

刘贝,文泽军,郭玉立,等.一维多工序制造过程全局成功率建模与公差稳健设计[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(1):77-83. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.012

LIU B, WEN Z J, GUO Y L, et al. Overall Yield Modeling and Tolerance Robust Design for One-Dimensional Multi-station Manufacturing Process [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):77-83. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.012

一维多工序制造过程全局成功率建模与公差稳健设计

刘贝,文泽军*,郭玉立,焦杰

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201)

摘要:文章开展一维多工序制造过程全局成功率建模与公差稳健设计.首先,根据加工余量落在公差允许范围内的概率,建立了零件加工成功率计算模型,根据装配尺寸链中封闭环尺寸落在公差允许范围内的概率,建立一维多工序装配成功率计算模型;根据加工成功率和装配成功率是相互独立的假设,建立一维多工序全局成功率模型;然后,构建以产品全局成功率的敏感度最小化为目标的一维多工序制造过程公差稳健设计优化模型;最后,以组件轴向装配为例,建立公差稳健设计优化模型并对该模型进行优化设计,结果表明该方法的有效性.这为产品一维多工序制造装配质量保障提供了一种新的途径.

关键词:零件加工成功率;全局成功率;模拟退火算法;公差稳健设计

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)01-0077-07

Overall Yield Modeling and Tolerance Robust Design for One-Dimensional Multi-station Manufacturing Process

LIU Bei, WEN Zejun, GUO Yuli, JIAO Jie

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Overall yield modeling and tolerance robust design of one-dimensional multi-station manufacturing process were developed. Firstly, according to the probability that the machining allowance falls within the allowable tolerance range, the machining success rate model of parts was established; according to the probability that the closed ring size in the assembly dimension chain falls within the allowable tolerance range, the one-dimensional multi-station assembly success rate calculation model was established; according to the assumption that the machining success rate and assembly success rate were independent, overall yield calculation modeling for one-dimensional multi-station manufacturing process was established. Then, the tolerance robust design optimization model of one-dimensional multi-station manufacturing process with the objective of minimizing the sensitivity of overall yield of the product was constructed; finally, the tolerance robust design optimization model was established and optimized by taking the axial assembly of components as an example. The result shows that

收稿日期:2018-03-14

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目资助(17A069)

*通信作者, E-mail: zjwen732@163.com

the method is effective, which provides a new way for product one-dimensional multi process manufacturing assembly quality assurance.

Keywords: machining yield; overall yield; simulated annealing algorithm; tolerance robust design

在产品零件制造的过程中,零件的设计尺寸与加工尺寸经常存在不同程度的偏差,从而削弱零件和产品的装配质量,造成包含装配特征在内的零件特征偏离名义位置.这是因为产品制造的过程中存在诸多不确定性,如工件几何尺寸、夹具误差、设备精度、人员水平以及生产环境等,所以,如何在产品设计阶段考虑加工制造过程诸多不确定性因素对装配质量的影响,提高产品的装配质量的稳健性是先进制造领域亟待解决的问题.

近年来,国内外学者对装配成功率进行了大量研究,并取得了阶段性研究成果.Lee等^[1-2]将尺寸链中封闭环尺寸落在可靠域内的概率定义装配成功率,用可靠度指标估算装配成功率,并利用截断的蒙特卡洛模拟方法计算装配成功率.蒋科等^[3]提出一种定位优先级约束下间隙配合的变动解析模型与装配成功率计算方法.赵曼等^[4]考虑了装配零件的几何变动,利用统计法研究装配体的装配成功率.在此基础上,相关学者基于装配成功率模型进行了公差稳健设计,周俊峰^[5]采用试验设计方法实现基于装配成功率的离散公差稳健设计.文泽军等^[6-8]研究了基于 Taguchi 正交试验和状态空间模型的多工位装配成功率模型.张帆等^[9]研究了基于二阶可靠度 β 法的装配成功率的公差优化设计.上述研究虽然在装配成功率理论计算方面开展了卓有成效的研究工作,但鲜有学者研究公差分配对产品稳健性的影响,尤其是全面考虑装配成功率与加工成功率对产品装配质量影响的研究等.

