

③ 12-20

机械产品精度的并行优化设计—数学模型*

张根保 赵健衡

TH 161.1

(重庆大学机械工程一系,重庆,400044;第一作者 43岁,男,教授)

摘要 介绍机械产品精度设计的一种新方法—产品精度的并行优化设计,这种新方法非常适合于产品并行设计的环境。与常规的顺序精度设计方法不同,这种方法将产品的工作精度与零件的加工精度直接联系起来,于是在产品设计阶段就可直接求出满足产品工作精度要求的最佳加工公差来。应用这种方法,不仅可以大大缩短产品的设计和制造周期,还可以保证产品的设计质量,降低产品的设计和制造成本。

关键词 精度设计;并行工程;数学模型

中国图书资料分类法分类号 TH161.1

机械产品

0 引言

产品的精度是一个产品输出特性偏离其目标值的度量,输出特性愈偏离其目标值,产品的精度也就愈差。在广义意义上,产品的精度包括其性能的各个方面,如噪声水平、抗振动性能、运转精度、加工精度、外观造型、可维修性等。在大多数情况下,产品的输出特性都可用其构成零部件的几何参数来描述。也就是说,可以在产品输出特性和其构成零部件几何参数之间建立一种数学关系。本文所谈的精度设计就局限在这种范围内。当然,它包括了产品性能特性的大多数,也是设计人员最关心的设计内容。既然产品的输出特性和零部件的几何参数之间的关系可以用数学方程来描述,那么,产品输出特性的变化(即精度)与零件的几何和尺寸精度方面也可以建立起相应的数学方程。产品精度并行优化设计的目的就是在设计阶段通过直接控制加工工艺过程所产生的零件的误差,来直接保证产品输出特性的精度。本文中,公差设计和精度设计两个术语的意义完全相同。

精度设计是设计和制造的一个重要方面,它不仅影响产品设计过程,而且影响加工工艺过程,因为它是联接产品性能要求和加工工艺之间的桥梁。通常,精度设计分别在两个不同的领域内进行:产品设计过程的精度设计和零件加工工艺设计过程的精度设计。

在产品设计阶段,作为输入数据,我们知道产品输出特性公差 Y 和产品的装配结构图。由装配结构,我们可以得到表达产品输出特性的误差 y 和零件功能公差之间关系的数学表达式,这个表达式称为功能方程,可用下式表示:

$$y = f_j(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (1)$$

精度设计或称公差设计包括两项内容,公差分析和公差综合。在公差分析中,已知产品组成零件的公差 X_i ,根据(1)式计算产品输出特性的变动量 y ,并与输出特性公差 Y 相比较,看看

* 收文日期 1995-10-04

国家教委博士点基金资助项目(9361108)

是否满足关系式： $y \leq Y$ ，如果不满足，则需要重新选择 X_i 的值或改变产品的机械结构。公差综合的目的是将产品输出特性公差 Y 按一定的规则（判据）分配给 X_i ，使得产品的制造成本为最小，最好的分配判据是零件的制造成本。

在工艺设计阶段，作为已知量，我们知道零件的功能公差 X_i 和所确定的加工工艺过程。由加工工艺过程，我们可以得到表达每个加工误差 Δ （与功能公差 X_i 相对应）和它的加工工序公差 δ_j 之间关系的数学表达式，这个数学表达式称为加工方程，可以用（2）式来表示：

$$\Delta = f_x(\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ij}, \dots, \delta_{in_i}) \quad (2)$$

工艺设计阶段的公差设计也包括两项内容：公差分析和公差综合。公差分析的任务是利用（2）式计算工艺过程变动量 Δ 并与零件功能公差 X_i 相比较，由此来确定关系式 $\Delta \leq X_i$ 是否满足，如果不满足，则需重新计算 δ_j 或改变加工工艺过程。公差综合的目的则是按一定的规则将 X_i 分配给 δ_j ，使得制造成本为最小。这种顺序公差设计过程可以用图 1 来表示。

