

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.041

基于工序切削体的三维公差模型*

赵鹏 盛步云

(武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070)

【摘要】 在工序特征识别的基础上,提出了一种基于工序切削体的三维公差建模方法。该方法视毛坯模型为零件模型和工序切削体集合的装配体,利用小位移旋量描述零件和工序切削体的公差旋量,计算各旋量的变动约束;构建工序切削体集合的公差网络图,探讨设计公差在工序公差网络中的传播机制,建立工序公差累积模型,为工序公差设计提供基础。最后,通过实例验证该方法的有效性,并说明基于该建模理论的工序公差分配方法。

关键词: 三维公差 工序切削体 建模

中图分类号: TG801 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0226-05

3-D Tolerance Model Based on Operation Removal Model

Zhao Peng Sheng Buyun

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract

A method of 3-D tolerance modeling and analysis for operation removal model was proposed based on operation feature recognition. The roughcast was considered as the assembly of part model and operation removal models. Small displacement torsor (SDT) theory was used to describe design and process tolerances while the changeable constrains of tolerance torsors were calculated. The tolerance network graph of the operation removal models was constructed and the tolerance propagation mechanism in the tolerance network was discussed. Then the process tolerance stack-up models were achieved, which was the basis of process tolerance allocation. Finally, a case was analyzed to verify the validity of the proposed theory. The process tolerance allocating method based on the proposed theory was mentioned briefly.

Key words 3-D tolerance, Operation removal model, Modeling

引言

工序公差分配,对产品质量及其制造成本有很大的影响。公差制图法(tolerance charting)是一种最为常用和成熟的公差分配方法,然而该方法的特性决定了其只能处理一维和二维的尺寸公差^[1~2]。随着几何公差不断地应用到产品设计、工艺、制造等各个领域,迫切需要新的方法论来解决工艺设计中的三维公差分配问题。鉴于在产品阶段的研究和应用,三维公差传播技术有望被修订或定制以应

用于三维工序公差的分配和优化^[3]。

在设计阶段,三维公差传播技术用于描述和分析三维空间中几何公差的传播,包括公差建模和公差传播机制。根据文献[4~8],公差建模的主要方法有运动学公式法、矩阵表示法、向量公差法、小位移旋量法以及公差映射法等;公差的空间传播机制主要有基于装配链^[9]和基于加工工序封闭环^[10]的传播。本文在工序特征识别的基础上,提出一种基于工序切削体的三维公差建模方法。将毛坯模型视为零件模型和工序切削特征集合的装配体,利用小

收稿日期:2010-07-02 修回日期:2011-08-25

*国家自然科学基金资助项目(50620130441)、湖北省国际科技合作项目(2010BFA006)和武汉理工大学自主创新研究基金研究生国际学术交流预研项目(2010-JL-16)

作者简介:赵鹏,博士生,主要从事CAD/CAPP/CAM、现代集成制造等先进制造技术研究,E-mail:zp_whut@163.com

位移旋量法描述零件的设计公差及工序切削体的工序公差。依据工艺路线构建工序公差网络,并建立三维公差回路上的工序公差累积模型,为三维工序公差分配提供理论基础。

1 工序公差建模

在机械加工中,大部分零件通过金属切削加工工序完成,这些工序按照逻辑和时间顺序将毛坯模型转换为具有尺寸和公差要求的设计模型。定义每道工序完成后获得的零件状态为工序模型 m_o (operation model),切除的部分作为工序切削体 m_{or} (operation removal model),则这些 m_{or} 组成一个有序集合 $M_{or} = (m_{or1}, m_{or2}, \dots, m_{orm})$ 。设定一道工序中工序模型加工表面及工序切削体上对应表面的公差相一致,即工序切削体直接或间接(几何计算)继承零件设计公差要求,并定义相对应的几何要素具有工序耦合关系。

