

面向零件利用率的选配技术与应用

陈馨雯,王本涛,官峰

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司,江苏 常州 213011)

摘要:为满足装配过程对组件尺寸链的配合要求,根据配合尺寸链进行选配空间计算来预估计算规模。在满足配合要求的前提下,以零件利用率最高为目标建立选配目标函数,采用优化算法对目标函数求取最优解,得到选配结果。产品装配应用实例表明:该选配技术能在较短时间内完成批量选配结果的输出,匹配率高,经济性好,具有工程可行性。

关键词:选配;尺寸链;零件利用率;优化算法

中图分类号:TP202⁺.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0070-04

Selective Assemble Technology and Application for Part Utilization

CHEN Xinwen, WANG Bentao, GONG Feng

(CRRR Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract: To meet the matching requirements for component dimension chain in assembly process, the matching space is calculated to estimate the calculation scale according to the matching dimension chain. On the premise of meeting the matching requirements, the matching objective function is established with the aim at the highest utilization rate of parts. Optimization algorithm is applied for the optimal solution of the objective function, thus the result of the selective assembly obtained. The application of the actual product shows that the selective assembly technology can complete the output of batch assembly results in a short time with high matching rate, good economy and engineering feasibility.

Keywords: selective assembly; dimension chain; part utilization; optimization algorithm

0 引言

装配作为机械产品生产过程中的关键工序,是决定产品质量的重要环节^[1]。为了使装配在批量大小、质量控制、产品更新等方面最大限度适应不断变化的市场需求,选配技术得到应用与发展^[2-4]。选配适用于批量生产、经济性好,是现代工业装配环节的重要技术。

国外从 20 世纪 80 年代中期开始,就进行了选配技术的研究,有了较多的成果应用。而我国在选配研究方面起步较晚,但也取得了一定的进展。合肥工业大学刘明周等^[5]利用二分图建立机械产品选配问题的非形式化描述,构建以匹配率最大为目标的选配数学模型,利用遗传算法对机械产品选配问题进行求解。扈静等^[6]运用基于离差最大化和 CWGA 算子相结合的不确定多属性群决策方法对初选后的零部件组合进行优化。浙江大学周鑫^[7]针对大批量产品提出了基于多目标进化算法的分组选配,针对小批量高精度产品提出了面向多选配参数零件精确选配方法。湖南大学宿彪^[8]构建了基于多元质量损失函数和尺寸链约束的数学模型,形成了装配成功率和再制造资源利用率为目标的综合选配模型。融入优化算法的选配,可以实现产品零部件资源的充分利用,同时也对满足最佳装配效果和产品高质量要求的装配过程进行了优化。

实际装配过程经常存在一些问题:组件的零件数量较

多,配合关系较为复杂,传统的人工选配方式难以同时保证配合精度和装配效率;装配过程存在较多零件剩余,造成零件浪费,需要保证每装配批次的剩余零件数量最少,且剩余零件可以进入下一批次继续进行装配;客户对不同产品的尺寸需求不同,装配方案需要满足个性化快速响应。所以,本文引入了一种面向零件利用率的组件选配方法,结合优化算法对待装配尺寸进行合理、快速地选择,在保证配合尺寸要求的同时最大化利用待装配零件,提高装配效率。

1 组件选配建模

1.1 选配尺寸链

假设组件 P 由 x 种零件 $Q^1, Q^2, Q^3, \dots, Q^x$ 装配组成。零件 Q^1 与零件 Q^2 存在配合关系,零件 Q^1 与零件 Q^2 配合的尺寸分别为 q^1 和 q^{2I} ,配合尺寸要求为 $q^1 - q^{2I} \in [\varepsilon_1^-, \varepsilon_1^+]$;零件 Q^2 又与零件 Q^3 存在配合关系,零件 Q^2 与零件 Q^3 配合的尺寸分别为 q^{2II} 和 q^{3I} ,配合尺寸要求为 $q^{2II} - q^{3I} \in [\varepsilon_2^-, \varepsilon_2^+], \dots$ 。以此类推,零件 Q^{x-1} 与零件 Q^x 配合的尺寸分别为 $q^{(x-1)II}$ 和 q^x ,配合尺寸要求为 $q^{(x-1)II} - q^x \in [\varepsilon_{x-1}^-, \varepsilon_{x-1}^+]$ 。假设在一个装配批次中,零件 Q^1 有 n_1 个,第 i_1 个零件 Q^1 上的尺寸为 $q_{i_1}^1$;零件 Q^2 有 n_2 个,第 i_2