这种顺序公差设计过程具有下列缺点：

1) 功能公差（有人称为设计公差）作为设计和制造之间的桥梁，它起着十分重要的作用。但是，在设计阶段却不可能得到最佳功能公差，因为功能公差是根据产品功能要求和制造成本确定的，不知道制造成本就无法确定最佳功能公差。而制造成本却只有在已知加工工艺的条件下才能确定。因此，在设计阶段用来确定功能公差的成本模型与实际有很大出入^[1]，造成功能公差分配的不合理，这是顺序公差设计系统的最大不足。

2) 在工艺过程设计阶段，需要将功能公差再分配给加工公差，一般情况下，加工公差之和不可能正好等于功能公差，总存在一定的“富裕量”，而这种“富裕量”却不可避免地增加制造成本。

3) 在产品输出特性和加工公差之间没有直接的联系，工艺师被限制在零件水平，他对零件在系统中的作用不了解，限制了他的主观能动性。

4) 从产品设计到加工工艺设计所需要的时间长，因为需要形成两次成本模型，解两次优化问题。

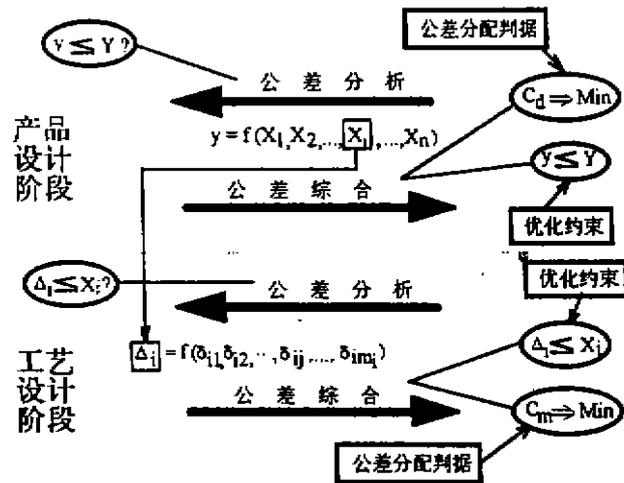


图 1 顺序公差设计过程

为了克服这些缺陷，就需要彻底放弃功能公差，在产品输出特性波动量和加工公差之

间建立起直接的联系,在产品阶段就可直接确定最佳加工公差。并行工程设计理论为我们提供了这种可能性。原国际生产工程学会执行主席 R. Weill 教授在一次关于并行工程的学术会议上说道^[2]：“并行工程应重点研究 CAD 和 CAM 之间的联系上,例如尺寸和公差设计。这种联系是十分重要的,因为设计尺寸和加工尺寸是不相同的”。已经有些专家在这方面做了一些工作^[3~6],但至今尚未见到对这个问题的全面描述,也缺乏一个通用的数学模型。

在下面几节中,我们首先给出并行公差设计的定义,其次对它的组成元素作一简单描述,最后建立并行公差设计的数学模型。

1 并行公差设计的概念

并行公差设计是在产品设计阶段根据产品输出特性要求直接确定加工公差,而不再需要功能公差作为设计和制造之间的桥梁,并行公差设计包括并行公差分析和并行公差综合两个内容。在并行公差设计系统中,产品输出特性的变动量 y 和加工公差 δ_i 之间的联系是直接的,如图 2 所示。在并行公差分析中,产品输出特性的变动量 y 可以直接由加工公差 δ_i 计算得到。在并行公差综合中,产品输出特性公差 Y 可以被直接分配到加工公差 δ_i 上去并且保证制造成本为最小。