为定量描述工序公差,引入小位移旋量 (small displacement torsor, 简称 SDT) 概念。SDT 是用于表示数字实体内 3 个转动和 3 个平动位移的数学对象,早在 1996 年 Bourdet 和 Clement 将小位移旋量引入公差领域^[11]。在坐标系中给定某一点 A ,假定该点位移非常小,则该点的变动量可以表示为

$$T = [R \ D]_A \quad (1)$$

其中, $R = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$, 表示该点绕 x 、 y 和 z 轴的转动矢量; $D = [u \ v \ w]^T$, 表示该点沿 x 、 y 和 z 轴的平动矢量。它们被称为 SDT 矢量。将两矢量代入式(1)可得

$$T = \begin{bmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{bmatrix}_A \quad (2)$$

在新一代 GPS 公差语义中,公差域用于控制零件实际变动的范围和区域,鉴于公差域相对其名义尺寸非常微小,可以用 SDT 矢量精确描述刚体零件几何要素的变动(公差域)。

以图 1 所示零件为例,该零件孔加工工序的工

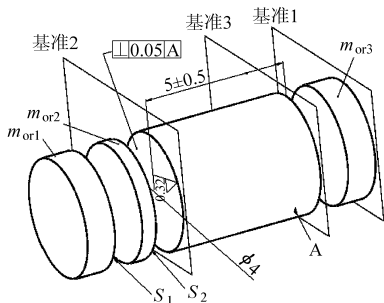


图 1 工序切削体及加工基准示意图

Fig. 1 Operation removal models and process datum schema

序切削体为一圆柱体,该孔同时具有尺寸和位置度要求,工序切削体继承相应的公差要求。

该工序切削体及其几何要素进行编号,并对其公差进行 SDT 旋量描述。

尺寸公差

$$T_d = \begin{bmatrix} 0 & \Delta r \sin \alpha \\ 0 & \Delta r \cos \alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\alpha \in [0, 2\pi]; \Delta r < |T_d|/2)$$

位置度公差

$$T_p = \begin{bmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left(-\frac{|T_p|}{2} \leq \sqrt{u^2 + v^2} \leq \frac{|T_p|}{2}; \right.$$

$$|\alpha| \leq \frac{\sqrt{\left(\frac{|T_p|}{2}\right)^2 - u^2 - |v|}}{c/2};$$

$$\left. |\beta| \leq \frac{\sqrt{\left(\frac{|T_p|}{2}\right)^2 - \left(v + \alpha \frac{c}{2}\right)^2 - u^2}}{c/2} \right)$$

由于该实例的尺寸公差和位置公差默认遵循独立原则,且两公差作用于不同的几何要素,故两者无关联,即相互独立。当零件孔特征的位置公差具有最大实体要求: $\boxed{+ \phi T_p M A B C}$ 时,则相应的工序切削特征应具有最小实体要求,即 $\boxed{+ \phi T_p L A B C}$, 并且其尺寸公差和形位公差将互相关联,其位置度 SDT 变量的约束条件附加以下约束

$$\begin{cases} \sqrt{[(|R| + \Delta r) \cos \theta + \beta z + u]^2 + [(|R| + \Delta r) \sin \theta + \alpha z + v]^2} \leq \\ |R| - \frac{|T_d| - |T_p|}{2} \\ \theta \in [-\pi, \pi) \\ z \in [-c/2, c/2] \\ -\frac{|T_d|}{2} \leq \Delta r \leq \frac{|T_d|}{2} \end{cases}$$

2 工序公差网络及公差传播

根据国家标准 GB/T 4249—2009,公差分为尺寸公差和几何公差(原标准 GB/T 4249—1996 为形状公差和位置公差)。传统工序公差累积的研究主要是基于尺寸公差链的,这种方法仅限于处理一维或二维的尺寸公差,而无法处理几何公差。其根本原因在于工序公差的传播方式不是链式结构,而是网状结构。文献[12]将附有公差信息的变动几何约束网络定义为公差网络。然而该公差网络主要是基于装配要求实现零件层的公差分配,并未考虑工序层的公差网络。本文借用公差网络相关概念,讨