第一作者简介:陈馨雯(1993—),女,江苏常州人,工程师,硕士,研究方向为机械传动系统设计。

个零件 Q^2 上的尺寸为 $q_{i_2}^{2I}$ 和 $q_{i_2}^{2II}$, ...。以此类推,零件 Q^j 有 n_j 个,第 i_j 个零件 Q^j 上的尺寸为 $q_{i_j}^j$ 和 $q_{i_j}^{jII}$ 。装配关系如图 1 所示。

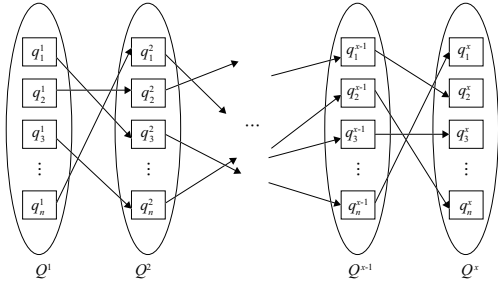


图 1 装配关系

1.2 解空间计算

对于上述选配批次,一个选配批次中有零件 $Q^1, Q^2, Q^3, \dots, Q^x$ 分别为 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_x$ 个,假设 $n_k = \min \{n_1, n_2, \dots, n_x\}$,零件全部随机装配完成为一个选配方案,形成选配解空间的一个解,所有可能的选配方案为这批零件的选配解空间。则解空间大小为

$$\Omega = \frac{n_1! n_2! \dots n_{k-1}! n_{k+1}! \dots n_x!}{(n_1 - n_k)! (n_2 - n_k)! \dots (n_x - n_k)!} \quad (1)$$

根据解空间大小预估了计算所需的算力,选择合适的计算工具以提高计算效率。

2 面向零件利用率的选配求解

2.1 选配目标函数

在 1.1 节所述的选配批次中,选配目标是从这 n_1 个 Q^1, n_2 个 Q^2, \dots, n_x 个 Q^x 中快速匹配出符合配合尺寸要求的最多对 (w 对, $w \leq n_k$) 零件,使得剩余零件最少,零件利用率最高。实测出 n_1 个零件 Q^1 上的尺寸值分别为 $q_1^1, q_2^1, \dots, q_{n_1}^1$, n_2 个零件 Q^2 上的尺寸值分别为 $q_1^2, q_2^2, \dots, q_{n_2}^2$ 和 $q_1^{2I}, q_2^{2I}, \dots, q_{n_2}^{2I}$, 以此类推, n_j 个零件 Q^j 上的尺寸值分别为 $q_1^j, q_2^j, \dots, q_{n_j}^j$ 和 $q_1^{jI}, q_2^{jI}, \dots, q_{n_j}^{jI}$ 。根据实测尺寸,可以计算出一组系数 g_x :

$$g_{i_1 i_2 \dots i_x} = \begin{cases} 1 & \begin{cases} q_{i_1}^1 - q_{i_2}^{2I} \in [\varepsilon_1^-, \varepsilon_1^+] \cap \\ q_{i_2}^{2II} - q_{i_3}^{3I} \in [\varepsilon_2^-, \varepsilon_2^+] \cap \dots \cap \\ q_{i_{x-1}}^{(x-1)I} - q_{i_x}^x \in [\varepsilon_{x-1}^-, \varepsilon_{x-1}^+] \end{cases} \\ 0 & \begin{cases} q_{i_1}^1 - q_{i_2}^{2I} \notin [\varepsilon_1^-, \varepsilon_1^+] \cup \\ q_{i_2}^{2II} - q_{i_3}^{3I} \notin [\varepsilon_2^-, \varepsilon_2^+] \cup \dots \cup \\ q_{i_{x-1}}^{(x-1)I} - q_{i_x}^x \notin [\varepsilon_{x-1}^-, \varepsilon_{x-1}^+] \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_1 = 1, 2, \dots, n_1; i_2 = 1, 2, \dots, n_2; \dots; i_x = 1, 2, \dots, n_x$ 。

建立变量

$$z_{i_1 i_2 \dots i_x} = \begin{cases} 1 & Q_{i_1}^1, Q_{i_2}^2, \dots, Q_{i_x}^x \text{ 选中} \\ 0 & Q_{i_1}^1, Q_{i_2}^2, \dots, Q_{i_x}^x \text{ 没有选中} \end{cases} \quad (3)$$