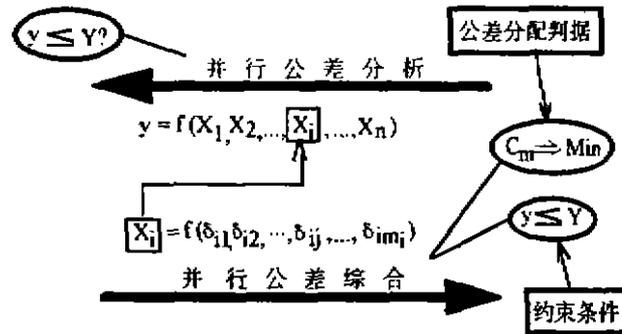


图 2 并行公差设计系统

2 并行公差设计系统的元素

图 3 所示为并行公差设计系统的元素,下面我们将进一步讨论这些元素。

E1——输入数据

作为输入数据,我们需要知道产品输出特性公差 Y 及装配图和零件的描述。输出特性公差 Y 可以用田口博士提供的方法来确定^[19],装配图和零件的描述可以由 CAD 数据库得到。

E2——识别功能零件,确定公差类型

建立功能方程的第一步是识别影响某一输出特性的所有零件,这些零件称为相对于该输出特性的功能零件。功能零件确定后,还应识别功能表面。功能表面是系统中直接与其它零件接触,具有承受或传递力作用的表面,这些表面的各种误差(形状、位置、方向)都对产品的输出特性有影响。最后,还应确定对控制输出特性有直接影响的公差类型。识别功能零件和功能表面可用变量几何技术^[10,11]和尺寸链技术^[12~16]。上述任务也可以用功能联系图^[17~20]来完成,根据我们的经验,有向功能联系图(OFRG)^[20]对完成这些任务特别有用。

E3——确定每个功能公差的灵敏度系数

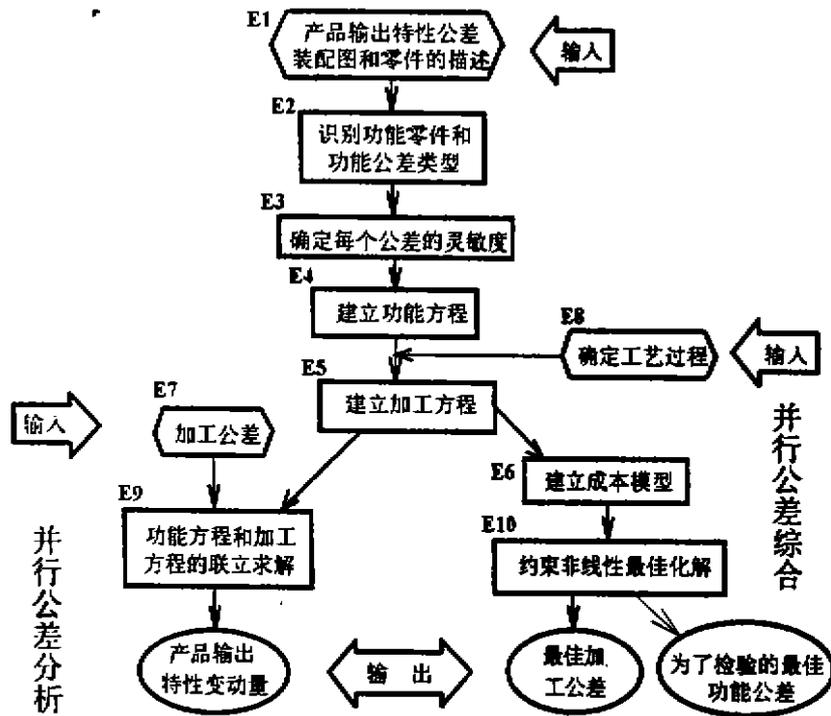


图 3 并行精度设计系统的概念模型

灵敏度系数的确定是一件非常重要而又困难的工作,这方面的研究工作以前做得很不够,今后应成为研究的重点。对于较简单的系统,可以使用下面的方法:变量几何法^[10]、尺链法^[12]、仿真技术^[21]、代数推理技术^[22]和传递矩阵技术^[23]。

E4——建立功能方程

在知道应包括的功能公差和灵敏度系数后,一般可以采用两种模型建立功能方程:极值公差模型^[24]和统计公差模型^[25]。

极值公差模型:
$$y = \sum_{i=1}^n |\xi_{1i}| X_i \quad (3)$$

统计公差模型:
$$y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_{1i}^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (4)$$

