DOI: 10.3901/JME.2019.07.172

基于集合概念的虚公差理论与应用*

王晓慧^{1,2} 郭士意^{1,2} 车冬冬^{1,2} 兰国生²

(1. 太原重型机械装备协同创新中心 太原 030024;

2. 太原科技大学机械工程学院 太原 030024)

摘要: 将上偏差小于下偏差的公差定义为虚公差,把具有公差(包括虚公差)要求的两个极限值之间的尺寸用一个集合表达,探究公差值由正数连续变小成为负数时产生质变的过程,抽象出虚公差的物理意义:虚公差的绝对值为误差补偿量,两极限值之间的尺寸为误差补偿范围。从量纲和谐原理、尺寸链通用公式存在的条件、公差计算结果的准确性等方面阐述提出虚公差概念的必要性及其与公差的对立统一关系。通过实例验证,在虚公差物理意义明确后,可大大简化带补偿件的装配尺寸链分析计算过程,使之计算更加灵活方便,并可实现误差与误差补偿量的并行分析计算,使公差分配更加经济合理;推导出机械加工过程中假废品尺寸区间的通用计算公式,提出了概率法确定假废品尺寸区间的方法,有效地提高了假废品判断的效率。

关键词: 公差质变过程;误差补偿;集合表达;概率法

中图分类号: TG801

Theory and Application of Virtual Tolerance Based on Set Concept

WANG Xiaohui^{1,2} GUO Shiyi^{1,2} CHE Dongdong^{1,2} LAN Guosheng²

(1. The Coordinative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment, Taiyuan 030024;

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Virtual tolerance is defined as the tolerance that its upper deviation is smaller than lower deviation. In order to abstract the physical meaning of virtual tolerance, the absolute value of the virtual tolerance is the error compensation and the dimensions between the two extreme values is the error compensation range, utilizing a set to elaborate the dimensions with tolerance requirements (virtual tolerance included) between two extreme values and explore the process from quantitative changes to qualitative changes when the virtual tolerance decreases from a positive number to a negative number. The principles of dimensional homogeneity, the existence condition of general formula of dimension chain and the accuracy of tolerance's calculation are introduced to illustrate the necessity of raising the concept of virtual tolerance and the opposition and unification relations between tolerance and virtual tolerance. It has been experimental verified that the definition of virtual tolerance's physical meaning can significantly simplify the analysis and calculation process of assembly dimension chain, which result in a convenient and flexible computation and fulfill parallel analysis between calculation of error and error compensation, which result in a reasonable tolerance distribution. And by getting the general calculation formula of the fake rejects' dimensional interval during mechanical processing, a way to determine fake rejects' dimensional interval-Probability method is conducted, which greatly improved the efficiency when determining fake rejects.

Key words: tolerance of qualitative change; error compensation; set expression; probability method

0 前言

制定公差的本意是为了将产品的几何误差限定在一定范围,公差在产品设计与制造过程中有着举足轻重的作用,其发展经历了漫长的过程,而且会进一步完善,这是事物发展的必然规律。

1902 年英国伦敦出现的纽瓦尔标准“极限

表”,它是由一家以生产剪羊毛机为主的纽瓦尔(Nevall)公司编制的,为适应互换性生产的规模 and 保证机器备件的供应,最早的公差制就这样诞生了。20 世纪初期,公差制已有了基孔制和基轴制等概念,公差单位的计算公式也已经明确,公差和配合代号首次实现分开,但由于当时对公差与配合的认识还有一定的局限性,初期公差制并不能完全适应生产发展的需要。为方便国际贸易和学术交流,要求统一各国的相关公差标准,1926 年在布拉格成立了国际标准化协会(ISA)负责公差标准。1945 年 10

* 国家自然科学基金(51575373, 51175360)和山西省“1331 工程”重点学科建设计划资助项目。20180411 收到初稿,20180929 收到修改稿

月,联合国标准协调委员会在纽约成立了一个新的永久性国际标准组织 ISO,其中 ISO/TC213 负责公差及其相关标准的制定。至此公差已经成为产品设计与制造过程中几何精度控制的最重要技术指标,相关人员对公差的各种研究层出不穷,这包括公差设计方法^[1-5],公差优化方法^[6-8],公差在计算机辅助设计中的应用^[9-11]等。

