

文章编号: 1000-8055(2004) 04-0530-06

应用遗传算法优化设计板翅式换热器

张丽娜, 杨春信, 王安良

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 本文提出了基于遗传算法的板翅式换热器优化设计方法, 该方法不仅能够实现一般的结构优化, 而且能够在提供多种类型翅片的情况下, 进行翅片类型的优选。根据不同的设计要求, 遗传算法能够分别以重量和效率为目标函数进行优化。为了方便翅片类型的优选, 建立了一个常用翅片的数据库, 库中包含了翅片的几何参数、传热特性和阻力特性, 可直接应用于计算机程序的处理。与传统的优化计算结果比较, 换热器的重量和体积都有不同程度的减小。本文的优化软件和翅片数据库具有通用性, 可应用于一般板翅式换热器的优化设计。

关键词: 航空、航天推进系统; 板翅式换热器; 遗传算法; 结构优化; 优选翅片; 翅片库
中图分类号: TK124 文献标识码: A

Optimum Design of Plate-Fin Heat Exchanger with Genetic Algorithm

ZHANG Li-na, YANG Chun-xin, WANG An-liang

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A method of optimum design for a plate-fin heat exchanger based on genetic algorithm (GA) is put forward in this paper. Not only the structure of a heat exchanger can be optimized with this method, but also the optimal type selection of fins can be obtained in the case of many types of fins are given. For different requirements of design, weight or effectiveness of a heat exchanger can be taken as an object function respectively by GA. A database of fins has been set up for selecting the optimal type of fins easily, which includes the geometric parameters, heat transfer factors and friction factors of fins. These parameters can be directly applied to computer programs. Compared with the conventional optimization results, it is showed that the weight and the volume of heat exchanger optimized in this paper are both reduced. The optimizing software and the database of fins are universal and can be used for general optimum design of heat exchangers.

Key words: aerospace propulsion system; plate-fin heat exchanger; Genetic Algorithm; structure optimization; optimal type selection of fins; database of fins

板翅式换热器(以下简称换热器)作为飞机环境控制系统的关键部件, 占据了系统很大的重量和体积。传统的换热器设计方法往往是在经验选

择和多次试算的基础上进行的, 一般只要满足基本换热性能和阻力要求即可。随着对环控系统性能要求的提高, 换热器在满足上述基本性能的同

时,重量和体积也要尽可能缩小。基于这一目的,设计者们尝试了不同的方法对换热器进行优化。文献[1]在这方面取得了较好的效果,但其中的翅片类型是根据设计经验事先选定的,只进行了结构优化,即换热器的外形尺寸、翅片间距和板间距等。

文献[2]最早尝试使用了遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA)进行优化设计。遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法^[3]。它不受搜索空间的限制性假设的约束,也不要求目标函数的连续、可微和单峰等条件,对复杂系统的优化具有较强的鲁棒性,在各领域都有广泛的应用。本文提出的方法不仅能够进行换热器的结构优化,而且实现了翅片类型的优选,为板翅式换热器的优化设计提供了一种新的思路。

1 数学模型

1.1 优化设计模型

对于换热器设计,效率高、阻力小、重量轻是设计者追求的共同目标。工程实际中主要有以下两种设计要求:一种是在满足效率和阻力特征的前提下,使换热器的外形尺寸和重量尽可能小;另一种是给定换热器的尺寸和重量要求,使换热器的效率尽可能高。根据不同的设计要求,可以选择不同的目标函数进行优化。基于遗传算法的优化模型,分别针对重量最轻和效率最高两个目标函数进行了优化。下面以重量作为目标函数为例介绍本文的优化设计模型。

芯体是板翅式换热器的核心部分和关键换热部分,占换热器绝大部分的重量和体积,封头、接管等附件只起封闭和连接等辅助功能,故本文重点针对换热器芯体部分进行设计。

板翅式换热器的设计参数很多,包括芯体结构参数:长、宽、高、隔板厚度、流程数等;以及翅片参数:如翅片类型、翅片间距、板间距、厚度等,属于多变量优化问题。芯体的外形尺寸直接影响其传热和阻力性能,应作为优化变量。翅片是板翅式换热器的基本元件,结构如图 1 所示(P_f 为翅片间距; S 为板间距; D 为翅片厚度)。传热过程主要依靠翅片完成,同时翅片又会对流体的流动产生阻力,所以翅片的类型和尺寸也是影响换热器性能的主要因素,也应作为优化变量。其它参数如隔板厚度和翅片厚度等只进行校核计算,满足强度

