

车身装配尺寸链生成方法*

周江奇 陈关龙 来新民 林忠钦

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 误差分析中装配函数的构造在装配体尺寸质量评价中扮演重要的角色。尺寸链的形成过程反映了装配函数的核心内容。针对柔性零件的装配连接特征,首先建立了车身装配尺寸链信息模型,通过路径搜索算法,提出车身装配体尺寸链的实现和生成方法。所生成的尺寸链综合考虑了设计要求、装配工艺(顺序)接头形式等因素,为设计方案的优化评价提供了误差分析手段。

关键词: 尺寸链 误差分析 图论 车身

中图分类号: TP391

0 前言

尺寸质量是大型复杂产品如飞机、汽车的关键质量指标,以轿车白车身为例,其一般由 150~250 块形状复杂的薄板冲压件经焊装、铆接和机械连接等方法经不同的加工站装配而成,白车身的尺寸误差水平直接影响整车的顾客满意度指标,如风噪声、关门力、外观缝隙平顺性等。整车尺寸误差溯源研究表明,车身设计因素(缺陷)造成的误差约占 50%^[1],这些因素难以通过现有的制造过程质量控制技术进行弥补,因此进一步改进尺寸质量,有赖于产品设计质量的提高。在设计自由度最大的概念设计阶段,实施产品和工艺的并行设计方法则是获得高质量设计方案的关键。

一般来说,车身尺寸质量水平是零件特征、连接方式、装配顺序、加工手段等众多影响因素综合作用的结果,可以表示为: $y=f(x_1, x_2, \dots, x_b, \dots, x_n)$,式中 x_i 为影响因素。上式为装配函数的一般形式。装配函数的构建是进行装配误差仿真的重要内容。对车身装配体,装配函数需反映装配零件(分总成)之间的相互作用关系以及尺寸偏差累积的传播关系。

由于车身装配的高度非线性特征,提出装配函数的解析关系式被认为不可能。许多学者试图通过应用各种数学工具或方法对影响柔性件装配尺寸质量的各种因素进行分析研究。S. J. Hu^[2]于 1997 年提出了偏差流理论,用以指导分析和预测柔性零件装配偏差在整个装配过程中的传播机理。S. C. Liu 等^[3]建立了柔性薄板件力学偏差模型,将统计分析方法与零件力学模型融为一体,较好地揭示了造成装配

偏差的机理。M. Hu 等^[4]应用有限元方法研究了点焊过程对装配误差的影响。B. Zhang^[5]针对车体尺寸误差分析和装配顺序生成,首次提出车身装配关系的矩阵表达方式。Y. Z. Zhang 等^[6]则在其基础之上,提出装配工艺知识的数学表达以及基于矩阵运算的装配顺序生成方法。上述研究为实现尺寸误差评价在不同方面进行了非常有价值的探索,尽管如此,在装配函数的一体化表达方面研究较少。

尺寸链是刚体零件进行尺寸精度计算(公差分析和综合)的重要手段,可以根据零件的加工面位置、加工顺序、零件形位特征要求以及加工方法直接进行尺寸链的查找、构建^[7,8],其形成过程反映了装配函数的核心内容。车身属于柔性装配体,传统的基于工艺过程图表的尺寸链生成方法并不适用。这里目的就在于利用尺寸链作为装配函数的表达载体,综合考虑设计要求、装配工艺(顺序)、接头形式等因素,在研究和提出面向柔性体尺寸质量评价的尺寸链生成方法的基础上,对车身复杂装配体的关键尺寸指标进行公差分析,为进一步进行车身结构优化设计打下基础。

