

文章编号: 1000-8055(2005)03-0518-05

遗传算法对压气机叶片排序的应用

唐绍军¹, 王旭¹, 朱斌²

(1 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038;

2 中国国防科技信息中心, 北京 100036)

摘要: 采用遗传算法研究压气机叶片装配中的排序优化问题。详细给出了遗传算法的计算步骤、计算过程中叶片序列可行解的编码、交叉算子、变异算子的选择方法, 建立了对叶片排序问题的适应度函数及其优化的评估方法。具体算例表明所建立的方法对压气机叶片排序问题有较高的效率和满意的准确度。

关键词: 航空、航天推进系统; 遗传算法; 压气机叶片; 排序; 最优化

中图分类号: V 232.4

文献标识码: A

Research on Genetic Algorithm Applied to Sequencing of Compressor Vanes

TANG Shao-jun¹, WANG Xu¹, ZHU Bin²

(1 The Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2 China National Defence Scientific Technology Information Center,
Beijing 100036, China)

Abstract: Genetic algorithm was applied to optimize sequencing of compressor vanes. This paper gives the detail calculation procedures, the selection methods of coding feasible solutions of the compressors vane sequencing, chiasm operator and variation operator in the computation. The adaptation functions were established and the evaluation methods to optimize them were also given. The idiographic computing examples indicate that the genetic algorithm has preferable efficiency and satisfactory accuracy.

Key words: aerospace propulsion system; genetic algorithm; compressors vanes; sequencing; optimize

叶片是发动机及压缩机上的重要部件, 由于工艺技术要求, 所有叶片都是经手工打磨加工的。因而各叶片之间难免有质量和振荡频率的差别, 安装时需对各叶片进行排序, 以满足静力学的配平要求。但无论是对发动机还是对压缩机, 所用叶片数量之大以及各叶片之间相差甚微, 其排序过程是很难通过手工完成的。而排序不当, 将会对发动机及压缩机的安全造成很大的隐患。

遗传算法是近年来发展起来的一种大型组合优化算法。典型的工程设计问题如集覆盖、装箱、背包、二次分配、确定最小生成树、机器调度排序与平衡、制造元设计、车辆路径、网络密度、设备定位与布局及旅行推销员分配等最具挑战性的组合爆炸问题都可通过遗传算法予以解决^[1]。可以预见未来的几年里, 遗传算法在许多工程领域的实际应用中将会表现出愈来愈强的生命力。

收稿日期: 2004-05-12; 修订日期: 2004-08-23

联系人: 王旭

作者简介: 唐绍军(1981-), 男, 湖南衡阳人, 空军工程大学工程院士硕士生, 主要从事飞行器设计的研究

本文给出一种基于遗传算法对给定的一组叶片按设计要求进行排序的计算方法。

1 问题的提出

设压气机 n (比如 24)片叶片均匀地分布在一圆盘边上, 将圆盘边分为 m (比如 6)个象限, 每个象限叶片的总质量与相邻象限叶片的总质量之差应尽量地小, 假设不允许超过 p (单位: g)值。两相邻叶片间的振荡频率差应尽量地大, 假设不允许小于 q (单位: Hz)值。

这是一个典型的组合优化问题。但如采用最原始的枚举法进行试探性地一一排序, 其计算量的量级为 n^n 。如以后面提到的数据为基础, $n=24$, 则计算量级为 24^{24} 次循环, 考虑到数据及问题自身的特点, 简化了的循环次数为 $23^{12}=2.19\times 10^{16}$, 如果计算机 1 ms 能运算 1 000 次, 则完成简化后的循环也需要 694. 908 a。对于成批压缩机叶片的排序, 采用此方法显然是不实际的。

2 遗传算法

近年来, 一种新的优化算法——遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 正在迅速发展^[2]。GA 以其高效、实用的特点在各个领域被用于解决许多工程实际问题, 并已取得了良好效果。在解决各类非线性问题时该算法所表现出的鲁棒性、全局最优性、可并行处理性及高效率越来越受到学术界的重视。对于大多数复杂的实际问题, 用 GA 求解经常能得到令人满意的结果^[3]。

