

群智能算法在螺旋桨参数优化设计中的应用

王 鹏 黄 帅 朱舟全

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘 要 螺旋桨参数优化设计一般是复杂的非线性问题,设计的难点在于如何在各种非线性约束条件下找到一组适当的参数,使得螺旋桨性能最佳。群智能算法作为一种新兴演化计算技术,能有效解决全局优化问题,是优化算法研究的新热点。首先介绍了粒子群算法和蜂群算法两种群智能算法的工作原理;然后在建立螺旋桨参数优化数学模型的基础上,将群智能算法运用到螺旋桨初步和终结设计优化问题中,并通过实例进行对比分析,结果表明群智能算法解决螺旋桨参数优化问题是实用且高效的。

关键词 群智能,粒子群算法,蜂群算法,螺旋桨参数优化,船舶

中图分类号 TP18 **文献标识码** A

Application of Swarm Intelligence Optimization Algorithm in Parameter Optimization Design of Propeller

WANG Peng HUANG Shuai ZHU Zhou-quan

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In general, parameter optimization design of propeller is a nonlinear problem, and the key to the problem is how to find a set of appropriate parameters under various constraint conditions to make propeller performance best. As a novel evolutionary computation technology, swarm intelligence is now becoming a new research hotspot, and has been successfully applied in many fields. Practice shows that swarm intelligence optimization algorithm is an effective method to solve global optimization problems. In this paper, the principles of particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm were introduced. Then on the basis of establishing mathematical model of parameter optimization design of propeller, the swarm intelligence optimization algorithm was employed to solve the problem of parameter optimization design of propeller, and the experimental results indicate that the swarm intelligence optimization algorithm is an effective and potential method for this problem.

Keywords Swarm intelligence, Particle swarm optimization, Artificial bee colony algorithm, Parameter optimization design of propeller, Shipping

群智能是群体所表现出来的智能。在飞鸟觅食、蚂蚁筑巢、蜜蜂采蜜中,昆虫表现出一种集体智慧,它们相互协作,完成了许多单个昆虫难以独立完成任务。受群居昆虫协作与竞争行为的启示,人们摸索出了一种新的演化计算技术——群智能算法。自20世纪90年代模拟蚂蚁行为的蚁群算法^[1](ACO)提出以来,又产生了模拟鸟类行为的粒子群算法(PSO)^[2]、模拟鱼类生存习性的人工鱼群算法^[3]、模拟青蛙觅食的混合蛙跳算法(SFLA)^[4]、模拟蜜蜂采蜜行为的人工蜂群算法^[5]等。这些群体智能优化算法的出现,使原来一些复杂的、难以用常规的优化算法进行处理的问题可以得到解决,大大增强了人们解决和处理优化问题的能力,这些算法不断地用于解决工程实际中的问题,使得人们投入更大的精力对其理论和实际应用进行研究。

螺旋桨设计是整个船舶设计的重要环节,通常在初步完成船舶线型设计并通过估算或用船模阻力试验确定船体有效功率后进行。目前,商用螺旋桨设计方法主要有两种,即图谱

设计法和环流理论设计法。由于流体动力本身的复杂性,对于一些特殊桨型理论设计法的结果往往保证不了可靠性,因此图谱设计法是可靠选择。用图谱法进行设计时,如何在保证设计要求较多的前提下,提高设计效率是关键问题。1997年魏东、张圣坤等人将约束直接搜索法应用于求解螺旋桨参数优化设计问题^[6];2002年冯峰、黄胜等人将人工神经网络应用于螺旋桨参数优化设计问题^[7];2004年王广东、杨丽等人将改进进化算法应用于螺旋桨参数优化设计问题^[8]。

本文将群智能算法中的粒子群算法和人工蜂群算法应用于螺旋桨参数设计优化问题中,并且将群智能算法的计算结果与其他文献计算结果进行了比较。结果表明,无论是设计效率还是设计结果,群智能算法都是令人满意的。

1 典型群智能算法

1.1 粒子群算法

在PSO算法中,首先随机产生一群粒子,每一个粒子都

本文受国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA09A104)资助。

王 鹏(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为水下航行器总体设计、多学科设计、流体力学等,E-mail: wangpeng305@nwpu.edu.cn;
黄 帅(1989—)男,硕士,主要研究领域为智能算法、流体分析;朱舟全(1989—),男,硕士,主要研究领域为多学科优化设计、流体力学。

是搜索空间的潜在解。然后通过迭代寻找最优解。每一个粒子都有一个适应于种群的适应值,及决定粒子飞翔的位移和速度。每次迭代后,粒子下一时刻的速度和位移通过两个“极值”来更新:第一个极值是迭代后粒子本身的最优解,称为局部最优解;第二个极值是整个种群的最优解,称为全局最优解。图 1 即为粒子群算法的搜索示意图。