E5——建立加工方程

给定加工工艺过程,我们就可以建立加工方程。可以用好几种方法完成这个任务,如工艺图法^[26]、尺寸链法^[27]、Bourdet 法^[28]、Farmer 法^[29]、矩阵—树一链法^[30]和矩阵搜索法^[31]。和功能方程一样,可以采用两种模型建立加工方程:极值公差模型和统计公差模型。

极值公差模型:
$$\Delta = \sum_{j=1}^{m_j} |\xi_{2ij}| \delta_{ij} \quad (5)$$

一般情况下, $\delta_{2ij} = 1$ 或 -1 。

统计公差模型:
$$\Delta = \sqrt{\sum_{j=1}^{m_j} \xi_{2ij}^2 \sigma_{\delta_{ij}}^2} \quad (6)$$

E6——建立成本模型

众所周知,进行公差分配时最好的判据是制造成本。然而,建立成本模型的难度却极大。到目前提出的大部分成本模型都基于一个观察事实上^[32,33]:即公差愈小,所需的制造成本愈高。根据这样一个观察事实,人们提出多种成本模型。最典型的两个是幂函数模型 $C = k/X^n$ 和指数函数模型 $C = ke^{-kX}$ 。成本模型里的系统可以利用曲线拟合技术由收集到的经验性的公差—成本数据来确定。这种方法的难点在于公差—成本数据收集的难度很大。笔者提出的成本模型是基于加工工艺过程的^[34],制造成本可以由选定的工艺过程计算得到,这种成本模型具有比较精确的优点,但需要一个数据库来储存各种工艺过程数据。对于并行公差设计,基于工艺过程的成本模型更为有用,因为可以在设计阶段直接确定加工工艺,加工成本的计算就变得简单可行了。

E7——加工公差

在进行公差分析时,加工公差属于输入数据。在进行公差综合时,加工公差属于需要优化确定的设计变量。若加工公差作为输入数据,它们可以根据过去的经验参考各种手册来确定。

E8——加工工艺过程选择

这部分内容将在另一篇文章中讨论。

E9——计算产品输出特性的变动量

这一步计算产品特性的变动量 y , 并与输出特性公差 Y 进行比较, 如果 $y > Y$, 则需要重新选择加工公差或加工工艺过程。

E10——求解最佳加工公差

最佳化数学模型将在下一节详细讨论。一旦数学模型建立后,就可选择一种适当的非线性规划技术对模型求解,最后得到最佳加工公差。如果数学模型可以被线性化,则可用线性规则技术来求解。

3 并行精度设计的数学模型

在这一节中,我们研究并行精度设计的数学模型。并行精度设计(公差综合)是一个优化设计过程,其目的是在设计阶段直接求出最佳加工公差。

并行精度设计的数学模型包括建立目标函数和设计约束。

3.1 目标函数

我们取加工成本作为优化设计的目标函数,假定第 ij 个加工公差的加工成本为 C_{ij} ,

$$C_{ij} = f_i(\delta_{ij}) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (7)$$

一个产品的总加工成本将是:
$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} \quad (8)$$

3.2 输出特性公差约束

产品输出特性的变动量 y 必须小于或等于其公差值 Y :

$$y = f_y(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \leq Y \quad (9)$$

3.3 加工方程约束

加工方程必须被满足:
$$X_i = f_x(\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ij}, \dots, \delta_{im_j}) \quad (10)$$

3.4 加工余量约束

加工余量链的结果值应在它的极限范围内:

$$a_{\min} \leq a_k = f_k(\delta_{k1}, \dots, \delta_{kp}) \leq a_{\max} \quad k = 1, \dots, p \quad (11)$$

一般情况下 a_k 和 δ_{ij} 之间的关系是线性的, 因此, a_k 是 δ_{ij} 的代数和:

$$a_k = \sum_{i=1}^{q_k} \zeta_{2k} \delta_{ij} \quad (12)$$

3.5 加工公差上下限约束

$$\delta_{ij\min} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij\max} \quad (13)$$