1 尺寸链信息模型

构建尺寸链的目的是为了进行以公差分析为手段的尺寸质量评价,综合考虑装配顺序、接头形式和尺寸公差对尺寸质量的影响,因此其信息模型应包括上述内容。

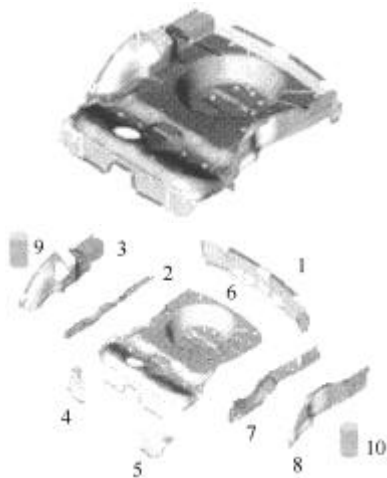
1.1 车身装配顺序

1.1.1 装配关系模型

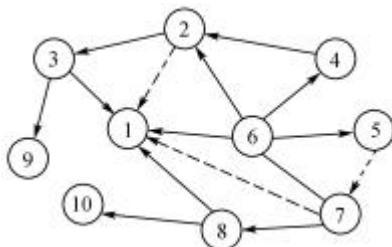
车体装配表现为多层次体系结构,其装配关系可采用关联图表示: $G=\{P,E\}$,式中节点 $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 为零件集合,边集 $E=$

* 国家自然科学基金资助项目(50175071, 50375092)。20040118 收到初稿,20040719 收到修改稿

$\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$ 为零件之间联系的集合，零件之间的联系主要指车身冲压件之间的接头接触关系和装配先后次序要求。图 1 为某车型后地板分总成，共由十个零件分层焊接而成。与传统的装配关系模型中定义的有向关联图不同，这里引入“虚联接”概念，表示两零件之间没有直接的物理连接关系，但却存在装配先后次序上的要求。如为满足焊枪可达性要求，在图 1a 中零件 4 必须先于零件 2 装配，否则焊接零件 2 后将使焊枪无法达到零件 4 和零件 6 焊接面上的焊点位置。虚联接在关联图中用虚线表示，在关联图的联接矩阵中则用字符元素 1 表示。如图 1b、c 所示。



(a) 某车型后地板分总成及零件清单



(b) 装配体关联图

0	-λ	-1	0	0	-1	-λ	-1	0	0
λ	0	-1	-λ	0	-1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	λ	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	λ	0	0	0
1	1	0	1	1	0	-1	0	0	0
λ	0	0	0	λ	1	0	-1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0

(c) 后地板分总成联接矩阵

图 1 后地板分总成、有向关联图以及联接矩阵

- 1. 后加强板 2. 右后纵梁
- 3. 右后轮罩内板 4. 右延伸板
- 5. 左延伸板 6. 后地板
- 7. 左后纵梁 8. 左后轮罩内板
- 9. 右避震器支架 10. 左避震器支架

采用关联图的优点在于它既可直观地表示零件

之间的物理接触关系和隐含层次关系，同时通过转化为矩阵形式，可以方便计算机进行数学推演，实现装配顺序生成。

1.1.2 装配顺序生成和表达

Y. Z. Zhang 等^[6]建立的基于规则的装配顺序生成方法，尽管尚需要人工干预(如进行优先关系的输入)，但大大提高了车身零件装配顺序生成的效率。通过矩阵的排序操作，并施加约束检验，可生成可行的装配顺序集。研究将直接利用其方法生成所有可行的装配顺序集。为了充分表达装配知识(主要是装配层次关系)，对装配顺序的表达方式作了改进，以方便计算机处理。装配顺序采用字符串表达，其中序数字及数字右边的括号表示零件，并和 BOM 中的序号一致，方便相关信息的查询(如“5”表示第 5 号零件)。子装配体则用一对括号{}表示；用“，”隔开的相邻装配体表示在同一层次进行装配(即对应同一级加工站装配)。其一般形式可用下式表示

$$\{ \{ \{ G_1, G_2, \dots \} G_s, G_t, \dots \} G_x, G_y, \dots \}$$

式中 G_s —— 总成

$$G_s = \{ p_1, p_2, \dots, p_l \mid 1 \leq l \leq n, p_l \in P \}$$

$$P = \{ p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \}$$

n —— 零件数量

显然，装配顺序表达中隐含了装配体的层次性信息，这些信息可以从括号对{}的嵌套深度分析得到。例如，图 1 所示后地板总成的一条装配顺序为： $\{ \{ \{ (6)4)5) \}, (7)8)10) \}, (2)3)9) \}, 1) \}$ ，其装配层次关系为：首先分别进行子装配 (6)4)5)、(7)8)10)、(2)3)9)的装配(第一层)，合成的装配体(第二层)再和零件 1)装配(第三层)。