尽管公差在保证产品精度方面有着重要的作用,然而保证产品精度的方法往往不局限于控制制造过程中的几何误差,工程中常常采用误差补偿的方法来满足产品精度,即在产品中设计一个误差补偿环节用来抵消其他环节的误差以保证产品精度。既然公差是控制各类产品几何精度的重要参数,那么是否可以用它来控制误差补偿量及其补偿范围。

1983 年,王晓慧等^[12]在计算含补偿件的装配尺寸链时发现,按尺寸链基本公式计算出的补偿件尺寸的上偏差小于下偏差,即公差值出现了负数,就将它命名为虚公差,既然能够计算出虚公差,它肯定有其意义,应该给它一个合理的解释,同时认定具有虚公差的尺寸是一个能够连续变化的尺寸,并将其用于装配尺寸链计算;2013 年,王晓慧等^[13]又将弹簧的长度尺寸视为具有虚公差的尺寸,并将其作为尺寸链的一个组成环来补偿其它组成环的误差,从而对虚公差进行了解释,统一了各类装配尺寸链的计算原理;2014 年,王晓慧等^[14]基于虚公差的特征首次推导出了概率法计算补偿量的计算公式,证明了概率法计算出补偿件的公差为纯虚数,其虚部为误差补偿量,使得虚公差有了不可替代的用场;2015 年,ISO/TC213 召集人、国际公差专家 JOHAN 等对虚公差产生了极大兴趣,这起因于 ISO/TC213 曾在先前专门讨论过如何描述误差补偿的问题,但没有找到合适的表达方法,而虚公差的提出正好与 ISO 想解决的问题不谋而合。2016 年 9 月在 ISO/TC213 第 41 届年会上,组委会特别安排专题研讨《Chinese input on potential new work on virtual tolerances》,王晓慧的报告《Theoretical Study of Virtual Tolerance and Its Applications》引起了各国公差专家的极大兴趣及认可,并希望进一步完善其理论,扩展它的应用范围。

虚公差是一个新的概念,它与目前公差概念在某些方面是相悖的,加上传统公差在人们的认知中根深蒂固,而先前对虚公差的解释又不够严谨,以至于很多人认为虚公差是荒唐的,不可思议的,因此需要用最简练的数学语言描述虚公差与公差的关系与区别,以解释虚公差的本质所在,使虚公差理论更加完善。

本文将具有公差(包括虚公差)要求的两个极限值之间的尺寸作为一个集合,按照公差的基本定义证明若公差为正值,则该集合内的任何一个元素都可满足尺寸要求;若公差为负值(虚公差),则需要该集合内的所有元素满足其尺寸要求。将误差补偿量及其补偿范围用虚公差来描述,扩大了公差的应用范围。基于量纲和谐原理、尺寸链通用公式存在的条件、公差计算结果的准确性等方面阐述提出虚公差概念的必要性及实用性。

1 虚公差的由来

当一个尺寸链的封闭环公差较小,而相关各个组成环公差又较大时,按照尺寸链方程求解公差时,必然有一个组成环的公差值为负数。

图 1 为对开齿轮箱部件简图,图中还画出了影响齿轮轴轴向窜动的尺寸链,它有 5 个组成环,装配要求齿轮轴轴向窜动量 $A_0 = 0_{+0.1}^{+0.4}$ mm。若采用完全互换法装配,则各个尺寸公差偏小,会增加生产成本,故选择 A_3 作为补偿环,采用不完全互换法装配。除补偿环 A_3 外,其余组成环的尺寸及公差分别确定为: $A_1 = 120_{0}^{+0.3}$ mm; $A_2 = 80_{0}^{+0.2}$ mm; $A_3 = 194_{0}^{+0.2}$ mm; $A_4 = 3_{-0.1}^{0}$ mm。