综上所述,本文拟研究一维多工序全局成功率计算模型,并结合零件加工成功率和装配成功率模型,以加工余量标准差、均值偏移为约束,以全局成功率敏感度最小化为目标,构建一维多工序制造过程公差稳健设计优化模型,最后以齿轮组件的装配作为实例,计算齿轮组件的全局成功率,构建该类组件轴向装配的公差稳健设计模型,并对该模型进行分析和计算,实现设计公差与工序公差的综合设计.

1 一维多工序全局成功率计算

1.1 建立零件加工成功率模型

零件制造一般要经过多工序加工,其工序尺寸和加工余量之间的关系计算为^[10]

$$X_s = \sum_{k \in L} H_k \cdot X_k; \quad (1)$$

$$\sigma_s^2 = \sum_{k \in L} \sigma_k^2; \quad (2)$$

$$\delta\mu_s = \sum_{k \in L} F_k \cdot \delta\mu_k. \quad (3)$$

式中: X_s 为封闭环尺寸; H_k 为第 k 个工序尺寸组成环方向,减环为负,增环为正; X_k 为第 k 个组成环尺寸; σ_s 为加工余量的标准差; σ_k 为第 k 个工序尺寸的标准差; $\delta\mu_s$ 加工余量的均值偏移值; $\delta\mu_k$ 为第 k 个工序尺寸的均值偏移; $\delta\mu$ 一般取 0.5σ ^[11]; F_k 为第 k 个工序尺寸的均值偏移矢量,一般取+1或-1; L 为加工余量 q 的尺寸链.

假设加工余量服从正态分布的随机变量,由式(1)~式(3)可以求得其概率密度函数为^[12]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2}\right) \left[\frac{x - (\mu_s + \delta\mu_s)}{\sigma_s}\right]^2}. \quad (4)$$

加工成功率可定义为加工余量落在公差允许范围内的概率^[12].若将加工余量公差上下偏差分别设计为 φ_l 和 φ_u , 根据正态分布,由式(4)可知满足加工余量设计要求的概率为

$$y_M = \int_{\varphi_l}^{\varphi_u} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2}\right) \left[\frac{x - (\mu_s + \delta\mu_s)}{\sigma_s}\right]^2} dx. \quad (5)$$

对于单个零件 $i=1$, 单工序加工 $j=1$, 根据式(5)加工成功率为

$$Y_M = y_{M_{11}} = \int_{\varphi_{l_{11}}}^{\varphi_{u_{11}}} \frac{1}{\sigma_{S_{11}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_{11} - (\mu_{S_{11}} + \delta\mu_{S_{11}})}{\sigma_{S_{11}}} \right]^2} dx_{11}. \quad (6)$$

对于单个零件 $i=1$, 多工序加工 $j=1, 2, \dots, n$, 根据式(5)和式(6)加工成功率为

$$Y_M = y_{M_{11}} y_{M_{12}} \cdots y_{M_{1n}} = \int_{\varphi_{l_{11}}}^{\varphi_{u_{11}}} \int_{\varphi_{l_{12}}}^{\varphi_{u_{12}}} \cdots \int_{\varphi_{l_{1n}}}^{\varphi_{u_{1n}}} \frac{1}{\sigma_{S_{11}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_{11} - (\mu_{S_{11}} + \delta\mu_{S_{11}})}{\sigma_{S_{11}}} \right]^2} \cdots \frac{1}{\sigma_{S_{1n}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_{1n} - (\mu_{S_{1n}} + \delta\mu_{S_{1n}})}{\sigma_{S_{1n}}} \right]^2} dx_{11} dx_{12} \cdots dx_{1n}. \quad (7)$$

对于多个零件 $i=1, 2, \dots, m$, 多工序加工 $j=1, 2, \dots, n$, 根据式(5)~式(7), 可定义多零件多工序加工成功率为

$$Y_M = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m y_{M_{ij}}. \quad (8)$$

根据式(8), 令公式中 $m+n=n_s$, 多零件多工序加工成功率可定义为^[12]

$$Y_M = \prod_{q=1}^{n_s} y_{M_q}. \quad (9)$$

1.2 装配成功率的计算方法

尺寸链组一般由成环和封闭环组成. 通过组成环尺寸可以计算得到封闭环尺寸, 基于统计公差理论, 封闭环尺寸标准差和均值偏移为^[11]

$$\sigma_r^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \cdots + \sigma_n^2; \quad (10)$$

$$\delta\mu_r = F_1 \delta\mu_1 + F_2 \delta\mu_2 + \cdots + F_i \delta\mu_i. \quad (11)$$

式中: σ_r 和 $\delta\mu_r$ 为封闭环尺寸的标准差与均值偏移; σ_i 和 $\delta\mu_i$ 为第 i 个组成环尺寸的标准差与均值偏移; n 为组成环总数; F_i 为第 i 个组成环尺寸的变化方向, 取值 1 或 -1.