要求即可。故本文最终选取换热器的外形尺寸 L_1, L_2, L_3 , 热边和冷边翅片型式编号 f_{in^h}, f_{in^c} 及翅片结构尺寸 P_{fh}, P_{fc}, S_h, S_c 作为优化变量。

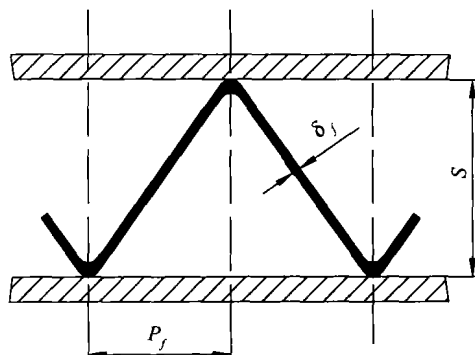


图 1 翅片结构示意图

Fig. 1 The structure of fin

以重量最轻为目标函数的优化模型:

$$W(X) = f(L_1, L_2, L_3, f_{in^h}, f_{in^c}, P_{fh}, P_{fc}, S_h, S_c) \quad (1)$$

模型的约束条件:

$$\begin{cases} G > G_{\min} \\ \$P_h < \$P_{h, \max} \\ \$P_c < \$P_{c, \max} \\ X_{i, \min} \leq X_i \leq X_{i, \max} \quad i = 1, 2, \dots, 9 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $G_{\min}$ 为最低效率值; $\$P_{h, \max}$ 和 $\$P_{c, \max}$ 分别为热边和冷边的允许压降; X 为优化变量组成的向量, $X_{i, \max}$ 和 $X_{i, \min}$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) 为每个变量取值的上下限。

1.2 优化方法

1.2.1 优化过程

遗传算法是基于对可行解的个体编码进行操作的优化方法,本文采用九个 16 位的无符号整型数组成的二进制染色体串,来表示个体向量 X 。换热器设计采用 GNTU 法^[4]。具体的优化过程如下(流程图见图 2):

(1) 首先在向量 X 的可行域内随机生成初始群体;

(2) 将群体中的二进制染色体串依次解码成十进制串:

$$\{L_1, L_2, L_3, f_{in^h}, f_{in^c}, P_{fh}, P_{fc}, S_h, S_c\} \xrightarrow{\text{解码}} \{L_1, L_2, L_3, f_{in^h}, f_{in^c}, P_{fh}, P_{fc}, S_h, S_c\}$$

(3) 通过换热器校核计算方法,计算换热器的重量 $W(X)$, 即个体的目标函数;

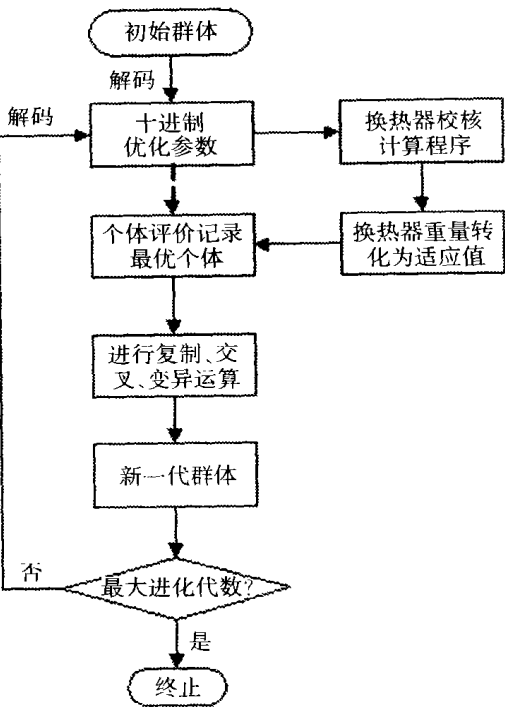


图2 遗传算法优化设计流程图

Fig. 2 Flow chart of optimum design with GA

(4) 将目标函数转化为适应值来进行个体评价,记录最优个体;