图 1 齿轮箱部件轴向装配简图

1. 左箱体 2. 右箱体 3. 齿轮轴 4. 左轴套 5. 右轴套

根据尺寸链得到其尺寸关系为

$$A_0 = A_1 + A_2 - A_3 - A_4 - A_5 \quad (1)$$

将以上尺寸及公差代入式(1),得: $A_3 = 3_{+0.2}^{-0.3}$ mm 其上偏差小于下偏差,公差为 -0.5 mm。计算结果不容置疑,这是因为除了 A_3 外,其余 4 个组成环的公差之和为 0.8 mm,已经比封闭环公差 0.3 mm 大出 0.5 mm,由于封闭环公差等于各个组成环公差之和,故 A_3 公差为 0.3 mm -0.8 mm $= -0.5$ mm 无可非议。

若按概率法计算, 尺寸 A_3 的公差 $\delta_{A_3} = \sqrt{0.4^2 - 0.3^2 - 0.2^2 - 0.15^2 - 0.15^2} = 0.122i$ 。

由此可见, 当封闭环公差较小, 而除补偿环外的各组成环的公差都较大时, 计算出补偿环的公差必然是负数或虚数, 我们称这种非正数公差为虚公差。

2 虚公差的本质特征

2.1 公差连续变小时发生质变的过程

若某尺寸 $M = N_{ei}^{es}$, 其中 N 为基本尺寸, es 为上偏差, ei 为下偏差, 则尺寸 M 的两个极限值分别为 $a = N + es$, $b = N + ei$, 公差定义, 满足尺寸 M 的必要条件是: $a \geq M \geq b$ 。

把两个极限值区间的尺寸作为一个尺寸集合(以下简称集合) $A = \{x | a \geq x \geq b\}$ 或 $A = \{x | b \geq x \geq a\}$, 假设公差是一个连续变量, 我们观察公差值连续变小时的过程。

(1) 公差为正数时, 其变化是一个量变过程。

当 $es > ei$, 即公差为正数时, 集合 $A = \{x | a \geq x \geq b\}$, 该情况下, 集合 A 中任何一个确定的尺寸 x 都可满足 $a \geq M \geq b$, 当公差值连续变小时, 满足尺寸 M 集合的区间逐渐变小, 要求尺寸 M 的误差逐渐变小, 但仍然有无数个确定的尺寸能够满足尺寸 M , 公差的变化只是一个量变的过程。

(2) 公差趋于零时是质变的起点。

当公差继续变小趋近于零时, 集合的区间无限小, 集合 $A = \{N\}$, 只有尺寸 N 能够满足尺寸 M , 不允许 N 有误差, 这为公差的质变做好了准备。

(3) 公差由零变为负数时将发生质变

当 $es < ei$, 即公差为虚公差时, 集合 $A = \{x | b \geq x \geq a\}$ 虽然没有变化, 但集合 A 中的任何一个确定的尺寸都不能满足 $a \geq M \geq b$, 这时公差发生了质变, 需要用一种特殊的尺寸来满足这种虚公差。

2.2 尺寸集合是满足虚公差的必要条件

集合 $A = \{x | b \geq x \geq a\}$ 中的任何一个尺寸 M 都无法满足 $a \geq M \geq b$, 也就是说虚公差要求的尺寸是集合 A 中的一个随机尺寸, 它必须以动态的形式来满足集合区间的全体尺寸, 这样, 在集合 A 中总可以找到一个尺寸 $x \leq a$, 也可以找到另一个尺寸 $x \geq b$, 从而使尺寸满足 $a \geq M \geq b$ 。例如 $M = 100_{+0.2}^{-0.1}$ mm 必须是一个动态尺寸, 可主动地在 99.9 mm~100.2 mm 区间内连续变化, 即集合 $A = \{X | 99.9 \leq X \leq 100.2\}$ 中的所有尺寸是满足 $M = 100_{+0.2}^{-0.1}$ mm 的必要条件。

2.3 虚公差的直观模型

图 2 是一个简单的装配体, 框架内侧高 $A_1 = 100 \pm 0.3$ mm, 内装垫块和弹簧, 垫块高 $A_3 = 25 \pm 0.2$ mm, 弹簧顶端 B 与框架内侧顶部 E 直接接触, 即 $BE = 0 \pm 0$ mm, 求弹簧高度 A_2 的尺寸及公差。