1.2 接触链模型

1.2.1 零件接头表达

搭接和对接是车身装配体中最常用的两种连接方式。连接方式或接头的不同，装配中产生的累积误差对关键装配体尺寸精度的敏感度也不相同^[3]。接头方向是接头非常重要的属性，一般定义接头接触面的法向作为接头方向。如车身坐标和零件局部坐标一致，则可认为零件的接头方向不外乎 $(\pm x, \pm y, \pm z)$ 。对接接头(图 2a)在接头方向上表现为刚体特征，而滑动方向上一般通过邻接几何特征或工艺(N-2-1 定位)保证定位准确；搭接接头由于允许在接头方向上滑动而表现出自适应性——可以吸收上游误差而减轻对误差传播的影响(图 2b)。

为便于计算机实现，装配体接头采用加权无向图表达， $J = \{ P, E, W \}$ ，式中权 W 表示各连接接头形式和连接方向，写成组合方式为 pq ，其中接头形

式 $p \in \{(b,s) | b = \text{butt-joint}, s = \text{slip-joint}\}$ ，接头方向 $q \in \{\pm x, \pm y, \pm z\}$ ，如图 3 所示。这种表示方式使得可以把连接关系看成一种尺寸关系，从而可以方便尺寸链的查找。

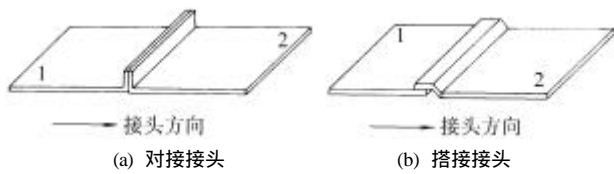


图 2 零件的接头形式
1、2. 零件号

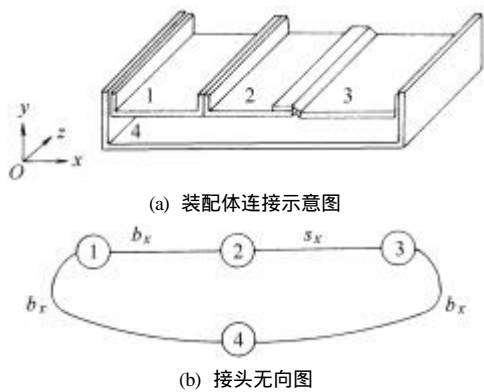


图 3 零件接头表达
1~4. 零件号

1.2.2 接触链生成

与轴类零件的加工面形成类似，车身总成通过零件之间接触面的焊接加工在时间上按一定的顺序生成，其接触面形成过程可以看成链，称为接触链。接触链既反映了零件之间的连接关系(通过接头)，同时也反映了装配的层次(时间)关系，因此接触链的属性包括接头形式、接头方向以及加工顺序，这些属性和为了满足公差分析的尺寸链的性质要求基本一致。这里“接触”是指在接头意义上的，和“连接”不尽相同，“连接”关系表示两个零件之间的所有物理接触。另外，为了便于分析，假设接头的接触关系一次完成。

可以看出，接触链随着装配顺序的不同而不同，并且可以根据装配顺序信息直接生成。以图 1 所示的装配体为例，设有装配顺序如下： $\{\{(6)4)5\}, \{(7)8)10\}, \{(2)3)9\}, 1\}$ ，通过装配层次信息的识别和提取，并结合设计者对各连接形式的确定，可以得到该顺序的接触链，如表 1 所示。