应用遗传算法解决某一问题通常有以下 5 个步骤^[4, 5]:

- (1) 将问题的解表示为长度为 1 的二进制(也可以是其它进制)编码;
- (2) 找到生成初始化群体的方法(通常是随机产生);
- (3) 选择合适的遗传算子(这是问题得到较好解决的关键所在);
- (4) 定义适应度函数;
- (5) 确定各个参数(种群规模、变异概率、交叉概率)的值。

3 遗传算法在压气机叶片排序中的应用

3.1 最好排序问题

确定压气机叶片最好排序问题的准则是满足

质量要求和频率要求, 并使质量差尽量小, 频率差尽量大。

将轮毂的 24 个位置分为 6 个象限, 每个象限 4 片叶片。排序要求每相邻象限的叶片质量和之差 不大于 8 g, 每相邻叶片的频率差不小于 6 Hz。满足此要求才是可行解。在此基础上, 使象限间质量差的方差越小, 叶片间频率差的方差越大, 对应的解则越优。

3.2 压气机叶片序列的编码表示

压气机叶片排序问题是一个典型的商旅 (TSP) 问题。求解 TSP 问题常用的表示方案有: 近邻表示、序表示、路径表示、边表示等等。近邻表示方案进行模式分析是比较方便, 但性能较差; 序表示法使后代与父代个体的差异极大, 模式没有明确的意义; 路径表示法是最自然的表示方案, 能基本满足要求, 但交叉算子较为复杂, 性能一般。对于压气机叶片排序, 我们关心的是相邻叶片间的频率差和相邻象限间的质量差, 与叶片的具体位置无关。边表示法在这方面能很好的体现其优势, 故选择边表示法。

下面以 9 片叶片为例说明边表示法的编码表示:

设 9 片叶片的序列号为: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 用边表示法可表示为:

$$p = [(1, 2) (2, 3) (3, 4) (4, 5) (5, 6) (6, 7) (7, 8) (8, 9)]$$
为表示简单, 略去中间重复的顶点, 则表示为:

$$p = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$$

此时, 边表示法的表示结果与序表示法相同, 但意义却不一样。这一点在后面的交叉算子中将体现出来。

3.3 交叉算子的选择

由于编码采用了边表示方案, 故交叉算子采用改进后的边重组交叉算子。边重组交叉算子由 Whitley 等人提出, Starkweather 等人对其进行修改。这种算子的基本思想是让后代从父代中继承尽可能多的边, 它能将父代个体中超过 95% 的边传递到下一代中^[6, 7]。这种算法首先为两个父代个体中的叶片建立一个边列表, 表示与这个叶片相连的其它叶片及其出现次数。假定 2 个个体:

$$p_1 = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$$

$$p_2 = (4, 1, 2, 8, 7, 6, 9, 3, 5)$$

进行交叉, 那么, 可以建立如表 1 所示的边列表。若某条边在父代中出现了 2 次, 则在列表中这条

边的顶点上添加一个负号。

表1 边列表

Table 1 List for the value of multiple borders

叶片	与之相连的叶片	叶片	与之相连的叶片
1	9, - 2, 4	6	5, - 7, 9
2	- 1, 3, 8	7	- 6, - 8
3	2, 4, 9, 5	8	- 7, 9, 2
4	3, - 5, 1	9	8, 1, 6, 3
5	- 4, 6, 3	—	—

边重组交叉算子通过选择一个初始点来开始构造后代。我们可以选第一个父代个体的首位作为后代的初始点, 则后代 o_1 为:

$$o_1 = (1, \#, \#, \#, \#, \#, \#, \#, \#)$$

边重组交叉算子通过在父代个体中选择适当的边填入后代中, 来生成后代个体。从父代中选择边的原则是, 选取与之相连的叶片最少的叶片, 若与某两片叶片相连的叶片数目相等, 则首选带有“-”号的叶片。