图 2 装配体模型

1. 框架 2. 弹簧 3. 垫块

从图中可看出, 与 BE 相关的尺寸关系为

$$BE = A_1 - A_3 - A_2 \quad (2)$$

即: $0 \pm 0 = 100 \pm 0.3 - 25 \pm 0.2 - A_2$ 。求得: $A_2 = 75 \mp 0.5$ mm, 弹簧高度 A_2 公差值为负数, 为虚公差。

单从保证 $A_2 = 75 \mp 0.5$ mm 看, 一个确定的尺寸无法满足 $A_2 = 75 \mp 0.5$ mm, 因为不大于 74.5 mm 而又不小于 75.5 mm 的尺寸是不存在的, 但弹簧的尺寸为什么能够满足 75 ∓ 0.5 mm, 其原因是它能够满足集合 $A = \{X | 74.5 \leq X \leq 75.5\}$ 中的任何一个尺寸。例如当 $A_1 = 100.253$ mm, $A_3 = 25.053$ mm 时, 弹簧高度可以变化为 $A_2 = 75.2$ mm, 确保 $A_0 = 0$ mm, 当 $A_1 = 99.853$ mm, $A_3 = 25.45$ mm 时, 弹簧高度又变化为 $A_2 = 74.403$ mm, 仍然可确保 $A_0 = 0$ mm 等。这就是说, 只要弹簧高度尺寸 A_2 满足 $A = \{X | 74.5 \leq X \leq 75.5\}$, 就可以满足 $A_2 = 75 \mp 0.5$ mm。直观的讲, 满足虚公差的尺寸必须是一个柔性尺寸, 它能够在一定范围内变化, 以满足虚公差范围内的各个尺寸。

若一个刚性零件取代弹簧, 其顶端 B 与框架内侧顶部 E 之间非间隙即过盈。

2.4 虚公差的物理意义

综上所述, 有虚公差的尺寸必须能够在其虚公差范围内连续变动, 也就是说, 不但不允许尺寸有误差, 而且要求尺寸可以补偿虚公差范围内的误差, 虚公差的绝对值为误差补偿量, 两个极限值之间的尺寸为误差补偿范围。图 2 中, 垫块上表面与框架内侧顶部 E 之间的尺寸为 75 ± 0.5 mm, 弹簧尺寸 75 ∓ 0.5 mm 刚好可以补偿其误差。我们称 ± 0.5 mm

为 $\mp 0.5 \text{ mm}$ 的反公差, 或 $\mp 0.5 \text{ mm}$ 为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 的反公差, 如果某公差与其反公差在一个尺寸链中出现, 则其误差可以抵消, 两个尺寸的合成误差为零, 这是公差与其反公差的一个重要特征。

3 虚公差与公差的对立统一关系

3.1 虚公差与公差的统一性

虚公差属于公差范畴, 与公差是统一的, 只是将公差的值域进行了扩展。

扩展后的公差值仍为上偏差减下偏差, 只是得到的值可能是正值、负值或者虚数, 但其尺寸仍可以保证“不大于基本尺寸加上偏差, 不小于基本尺寸加下偏差”并且“尺寸公差越小, 越难保证”的基本属性没有改变, 见表 1。

表 1 公差由正数变负数时质变的规律(mm)

尺寸	公差	误差	误差补偿量	说明
A	0.2	0.2	无需	尺寸由 A 到 D, 公差值渐小, 要求精度渐高, 尺寸 C 与 D 公差为虚公差, 要求其能够补偿误差, 且尺寸 D 比尺寸 C 的误差补偿量要大, 更难保证。
B	0.1	0.1	补偿误差	
C	-0.3		0.3	
D	-0.5	不允许有误差	0.5	

3.2 虚公差与公差的对立关系

现行公差指允许尺寸的误差量, 而虚公差非但不允许尺寸有误差, 且要求尺寸能够补偿误差; 满足现行公差的尺寸是相互独立的, 公差范围内的无数多个独立的尺寸都可以满足其要求, 而满足虚公差的尺寸是不独立的, 其具体尺寸还取决于其他相关尺寸, 且要求它必须适应虚公差范围内的所有尺寸, 即一个有虚公差要求的尺寸需要虚公差范围内无数多个的尺寸来满足。