如果机床、刀具和夹具的使用状态稳定, 则机床上批量生产的机械零件的尺寸在其设计公差范围内一般服从正态分布, 根据中心极限定理, 随着组成环的环数增多, 封闭环的尺寸分布也会越来越趋近于正态分布. 根据式(10)和式(11)可定义封闭环尺寸分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x - (\mu_r + \delta\mu_r)}{\sigma_r} \right]^2}. \quad (12)$$

指定 T_l 和 T_u 分别为封闭环公差上下偏差, 对于连续大批量生产, 随机变异效应对均值影响的补偿量称为均值偏移 $\delta\mu_r$. 根据式(12)装配成功率在满足设计要求情况下可表示为

$$y_A = \int_{T_u}^{T_l} \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x - (\mu_r + \delta\mu_r)}{\sigma_r} \right]^2} dx. \quad (13)$$

当产品的关键尺寸数 $p=1$ 时, 根据式(13)装配成功率为

$$Y_A = y_{A_1} = \int_{T_{u_1}}^{T_{l_1}} \frac{1}{\sigma_{r_1} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_1 - (\mu_{r_1} + \delta\mu_{r_1})}{\sigma_{r_1}} \right]^2} dx_1. \quad (14)$$

当 $p=2$ 时, 根据式(12)和式(13)装配成功率为

$$Y_A = y_{A_1} y_{A_2} = \int_{T_{u_1}}^{T_{l_1}} \int_{T_{u_2}}^{T_{l_2}} \frac{1}{\sigma_{r_1} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_1 - (\mu_{r_1} + \delta\mu_{r_1})}{\sigma_{r_1}} \right]^2} \frac{1}{\sigma_{r_2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_2 - (\mu_{r_2} + \delta\mu_{r_2})}{\sigma_{r_2}} \right]^2} dx_1 dx_2. \quad (15)$$

以此类推, 当 $p=n_A$ 时, 装配成功率为

$$Y_A = \prod_{p=1}^{n_A} y_{A_p} = y_{A_1} y_{A_2} \cdots y_{A_{n_A}} = \int_{T_{u_1}}^{T_{l_1}} \int_{T_{u_2}}^{T_{l_2}} \cdots \int_{T_{u_{n_A}}}^{T_{l_{n_A}}} \frac{1}{\sigma_{r_1} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_1 - (\mu_{r_1} + \delta\mu_{r_1})}{\sigma_{r_1}} \right]^2} \cdots \frac{1}{\sigma_{r_{n_A}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_{n_A} - (\mu_{r_{n_A}} + \delta\mu_{r_{n_A}})}{\sigma_{r_{n_A}}} \right]^2} dx_1 dx_2 \cdots dx_{n_A}. \quad (16)$$

1.3 全局成功率计算模型

产品制造过程可视为一系列加工元素和装配元素的组合^[12].假设加工和装配是相互独立的,则由式(9)和式(16),建立全局成功率计算模型为

$$Y = Y_M Y_A = \prod_{q=1}^{n_S} y_{M_q} \prod_{p=1}^{n_A} y_{A_p}. \quad (17)$$

式中: n_{SR} 为加工余量尺寸链在加工过程中的个数; n_A 为装配尺寸链在一维多工序装配过程中的个数; 第一部分 $\prod_{q=1}^{n_S} y_{M_q}$ 为加工成功率; 第二部分 $\prod_{p=1}^{n_A} y_{A_p}$ 为装配成功率.