2 尺寸链的生成

在方案设计阶段，一般用关键尺寸表示装配体的尺寸功能要求，零件接头形式、装配顺序都应该

保证该功能要求的实现，因此关键尺寸的精度(误差水平)成为评价不同结构方案的关键指标。对尺寸链而言，装配体关键尺寸作为封闭环成为确定尺寸链的前提约束条件。需要说明的是，由于车身零件可能具有多个接头方向，因此在确定关键尺寸的同时，指明其方向性。组成环则由那些和封闭环零件相关联的零件所组成。由于零件关联的复杂性，有可能存在多种组合，从图的角度看，即存在多条满足以封闭环为起始点的路径，其中一些路径实际装配中并不存在，必须加以甄别以获取可行的组成环连接路径。在此基础上，结合装配接触链模型，进行尺寸链的确定。

表 1 接触链形成

层(L)	接头 J(L)
0	空
1	 (= ? 1) (= ? 2) (= ? 3)
2	 (= ? 4)
3	
接头链	$J_c(S_1) = \{J(1), J(2), J(3)\}$

2.1 尺寸链的生成算法

尺寸链可按下列步骤生成。

(1) 准备装配体的无向连接图 $G' = \{P, E\}$ (由有向图 $G = \{P, E\}$ 剔除虚联接而成)。

(2) 定义封闭环：根据关键尺寸(由设计要求给定)确定相关 2 个顶点 s, t (即表示封闭环的两个尺寸分界线)。

(3) 装配连接图中，采用全路径算法(见第 2.2 节)搜索以 s 为起点、 t 为终点的可能路径 $Path_i$ ，路径所包含的边即为尺寸链的组成环，记录搜索过程产生的割集 $CutSet_i$ 。

(4) 用如下判别准则对可能路径 $Path_i$ 进行可行性判别。

判别准则：在割集 $CutSet_i$ 中，如存在任何一条边(装配联接)优先于当前路径的某一条边(装配联接)，则当前路径判定为不可行，否则可行。

(5) 根据接头属性，对 $Path_i$ 中的各条边进行接头形式、方向属性确定。

(6) 依据各装配顺序的接触链，生成相应的尺寸链。

2.2 全路径搜索算法

对给定连接图 $G = \{P, E\}$ ，边权重 $d: E \rightarrow R^+$ ，

Dijkstra算法^[9]旨在找出一条从属于 P 的顶点 s 到顶点 t 的最短路。下面给出的算法参考了Dijkstra搜索算法，以解决本研究所需的寻找所有路径的问题。

全路径问题可以表达为：给定一个无向连接图 $G=(P, E)$ ，边的权重 $d: E \rightarrow R^+$ (这里 $d=1$)，以及2个属于 P 的固定顶点 s 和 t ，找出连接 s 和 t 的所有路径。

算法步骤如下。

(1) 设 $i=0, S_0=\{u_0=s\}, L(u_0)=0$ ，并使 $L(v)=\infty$ ，对 $v \in P \setminus S_0$ 。如 $|P|=1$ 则停止，否则跳到步骤(2)。

(2) 对每一个顶点 v (属于 $P \setminus S_i$)， $L(v)=\min\{L(v), L(u_i)+d_{vi}^u\}$ 。如 $L(v)$ 被替换，对顶点 v 设置标签 $(L(v), u_i)$ 。

(3) 找到顶点 v ，使最小化 $\{L(v) : v \in P \setminus S_i\}$ ，设为 u_{i+1} 。

(4) 使 $S_{i+1}=S_i \cup \{u_{i+1}\}$ 。

(5) 用 $i+1$ 代替 i ，如 $i=|P|-1$ ，则停止，否则跳到步骤(2)。

上述5步组成了Dijkstra算法的核心内容，从中可以得到最短路径。下面的步骤则找出其他可能路径。

(6) 记录最短路径中所有顶点不包括 s 和 t 的弧(边)，记为 $E(n_0, m)$ ， n_0 为记录数， $m=1, 2, \dots$ 。

(7) 取 $n=0$ 到 n_0 ，步长为1，在 $E(n_0, m)$ 中求割，从图 G 中生成图 $G'=(P, E)$ ；如 $G'=F$ ，则停止。

(8) 用图 G' 代替 G ，跳到步1，找出图 G' 的最短路；如果搜索完毕则跳到步骤(7)。

2.3 算法举例

以图1所示后地板为例，说明上述尺寸链生成方法。首先得到该装配体的可行顺序集和零件的接头信息，建立和每一条顺序相应的接触链。此例关键尺寸设为后地板左右避振器支架中心孔横向尺寸，其相关的零件为9、10。按给定算法，可得到4条可能路径；根据判别准则进行可行性判别，最后确定可行路径为 $Path_1=9, 3, 2, 6, 7, 8, 10$ (表2)。尺寸链组成环用零件对表示。

