辑组合实现,由于各因素是以逻辑或的关系影响某道工序,因此  $F(a_p) = \bigcup_{q=1}^l a_p F_q$ , 又因为各道工序同样是以逻辑或的关系影响装配过程系统可靠性,因此  $F(A) = \bigcup_{p=1}^k F(a_p)$ ; 可得装配过程系统可靠性与影响各工步因素之间的逻辑关系为

$$F(A) = \bigcup_{p=1}^k \bigcup_{q=1}^l a_p F_q \quad (a_p F_q = 1 \text{ 或 } a_p F_q = 0) \quad (4)$$

则装配过程可靠性可用所有工步与所有因素之间布尔关系矩阵表示为

$$F(A) = [F(a) \times F] = \begin{bmatrix} a_1 F_1 & \cdots & a_1 F_q & \cdots & a_1 F_l \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_p F_1 & \cdots & a_p F_q & \cdots & a_p F_l \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_k F_1 & \cdots & a_k F_q & \cdots & a_k F_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.2 数控转台部件装配系统多色集合建模分析

影响数控转台装配过程主装配线工步性质的可能因素有：①锈渍未除干净。②毛刺未除净。③力矩扳手磨损出现打滑。④力矩扳手读数系统故障。⑤安装零件在加工过程中出现误差。⑥轴与孔的同

轴度保证性不好。⑦安装面与轴线不垂直。⑧平面度保证性不好。⑨跳动度保证性不好。⑩零件装配的一致性不好。⑪测量工具出现测量误差。⑫感应开关感应区域调整不合理。⑬感应开关出现故障。⑭螺钉锁紧缸组件装配不合格。⑮装配过程中未用定量工具。⑯蜗轮蜗杆啮合磨损。⑰装配时间隙调整不合理。⑱电动机或蜗杆装配不合格。

由 1.2 节灰色关联度分析算出的影响装配过程可靠性的主要工步,结合 2.1 节装配过程多色集合理论,可得  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_7\}$ ,  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_{18}\}$ ,集合  $A$  中各元素分别代表 1.2 节中求出的主要工步③、⑩、⑪、⑮、⑫、⑥、⑦;各主要工步性质受某因素影响时,可记  $a_p F_q = 1$ ,在布尔矩阵表格中用圆点表示,不受某因素影响时记  $a_p F_q = 0$ ,用空白格表示,根据式(5),则各工步的多色集合布尔矩阵如图 1 所示。

	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$	$F_{17}$	$F_{18}$
$a_1$					●	●												
$a_2$														●				
$a_3$			●	●														
$a_4$			●	●														
$a_5$										●	●							
$a_6$					●				●									
$a_7$			●	●														

图 1 数控转台装配过程各道工步影响因素的多色集合

Fig.1 Polychromatic sets of factors of NC rotary table assembly process steps

由布尔矩阵表格及式(4)可将各工步元因素与转台装配过程可靠性之间的布尔关系模型表示为

$$F(A) = a_1 F_5 \vee a_1 F_6 \vee a_2 F_{14} \vee a_3 F_3 \vee a_3 F_4 \vee a_4 F_3 \vee a_4 F_4 \vee a_5 F_{10} \vee a_5 F_{11} \vee a_6 F_5 \vee a_6 F_9 \vee a_7 F_3 \vee a_7 F_4 \quad (6)$$

由式(6)可以直观地看出影响该装配过程可靠性的工步和因素,从而便可直接采取措施对这些元

因素进行控制,达到装配过程可靠性驱动的目的。

### 3 数控转台装配过程可靠性驱动措施

根据元因素寻找提高各工步可靠性的元措施,从而驱动装配过程可靠性。通过分析转台装配过程各主要工步的影响因素,制定相应措施,如表 2 所示。

表 2 可靠性驱动的数控转台装配过程控制措施

Tab.2 Control measures of NC rotary table assembly process based on reliability-driven