2 公差稳健设计

使所设计的工艺或产品在结构参数有变差的情况下, 仍旧能在制造或者是使用时维持性能稳定, 这种过程设计方法叫作稳健设计. 在制作零件时, 会存在着机械系统变形、加工刀具失效、人员水平参差不齐, 以及夹具定位误差等一系列影响, 因此产品装配质量也会产生不同影响. 公差稳健设计在多工序制造过程中的重要性主要体现在均值变化值与标准差的扰动使产品的全局成功率降低. 所以, 为了提高产品全局成功率, 考虑加工余量均值偏移与标准差的扰动影响, 构建产品全局成功率的敏感度最小化为目标的一维多工序制造过程公差稳健设计优化模型表示为

$$\min S = (Y_0 - Y_f) / Y_0$$

s. t.

$$Y_f = \prod_{q=1}^{n_S} \prod_{p=1}^{n_A} y_{M_q} \times y_{A_p} = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m y_{M_{ij}} \prod_{p=1}^{n_A} y_{A_p} = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \int_{\varphi_{ij}^l}^{\varphi_{ij}^u} \frac{1}{(1+\gamma) \sigma_{S_{ij}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{x_{ij} - [\mu_{S_{ij}} + (1+\lambda) \delta \mu_{S_{ij}}]}{(1+\gamma) \sigma_{S_{ij}}} \right\}^2} dx_{ij}$$

$$\prod_{p=1}^{n_A} \int_{T_{up}}^{T_{lp}} \frac{1}{\sigma_{T_p} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{x_p - [\mu_{T_p} + \delta \mu_{T_p}]}{\sigma_{T_p}} \right\}^2} dx_p;$$

$$\sigma_{ij}^l < \sigma_{ij} < \sigma_{ij}^u;$$

$$\delta \mu_{ij}^l < \delta \mu_{ij} < \delta \mu_{ij}^u. \quad (18)$$

式中: S 为产品全局成功率的敏感度, 表示产品全局成功率的稳健性; Y_0 为预期达到的成功率表示; Y_f 为有扰动情况下实际成功率; γ 为标准差的扰动量表示; λ 为均值偏移的扰动量; σ_{ij}^l 和 σ_{ij}^u 为第 i 个零件, 第 j 个工序加工余量标准差的上下限; $\delta \mu_{ij}^l$ 和 $\delta \mu_{ij}^u$ 为第 i 个零件, 第 j 个工序加工余量标准差的上下限.

该公差稳健设计模型求解依赖初始值选择, 求解过程易致局部最优非全局最优, 为一般优化算法的缺陷. 模拟退火算法这种全局优化算法是一种有效的方法, 为此, 求解公差优化问题, 模拟退火算法求解步骤:

1) 随机产生初始值 x , 降温速度 $q = 0.95$, 最大迭代次数 $k_{\max} = 1\ 000$, 函数值的相对误差 $\varepsilon_f = 10^{-6}$, 令 $x_0 = x, f_0 = f(x)$, 迭代次数 $k = 1$.

2) 根据 $\min[f(x + \alpha dx)] = \min \varphi(\alpha)$ 计算最优步长, 产生 x 的步长 $\alpha, x_1 = x + \alpha dx$, 判断 $df = f(x_1) - f(x)$, 若 $df < 0$, 则 $x = x_1$, 否则转入步骤 3.

3) 依一定的概率接受 x_1 , 即随机产生一个实数 $r = \text{rand}$, 若 $P = \exp(-df/T) > r$, 则 $x = x_1$, 否则保持 x 不变.

4) 比较函数值是否有下降, 若 $f(x) < f_0$, 则 $f_0 = f(x)$, 迭代次数 $k = k + 1$, 若 $k > k_{\max}$, 则迭代结束. 否则, 进行下一步迭代, 转入步骤 2.

模拟退火算法流程图如图 1 所示.