由于目标函数为最小重量,故适应值函数取:

$$Fit(X) = W_{\max}(X) - W(X) \quad (3)$$

式中, $W_{\max}(X)$ 为当前代中换热器重量的最大值。

(5) 设计遗传算子,对解码前的二进制串进行复制、交叉和变异运算,产生新一代群体。

(6) 若到达最大进化代数则终止计算;否则跳转到步骤(2)。

1. 2. 2 算法改进

由于函数值和某些优化变量是不连续的,所以优化过程中时常会出现这样的情况:两个适应值都很高的个体,进行交叉运算后,可能变成两个适应值都较低的个体,导致被复制到下一代的概率很小或者被淘汰,而原来的两个适应值都较高的个体也得不到保留,这样就有可能丢掉最优的染色体串。为避免这种情况,程序中保留了每一代中适应值最高的染色体串,直接复制到下一代。

遗传算法中,伴随着交叉和复制运算,较优个体会迅速繁殖并占据种群的大部分,使算法出现早熟收敛现象。因此,随着进化过程的进行,应及时增大变异概率,恢复群体的多样性,使遗传算法能够搜索到更广阔的解空间,避免陷入局部最优解。本文设定的变异概率是进化代数的函数,即:

$$p_m = p_{m0} + 0.001N \quad (4)$$

式中, p_{m0} 和 p_m 分别为变异概率的初始值和当前值; N 为进化代数。

1. 3 翅片数据库

板翅式换热器以往一般是凭借设计者的经验来选择翅片类型的。为了实现翅片类型的自动优选,提高设计效率,本文建立了一个专门的翅片数据库,通过程序从中自动选取最佳的翅片型式。该库包含了4类50多种翅片,称之为标准翅片,把这些类型和规格不同的标准翅片编号,称为翅片型号。这样,翅片的类型、几何特征、传热因子、阻力因子等信息就与翅片型号相关联。优化计算时,只要选择翅片型号,那么标准翅片的特征参数随之确定,示例见表1。

表1 翅片数据库举例

Table 1 Demonstrations of the database of fins

编号	名称	翅片间距/mm	板间距/mm	水力直径/mm	翅片厚度/mm	总面积/板间体积/(m ² /m ³)	翅片面积/总面积
11	平直 11 号	1.28	6.35	1.875	0.152	1 841.0	0.849
31	百叶窗 13 号	2.29	6.35	3.08	0.152	1 204.0	0.756
48	锯齿形 16 号	1.61	7.72	2.07	0.102	1 726.0	0.859
54	波纹形 1 号	2.22	10.49	3.23	0.152	1 152.0	0.847
编号	名称	j 因子拟合式系数 {a ₃ , a ₂ , a ₁ , a ₀ }			f 因子拟合式系数 {b ₃ , b ₂ , b ₁ , b ₀ }		
11	平直 11 号	{- 0.181 5, 2.135 2, - 8.479 7, 8.876 3}			{- 0.011 4, 0.547 7, - 3.757 1, 4.941 7}		
31	百叶窗 13 号	{- 0.116 2, 1.262 3, - 4.871 4, 4.357 5}			{0.015 5, 0.084 4, - 1.542 9, 2.014 2}		
48	锯齿形 16 号	{- 0.083 8, 0.932 7, - 3.872 0, 3.623 1}			{0.067 2, - 0.401 7, - 0.025 8, 0.513 8}		
54	波纹形 1 号	{0.127 9, - 1.329 8, 4.218 3, - 5.956 8}			{0.054 5, - 0.545 9, 1.418 8, - 1.903 1}		

翅片库的原始数据来源于文献[5],但文献中传热因子 j 和阻力因子 f 均以图表形式给出,无法用于编程计算。为方便计算机的处理,本文将这些图表数据拟合成雷诺数 Re 的函数关系式,形式如下:

传热因子 j 的拟合式为:

$$\lg j = a_3(\lg Re)^3 + a_2(\lg Re)^2 + a_1 \lg Re + a_0 \quad (5)$$

阻力因子 f 的拟合式为:

$$\lg f = b_3(\lg Re)^3 + b_2(\lg Re)^2 + b_1 \lg Re + b_0 \quad (6)$$

公式(5)中: $j = St Pr^{2/3}$, St 是斯坦登数, Pr 是普朗特数。 Pr 不是实验变量,但它的 $2/3$ 次方包括在表达式中,以作为对一定范围内普朗特数的近似,这对于全部气体都是合适的^[5]。

使用该翅片库时,首先按照传热因子的大小对库中的翅片进行排序,以区分不同翅片换热能力的高低。排序之后,能够提高遗传算法的运算速度,增加搜索的准确性。从四类翅片中各选一种规格的翅片为例,其传热因子 j 的对比见图 3。

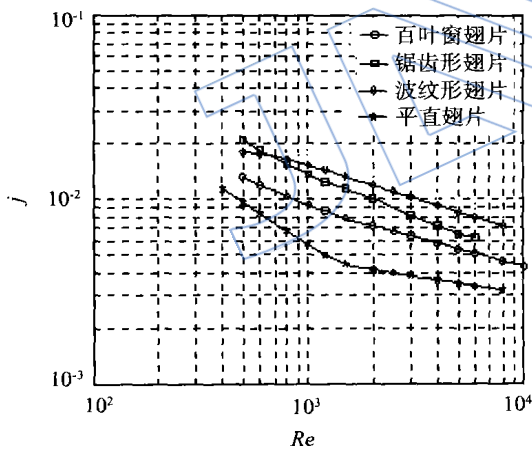


图 3 不同翅片表面的 j 因子对比图

Fig. 3 Comparison for j factors of different fins

对板翅式表面,将翅片性能数据外推至表面几何相似而水力直径不同的表面也是可行的,只要水力直径的变化适中,就不会引入严重的不确定性^[5]。故在所选标准翅片的基础上,可以进行基于几何相似的翅片尺寸的适当调整,从而得到最优的目标函数值。

2 算例和结果分析

本文针对以下两种情况对板翅式换热器进行优化设计:

(1) 若设计要求中已给定翅片表面的类型,本文能够对换热器进行结构优化,即优化换热器的外形尺寸和翅片的结构尺寸;

(2) 若翅片类型没有给定,本文还能够优选翅片,即通过程序自动搜索最合适的翅片类型,同时进行结构优化。

选取文献[1]中的飞机空调用三流程板翅式换热器进行优化。文献[1]初始设计采用 SIZ 计算,优化方法为混合罚函数法。本文将二者的结果都列出,并将遗传算法的优化结果与之进行比较。该换热器的设计条件如下:

初始条件:

热边和冷边进口温度分别为: 250°C , 97.6°C ;

热边和冷边进口压力分别为: 607.6 kPa ,

28.8 kPa ;

热边和冷边流量分别为: 0.139 kg/s , 0.278 kg/s ;

设计要求: 三流程换热器的效率为: 0.948 ;

热边和冷边的允许压降分别为: 0.5 kPa ,

2.13 kPa ;

2.1 结构优化

文献[1]中,翅片类型选定为百叶窗翅片。

对飞机用换热器,文献[1]以当量重量为目标函数,包括换热器的结构重量和引入冷却空气所带来的代偿损失两部分,本文只与其芯体的结构重量相比较,不包括接管和封头等部分的重量,这部分重量与芯体本身的重量是成比例的。

