

文章编号:1007-6735(2012)04-0399-05

基于遗传算法的列车空调冷凝器优化设计

陈家星¹, 余敏¹, 姚俊豪²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海法维莱交通车辆设备有限公司, 上海 201906)

摘要: 提出了应用遗传算法对列车空调翅片管式冷凝器的尺寸优化设计, 根据不同设计要求, 以冷凝器的重量或体积为目标函数, 翅片的厚度和间距作为优化变量. 优化结果表明, 冷凝器重量(或体积)明显减小, 换热性能得到改善, 符合列车提速对设备的轻量化和高性能设计要求.

关键词: 遗传算法; 列车空调; 冷凝器; 优化设计

中图分类号: TK 123 **文献标志码:** A

Optimal Design of Train Air-conditioning Condenser Based on Genetic Algorithm

CHEN Jia-xing¹, YU Min¹, YAO Jun-hao²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Faiveley Traffic Equipment Co., Ltd., Shanghai 201906, China)

Abstract: A strategy for optimal design of train air-conditioning condenser (TACC) was developed using genetic algorithm (GA). According to different design requirements the weight or the volume of TACC was taken as an objective function and the dimensions of spacing and thickness of the fins as the optimization parameters. The optimization results show that the weight(volume) of TACC is reduced obviously and the heat transfer performance is improved. The design requirements of high performance and light weight can be satisfied, when the train speed is raised.

Key words: genetic algorithm; train air-conditioning; condenser; optimal design

冷凝器作为列车空调系统的重要组成部分, 占据了系统很大的重量和体积, 翅片管式冷凝器具有结构紧凑、效率高等优点, 在列车空调系统中得到广泛的应用. 随着列车运行速度的提升, 对空调系统性能的要求也不断提高. 在满足基本换热性能和阻力要求的同时, 通过优化设计进一步减小冷凝器的重量(或体积), 可以减少原材料的消耗, 降低牵引功率, 有利于提高列车运行速度, 达到节能和环保的要求^[1].

遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法. 由于该算法对所求解的优化问题没有过多的限制, 且具有高

收稿日期: 2012-01-11
基金项目: 上海市宝山区产学研合作项目(CXY201106)
作者简介: 陈家星(1985-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 强化传热和高效换热器、热力系统优化. E-mail: shaou26@163.com
余敏(联系人), 女, 教授. 研究方向: 强化传热与节能技术、热力系统及设备优化. E-mail: usstyuminm@yahoo.com.cn

度并行、随机、全局搜索以及自适应的特点,使其在函数优化领域得到越来越广泛的应用.

本文综合分析列车空调冷凝器的热力参数、几何参数以及制冷系统中有关量之间的制约关系,以冷凝器的重量(或体积)为目标函数,引入 MATLAB 遗传算法工具箱进行优化设计,有效地减少了冷凝器的重量(或体积),为其他类型换热器的优化设计提供了参考.

1 模型建立

在列车空调系统中,受应用条件的限制,一般采用风冷式冷凝器,该冷凝器通常采用几根并联的外套翅片的蛇形管形成长方体管箱.风冷式冷凝器工作时,制冷剂蒸汽在管内冷凝,在轴流式风机作用下,空气在蛇管外横向流动,从而将热量带走.翅片管结构模型如图 1 所示.图 1 中, S_1 为铜管水平间距, S_2 为铜管竖直间距, S_f 为翅片间距, δ_f 为翅片厚度, d_b 为铜管外径, d_i 为铜管内径.

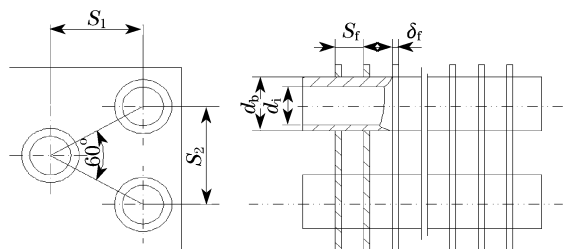


图 1 翅片管结构简图

Fig.1 Figuration of finned tube heat exchange

现分别以翅片管式冷凝器的重量最轻和体积最小为优化目标.由于冷凝器的重量是结构和几何尺寸的直接函数,而具体结构和尺寸又与装置运行参数、循环工质的热力性质及传热和阻力特性等因素相关.同时,芯体作为冷凝器的核心部件,占有大部分体积和重量.封头、接管等附件只起封闭和连接等辅助作用,因此,只考虑对冷凝器芯体部分进行设计与优化^[2].故下文提到重量或体积,如无特别说明,均指冷凝器芯体部分.