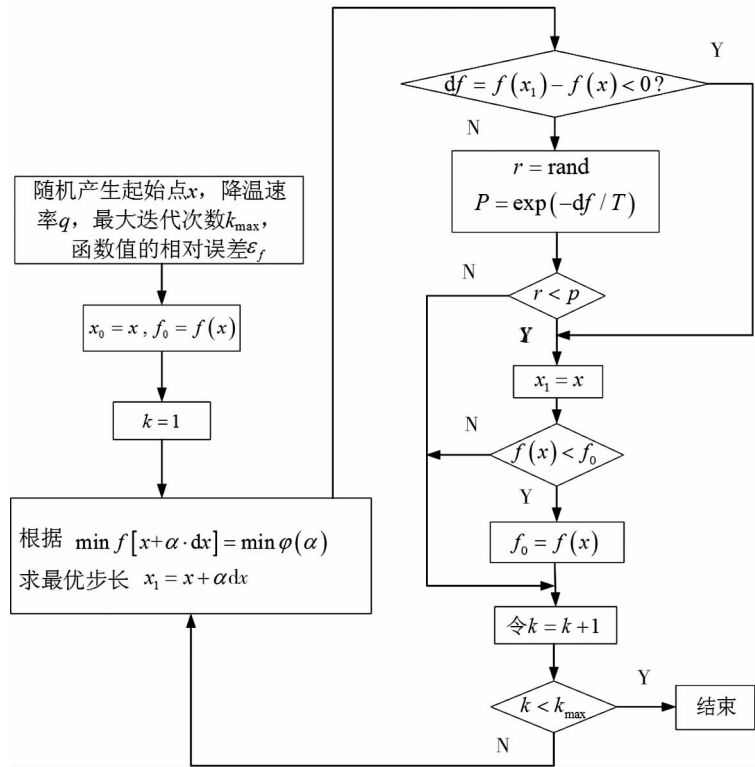


图 1 模拟退火算法流程

3 实例分析

图 2 为齿轮组件装配示意图,用 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别表示齿轮宽度、左挡环宽度、轴肩到轴槽的尺寸、卡环宽度、右挡环宽度.为保证齿轮正常运转,挡环与齿轮端面之间需有配合间隙 A_0 .该间隙与上述 5 个尺寸连接成封闭的尺寸组,形成尺寸链.按工作条件, $A_0 = 0^{+0.35}_{-0.01}$ mm.图 2 上标注尺寸 $A_1 = 30^{0}_{-0.1}$ mm, $A_2 = 5^{0}_{-0.05}$ mm, $A_3 = 43^{+0.2}_{+0.1}$ mm, $A_4 = 3^{0}_{-0.05}$ mm, $A_5 = 5^{0}_{-0.05}$ mm, 齿轮、挡环、齿轮轴和开口卡环为相关的装配零件,其中开口卡环是标准件.

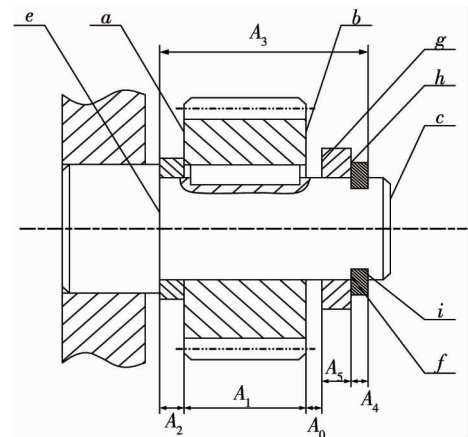


图 2 齿轮组件装配

讨论零件特征面对装配的影响,只需讨论齿轮宽度加工过程对加工成功率的影响,定位 a 面,对 b 面粗加工,确保 a_1b_1 的尺寸;定位 b 面,粗加工 a 面,确保 b_1a_1 尺寸,继续定位 b 面,精车 a 面,确保 b_1a_2 的尺寸;定位 a 面,精车 b 面,确保 a_2b_2 尺寸^[12].工艺尺寸式 $a_1a_2 \rightarrow a_1b_1a_2$ 根据 a 面的加工余量来建立,再确定工序公差,已知 $T_{(b_2a_2)} = \pm 0.05$, 其余工序尺寸公差

和设计尺寸无关,按经济精度要求粗加工 IT11,精加工为 IT7,查表得 $T_{(a_1b_1)} = \pm 0.13, T_{(b_1a_2)} = \pm 0.021$, 根据 $T=6\sigma$ 原则求得 $\sigma_{(a_1b_1)} = 0.0433, \sigma_{(b_1a_2)} = 0.0070, \sigma_{(b_2a_2)} = 0.0167$, 根据式(2)和式(3)可求 $\sigma_{(a_1a_2)} = 0.0439, \delta\mu_{(a_1a_2)} = 0.0182$, 取 a_1a_2 最小余量 $Z_{\min(a_1a_2)} = 0.1$, 求得 a 面加工余量 a_1a_2 为 $Z_{(a_1a_2)} = 0.402 \pm 0.152$, 批量生产情况下,通过式(9)可以得出工序尺寸,截面 a 精车加工的成功率为 0.997781.由此通过等式(9)可以计算加工剩余零件的成功率,通过式(16)可以计算装配的成功率,通过式(17)可以计算产品全局的成功率^[12],结果如表 1 所示.