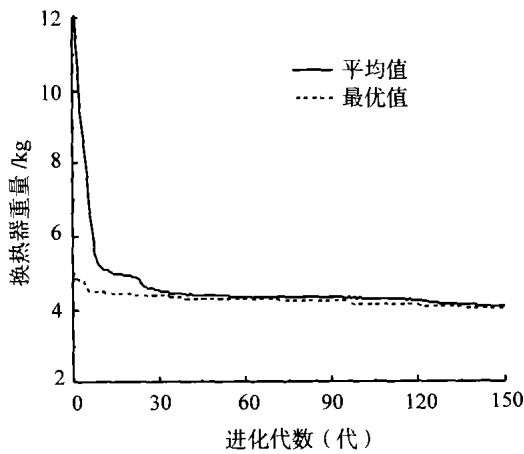


图 4 遗传算法优化过程(结构优化)

Fig. 4 Process of structure optimization with GA

遗传算法优化结果与文献[1]结果相比较,比 SIZ 计算的换热器重量减轻了 24.52% , 体积减小了 47.33% , 见表 2。由图 4 的优化过程很容易看

表 2 遗传算法与文献[1] 的优化结果比较

Table 2 Comparison of optimum results for GA with literature^[1]

参数值		SIZ 计算	文献[1] 优化结果	遗传算法	
				结构优化	优选翅片
优 化 变 量	L_1/m	0.31	0.18	0.137	0.097
	L_2/m	0.33	0.33	0.159	0.285
	L_3/m	0.15	0.24	0.371	0.240
	f_{inb}	—	—	—	百叶窗 13 号
	f_{inc}	—	—	—	平直 4 号
	P_{fh}/mm	4.57	2.42	2.36	2.2
	P_{fc}/mm	4.57	2.55	4.32	4.3
	S_h/mm	6.35	5.38	6.56	6.2
	S_c/mm	6.35	8.27	6.55	10.7
约 束 条 件	G	0.95	0.95	0.95	0.95
	$\$P_h/\text{kPa}$	0.5	0.5	0.495	0.496
	$\$P_c/\text{kPa}$	2.13	2.13	2.134	2.087
目 标 函 数	W/kg	5.368	6.744	4.052	2.527

出,随着进化代数的推进,重量的平均值和最优值都逐渐减小。进化的初始阶段,个体差异较大,较差个体很快被淘汰,目标函数值变化较明显,经过若干代进化之后,较优个体迅速繁殖,群体渐渐趋于一致,目标函数值的变化幅度就逐渐减弱了,在设计条件的制约下,最终趋于一个稳定值。

2.2 优选翅片

给定可供选择的翅片库,应用遗传算法即能

实现翅片类型的自动优选。同结构优化相比较,优选翅片后的结果有了更明显的改善,重量减轻了 37.64%,体积减小了 18.41%。优化计算过程同结构优化相类似,见图 5。

为直观表达遗传算法优选翅片的过程,对每一代中不同型号的翅片在群体中所占的比例(简称翅片类型比)进行统计,冷热边的翅片类型变化图分别见图 6 和图 7。由于篇幅,图中仅列出优势较明显的翅片型号。