论工序层公差网络中公差传播机制及工序公差累积计算。

首先要确定需要求解的工序公差。给定一工序切削体,在该道工序中的加工生成要素如果与零件模型加工生成要素接触,则工序切削体继承零件相应的设计公差;如果与工序模型加工生成要素接触,则按照工序切削体加工生成要素的自由度确定相关的工序公差。如图1所示,零件由3道工序加工完成, m_{o1} 、 m_{o2} 和 m_{o3} 为其工序切削体,基准1~3分别为其加工基准。 m_{o2} 直接与零件接触,故加工表面 S_2 继承相邻面的形位公差、并参照加工基准3的尺寸公差。而 S_1 没有与零件直接接触,故按照其自由度(轴向平动及径向转动3个自由度),选择相对基准1的平行度定向公差及相应的轴向尺寸公差以及表面粗糙度要求。

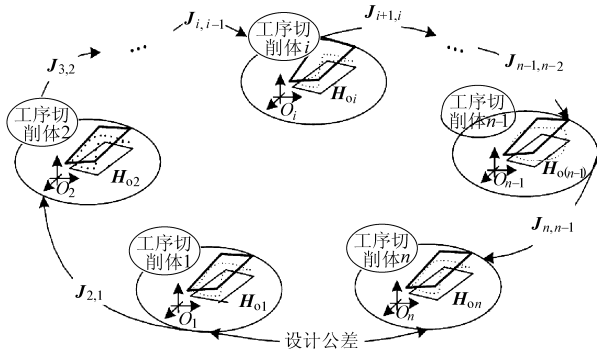


图2 工序公差累积示意图

Fig.2 Process tolerance stack-up schema

其次以工序切削体(零件模型)几何要素为公差网络节点,以公差关联或几何要素工序耦合关系为连接,构建工序公差网络。

工序切削体(零件模型)的几何要素主要包括顶点、边线、轴线和表面等。公差关联包括基准参考和尺寸公差与形位公差间的公差原则关联。零件设计公差参考其设计基准,工序公差参考其加工基准。当同一工序切削体上不同几何要素的公差之间满足特定公差原则时,将构建其虚连接,其关联通过其SDT旋量的参数约束条件反映。

基准独立公差(如定型尺寸公差、形状公差和表面粗糙度等)可以直接根据一道或多道工序直接保证,不依赖于基准参考,由此在公差网络中产生非封闭链。基准相关公差又分为直接获取公差和间接获取公差。基准相关公差的直接获取指以约束表面作为参考(基准),通过一道工序直接加工生成被约束表面的最终状态,即是该道工序直接影响该公差,故此不产生工序公差累积;而间接获取的基准相关公差则需要多道工序,而这些工序需要使用附加的参考基准作为约束表面,这种情况下将产生工序公

差累积。工序公差累积在公差网络中表现为回路。零件模型中 n 个独立的、间接获取的基准相关公差对应公差网络中 n 条回路,非独立公差同时存在于多条回路中。

3 工序公差累积模型

工序公差沿公差网络中的回路进行传播,要实现工序公差的分配,需要依据公差网络回路建立工序公差累积模型。鉴于几何要素之间的坐标关系利用齐次坐标矩阵表示,将各公差的SDT旋量也转换成齐次变换矩阵形式,即

$$T = \begin{bmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{bmatrix} \Rightarrow H = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta & u \\ r & 1 & -\alpha & v \\ -\beta & \alpha & 1 & w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于某一工序公差 T_{oi} 的齐次变换矩阵 H_{oi} ,其物理意义为该工序的加工要素的实际位置相对其名义位置的局部坐标转换。设工序公差传播回路上相邻两节点相对坐标变换矩阵为 $J_{i,i+1}$,则下一节点实际位置相对上一节点实际位置关系可以表示为