4 虚公差应用的扩展

虚公差归入公差范畴后, 公差的应用范围不再局限于控制误差, 还能够对误差补偿量及其补偿范围提出要求, 使误差与误差补偿得到了统一, 给我们分析与解决相关产品的精度问题带来了方便。

4.1 虚公差应用的回顾

虚公差概念起源于带补偿件的尺寸链计算, 反过来利用虚公差概念分析处理此类问题会更得当, 目前的文献中, 基于虚公差概念解决了尺寸链计算中的两个问题。

(1) 统一并简化了各类装配尺寸链的公差计算方法。尺寸链基本公式适应了各类装配方法的公差计算, 无需根据不同装配情况及其尺寸性质分门别类地推导出一系列特定的计算公式, 也避免了复杂的分析判断过程。若装配体中有补偿件, 则会直接计算出补偿件的虚公差, 得到其误差补偿量及其补偿范围, 从而可直接确定出补偿件的尺寸及公差, 使其分析、判断、计算过程大大简化^[13]。

(2) 针对含补偿件的装配体, 建立了概率法计算(公差)公式。以前对于含补偿件的装配尺寸链无法用概率法计算, 然而当尺寸链的组成环的数量较多时, 用极值法计算出各相关尺寸公差偏小或补偿量过大, 结果导致制造成本的提高。文献[14]推导出了概率法计算含补偿件尺寸链的公差计算公式, 并证明了补偿件的公差为纯虚数, 其虚部为误差补偿量, 为装配体公差计算提供了经济可靠的方法。

4.2 误差与误差补偿量同步计算

在公差设计时, 基于虚公差概念便可直接给误差补偿件分配适量的虚公差, 实现误差与误差补偿量同步计算, 这样有利于综合考虑误差与误差补偿, 使公差分配更加经济合理。

图 1 中, 若选择修配法装配, 考虑修配工作量后限定修配件尺寸 A_3 的最大修配量为 0.45 mm , 取修配件在修配前的尺寸公差为 0.05 mm , 则修配件的 A_3 误差补偿量为 $0.45 \text{ mm} - 0.05 \text{ mm} = 0.4 \text{ mm}$, 公差为 -0.4 mm , 取 $A_2 = 3_0^{-0.4} \text{ mm}$, 则可确定 A_3 在修配前的尺寸 $A_{3b} = 3_0^{+0.05} \text{ mm}$ 。与前面计算相比, A_3 的误差补偿量由 0.5 mm 变成 0.4 mm , 少了 0.1 mm , 为保证封闭环公差等于各个组成环公差之和, 需要将其他组成环公差减小 0.1 mm , 现将上面的 $A_1 = 120_0^{+0.3} \text{ mm}$ 更改为 $A_1 = 120_0^{+0.2} \text{ mm}$, A_5 作为调整件, 其余尺寸及公差确定为

$$A_2 = 80_0^{+0.2} \text{ mm} \quad A_3 = 3_0^{-0.4} \text{ mm} \quad A_4 = 194_0^{+0.2} \text{ mm}$$

代入尺寸链方程

$$0_{+0.1}^{+0.2} = 120_0^{+0.2} + 80_0^{+0.2} - 3_0^{-0.4} - 194_0^{+0.2} - A_5$$

解得: $A_5 = 3_0^{+0.1} \text{ mm}$ 。

按照以上尺寸进行加工, 能够保证在修配 $A_{3b} = 3_0^{+0.05} \text{ mm}$ 时的最大修配量为 0.45 mm 。

4.3 假废品尺寸区间的通用计算公式

在机械加工过程中, 零件的某些设计尺寸往往由多个工序尺寸间接保证, 这样, 当其中的某个工序尺寸超差但对应的设计尺寸仍可能是合格的, 这种“有可能”合格的零件称为假废品。假废品是否合格还取决于其他工序尺寸的实际值, 快速准确地找到假废品可提高产品合格率。

虽然确定假废品尺寸区间的方法层出不穷^[15-16],但至今没有找到一种简单实用的通用计算方法,而基于虚公差概念,不但可以建立通用计算方法,而且可以用概率法求解假废品尺寸区间,大大减小了假废品的判断区间,可有效提高假废品判断的效率。