表2 后地板尺寸链生成路径

有关关联图	$G=(P, E)$ (图1)
关键尺寸	左右避振器支架中心孔间横向(y 向)尺寸($s=9, t=10$)
可能路径	$Path_1=9, 3, 2, 6, 7, 8, 10$
	$Path_2=9, 3, 1, 6, 7, 8, 10$
	$Path_3=9, 3, 1, 8, 10$
	$Path_4=9, 3, 2, 6, 1, 8, 10$
路径割集	$CutSet_1=\{(3,1), (1,6), (1,8), (6,4), (6,5)\}$
	$CutSet_2=\{(3,2), (2,6), (1,8), (6,4), (6,5)\}$
	$CutSet_3=\{(3,2), (2,6), (1,6), (6,7), (7,8), (6,4), (6,5)\}$
	$CutSet_4=\{(3,1), (6,7), (7,8), (6,4), (6,5)\}$
可行路径	$Path_1=9, 3, 2, 6, 7, 8, 10$

生成的可行路径需要进一步和接触链模型结合，以确定尺寸链各组成环的时间属性(即先后关系)和接头属性。后地板实例相应各装配顺序的尺寸链见表3所示。

表3 装配体装配顺序及其尺寸链(组成环)

装配顺序	接触链	尺寸链(组成环)
1	$J_C(1)$	$\{(2,3)(3,9), \{(7,8)(8,10)\}, \{(2,6)(7,6)\}$
2	$J_C(2)$	$\{(6,5)(4), \{(7,8)(10)\}, \{(2,3)(9)\}, \{(2,6)(7,6)\}$
3	$J_C(3)$	$\{(6,4)(5), \{(7,8)(10)\}, \{(2,3)(9)\}, \{(2,6)(7,6)\}$
4	$J_C(4)$	$\{(6,5)(4), \{(2,3)(9), \{(7,8)(10)\}, \{(2,6)(7,6)\}$

3 公差分析算例

为了验证上述尺寸链方法，仍采用图1中所示分总成进行公差分析计算。为简化计算过程，假设：

不考虑零件定位基准偏差。认为点焊焊接过程只影响接头的公差分布，尽管焊接过程也可能引入误差，关于焊接方式的影响较详细的分析参见参考文献[4]。因此分总成尺寸精度将取决于装配顺序、接头形式以及接头公差。计算流程如图4所示。从图4中可以看出，装配体尺寸精度的评价是一个多变量优化问题。限于篇幅，对接头形式设计、公差设计以及多目标优化问题在此不作进一步展开(将另文介绍)。为了说明所提出的方法，直接给出一组接头设计方案、多组公差候选设计方案(表4)。根据生成的尺寸链，考虑不同的接头形式、不同的接头层次属性，分步计算偏差的传递和累积，最终得出关键尺寸的尺寸误差。表5给出了采用Monte-Carlo方法进行公差分析计算的结果。计算结果表明，在该接头设计方案下，选择装配顺序3或4以及公差设计方案3将使得关键尺寸偏差较小。