$$H_{i+1,i} = H_{o(i+1)} \times J_{(i+1),i} \quad (4)$$

以此类推,如果工序切削体1和工序切削体 n 均生成零件最终几何要素,且两几何要素间具有设计公差要求 $H_{1,n}^0$,如图2所示,则

$$H_{1,n} = H_{1,n}^0 \times J_{1,n} \quad (5)$$

沿工序公差回路 $H_{1,n}^0$ 可表示为

$$H_{1,n}^0 = H_{2,1} \times \cdots \times H_{i,i-1} \times \cdots \times H_{n,n-1} = H_{o2} \times J_{2,1} \times \cdots \times H_{oi} \times J_{i,i-1} \times \cdots \times H_{on} \times J_{n,n-1} \quad (6)$$

联合式(5)和式(6)求解,求得

$$H_{1,n}^0 \times J_{1,n} = H_{o2} \times J_{2,1} \times \cdots \times H_{oi} \times J_{i,i-1} \times \cdots \times H_{on} \times J_{n,n-1} \quad (7)$$

$$H_{1,n}^0 = H_{o2} \times J_{2,1} \times \cdots \times H_{oi} \times J_{i,i-1} \times \cdots \times H_{on} \times J_{n,n-1} \times J_{1,n}^{-1} \quad (8)$$

其中 H_{oi} 表示第 i 节点几何要素的工序公差旋量矩阵,该等式建立了设计公差和工序公差的关系,当公差网络中有 n 条回路时,将产生 n 个等式。

为实现工序公差的合理分配,采用基于SDT旋量理论的最小制造成本优化公差分配方法。将其优化模型表示为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^p M(T_i) \\ & \text{s. t.} \begin{cases} f_i(\alpha_i, \beta_i, \lambda_i, u_i, v_i, w_i) \\ \varepsilon_i(H_{on}, \cdots H_{oi}, \cdots H_{o1}) \\ T_{Li} \leq T_i < T_{ui} \end{cases} \end{aligned}$$

式中 $M(T_i)$ ——工序公差制造成本

p ——需要确定的几何工序公差个数

f_i ——工序公差 SDT 旋量之间的约束函数

ε_i ——工序公差回路中公差累积函数

T_{Li}, T_{ui} ——对应工序的最小加工公差和最大加工公差,为工序加工能力约束

由于实际加工产生的不确定性,使得工序公差在一定范围内随机变动。可以为工序公差的 SDT 旋量随机取值,在约束范围内通过迭代寻找最优解,实现工序公差的优化分配(此部分内容不在本文详述)。

4 实例分析

用文献[13]的实例,附加完整的设计公差,并就分解组合结果进行工序公差建模和公差网络构建。其零件设计模型如图 3 所示,分解结果如图 4 所示。

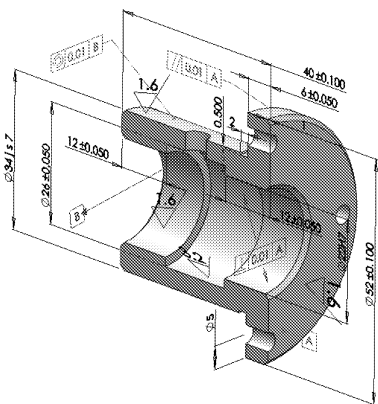


图 3 实例零件模型

Fig. 3 Case part model

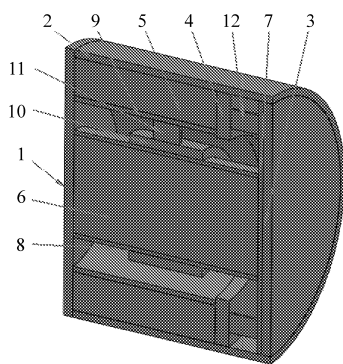


图 4 工序切削体及编号

Fig. 4 Operation removal models and numbers

表 1 为工序切削体编号、工序、基准以及所求工序公差,其中 $T_D, T_{//}, T_C, T_P, T_R$ 分别表示尺寸公差、平行度公差、同轴度公差、垂直度公差和粗糙度要求, $O_i S_j$ 表示第 i 个工序切削体的第 j 个表面, $O_i A_j$ 表示第 i 个工序切削体的第 j 个轴,在公差网络图中它们既可表示几何加工要素,也可表示加工基准所在位置。表中仅列出与公差要求有关的加工基准。