主要工步的影响因素	工步⑦、⑪、⑮所使用力矩扳手磨损出现打滑或读数系统出现问题	工步③与⑥安装零件出现加工误差	工步③同轴度保证性不好	工步⑥跳动度保证性不好	工步⑫零件装配一致性不好	工步⑫测量工具出现测量误差	工步⑩螺钉锁紧缸组件装入回转体不合格
数控转台装配过程可靠性控制点(元因素控制措施)	当出现打滑时应及时更换;调整力矩扳手刻度值与所测物规格尺寸一致	加工过程中着重控制工步③与⑥所需零件的精度	控制安装面几何精度(刮削),可适当用磨削减少刮削量,配做定位销	用刮削的方法控制安装面几何精度	调节螺钉控制,控制蝶簧力的均衡性,控制垫片厚度的一致性	应及时调整或更换测量工具,并且需要操作人员按照准确的测量规则进行测量	量化锁紧缸上摩擦片与回转体的间隙,并按照该间隙进行装配

## 4 结束语

本文利用灰色关联度分析方法提取出了产品装配过程主要工步,并将多色集合理论引入到产品装配过程可靠性与元因素的分析建模中。以加工中心主要功能部件数控转台装配过程主装配线上的工步为研究对象,计算了各工步指标与数控转台装配过

程可靠性之间的灰色关联度,得出主要工步。利用多色集合理论能形式化地描述系统性质与元素性质之间关系的核心思想,通过分析影响各主要工步的影响因素,建立了各主要工步与所有可能因素的布尔矩阵模型,从而确定了数控转台装配过程可靠性与各工步元因素之间的布尔或关系,并根据各元因素控制点制定了数控转台装配过程可靠性驱动措施。

## 参 考 文 献

- 贾振元,马建伟,王福吉,等. 多零件几何要素影响下的装配产品特性预测方法[J]. 机械工程学报,2009,45(7):168~173.  
Jia Zhenyuan, Ma Jianwei, Wang Fuji, et al. Characteristics forecasting method of assembled product based on multiple part geometric elements[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(7):168~173. (in Chinese)
- 李中凯,冯毅雄,谭建荣,等. 基于灰色系统理论的质量屋中动态需求的分析与预测[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(11):2272~2279.  
Li Zhongkai, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Analysis and prediction for dynamic requirements in house of quality based on grey theory[J]. Computer Integrated Manufacturing System,2009,15(11):2272~2279. (in Chinese)
- 贾振元,顾丰,王福吉,等. 基于信噪比与灰关联度的电火花微小孔加工工艺参数的优化[J]. 机械工程学报,2007,43(7):63~67.  
Jia Zhenyuan, Gu Feng, Wang Fuji, et al. Parameter optimization of edm-micro-and-small holes based on signal-to-noise and grey relational grade[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2007,43(7):63~67. (in Chinese)
- 同淑荣,徐显龙. 基于多色集合理论的制造质量影响因素关系网模型[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(7):1292~1298.  
Tong Shurong, Xu Xianlong. Relationships network model of factors influencing manufacturing quality based on polychromatic sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2009,15(7):1292~1298. (in Chinese)
- 刘永,李言,李淑娟,等. 基于多色集合的敏捷制造系统重构方法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):76~80.  
Liu Yong, Li Yan, Li Shujuan, et al. Reconfiguration method of agile manufacturing system using polychromatic sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2010,16(1):76~80. (in Chinese)
- 赵珊珊,李宗斌. 基于多色集合的装配序列规划方法[J]. 中国机械工程,2008,19(14):1691~1696.  
Zhao Shanshan, Li Zongbin. Research on polychromatic sets-based assembly sequence generation method [J]. China Mechanical Engineering,2008,19(14):1691~1696. (in Chinese)
- 王中宇,付继华,孟浩,等. 基于灰色关联分析和区域生长的微小缺陷提取[J]. 农业机械学报,2008,39(12):166~169.  
Wang Zhongyu, Fu Jihua, Meng Hao, et al. Small defect extracting based on region growing algorithm and grey relation analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(12):166~169. (in Chinese)
- 王波,耿如军. 机械产品装配过程质量熵研究[J]. 制造业自动化,2009,31(9):18~23.  
Wang Bo, Geng Rujun. Assembly quality entropy for mechanical assembly process [J]. Manufacturing Automation,2009,31(9):18~23. (in Chinese)
- 刘思峰,郭天榜,党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- Pavlov V V. Structural simulation in CALS technology[M]. Moscow: Science Press, 2006.
- Li Z B, Xu L D. Polychromatic sets and its application in simulation complex objects and systems [J]. Computers & Operations Research, 2003,30(6):851~860.
- 李怀祖,韩新民. 先进制造多色集合理论的研究及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社,2005.