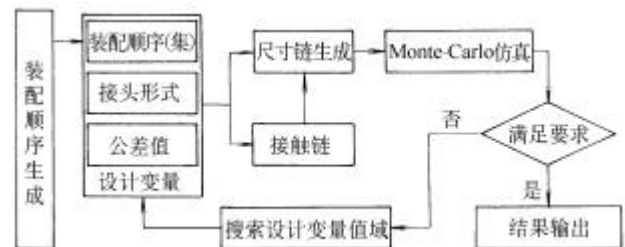


图4 公差分析计算流程简图

4 结论

在柔性装配体结构方案尺寸质量评价中，装配函数的实现是普遍关心的问题之一。研究了反映装配函数实质的尺寸链的生成算法，提出装配接触链

模型表达柔性尺寸链生成所需的层次关系和接头属

表 4 尺寸链接头、公差设计方案

尺寸链组成	接头方案	公差方案 1	公差方案 2	公差方案 3	公差方案 4	公差方案 5
9←→3	Butt joint	1.0	1.5	0.8	1.5	0.8
3←→2	Butt joint	1.0	1.5	0.8	1.5	0.8
2←→6	Slip joint	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
6←→7	Slip joint	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
7←→8	Butt joint	1.0	1.5	0.8	0.8	1.5
8←→10	Butt joint	1.0	1.5	0.8	0.8	1.5

表 5 关键尺寸公差分析结果(关键尺寸:后地板左右避振器支架中心孔横向尺寸;方向:y)

装配顺序	公差方案 1	公差方案 2	公差方案 3	公差方案 4	公差方案 5
顺序 1	2.394	2.844	2.255	2.458	2.671
顺序 2	2.394	2.844	2.255	2.458	2.671
顺序 3	2.390	2.839	2.250	2.450	2.669
顺序 4	2.390	2.839	2.250	2.450	2.669

性,并通过图论方法实现了尺寸链的生成,实例计算说明尺寸链的生成为进一步进行结构优化设计提供了分析手段。

在本研究中,对零件关键尺寸误差的影响只考虑零件接头形式、连接方式和装配顺序因素,假设装配是一个理想的过程。实际上在车身装配中夹具误差的影响也是非常大的,这个因素对装配尺寸链的构成的影响需要进一步考虑,如果参照刚性尺寸链的零尺寸环方法,似乎可以对尺寸链的构成进行一些修正和补充,这也正是下一步进行研究的一个方面。

参 考 文 献

- Ceglarek D, Shi J. Dimension Variation reduction for automotive body assembly. *Manufacture Review*, 1995, 8(2): 233 ~ 249
- Hu S J. Stream of variation theory for automotive body assembly. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(1): 1 ~ 6
- Liu S C, Lee H W, Hu S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using mechanic models. *Transactions of NAMRI/SAE*, 1995, 23(5): 235 ~ 240
- Hu M, Lin Z Q, Lai X M, et al. Simulation and analysis of assembly processes considering compliant, non-ideal parts and tooling variations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41: 2 233 ~ 2 243
- Zhang B. Design for the Dimensional Integrity of Automobile Body Assembles: [PhD Dissertation]. Ann Arbor Michigan, U.S.: University of Michigan, 2000
- Zhang Y Z, Ni J, Lin Z Q, et al. Automated sequencing and sub-assembly detection in automobile body assembly planning. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, 129: 490 ~ 494
- 周江奇, 陈冠龙, 赖新民, 林钟琴. 装配尺寸链和工艺尺寸链的计算. 李纯莆译. 上海:上海科学

技术文献出版社, 1986

- Xue J B, Ji P. Identifying tolerance chains with a surface-chain model in tolerance charting. *Journal of Material Processing*, 2002, 123: 93 ~ 99
- Minieka E. 网络和图的最优化算法. 李家滢, 赵关旗译. 北京:中国铁道出版社, 1984

GENERATION METHOD OF AUTO- MOBILE BODY ASSEMBLY DIMENSION CHAIN

Zhou Jiangqi Chen Guanlong

Lai Xinmin Lin Zhongqin

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: The assembly function constructed in variation analysis plays an important role during evaluation of dimensional quality of an assembly. The process of generating dimension chain does reflect the kernel of assembly function. A procedure to generate dimension chain utilizing a graph search algorithm is presented. An assembly joint chain model is built up combining the assembly process information such as joint types, assembly sequences and design constraints (e.g. key dimensions), and help dimension chain generation. The method can help designers efficiently evaluate design solutions of body structure.

Key words: Variation analysis Dimension chain

Graph theory Automobile body

作者简介:周江奇,男,1970年出生,博士研究生。主要研究方向为汽车产品数字化设计,车身制造质量控制等。

E-mail: zhoujiangqi@sjtu.edu.cn