在一个有效配合方案中,每个零件最多仅可出现一次,即 $\sum_{i_x=1}^{n_x} \dots \sum_{i_3=1}^{n_3} \sum_{i_2=1}^{n_2} z_{i_1 i_2 i_3 \dots i_x} \leq 1$ 且 $\sum_{i_x=1}^{n_x} \dots \sum_{i_3=1}^{n_3} \sum_{i_1=1}^{n_1} z_{i_1 i_2 i_3 \dots i_x} \leq 1, \dots$, 且 $\sum_{i_x=1}^{n_x} \dots \sum_{i_{j+1}=1}^{n_{j+1}} \sum_{i_{j-1}=1}^{n_{j-1}} \dots \sum_{i_2=1}^{n_2} \sum_{i_1=1}^{n_1} z_{i_1 i_2 i_3 \dots i_x} \leq 1, \dots$, 且 $\sum_{i_{x-1}=1}^{n_{x-1}} \dots \sum_{i_2=1}^{n_2} \sum_{i_1=1}^{n_1} z_{i_1 i_2 i_3 \dots i_x} \leq 1$ 。

式中: $i_1 = 1, 2, \dots, n_1; i_2 = 1, 2, \dots, n_2; \dots; i_x = 1, 2, \dots, n_x$ 。

则选配目标函数为

$$\max f(x) = \sum_{i_x=1}^{n_x} \dots \sum_{i_2=1}^{n_2} \sum_{i_1=1}^{n_1} g_{i_1 i_2 \dots i_x} z_{i_1 i_2 \dots i_x} = w \quad (4)$$

2.2 优化求解

求解 2.1 节目标函数即可获得最大配合成功对数,实现目标的一组 $z_{i_1 i_2 \dots i_x}$ 解就确定了一组最大配对(也可能有多种最大配对组合解),即为选配优化结果。

此类问题属于 NP 问题的一种。当变量数较少时,一般采用穷举法,即检查变量 0 或 1 的每一种组合,比较目标函数值求得最优解。当变量数较多时,采用穷举法求解会需要较大的计算空间和时间,可以通过加入一定的限制和策略,更快获得最优解。工程上常采用分支定界法、割平面法、隐枚举法、匈牙利算法等来解决此类问题。本文采用以下步骤来求解此问题。

1) 预处理缩减问题的规模:通过预处理步骤消除冗余变量和约束,改善计算空间尺度和约束矩阵的稀疏性,加强变量的边界,加速问题的求解。

2) 求解松弛问题:将初始问题转化为松弛问题,因目标函数和剩余的约束条件不变,若 Z 为初始整数规划的解, Z_{LP} 为松弛问题的解,则 $g_{i_1 i_2 \dots i_x} Z_{LP} \leq g_{i_1 i_2 \dots i_x} Z$ 。若 Z 恰好是整数,则 $Z = Z_{LP}$ 。

3) 收紧松弛:求松弛问题的最优解,如果获得整数最优解,即为所求问题的解,停止计算;如果得到的最优解不是整数,则在此非整数解的基础上增加新的线性不等式约束条件重新求解,即切割限制松弛问题的可行域,割去部分非整数解(包括已得到的非整数最优解)。

4) 搜索求得最优解:将解松弛问题得到的非整数解分割成为最接近的两个整数,分列条件加入到原问题上,形成两个子问题分别再进行求解,从而得到目标函数的上限和下限值;每次分支后,凡是超出可行域界限的子集将不再分支,从而缩小搜索范围。

将上述问题求解过程编译为程序语句,利用算法函数,进行迭代搜索,即可得到选配问题的最优解。

3 应用

工程实际中,一个产品包含的零部件众多,装配关系复杂,装配精度会直接影响整机传动精度,传统的人工选配方式难以同时保证配合精度和装配效率,且会造成较多零件剩余。某产品 P 中有 3 种零件 A、B、C 需要进行选配,对 A、B、C 装配尺寸链开展选配,在保证配合尺寸要求和精度的同时最大化利用待装配零件。

3.1 选配尺寸链

零件 A 上存在内孔(孔直径 L_1)与轴零件 B(轴直径 L_2)间隙配合,配合间隙要求为 $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$;零件 B 上存在内孔(孔直径 L_3)与轴零件 C(轴直径 L_4)间隙配合,配合间隙要求为 $[\varepsilon_3, \varepsilon_4]$,则

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &\leq L_1 - L_2 \leq \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 &\leq L_3 - L_4 \leq \varepsilon_4 \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 选配解空间