并行精度设计的数学模型应为:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} \\ & C_{ij} = f_i(\delta_{ij}) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m_i \\ \text{S. T.} \quad & y = f_y(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \leq Y \\ & X_i = f_x(\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ij}, \dots, \delta_{im_i}) \\ & a_{\min} \leq a_k = f_k(\delta_{k1}, \dots, \delta_{kp}) \leq a_{\max} \quad k = 1, \dots, p \\ & \delta_{ij\min} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij\max} \end{aligned}$$

在并行优化设计环境下, 不再需要功能公差作为“桥梁”作用, 但有时, 为了控制产品的精度, 需要对零件进行检验, 用于检验的公差可以由(10)式计算得到。注意到加工误差和加工公差之间的差别, 我们可以利用所建立的模型进行动态加工公差控制, 以便于实现更经济的加工过程。也就是说, 我们可以测量并记录已完成的零件的加工误差(这些误差一般小于给定值), 将这些误差代入加工方程, 重新计算尚未加工的零件的允许误差, 可以得到更大的加工公差。当然, 如果某一个零件超差, 一般情况下, 这个零件则变为废品。但在动态加工公差控制环境下, 还可以通过改变(减少)其它未加工零件的公差值, 使废品可以得到重新利用。如果减少公差值带来的成本增加小于废品零件的成本, 这个过程就是值得的。对于两种常用的公差模型, 前面建立的最佳化数学模型可以进一步简化:

极值公差模型:

令 $\Delta = X$, 公式(3)和(5)可以给出 δ_{ij} 和 y 之间的直接关系:

$$y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} |\zeta_{1i}| |\zeta_{2ij}| \delta_{ij} \quad (14)$$

由公式(12)、(13)和(14), 可以得出极值公差时的最佳化模型:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} \\ & C_{ij} = f_i(\delta_{ij}) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m_i \\ \text{S. T.} \quad & y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} |\zeta_{1i}| |\zeta_{2ij}| \delta_{ij} \leq Y \\ & a_{\min} \leq a_k = \sum_{i=1}^{q_k} \zeta_{2k} \delta_{ij} \leq a_{\max} \quad k = 1, \dots, p \\ & \delta_{ij\min} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij\max} \end{aligned}$$

统计公差模型

令 $\Delta = \sigma_{X_i}$, 公式(4)和(6)可以给出 σ_{a_i} 和 y 之间直接关系:

$$y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \xi_{1i}^2 \xi_{2ij}^2 \sigma_{ij}^2} \quad (15)$$

在统计公差模型时,公式(12)变成:

$$a_k = \sqrt{\sum_{i=1}^{q_k} \xi_{2k}^2 \sigma_{ij}^2} \quad (16)$$

由公式(13)、(15)和(16),可以得出统计公差时的最佳化模型:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad C &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} C_{ij} \\ C_{ij} &= f_c(\delta_{ij}) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m_i \\ \text{S. T. } y &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \xi_{1i}^2 \xi_{2ij}^2 \sigma_{ij}^2} \leq Y \\ a_k &\leq a_k = \sqrt{\sum_{i=1}^{q_k} \xi_{2k}^2 \sigma_{ij}^2} \leq a_{k\max} \quad k = 1, \dots, p \\ \delta_{i,\min} &\leq \delta_{ij} \leq \delta_{i,\max} \end{aligned}$$

4 结 论

本文将并行工程的概念和机械产品的精度设计结合在一起,建立了机械产品并行精度设计的新概念;讨论了并行精度设计系统的元素;建立了并行精度设计的数学模型。并行精度设计的特点在于将产品输出特性的变化与加工公差直接联系起来,可以在产品设计阶段根据产品输出特性的公差、产品装配结构和加工工艺过程,直接求出零件的加工公差。在并行精度设计系统中,零件的功能(设计)公差失去其在设计和制造之间的桥梁作用,也就不再需要在零件图上标注设计公差。利用并行精度设计系统,可以缩短设计时间,保证产品的最终工作精度、降低产品的制造成本。