为对冷凝器建模,作如下简化处理:忽略各流道相互之间的传热,不考虑分液不均匀问题;管内制冷剂流动简化为一维流动,且不考虑压降,忽略其势能;管外空气的流动视为一维流动;管壁热阻忽略不计.

a. 传热量的计算

传热量的计算可由以下传热基本方程式求得^[3]

$$Q = K_0 F_0 \Delta t_m = K_f F_f \Delta t_m \quad (1)$$

式中, Q 为传热量; F_0, F_f 分别为翅片管外表面积、翅片管光管外表面积; K_0, K_f 分别对应于以翅片管外表面积、翅片管光管外表面积为基准的传热系数; Δt_m 为对数平均温差.

b. 空气侧表面传热系数的计算

空气侧表面传热系数^[4-5]

$$h_o = \frac{C \lambda_o Re_o^n}{d_e} \left(\frac{L}{d_e} \right)^m \quad (2)$$

式中, λ_o 为空气导热率; Re_o 为空气侧雷诺数; L 为沿气流方向的翅片长度; d_e 为当量直径.

其中

$$\begin{aligned} d_e &= \frac{4(S_1 - d_b)(S_f - \delta_f)}{2(S_1 - d_b) + (S_f - \delta_f)} \\ n &= 0.45 + 0.006 6L/d_e \\ m &= -0.28 + 0.08 Re_o/1\ 000 \\ C &= A(1.36 - 0.24 Re_o/1\ 000) \\ A &= 0.518 - 0.023\ 15 \left(\frac{L}{d_e} \right) + 0.000\ 425 \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 - \\ &\quad 3 \times 10^{-6} \left(\frac{L}{d_e} \right)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

对于叉排管簇,由于气流的扰动比顺排管簇大,故按式(2)计算的表面传热系数还要增加 10%.

c. 制冷剂侧换热系数的计算

单相区(过冷、过热区)的表面传热系数 h_i , 由 Dittus-Boeler 换热关联式计算,即

$$Nu_i = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (4)$$

式中, Nu_i, Re 和 Pr 分别为制冷剂侧流体的努塞尔数、雷诺数和普朗特数.其中

$$\begin{aligned} Nu_i &= \frac{h_i d_i}{\lambda} \\ Re &= \frac{G_i d_i}{\mu} \end{aligned}$$

式中, λ 为流体导热系数; G_i 为流体质量流速; μ 为流体运动黏度.

两相区的表面传热系数 h_i , 采用 Shah 关联式

$$h_i = h_1 \left((1-x)^{0.8} + \frac{3.8 x^{0.76} (1-x)^{0.04}}{Pr^{0.38}} \right) \quad (5)$$

式中, h_1 为单相区表面传热系数; x 为两相区干度.

d. 翅片效率

$$\text{翅片参数 } \theta = \sqrt{2\alpha_o/(\lambda_f \delta_f)}$$

$$\text{翅片效率 } \eta_f = \frac{\text{th}(\theta \kappa)}{\theta \kappa}$$

$$\text{表面效率 } \eta_s = 1 - \frac{F_2}{F} (1 - \eta_f)$$

式中, λ_f 为翅片材料导热系数; F_2 为翅片面积; F

为每米翅片总面积; κ 为翅片当量高度.

由计算式(2)~式(5)可看出,冷凝器的结构参数影响了空气侧和制冷剂侧换热系数等热力参数,这些热力参数又对换热效率产生影响,进而影响换热器的体积和重量,即冷凝器热力参数、几何参数以及换热效率等相关量之间存在着制约关系.冷凝器的优化设计,要求在满足换热性能的条件下,对管径、翅片间距等要素进行匹配,实现在某个优化目标(如重量最轻、体积最小等)下的最佳组合,而寻找这种最佳组合,与生物进化过程比较类似,因此在冷凝器的优化设计中采用遗传算法是合理、可行的^[6].