例如, 与叶片“1”相连的叶片有“9”, “2”, “4”, 其中与“9”相连的叶片数目多, 所以不选“9”, 而与“2”和“4”相连的叶片数都是3个, 由于叶片“2”上标记了“-”号, 则选择叶片“2”填入后代 o_1 中:

$$o_1 = (1, 2, \#, \#, \#, \#, \#, \#, \#)$$

如此反复进行, 得到:

$$o_1 = (1, 2, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 9)$$

3 4 变异算子的选择

常用的变异算子有:

$$A p(p_i) = \begin{cases} 1 \\ (N_{g1} + N_{g2} + N_{g3} + N_{g4})^{-1} \end{cases}$$

其中, $N_{g1}, N_{g2}, N_{g3}, N_{g4}$ 分别对应4种情况下, 不满足象限质量差要求的象限对数。

$$A p(p_i) = \begin{cases} 1 & N_p = 0 \\ N_p^{-1} & N_p \neq 0 \end{cases}$$

其中: N_p 为频率不达标的边数。

适应度函数:

$$f(p_i) = 10 \times B_g \cdot B_p \times A g(p_i) \cdot A p(p_i)$$

其中为了使适应度值不至于太小, 故扩大了10倍。

4 数据验证

表2 是一组压气机叶片数值。

倒置算子: 这种算子将个体中随机选择的一组子边中各叶片的次序进行倒置。

插入算子: 这种算子随机的选择一片叶片, 并将这片叶片随机地插到个体中的某个位置。

置换算子: 这种算子随机地选择一段, 并将这一段随机地插到个体中。

互易交换: 这种算子随机地交换两片叶片的位置。

由于互易交换算子的算法简单易行, 且不会产生非法个体, 故选用互易交换算子。

3 5 适应度函数

影响一个叶片序列好坏的因素主要有4个: 质量要求、频率要求、质量相差程度和频率相差程度。相应的评估系数有: 质量系数(B_g)、频差系数(B_p)和约束条件质量要求、频率要求。由于6象限划分的方法有4种, 要满足质量要求, 需要在任意划分方法下, 两相邻象限质量差均不超标。

评估系数:

$$B_g = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^6 \Delta G_{ij}^2}}$$

其中: ΔG_{ij} 为第*i*种划分方法中, 按顺时针方向, 第*j*象限与相邻象限的质量差。

$$B_p = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} \Delta P^2}}$$

其中: ΔP 为按顺时针方向, 第*i*片叶片与相邻叶片的频率差。

约束条件罚函数:

$$\begin{aligned} (N_{g1} + N_{g2} + N_{g3} + N_{g4}) &= 0 \\ (N_{g1} + N_{g2} + N_{g3} + N_{g4}) &\neq 0 \end{aligned}$$

表2 一组典型的压气机叶片序号及参数值

Table 2 A group of typical serial numbers of compressors value of parameters

序号	质量/g	频率/Hz	序号	质量/g	频率/Hz	序号	质量/g	频率/Hz
1	696	203	9	658	201	17	695	208
2	698	204	10	658	197	18	696	209
3	694	210	11	660	196	19	666	194
4	695	211	12	663	198	20	660	194
5	695	212	13	697	209	21	665	198
6	694	208	14	694	210	22	663	196
7	660	188	15	693	215	23	663	193
8	660	196	16	696	209	24	660	189

表3 4种象限划分各象限压气机叶片的总质量

Table 3 The general quality of those compressors vans in each of quadrants divided by four methods

类型	象限	包含叶片号	总质量/g	类型	象限	包含叶片号	总质量/g
1	1	22 1 19 15	2 718	3	1	19 15 9 17	2 712
	2	9 17 21 4	2 713		2	21 4 8 14	2 714
	3	8 14 11 16	2 709		3	11 16 7 3	2 709
	4	7 3 12 5	2 712		4	12 5 20 13	2 715
	5	20 13 10 2	2 713		5	10 2 23 18	2 715
	6	23 18 24 6	2 713		6	24 6 22 1	2 713
2	1	1 19 15 9	2 713	4	1	15 9 17 21	2 711
	2	17 21 4 8	2 715		2	4 8 14 11	2 709
	3	14 11 16 7	2 709		3	16 7 3 12	2 712
	4	3 12 5 20	2 712		4	5 20 13 10	2 710
	5	13 10 2 23	2 716		5	2 23 18 24	2 717
	6	18 24 6 22	2 713		6	6 22 1 19	2 719