表 1 工序切削体及工序公差

Tab. 1 Operation removal model and process tolerance

序号	工序	加工基准	工序公差
1	车左端面	$O_0 S_1, O_0 A_1$	T_{D1}
2	车外圆	$O_0 S_1, O_0 A_1$	T_{D2}
3	粗车右端面	$O_1 S_1, O_0 S_1$	$T_{D3}, T_{//4}$
4	切槽	$O_3 S_1$	T_{D4}
5	粗车台阶	$O_2 A_1$	T_{D5}, T_{R5}
6	钻孔 1	$O_5 A_1$	T_{D6}, T_{R6}, T_{C6}
7	精车右端面	$O_5 A_1, O_1 S_1$	$T_{D7}, T_{//7}$
8	镗孔	$O_5 A_1, O_7 S_1$	T_{D8}, T_{P8}, T_{C8}
9	精车台阶	$O_8 A_1$	T_{D9}, T_{P9}
10	镗削内台阶	$O_7 S_1, O_9 A_1$	$T_{D10.1-3}$
11	钻孔 2	$O_7 S_1$	T_{D11}
12	钻孔 3	$O_8 A_1$	T_{D12}

利用 SDT 旋量描述各类工序公差,并建立各旋量约束表达式。举例

$$T_{D1} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta r \sin \alpha \\ 0 & \Delta r \cos \alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\alpha \in [0, 2\pi]; \Delta r < |T_{D1}|)$$

$$T_{C(9,8)}^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{bmatrix} \quad \left(-\frac{0.01}{2} \leq v + 16\beta \leq \frac{0.01}{2}; \right. \\ \left. -\frac{0.01}{2} \leq w - 16\gamma \leq \frac{0.01}{2}; v^2 + w^2 \leq \left(\frac{0.01}{2}\right)^2 \right)$$

$$T_{P9} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta & 0 \\ \gamma & 0 \end{bmatrix} \quad \left(-\frac{|T_{P9}|}{40} \leq \beta \leq \frac{|T_{P9}|}{40}; \right. \\ \left. -\frac{|T_{P9}|}{40} \leq \gamma \leq \frac{|T_{P9}|}{40} \right)$$

$$T_{//4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta & 0 \\ \gamma & 0 \end{bmatrix} \quad \left(-\left| \frac{T_{//4}}{52} \right| \leq \beta \leq \left| \frac{T_{//4}}{52} \right|; \right. \\ \left. -\left| \frac{T_{//4}}{52} \right| \leq \gamma \leq \left| \frac{T_{//4}}{52} \right| \right)$$

构建工序公差网络如图 5 所示。该图中节点表示加工要素(加工基准),用椭圆表示。工序公差 T 用实线将加工要素与加工基准相连。 T^0 表示工序切削体从零件设计模型继承的公差,它们通过虚线与相关工序切削体几何要素相连。其中继承的设计粗糙度 T_R^0 指向加工要素,工序粗糙度 T_R 未标注。

从设计公差 T^0 出发反向获取公差传播回路,当存在 $T \rightarrow T^0$,即工序公差 T 连接两端的几何要素与 T^0 连接两端的几何要素相对应,则表明设计公差 T^0 直接由工序公差 T 保证,不存在公差累积,如 $T_{P7} \rightarrow$