4.3.1 计算原理

假设某设计尺寸 A 由三个工序尺寸 B 、 C 、 D 保证

$$A_{a2}^{a1} = B_{b2}^{b1} + C_{c2}^{c1} - D_{d2}^{d1} \quad (3)$$

将式(3)尺寸 B 、 C 上下偏差颠倒,即取它们的反公差得

$$A_{a2}^{a1} = B_{b1}^{b2} + C_{c1}^{c2} - D_{d4}^{d3} \quad (4)$$

式(4)是在式(3)基础上对两个工序尺寸 B 与 C 作了“有可能”的“假设”。首先它们有可能是对应的反公差(虚公差)范围内的任何尺寸,然后假定它们满足其对应虚公差内的尺寸,这样计算出 D_{d4}^{d3} 便是其有可能满足设计尺寸 A 的尺寸区间,可用集合表示为

$$S = \{x | D + d_4 < x < D + d_3\} \quad (5)$$

式(3)中 D_{d2}^{d1} 用集合表示为

$$P = \{x | D + d_2 < x < D + d_1\} \quad (6)$$

式(5)中的集合 S 为尺寸 D 有可能合格的区间,而式(6)中的集合 P 则为尺寸 D 肯定合格的区间,即 $P \subset S$ 。因此 P 在 S 中的补集 $CsP = \{x | D + d_4 < x < D + d_2\} \cup \{x | D + d_1 < x < D + d_3\}$ 便是假废品区间。

4.3.2 实例计算

假如某个设计尺寸 $A_0 = 130_0^{+0.4}$ mm 有三个工序尺寸来保证,对应的尺寸及公差为

$$130_0^{+0.4} = 100_0^{+0.2} + 50_0^{+0.1} - A_3$$

解得: $A_3 = 20_0^{-0.1}$ mm。

将尺寸 100 mm 与 50 mm 的上下偏差颠倒得

$$130_0^{+0.4} = 100_{+0.2}^0 + 50_{+0.1}^0 - A_3$$

求得 $A_3 = 20_{-0.4}^{+0.3}$ mm, 即: $S = \{x | 19.6 < x < 20.3\}$, 上下偏差调换之前求得 $A_3 = 20_0^{+0.1}$ mm, 即

$$P = \{x | 19.9 < x < 20\}$$

也就是说,当 A_3 满足 S 尺寸区间时, A_0 有可能合格,其中 A_3 满足 P 尺寸区间时, A_0 一定合格,因此 A_3 的假废品区间为

$$CsP = \{x | 19.6 < x < 19.9\} \cup \{x | 20 < x < 20.3\}$$

即 A_3 的假废品公差为: $A_3 = 20_{-0.4}^{-0.1}$ mm 及 $A_3 = 20_0^{+0.3}$ mm。

4.3.3 概率法计算假废品区间

用极值法确定出的假废品范围太大,增加了检测成本,而基于虚公差概念可以求出经济合理的假废品区间,将上面的公式写成双向对称公差形式

$$130.2 \pm 0.2 = 100.1 \mp 0.1 + 50.05 \mp 0.05 - A_3$$

按照概率法解得: A_3 的平均尺寸为 $A_3 = 100.1$ mm + 50.05 mm - 130.2 mm = 19.95 mm。公差 $\delta(A_3) = \pm \sqrt{0.2^2 + 0.1^2 + 0.05^2} = \pm 0.23$ mm。则 $A_3 = 19.95 \pm 0.23$ mm = $20_{-0.28}^{+0.18}$ mm, A_3 假废品公差为: $A_3 = 20_0^{+0.18}$ mm 或 $A_3 = 20_{-0.28}^{-0.1}$ mm。

假废品的尺寸区间比极值法小了许多。

4.4 虚公差的其他用途

虚公差要求尺寸是一个可变的柔性尺寸,反过来柔性件的尺寸用虚公差来描述后往往有利于问题的分析。例如,密封件能够密封的本质是由于它在一定压力下能够满足一定范围内的虚公差,从而使间隙为零,达到密封的目的;再如,密封件一般都有压缩性和复原性要求,可用虚公差来要求与量化密封件的柔量。实际上,凡是可以变化的尺寸都可以用虚公差描述,例如螺栓的旋进量,船体零部件补偿量都可以用虚公差表达。