2 遗传算法在冷凝器优化设计中的应用

2.1 遗传算法原理

遗传算法将每个可能的解看成种群 $P(t)$ (t 代表遗传代数,也即计算中的迭代次数)中的一个个体,根据预定的目标函数对每个个体进行评价后给出一个适应度值.利用选择、交叉和变异3种遗传算子对初始产生的个体进行组织,产生新的个体 $C(t)$.从父代种群和子代种群中选择优秀个体形成新的种群.在若干代后,算法收敛到一个最优个体,该个体很有可能代表遗传算法的最优或次优解.遗传算法的流程如图2所示^[7].

2.2 变量的编码

翅片管是冷凝器的基本元件(见图1),换热过程主要依靠翅片管完成,翅片的类型及尺寸是影响冷凝器性能的主要因素,因此选取翅片间距和翅片厚度为优化变量,参考文献[4]选取翅片间距 S_f 优化范围为 1.5~3.0 mm,翅片厚度 δ_f 优化范围为 0.1~0.2 mm.考虑到加工、测量精度和计算机运算能力,遗传算法的计算结果保留2位小数.选取的遗传算法主要参数:个体数目为40;变量维数为2;代沟为0.9;最大遗传代数为250;每个种群的长度为20.

2.3 目标函数的确定

取翅片间距和翅片厚度为优化变量,即 $X = [X_1, X_2]^T = [S_f, \delta_f]^T$,其中,目标函数为重量 W 最轻时的表达式为

$$\begin{aligned} \min f(x_i) = W(x_i) = f(S_f, \delta_f) = \\ \frac{1}{4} k N_B \pi (d_b^2 - d_i^2) l \rho_{Cu} + \\ \left(bH - \frac{1}{4} k N_B \pi d_b^2 \right) \delta_f S_f \rho_{Al} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, N_B 为每排管数; k 为沿空气流动方向的紫铜管的管排数; l, b, H 分别为冷凝器的长度、宽度、高度; S 为铝片的片数; ρ_{Cu} 为紫铜的密度, ρ_{Al} 为铝片的密度.

限制条件为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &> \epsilon_{\min} \\ \Delta p_i &< \Delta p_{i, \max} \\ x_{\min} &< x_i < x_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $\epsilon_{\min}$ 为允许的最低效率,值为 0.75; $\Delta p_{h, \max}$, $\Delta p_{c, \max}$ 分别为冷媒侧和空气侧允许的最大压降,值分别为 50 kPa 和 0.25 kPa; x_i 为优化变量 (S_f , δ_f), i 表示冷媒侧、空气侧; $x_{\max}$, $x_{\min}$ 分别为每个变量优化的上下限.

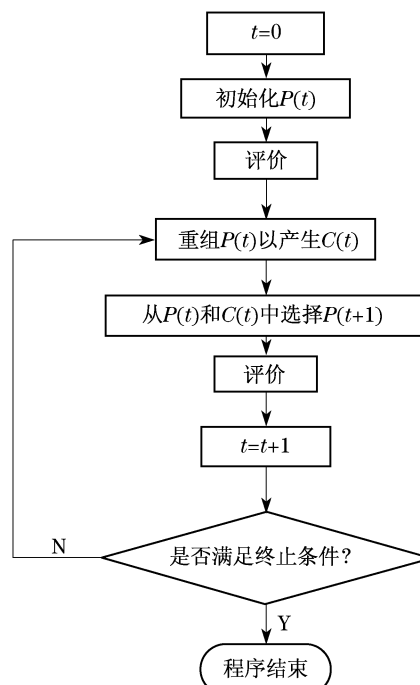


图2 遗传算法流程图

Fig.2 Flow chart of GA routine

3 优化算例及结果分析

以 CRH₃ 型动车组空调系统工况为例进行优化计算,制冷剂型号为 R134a,其冷凝器原始设计参数见下页表1.为了将优化结果和原始设计参数进行对比,在翅片参数变化时,若换热系数增大,换热面积相应减小(铜管总长减短),迎风面积发生改变,而管排数和其它结构参数等均保持不变.