显然, 按4组为一个象限, 则6个象限的质量分别为2 792 g, 2 707 g, 2 634 g, 2 780 g, 2 717 g和2 655 g, 则1~ 2, 2~ 3, 3~ 4, 4~ 5, 5~ 6, 6~ 1象限之间的质量差分别为85 g, 73 g, 146 g, 63 g, 62 g和137 g。19号与20号叶片之间没有频率差, 可能形成共振。因此, 所给叶片序号不满足设计要求。

采用以上所给出的遗传算法对叶片进行重新排序。设定参数如下:

种群规模: $n = 1\ 000$; 交叉概率: $p_c = 0.8$; 变异概率: $p_m = 0.02$; 最大迭代次数: $\max\text{No.} = 1\ 000$ 。程序总运行时间(CU P主频1.84 GHz): 13 s。

运行结果, 适应度最大的个体:

$p = (22, 1, 19, 15, 9, 17, 21, 4, 8, 14, 11, 16, 7, 3, 12, 5, 20, 13, 10, 2, 23, 18, 24, 6)$

适应度值 $f(p) = 7.368\ 374$ 。

对上述结果进行检验, 可知4种象限划分的质量如下表。

由表3可以看出, 4种象限划分情况下, 各象限的叶片总质量差均小于8 g, 而叶片间的频率差(单位: Hz)分别为: 7, 9, 21, 14, 7, 10, 13, 15, 14, 14, 13, 21, 22, 12, 14, 18, 15, 12, 7, 11, 16, 20, 19, 12。可见, 频率差为最小为7 Hz, 大于要求的6 Hz。因此所得结果满足压气机叶片排序的工艺要求。从记录的结果看, 当算法迭代到600代左右, 最优个体基本收敛不变, 故以上参数中最大迭代次数取1 000足以满足要求。

5 结 论

遗传算法为组合优化问题提供了有力地解决途径,可以在大搜索空域中快速收敛,且避免了局部最优现象的发生。良好的信息积累和空间搜索次数分配机制,使得遗传算法在处理很多优化问题方面具有非常明显的优势。作为一种具体的工程应用,遗传算法对压气机叶片的优化排序提供了一种快速有效的方法,同时也为遗传算法本身的发展注入了实际应用的活力。

参考文献

- [1] 玄光男,程润伟 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004
- [2] 张文修,梁怡 遗传算法的数学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001
- [3] 徐志洪,卢建刚,顾文钟 解全局优化问题的进化策略及其仿真[J]. 机电工程,2000,17(2): 87~ 89

XU Zhi-hong, LU Jiang-gang, GU Wen-zhong Evolutionary Strategy for Constrained Optimization and Its Simulation [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Magazine*, 2000, 17(2): 87~ 89

- [4] 钟求喜,陈火旺 任务分配与调度中遗传算子的设计[J]. 国防科技大学学报,2000,22(3): 34~ 38

ZHONG Qiu-xi, CHEN Huo-wang Genetic Operators in Task Matching and Scheduling [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(3): 34~ 38

- [5] 云庆夏,黄光球,王战权 遗传算法和遗传规划[M]. 北京:北京冶金工业出版社,1997

- [6] 王英勋,陈宗基 基于遗传算法(GA)的具有约束的飞行轨迹规划[J]. 北京航空航天大学学报(控制与仿真专辑),1999,25(3): 355~ 358

WANG Ying-xun, CHEN Zong-ji Genetic Algorithms (GA) Based Flight Path Planning with Constraints [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 25(3): 355~ 358

- [7] 王正志,薄涛 进化算法[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000