5 结论

(1) 虚公差指上偏差小于下偏差的公差,它要求尺寸必须在虚公差范围内能够变动,其绝对值为误差补偿量,两个极限值之间的尺寸为误差补偿范围。

(2) 与虚公差相比,传统公差带区间的所有尺寸均为有效尺寸,它与其他尺寸无关联,因此具有互换性;而虚公差区间的尺寸只有其中的某一个尺寸是有效的,其大小要取决于其他组成环尺寸的具体值,因此具有虚公差的尺寸没有互换性。

(3) 按照概率法求出补偿件的公差为纯虚数,其虚部为虚公差的绝对值,即误差补偿量。

(4) 基于虚公差概念可使尺寸链的分析计算更加灵活方便,可实现误差与误差补偿的同步计算。

虚公差是一个全新的概念,对其认知还需要进一步完善,应用范围还需要在理论完善的基础上逐渐扩大。

参 考 文 献

- [1] 叶佩青,翟栋,赵彤,等. 卧式加工中心空间误差对制造误差敏感度分析[J]. 清华大学学报, 2011, 51(5): 587-591.
- YE Peiqing, ZHAI Dong, ZHAO Tong, et al. Sensitivity

- analysis of volumetric errors to manufacturing tolerances for a horizontal machining center[J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(5): 587-591.
- [2] FELICIA V B, ION G. Tolerance allocation using design of experiments[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3878(760): 45-50.
- [3] QIAO J. Sequential algorithms for structural design optimization under tolerance conditions[J]. Engineering Optimization, 2014, 46(9): 1183-1199.
- [4] RAO R V, MORE K C. Advanced optimal tolerance design of machine elements using teaching-learning based optimization algorithm [J]. Production & Manufacturing Research, 2014, 2(1): 71-94.
- [5] CHANG F, LI S L, YIN J, et, al. Optimum design based on damage tolerance for overall beam structure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3254(575): 363-369.
- [6] LI C Y, CONG D J, DING K. The tolerance optimization design of displacement pump[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2109(605): 376-379.
- [7] GUO H X. Design optimization for the robustness of dimensional tolerance by using evidence theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 2931(483): 434-437.
- [8] GABRIEL F, ALEXANDRU E. Tolerance design for optimal dimensional quality of machine parts[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 4244(841): 65-71.
- [9] 吴玉光, 张根源. 基于几何要素控制点变动的公差数学模型[J/OL]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 138-146.
WU Yuguang, ZHANG Genyuan. Tolerance mathematical model based on the variation of control points of geometric element.[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 138-146.
- [10] CAO Y L, MATHIEU L, JIANG J. Key research on computer aided tolerancing[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering, 2015, 16(5): 335-340.
- [11] 朱绘丽. 粗糙集理论在并行公差设计中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 246-248.
ZHU Huili. Theory and application of rough set in concurrent-tolerance design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(9): 246-248.
- [12] 王晓慧. 虚公差及其在装配尺寸链中的应用[J]. 机械工艺师, 1989(3): 6-7.
WANG Xiaohui. Virtual tolerance and its application in assembly dimension chain[J]. Mechanical Technologist, 1989(3): 6-7.
- [13] 王晓慧, 孙超. 公差值域的扩展及其应用[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(12): 1243-1246.
WANG Xiaohui, SUN Chao. Extension and application of range of tolerance[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(12): 1243-1246.
- [14] WANG Xiaohui. Extension of the definition of tolerance and application thereof in the calculation of dimension chains[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5), 1069-1076.
- [15] 李军. 机械加工中假废品问题探析[J]. 现代工业经济和信息化, 2014, 4(21): 49-50.
LI Jun. The false waste products in machining problem analysis[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2014, 4(21): 49-50.
- [16] 刘龙田. 机械加工工艺尺寸换算中的假废品研究[J]. 制造技术与机床, 2015(8): 78-81.
LIU Longtian. Product research-tolerance machining process in terms of the size[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(8): 78-81.
-
- 作者简介: 王晓慧(通信作者), 男, 1959 年出生, 教授。主要研究方向为尺寸工程, 机械精度设计理论及应用, 计算机辅助夹具设计。
E-mail: houmawxh@sina.com
郭士意, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为现代制造技术。