标识符

| | |
|--|---------------------------------------|
| Y —— 产品输出特性公差; | y —— 产品输出特性误差; |
| X_i —— 零件功能公差; | Δ_{X_i} —— 过程产生的相应于 X_i 的误差; |
| C_d —— 在设计过程中确定的制造成本; | δ_{ij} —— 加工(工步)公差; |
| C_m —— 根据工艺过程计算出的制造成本; | ξ_{1i} —— 第 i 个功能公差的灵敏度; |
| σ_{X_i} —— 第 i 个功能公差的标准差; | ξ_{2ij} —— 第 ij 个加工公差的灵敏度; |
| $\sigma_{a_{ij}}$ —— 第 ij 个加工公差的标准差; | C_{ij} —— 第 ij 个加工公差的制造成本; |
| n —— 功能方程中功能公差的数量; | p —— 余量链的数量; |
| m_i —— 加工方程中加工公差的数量; | q_k —— 余量链中加工公差的数量; |
| a_k —— 计算余量; | L —— 两个端面之间的距离。 |

参 考 文 献

- 1 Walker R. The Effects of the Mathematical Definition of Tolerances. Proceedings of the ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition, Santa Clara, California, 1991. 1~8
- 2 Weill R. Round Table Discussion on Concurrent Engineering Requirements and Perspectives. IFIP TC5/WG5.3/WG5.2 Working Conference on Manufacturing in the Era of Concurrent Engineering, Israel, 1992
- 3 Bourne D, Navinchandra D and Ramaswamy R. Tolerance Free Design for Manufacturing. The Winter Annual Meeting of ASME, San Francisco, 1989. 47~56
- 4 Cagan J. and Kurfess T R. Optimal Tolerance Allocation over Multiple Manufacturing Alternatives. 18th ASME Design Automation Conference, Scottsdale, Arizona, 1992. 165~172
- 5 Dong Z. Design for Automated Manufacturing. Concurrent Engineering Automation, Tools and Techniques. Kusiak A. (Ed.), John Wiley and Sons, New York, 1992. 207~234
- 6 Srinivasan R S and Wood K L. Fractal-Based Geometric Tolerancing for Mechanical Design. ASME Design Technical Conference, Arizona, 1992. 107~115
- 7 Willheim R G and Lu S C Y. Tolerance Synthesis to Support Concurrent Engineering. Annals of the CIRP, 1992. 41(1): 197~200
- 8 Zhang C, Wang H P and Li J K. Simultaneous Optimization of Design and Manufacturing Tolerances with Process (machine) Selection, Annals of the CIRP, 1992. 41(1):569~572
- 9 Taguchi G et al. Quality Engineering in Production Systems. McGraw-Hill Book Company, 1989
- 10 Structural Dynamics Research Corporation. I-DEAS User'S Guide; Tolerance Analysis. First Edition, 1991
- 11 Turner J U. Exploiting Solid Models for Tolerance Computation. Geometric Modeling for Product Engineering, Elsevier Science Publishers B. V. 1990
- 12 Bjørke O. Computer Aided Tolerancing. ASME Press, Second Edition, Univ. Trondheim, Norway, 1989
- 13 Dong Z and Soon A. Automatic Optimal Tolerance Design for Related Dimension Chains. Manufacturing Review, 1990. 3(4): 262~271
- 14 He J R and Lin G G I. Computerized Trace Method for Establishing Equations for Dimensions and Tolerances in Design and Manufacturing. Int. J. Manuf. Technol. 1992. 7(4):210~217
- 15 Soderberg R. CATI: a Computer Aided Tolerancing Interface, 18th ASME Design Automation Conference, Arizona, 1992. 157~164
- 16 Wang N and Ozasoy T M. Automatic Generation of tolerance Chains from Mating Relations Represented in Assembly Models. ASME 16th Design Automation Conference, Chicago, 1990. 227~233
- 17 Eydad O K and Ong J B. An Assembly Recognition Algorithm for Automatic Tolerancing. Transactions of NAMRI/SME, NAMRC XIX, Rolla, Missouri, 1991. 309~314
- 18 Juster N P, Dew P M and Pennington A de. Automating Linear Tolerance Analysis Across Assemblies. Journal of Mechanical Design, 1992. (14): 174~179
- 19 Shah J J and B C Zhang. Attributed Graph Model for Geometric Tolerancing. 18th ASME Design Automation Conference, Arizona, 1992. 133~140
- 20 Zhang G and Porchet M. Assembly Modeling for Tolerancing in CAD: an Approach of Oriented Functional Relationship Graph. 9th International Conference on Engineering Design ICED'93, Netherland. 975~984
- 21 Zhang G and Porchet M. Some New Progresses in Tolerance Design In CAD. 19th ASME Design Automation Conference, New Mexico, 1993. 175~185
- 22 Inui M and Kimura F. Algebraic Reasoning of Position Uncertainties of Parts in an Assembly. Proceedings of the Symposium on solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, Texas, June 5-7, 1991, 419~428