3.1 以重量最轻为目标函数

图3(见下页)为以重量最轻为目标函数的遗传

表 1 冷凝器原始设计参数
Tab.1 Original parameters of condenser

参数名称	参数值	参数名称	参数值
热负荷/kW	31	铜管厚度 δ_t/mm	0.35
冷凝温度/ $^{\circ}\text{C}$	54	翅片厚度 δ_f/mm	0.15
空气进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	35	翅片间距 S_f/mm	2.0
铜管排数 $N_c/\text{个}$	4	紫铜光管外径 d_b/mm	9.52
每排管数 $N_B/\text{个}$	22	铜管水平间距 S_1/mm	25.4
冷凝风量/ m^3/h	7 500	铜管竖直间距 S_2/mm	22

算法在优化过程中初始种群经过 50 次迭代后重量 W 随着种群大小 N 的变化的结果,图 4 为经过 250 次迭代后的结果.从图 3 和图 4 可以看出,在进化初始阶段,个体差异较大,经过若干代进化后,较差个体被淘汰,目标函数值变化明显.图 5 表示了迭代过程中种群目标函数均值的变化和最优解的变化,说明经过若干代进化之后($t>50$),目标函数值最终趋于一个稳定值.

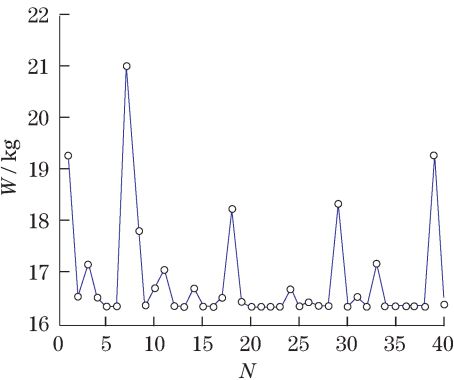


图 3 经过 50 次迭代后的结果
Fig.3 Results after 50 iterations

表 2 以重量最轻为目标函数的优化结果比较
Tab.2 Comparison of optimum results for minimum weight

项目	翅片间距 S_f/mm	翅片厚度 δ_f/mm	翅片效率 $\eta_f/\%$	冷凝器重量 W/kg	冷凝器体积 V/dm^3
设计值	2.0	0.15	0.826	21.2	59.9
优化值	1.5	0.10	0.751	16.4	52.7

3.2 以体积最小为目标函数

图 6 为以冷凝器体积最小为目标函数的遗传算法优化过程,从图 6 可以看出目标函数值发生明显的变化,最后趋于一个稳定值.表 3 为以体积最小为目标函数的优化结果与原始数据的比较.从表 3 可以看出,优化结构尺寸后,翅片间距有所减小而翅片厚度增加,体积减小 22.7%,翅片效率增加 3%,但重量比原始数据下增加 11.3%,比以重量最轻为目标函数的优化结果增加 43.9%.

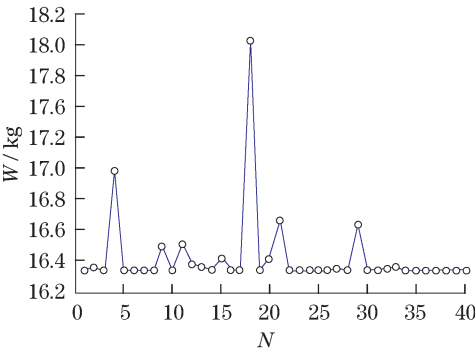


图 4 经过 250 次迭代后的结果
Fig.4 Results after 250 iterations

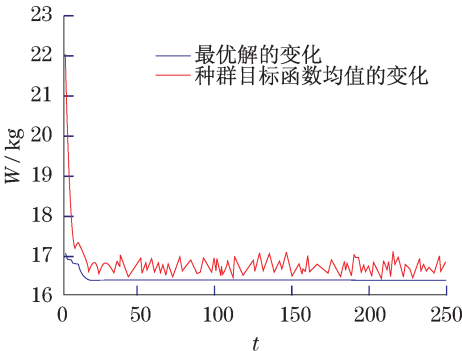


图 5 重量最轻迭代中种群目标函数均值和最优解的变化
Fig.5 Population means and the optimal objective changes of lightest iteration

表 2 为以重量最轻为目标函数的优化结果与原始数据的比较,从表 2 可以看出,优化结构尺寸后,翅片间距和厚度均有所减小;优化后重量减轻 22.6%,体积相应减小 12%,而翅片效率降低 9%,但仍在允许范围内.