- 3 樊智敏, 张光辉. 双渐开线齿轮振动特性的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(5):820~823.
Fan Zhimin, Zhang Guanghui. Experimental research on the vibration characteristics of double involute gears[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(5):820~823. (in Chinese)
- 4 娄依志, 王小群, 李威. 非对称渐开线圆柱齿轮的动力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3):334~337.
Lou Yizhi, Wang Xiaoqun, Li Wei. Dynamics analysis of involute gears with asymmetric teeth[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3):334~337. (in Chinese)
- 5 邓效忠, 徐恺, 潘十成, 等. 直廓内齿与渐开线齿轮啮合传动计算与噪声试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11):219~222.
Deng Xiaozhong, Xu Kai, Pan Shicheng, et al. Transmission error and noise experiment on meshing of the straight profiled internal gear with the involute external gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):219~222. (in Chinese)
- 6 Khabou M T, Bouchaala N, Chaari F, et al. Study of a spur gear dynamic behavior in transient regime[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(8):3 089~3 101.
- 7 Yuksel C, Kahraman A. Dynamic tooth loads of planetary gear sets having tooth profile wear[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(7):695~715.
- 8 Jean-Luc Dion, Sylvie Le Moyne. Gear impacts and idle gear noise: experimental study and non-linear dynamic model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(8):2 608~2 628.
- 9 Marcello Faggioni, Farhad S Samani. Dynamic optimization of spur gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(4):544~557.
- 10 Andersson A, Vedmar L. A dynamic model to determine vibrations in involute helical gears[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(2):195~212.
- 11 段福海, 胡青春, 谢存禧. 钢塑齿轮组行星传动的振动特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1):62~67.
Duan Fuhai, Hu Qingchun, Xie Cunxi. Dynamic behavior for planetary geared system with plastic gear[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1):62~67. (in Chinese)
- 12 王立华, 李润方, 林腾蛟, 等. 齿轮系统时变刚度和间隙非线性振动特性研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13):1 143~1 146.
- 13 陈奇, 赵韩, 黄康. 齿轮结合面切向接触刚度分形计算模型研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):203~206.
Chen Qi, Zhao Han, Huang Kang. Fractal model of tangential contact stiffness between gears's joint surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):203~206. (in Chinese)

(上接第 230 页)

- 7 茅健. 基于数学定义的公差建模与误差评定技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
Mao Jian. Study on the modeling of tolerance based on mathematical definition and for errors evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 8 张为民, 李国伟, 陈灿. 基于雅可比旋量理论的公差优化分配[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4):216~219, 228.
Zhang Weimin, Li Guowei, Chen Can. Optimal allocation of tolerance based on jacobian-torsor theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):216~219, 228. (in Chinese)
- 9 徐旭松, 杨将新, 曹衍龙, 等. 一种面向可装配性的公差分析方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24):2 976~2 981.
Xu Xusong, Yang Jiangxin, Cao Yanlong, et al. A tolerance analysis method for feasibility of assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(24):2 976~2 981. (in Chinese)
- 10 周彤, 凌芸, 周岩. 基于一致性分析的公差传播方法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(3):214~217.
Zhou Tong, Ling Yun, Zhou Yan. Tolerance propagation method based on consistency analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(3):214~217. (in Chinese)
- 11 Bourdet P, Mathieu L, Lartigue C. The concept of the small displacement torsor in metrology[M]//Ciarlini P, Cox M G, Pavese E, et al. Advanced Mathematical Tools in Metrology II, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, 1990:109~121.
- 12 胡洁, 吴昭同. 面向装配的变动几何约束网络的生成方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(1):79~82.
Hu Jie, Wu Zhaotong. Method for generation of variational geometric constraints networks for assembly[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(1):79~82. (in Chinese)
- 13 赵鹏, 盛步云, 邓伟刚. 工艺设计过程中的切割体分解组合策略[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(9):1 793~1 800.
Zhao Peng, Sheng Buyun, Deng Weigang. Delta-volume decomposition and combination strategy for process planning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(9):1 793~1 800. (in Chinese)