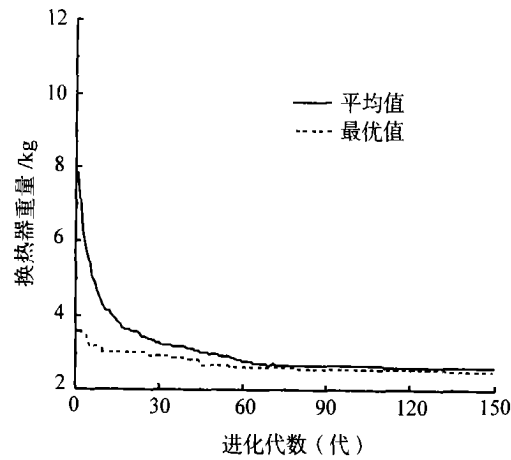


图 5 遗传算法优化过程(优选翅片)
Fig. 5 Process of optimal type selection
of fins with GA

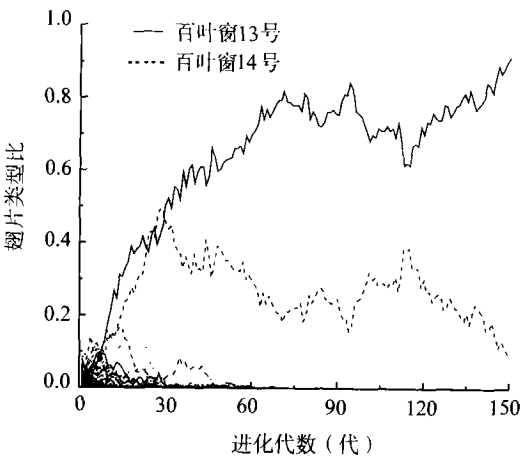


图 6 热边翅片型号比的变化图
Fig. 6 Process of different fins for hot flow passage

从图 6 和图 7 中可看出,在遗传算法的初期,群体中的翅片型号分布比较均匀,基本上各种型号的翅片都能被选到。随着进化过程的推进,远离约束条件的翅片逐渐被淘汰,群体中所包含的翅片型号就逐渐减少。若干代之后,群体中只剩下某几种型号的翅片占绝对优势。另一方面,一些已经被淘汰的翅片偶尔也会出现,这正是受变异概率影响的结果,对恢复群体的多样性是有利的。



图 7 冷边翅片型号比的变化图

Fig. 7 Process of different fins for cold flow passage

表 3 以效率最高为目标函数的优化结果
Table 3 Optimum results for the maximum effectiveness

参数值		结构优化	优选翅片
优化变量	L_1/m	0.176	0.132
	L_2/m	0.166	0.399
	L_3/m	0.366	0.232
	f_{in_h}	—	百叶窗 13 号
	f_{in_c}	—	平直 5 号
	P_{fh}/mm	4.55	2.06
	P_{fc}/mm	2.16	3.69
	S_h/mm	6.91	5.72
	S_c/mm	6.00	9.26
约束条件	W/kg	5.3	5.3
	$\$P_h/\text{kPa}$	0.49	0.45
	$\$P_c/\text{kPa}$	2.13	2.06
目标函数	G	0.972	0.988

需要说明的是,对于单个换热器的优化,本文不考虑其设计条件的改变,即冷热流体的流量始终是定值。而且优化设计前后换热器的效率和阻力都基本相同,这样对同一飞机在相同的飞行状态下,代偿损失也是相同的。因此,考虑代偿损失前后的优化结果是一致的。

此外,表 3 中还给出了以效率最高为目标函数的优化结果。以优选翅片的结果为例,效率最高的结果和重量最轻的结果相比较,换热器效率提高了 3.85%,而重量却增加了 52.32%。即换热器效率较高时,若进一步提高效率,会使重量显著增加,这对于工程实际将会有较高的代价。这种情况下,工程中一般不会选取效率作为目标函数。

3 结 论

(1) 提出了基于遗传算法的板翅式换热器优化设计方法。在给定翅片类型的条件下,能够进行结构优化,并优于传统的优化算法;在有多种翅片类型可供选择时,能够实现翅片类型的自动优选,减少了对设计者经验的依赖,其中后者是主要优点。

(2) 为实现优选翅片类型的功能,创建了一个翅片数据库,包含了 50 余种常用翅片的几何尺寸、公式化的传热因子和阻力因子数据,方便了同类问题计算机程序处理的需要。该库可以进一步补充和完善,其数据量越大,就越能体现出遗传算法的高效性和鲁棒性。

(3) 本文的优化软件和翅片数据库具有通用性,可应用于工程实际。遗传算法作为一种优化方法,可推广到整个环控系统(包括涡轮冷却器、压气机以及多个换热器等)的优化设计。而且由于整个系统的计算规模比单个换热器的计算规模要大得多,因此遗传算法的优越性将更加显著。

参考文献:

[1] 余小章. 紧凑热交换器优化设计[J]. 南京航空航天大学学报. 1994, 26(4): 489- 494.
[2] 曹乃承. 基于遗传算法的平板翅片式换热器优化设计[D]. 北京航空航天大学硕士论文. 2001.
[3] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
[4] 齐铭. 制冷附件[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
[5] [美] 凯斯 W M, 伦敦 A L. 紧凑式热交换器[M]. 宣益民, 张后雷译. 北京: 科学出版社, 1997.