通过表 1 的数据可知,若不考虑加工过程,则得到的产品的装配的成功率为 99.67%;若考虑加工过程,得到产品的全局成功率为 99.04%.故考虑加工过程的影响时,产品的全局成功率会降低 0.72%.

表1 齿轮组件制造过程成功率计算结果^[12]

制造过程	零件	加工工序	加工/装配成功率
加工过程	齿轮 1	11 精车 a 面	0.997 781
		12 精车 b 面	0.999 714
	齿轮轴 2	21 精车台阶 e	0.999 998
		22 精车外圆 f	0.999 889
		23 精车槽 i	0.997 880
		24 精车 c 面	0.998 550
挡环 3	31 精车 g 面	0.999 767	
	32 精车 h 面	0.999 690	
装配过程	齿轮组件	封闭环	0.997 581
全局成功率			0.990 398

在公差设计问题中,当出现加工变量参数扰动时,产品的全局成功率降低.公差分配方案不同,加工变量参数的扰动对成功率的敏感度不同^[12],图3表示了30组不同方案公差分配的敏感度.($Y_0 = 99\%$, $\gamma = 10\%$, $\lambda = 10\%$)

由图3可知,30组不同方案下公差分配的敏感度最大为8.7%,最小为0.98%.以这2组公差分配为例,当加工变量的参数存在10%的扰动,则前者产品的全局成功率为98.03%,但是后者只有93.33%.由此从产品的稳定性方面看,前者的分配方案显然优于后者^[12].

关于齿轮组件公差的稳定性设计问题,可通过模拟退火算法来优化,图4通过MATLAB求出公差的稳健设计的优化记录.

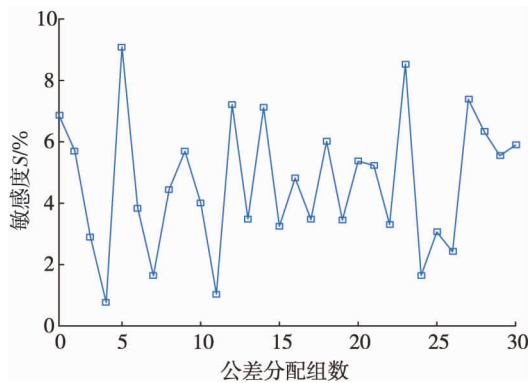


图3 常规公差设计敏感度计算结果

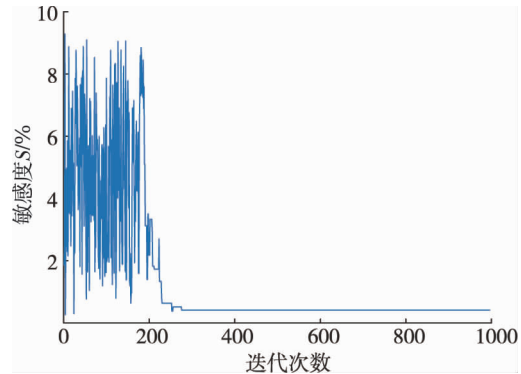


图4 模拟退火算法结果

如图4所示,在迭代200次前,可接受一定范围内一定概率下非最优解所得到的敏感值的波动,接受非最优解的概率和退火温度在迭代步数增大的条件下逐渐下降,在300次迭代之后,所得解趋于稳定^[12].

如表2所示,基于模拟退火算法求得的敏感度最优解和公差稳健设计结果,优化的标准差与均值偏移及公差数据如表2所示.