- 23 Ingham P C. A Computer—Aided Tolerance System. 4th International Conference and Exposition on Computers in Design Engineering, UK, 1980. 382~392
- 24 Greenwood W H and Chase K W. Worst Case Tolerance Analysis with Nonlinear Problems. Journal of Engineering for Industry, 1988. (110): 232~235
- 25 Lehtihet E A and Dindelli B A. Tolcon; Microcomputer Based Module for Simulation of Tolerances. Manufacturing Review, 1989. 2(3): 179~188
- 26 Irani S A, Mittal R O and Lehtihet E A. Tolerance Chart Optimization. Int. J. Prod. Res, 1989. 27(9): 1531~1552
- 27 Zhang H C, Mei J and Dudek R A. Operational Dimensioning and Tolerancing in CAPP. Annals of the CIRP, 1991. 40(1): 419~422
- 28 Weill R. Integrating of Dimensioning and Tolerancing in Computer—Aided Process Planning. Robotic & Computer—Integrated Manufacturing, 1988. 4(1/2): 41~48
- 29 Farmer L E and Harris A g. Change of Datum of the Dimensions on Engineering Design Drawings. International Journal of Machine Tool Design & Research, 1984. (24): 267~277
- 30 Tang X and Davies B J. Computer Aided Dimensional Planning. Int. J. Prod. Res. 1988. 26(2): 283~297
- 31 Zhang G and Porchet M. Automatic Calculation of Dimensions and Tolerances in Manufacturing. IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems'92, Kobe, Japan, 1992. 1131~1136
- 32 Cheikh A McGoldrick P F. The Influence of Cost Function and Process Capability on Tolerance. International Journal of Quality and Rilyability Management, 1988, 5(3): 15~28
- 33 Wu Z, ELAaraghy W H and ElMaraghy H A. Evaluation of Cost—Tolerance Algorithms for Design Tolerance Analysis and Synthesis. ASME Manufacturing Review, 1988. 1(3): 168~179
- 34 Zhang G. Functional Dimensioning and Tolerancing: an approche of Functional Relationship Graph and Cost Model Based on Machining Process Ph. D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 1994.

Concurrent Optimal Design for the Mechanical Product Accuracy and its Mathematical Model

Zhang Genbao Zhao Jianheng

(Department of Mechanical Engineering (1), Chongqing University)

ABSTRACT A new method, the concurrent optimal design for the mechanical product accuracy is addressed presented, this method is very suitable to a concurrent engineering context. Differing from the conventional tolerance design method, this method establishes a direct link between product working accuracy and machining precision of the parts. Therefore, in the product design phase, the optimal machining tolerances which satisfy the product working accuracy can be determined. Using this method, the design and manufacturing time and cost can be enormously reduced and product quality can be guaranteed.

KEYWORDS Accuracy design; Concurrent Engineering; Mathematical Model