一个选配批次中零件 A 有 m 个,零件 B 有 n 个,零件 C 有 l 个,假设 $m \geq n \geq l$,零件全部随机装配完成形成一个选配方案,为这批零件选配解空间的一个解,所有可能的方案定义为这批产品 P 的选配解空间,则选配解空间大小为

$$\Omega = \frac{m! n! l!}{(m-l)! (n-l)!} \quad (6)$$

3.3 优化求解

假设在一个选配批次中,零件 A 有 m 个,内孔直径分别为 a_1, a_2, \dots, a_m ;零件 B 有 n 个,测得的其轴直径分别为 b_1, b_2, \dots, b_n ,测得的其孔直径分别为 d_1, d_2, \dots, d_n ;零件 C 有 l 个,轴直径分别为 c_1, c_2, \dots, c_l 。选配目标是从这 m 个零件 A、 n 个零件 B 和 l 个零件 C 中快速匹配出符合轴承游隙要求的最多对(w 对)零件。

根据已有的零件 A、零件 B 和零件 C 实测尺寸,可以计算出一组系数 g_{ijk} :

$$g_{ijk} = \begin{cases} 1 & a_i - b_j \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2] \cap d_j - c_k \in [\varepsilon_3, \varepsilon_4] \\ 0 & a_i - b_j \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2] \cup d_j - c_k \in [\varepsilon_3, \varepsilon_4] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, l$ 。

建立变量

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & A_i, B_j \text{ 和 } C_k \text{ 选中} \\ 0 & A_i, B_j \text{ 和 } C_k \text{ 没有选中} \end{cases} \quad (8)$$

在一个有效配对方案中,每个零件最多仅可出现一次,即 $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l x_{ijk} \leq 1$,且 $\sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m x_{ijk} \leq 1$,且 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq 1$,

$i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, l$ 。

则选配目标函数

$$\max f(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l g_{ijk} x_{ijk} = w \quad (9)$$

即实现目标的一组 x_{ijk} 解就确定了一组最大配对(也可能有多种最大配对组合解)。

3.4 组件选配软件开发

对上述选配优化过程进行程序编译,并进行程序封装和交互设计,形成组件选配软件,如图 2 所示。界面分为用户自定义区域、输入文件显示区域、输出文件显示区域和计算进程显示区域。在用户自定义区域,用户进行参数定义:配合尺寸上、下限要求;通过“载入”按钮,可载入存有被选配零件信息的表格文件,并显示在输入文件显示区域;通过“启动”按钮,软件开始选配优化计算;结束后在输出文件显示区域显示选配结果,并输出结果表格文件。输出文件与载入文件存储在同一文件夹下,可自定义输出文件名。

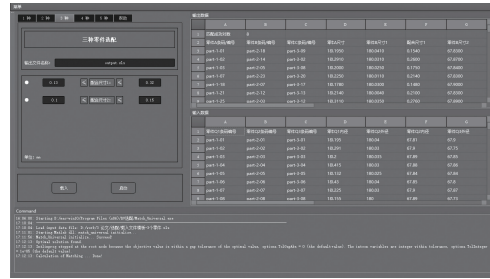


图 2 组件选配软件

定义零件 A 和零件 B 的配合尺寸要求为 $[0.13, 0.32]$,单位为 mm;零件 B 和零件 C 的配合尺寸要求为 $[0.1, 0.15]$,单位为 mm。表 1 所示为输入的待选配零件信息,表 2 所示为输出的选配结果。可以看到一共有 8 对零件 A、B、C 完成配对,满足配合尺寸要求。经过软件测试当待选配零件个数 < 100 时,软件都可在 1 min 内快速生成选配结果;若一批次的待装配零件较多,可以分批进行选配,从而提高选配效率。

表 1 待选配零件信息

零件 A 条码/ 编号	零件 B 条码/ 编号	零件 C 条码/ 编号	零件 A 孔直径/mm	零件 B 轴直径/mm	零件 B 孔直径/mm	零件 C 轴直径/mm
part-1-01	part-2-01	part-3-01	180.20	180.04	67.81	67.90
part-1-02	part-2-02	part-3-02	180.29	180.03	67.90	67.75
part-1-03	part-2-03	part-3-03	180.20	180.04	67.89	67.85
part-1-04	part-2-04	part-3-04	180.42	180.03	67.88	67.86
part-1-05	part-2-05	part-3-05	180.13	180.03	67.84	67.84
part-1-06	part-2-06	part-3-06	180.43	180.04	67.85	67.80
part-1-07	part-2-07	part-3-07	180.23	180.03	67.90	67.87
part-1-08	part-2-08	part-3-08	180.16	180.00	67.89	67.73
part-1-09	part-2-09	part-3-09	180.05	180.03	67.87	67.70
part-1-10	part-2-10	part-3-10	180.17	180.01	67.89	67.87
part-1-11	part-2-11	part-3-11	180.25	180.02	67.88	67.73
part-1-12	part-2-12	part-3-12	180.24	180.00	67.83	67.77