对比表 2 和表 3 的数据,可以看到在设定范围内,翅片厚度的增加有效地减小了冷凝器的体积,同时提升了翅片的表面效率,但增大了冷凝器重量,而冷凝器的重量是列车空调机组减少原材料的消耗,降低牵引功率的重要因素之一.因此,在规定的性能要求下,如果需要同时优化重量和体积,则可建立新的目标函数 ϕ 并给出重量和体积在新目标函数中所占的权重系数,即

$$\phi = V^{-c_1} W^{-c_2}$$

(8)

式中, c_1, c_2 分别为体积和重量的权重系数.

由式(8)可以看出, ϕ 越小, 冷凝器越理想. 若 $c_1 = 0$ 或 $c_2 = 0$ 则表示仅考虑重量或仅考虑体积.

事实上, 也可以用冷凝器效率最高为目标函数进行计算, 但是在列车提速和列车轻量化设计背景下, 考虑较多的是冷凝器的重量和体积. 当冷凝器的效率已经较高时, 不宜将其作为优化目标函数, 因为这往往会显著增加制造材料成本及运输费用等.

对列车翅片管式空调冷凝器采用的遗传算法的优化设计方法, 可以推广到其它类型的紧凑式换热器进行优化计算.

表 3 以体积最小为目标函数的优化结果比较
Tab.3 Comparison of optimum results for minimum volume

项目	翅片间距 S_f/mm	翅片厚度 δ_f/mm	翅片效率 $\eta_f/\%$	冷凝器体积 V/dm^3	冷凝器重量 W/kg
设计值	2.0	0.15	0.826	59.9	21.2
优化值	1.5	0.20	0.851	46.3	23.6

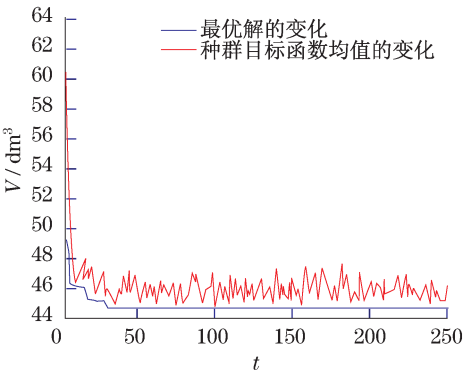


图 6 体积最小迭代中种群目标函数均值和最优解的变化
Fig.6 Population means and the optimal objective changes of smallest iteration

4 结 论

采用 MATLAB 遗传算法, 以 CRH₃ 型动车组空调系统为例, 分别以重量最轻和体积最小为目标函数, 对翅片管式冷凝器进行了结构参数优化, 可得出如下结论:

- a. 以重量最轻为目标函数时, 通过优化计算后, 翅片间距和厚度均减小; 冷凝器重量可减轻 22.6%, 体积相应减小 12%, 而翅片效率降低 9%, 但仍在允许范围内.
- b. 以体积最小为目标函数时, 通过优化计算后, 翅片间距有所减小而翅片厚度增加, 冷凝器体积减小 22.7%, 翅片效率增加 3%. 但重量比原始数据

- 增加 11.3%, 比以重量最轻为目标函数的优化结果增加 43.9%.
- c. 在列车提速和列车轻量化设计背景下, 冷凝器以重量最轻为目标函数, 可减少原材料的消耗, 降低牵引功率, 达到节能和环保的要求. 如需同时考虑对冷凝器体积的优化, 可建立综合考虑重量和体积的目标函数, 其中重量和体积的权重系数可根据具体设计要求确定.
- d. 该优化设计方法可推广到其它类型的紧凑式换热器, 可对不同翅片形式进行优化.

参考文献:

[1] 刘转华, 唐阳. 动车组技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.

[2] 谢公南, 王秋旺. 遗传算法在板翅式换热器尺寸优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 53 - 57.

[3] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.

[4] 张祉祐. 制冷原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[5] 张丽娜, 杨春信, 王安良. 应用遗传算法优化设计板翅式换热器[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 530 - 535.

[6] Hakan A. Optimal resampling and classifier prototype selection in classifier ensembles using genetic algorithms [J]. Pattern Analysis and Applications, 2004, 7(3): 285 - 295

[7] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.