表2 公差稳健设计优化结果^[12]

优化结果	齿轮 1		齿轮轴 2				挡环 3	
	工序 11	工序 12	工序 21	工序 22	工序 23	工序 24	工序 31	工序 32
标准差 σ	0.035 2	0.011 5	0.021 5	0.006 6	0.013 0	0.021 1	0.008 7	0.037 3
均值偏移 $\delta\mu$	0.011 5	0.026 6	0.037 4	0.006 4	0.017 3	0.017 3	0.003 8	0.025 0
公差 T	$\pm 0.105 6$	$\pm 0.034 5$	$\pm 0.064 5$	$\pm 0.019 8$	$\pm 0.039 0$	$\pm 0.063 3$	$\pm 0.026 1$	$\pm 0.111 9$
敏感度 S	0.94%							

通过模拟退火算法优化得到公差优化设计结果,可以指导设备的选择与加工变量参数控制,如在齿轮加工的第一阶段,加工变量参数需要控制为 $\sigma = 0.035 2 \text{ mm}$, $\delta\mu = 0.011 5 \text{ mm}$;还可知在99%的成功率和10%的

扰动水平条件下,得到优化的敏感度为 0.94%,比未进行稳健公差设计的敏感度小,同时当加工变量参数存在 10%扰动的情况下,通过公差稳健设计能提高产品全局成功率的稳健性.如表 3 所示,通过 3 种产品预期成功率(90%,95%,99%)和 3 种加工变量参数扰动水平(5%,10%,15%)进行公差稳健设计的结果^[12].

表 3 不同条件下的敏感度 $S^{[12]}$ %

均值偏移扰动量 λ	标准差扰动量 γ	预期成功率 Y_0		
		90%	95%	99%
5	5	2.54	2.12	0.51
10	10	5.48	3.64	0.94
15	15	8.79	6.23	2.49

如表 3 所示,在 10%加工变量参数扰动与 99%的预期成功率的条件下,得到的敏感度为 0.94%,在同样的条件下,如没有进行稳健性设计,则敏感度小很多.由此证明:即使考虑加工变量参数扰动,公差稳健设计也能有效地提高产品全局成功率的稳健性,例如,在扰动水平为 10%的情况下,当预期成功率为 90%时,敏感度为 5.48%;当预期成功率为 99%时,敏感度为 0.94%.可见,预期成功率对产品稳健性有较大影响.在一定范围内,预期成功率和稳健性成正比例关系.

4 结论

1)分析了加工余量与工序尺寸对零件加工过程的影响,根据加工余量落在公差允许范围内的概率,建立了零件加工成功率模型,根据装配尺寸链中封闭环尺寸落在公差允许范围内的概率,建立了一维多工序装配成功率计算模型;继而构建一维多工序全局成功率计算模型.

2)考虑加工余量均值偏移与标准差的扰动影响,构建产品全局成功率的敏感度最小化为目标的一维多工序制造过程公差稳健设计优化模型.

3)以组件轴向装配为例,建立公差稳健设计优化模型并对该模型进行优化设计,结果表明该方法的有效性.这为产品一维多工序制造装配质量保障提供了新的途径.

参考文献:

- [1] Lee W J, Johnson G E. Optimal tolerance allotment using a genetic algorithm and truncated Monte Carlo simulation[J]. Computer-Aided Design, 1993, 25(9):601-611.
- [2] Lee W J, Woo T C. Tolerances: Their Analysis and Synthesis[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(2):113-121.
- [3] 蒋科,刘检华,宁汝新,等.定位优先级约束下间隙配合的变动解析与装配成功率计算[J].机械工程学报,2014,50(15):136-146.
- [4] 赵嫚,茅健.面向制造过程的装配公差模型研究[J].工程设计学报,2014,21(6):529-533.
- [5] 周俊峰.基于离散变量的公差稳健设计[D].西安:西安科技大学,2014.
- [6] 文泽军,朱正强,周知进,等.基于 Taguchi 正交试验的一维装配成功率计算方法及其应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(3):26-30.
- [7] 文泽军,朱正强,张小平,等.基于数论网格法(NT-net)的二维多工位装配成功率计算方法与实例[J].机械设计与研究,2012,28(5):94-97.
- [8] 文泽军,张帆,赵延明,等.基于数论网格法的三维单工序装配成功率计算方法[J].机械设计与研究,2015,31(4):134-137.
- [9] 张帆.二阶矩可靠性指标的计算机辅助公差优化装配尺寸链设计模型[J].机械传动,2008,32(1):58-59.
- [10] Chun Z, Hsu P W. Robust design of assembly and machining tolerance allocations[J]. Iie Transactions, 1997, 30(1):17-29.
- [11] Bothe D R. Statistical Reason for the 1.5 σ Shift[J]. Quality Engineering, 2002, 14(3):479-487.
- [12] 刘贝.典型两类装配工艺分析与稳健设计[D].湘潭:湖南科技大学,2018.