续表1

零件 A 条码/ 编号	零件 B 条码/ 编号	零件 C 条码/ 编号	零件 A 孔直径/mm	零件 B 轴直径/mm	零件 B 孔直径/mm	零件 C 轴直径/mm
part-1-13	part-2-13	part-3-13	180.48	180.01	67.88	67.71
part-1-14	part-2-14	part-3-14	180.01	180.03	67.87	67.80
part-1-15	part-2-15	part-3-15	180.45	180.04	67.89	67.82
part-1-16	part-2-16	part-3-16	180.23	180.03	67.81	67.83
part-1-17	part-2-17	part-3-17	180.23	180.01	67.85	67.79
part-1-18	part-2-18	part-3-18	180.18	180.04	67.83	67.89
part-1-19	part-2-19	part-3-19	180.35	180.04	67.82	67.81
part-1-20	part-2-20	part-3-20	180.40	180.02	67.88	67.71
part-1-21	part-2-21	—	180.21	180.02	67.87	—
part-1-22	part-2-22	—	180.40	180.05	67.81	—
part-1-23	part-2-23	—	180.25	180.01	67.83	—
part-1-24	part-2-24	—	180.31	180.02	67.84	—
part-1-25	part-2-25	—	180.31	180.03	67.88	—
part-1-26	—	—	180.28	—	—	—
part-1-27	—	—	180.29	—	—	—
part-1-28	—	—	180.35	—	—	—
part-1-29	—	—	180.16	—	—	—

表 2 选配结果

零件 A 与零件 B					零件 B 与零件 C				
零件 A 条码/编号	零件 B 条码/编号	零件 A 孔直径	零件 B 轴直径	配合 尺寸 1	零件 B 条码/编号	零件 C 条码/编号	零件 B 孔直径	零件 C 轴直径	配合 尺寸 1
part-1-01	part-2-18	180.20	180.04	0.15	part-2-18	part-3-09	67.83	67.70	0.13
part-1-02	part-2-14	180.29	180.03	0.26	part-2-14	part-3-02	67.87	67.75	0.12
part-1-03	part-2-05	180.20	180.03	0.18	part-2-05	part-3-08	67.84	67.73	0.11
part-1-07	part-2-23	180.23	180.01	0.21	part-2-23	part-3-20	67.83	67.71	0.12
part-1-18	part-2-07	180.18	180.03	0.15	part-2-07	part-3-17	67.90	67.79	0.11
part-1-21	part-2-12	180.21	180.00	0.21	part-2-12	part-3-13	67.83	67.71	0.12
part-1-25	part-2-03	180.31	180.04	0.28	part-2-03	part-3-12	67.89	67.77	0.12
part-1-26	part-2-17	180.28	180.01	0.26	part-2-17	part-3-11	67.85	67.73	0.12

4 结语

本文介绍了一种面向零件利用率的选配技术,根据选配尺寸链建立选配目标函数,利用优化算法求解选配目标函数,即可在保证配合精度的前提下最大化利用待选配零件,使得剩余零件最少,该选配技术匹配效率高、经济性好。

通过工程实际产品中 3 种零件装配的实例,应用该组件选配技术开发了专用选配软件对 3 种零件进行批量选配,软件可根据配合尺寸要求快速输出批量选配结果,证明了该方法具有较好的工程应用性。

参考文献:

- [1] 徐辉,王志国. 基于曲面配准的柔性件装配偏差分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):19-21,39.
[2] 杜海雷,孙惠斌,黄健,等. 面向装配精度的航空发动机转子零件

选配优化[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(5):1292-1299.

- [3] 石双江,陈文亮,王子昱. 面向干涉量控制的铆钉智能选配技术研究[J]. 航空制造技术,2021,64(10):74-79,85.
[4] 王鹏飞,胡小锋. 基于蚁群算法的汽缸螺纹连接质量选配优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(7):1-4.
[5] 刘明周,陈诚和,葛茂根,等. 机械产品选配问题的二分图非形式化描述[J]. 农业机械学报,2007,38(11):133-136,128.
[6] 扈静,刘明周,葛茂根,等. 面向客户定制需求的机械产品选配方法[J]. 农业机械学报,2008,39(10):152-157,163.
[7] 周鑫. 产品多目标多类型选配技术及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
[8] 宿彪. 工程机械再制造优化选配方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

收稿日期:2022-01-05