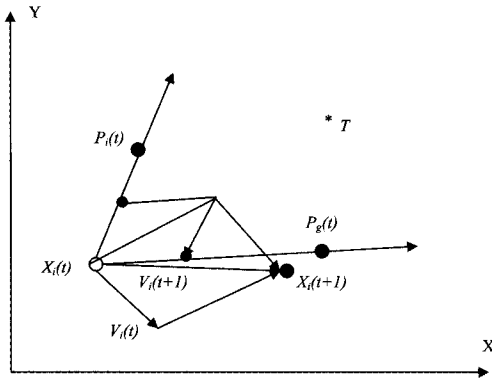


图 1 粒子群算法的搜索示意图

PSO 算法可概述如下:假设目标搜索空间为 d 维,算法的种群规模为 m (种群中的粒子个数为 m), 向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 和 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 分别表示第 i 个粒子的位置和速度。算法迭代至当前代数 t 时,第 i 个粒子本身搜索到的最优位置记为 $P_i(t)$,整个种群搜索到的最优位置记为 $P_g(t)$,则第 i 个粒子的速度和位置的更新公式为:

$$V_i(t+1) = V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_g(t) - X_i(t)) \quad (1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2)$$

通常每一维的大小都限制在 $[-u_{\max}, u_{\max}]$ 之间, $u_{\max}$ 为容许的最大粒子速度; c_1, c_2 是加速常数(或称学习因子),分别调节向种群最好位置和个体历史最好位置方向飞行的最大步长; r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

PSO 算法基本流程如图 2 所示。

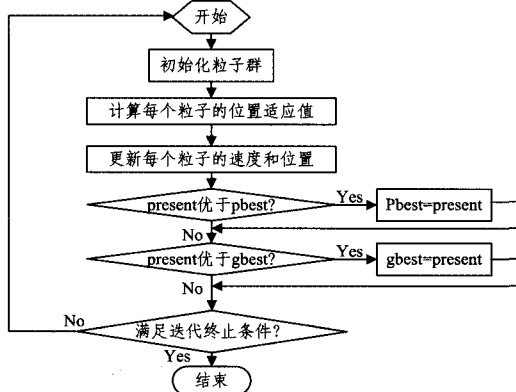


图 2 PSO 算法流程图

1.2 人工蜂群算法

人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)是模拟蜜蜂种群采蜜过程的一种新型群智能优化算法。蜜蜂是一种群居生物,能够在复杂的环境下以极高的效率采集花蜜。研究表明,蜂群采蜜过程中,蜜蜂按任务角色分为 3 种类型:侦察蜂、引领蜂、跟随蜂,它们通过摇摆舞、气味等多种方式进行信息交流,协同完成采蜜。

ABC 算法首先生成含有 NP 个解(食物源)的初始种群,

每个解 $X_i (i=1, 2, \dots, NP)$ 是一个 N 维的向量,然后引领蜂分头对食物源(解)进行一次领域搜索,搜索到食物源后对其花蜜质量(适应度)进行比较,如果优于以前的,则用新的食物源位置代替旧的。所有引领蜂搜索完之后,回到舞蹈区把食物源花蜜质量信息通过跳摇摆舞传达给跟随蜂,跟随蜂据此按照一定的跟随概率 P_i 选择食物源,花蜜越多的食物,源跟随蜂也越多,以提高蜂群搜索局部最优食物源的能力。通过这样一个分工协作搜索过程,蜂群就能够以较高的效率在一定的搜索空间下获取最佳食物源。图 3 即为蜜蜂采蜜过程信息交流示意图。

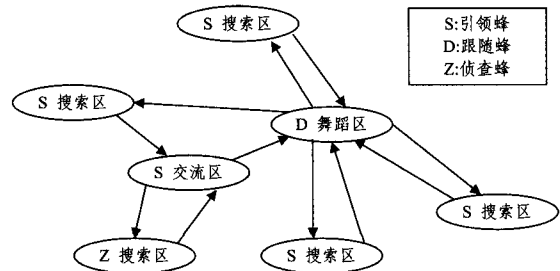


图 3 蜜蜂采蜜过程信息交流示意图

ABC 算法中,引领蜂和跟随蜂按照下式进行食物源位置更新:

$$x_{ij} = x_{ij} + r_{ij} (x_{ij} - x_{ij}) \quad (3)$$

式中, $l \in NP, j \in N, l \neq i, r_{ij} \in [-1, 1]$ 是一个随机数。

跟随概率 P_i 按照下式确定:

$$P_i = fit_i / \sum_{i=1}^{NP} fit_i \quad (4)$$

式中, fit_i 是第 i 个解的适应度值, NP 是解的个数。

ABC 算法流程如图 4 所示。

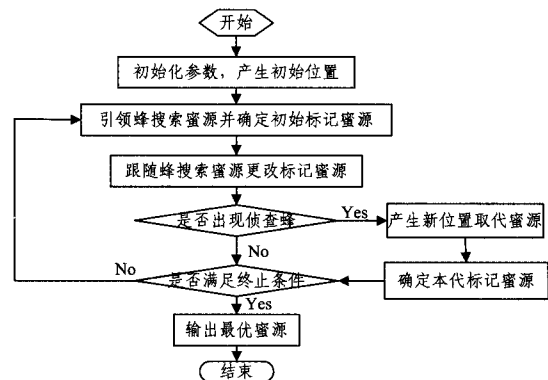


图 4 ABC 算法流程图

2 B 型螺旋桨参数优化设计数学建模

荷兰船模试验水池 B 型螺旋桨系列是世界上应用最广泛的螺旋桨设计图谱系列之一,从 1938 年发表第一批试验结果以来,已有 70 多年的使用经验。我国的许多民用船舶螺旋桨也采用此图谱进行设计。鉴于 B 系列螺旋桨已具有敞水试验数据的多项式回归表达式,本文在总结前人工作的基础上,建立和分析了 B 型螺旋桨优化设计的数学模型。

2.1 B 型螺旋桨敞水试验结果多元回归表达式

荷兰船模试验水池利用回归分析方法完成了 B 型螺旋桨系列试验结果的多元回归分析并考虑了雷诺数 Re 的影响,当 $Re \geq 2 \times 10^6$ 时,螺旋桨的推力系数 K_t 和转矩系数 K_q 可用 $A_e/A_0, P/D, J, Z$ 的多项式表达:

$$K_t = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v} J^s (P/D)^u (A_e/A_0)^t Z^v$$

$$K_q = \sum_{s',t',u',v'} C_{s',t',u',v'} J^{s'} (P/D)^{u'} (A_e/A_0)^{t'} Z^{v'}$$

式中,多项式系数和幂指数已知,其他参数范围是 $Re \geq 2 \times 10^6$, $Z=2 \sim 7$, $A_e/A_0=0.3 \sim 1.05$, $P/D=0.5 \sim 1.4$, 通过该回归多项式计算得到的敞水特性曲线与图谱给出的敞水特性曲线完全吻合。

2.2 B型螺旋桨初步设计优化模型

螺旋桨的初步设计要求设计一个效率最佳的螺旋桨,其既能达到预定航速,又要使消耗的主机功率最小,即已知航速 V_S 、有效功率 P_E ,根据螺旋桨选定的直径 D_{max} 确定主机功率 P_S 、盘面比 A_e/A_0 、螺距比 P/D 、进速比 J 等参数,使得敞水效率 η 最高。

目标函数敞水效率 $\eta(A_e/A_0, P/D, J, Z)$, 即:

$$\eta = (K_t/K_q) \cdot (J/2\pi) \quad (5)$$

式中,盘面比 A_e/A_0 、螺距比 P/D 、进速比 J 为设计变量;桨叶数 Z 为参变量。

约束条件:

(1)运动条件:螺旋桨的进速等于伴流修正后的船速,即

$$V_A = 0.5144 V_S (1-w) \quad (6)$$

式中, V_A 为桨进速(m/s); w 为伴流分数。

(2)动力条件:螺旋桨的有效推力等于船体受到的阻力,

即

$$R = T(1-t) \quad (7)$$

式中, R 为船体的总阻力; T 为总推力; t 为推力减额分数。

(3)不发生空泡条件:螺旋桨的平均推力系数小于限定值,即

$$\tau_c - \tau_c' \leq 0$$

即

$$8K_t / \{\pi(1.067 - 0.229)P/D[J^2 + (0.7\pi)^2](A_e/A_0)\} - \tau_c' \leq 0 \quad (8)$$

采用 Burrill 空泡限界线, τ_c' 可回归成如下表达式:

$$\tau_c' = 0.0576 + 0.32\sigma_{0.7} - 0.0787\sigma_{0.7} \quad (9)$$

式中, $\sigma_{0.7}$ 为桨叶 0.7R 切面处的空泡数。

(4)直径条件:螺旋桨直径小于等于设计要求最大直径,

即

$$D \leq D_{max} \quad (10)$$

对上述公式进行简化归并后,得到 B 型螺旋桨初步设计优化数学模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta = f(A_e/A_0, P/D, J) \\ \text{s. t.} \quad & g_1 = 8K_t / \{\pi(1.067 - 0.229)P/D \\ & [J^2 + (0.7\pi)^2](A_e/A_0)\} - \tau_c' \leq 0 \\ & g_2 = [R/(1-t)K_t \rho]^{0.5} J/V_A - D_{max} \leq 0 \\ & a_1 \leq J \leq b_1, a_2 \leq P/D \leq b_2, a_3 \leq A_e/A_0 \leq b_3 \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 B型螺旋桨终结设计优化模型

螺旋桨的终结设计要求在选定主机之后,设计一个在给主机条件下使船舶达到最高航速的螺旋桨,即已知主机功率 P_S 、转速 N_S 、传动比 i (或桨转速 n)、有效功率曲线 $P_E - V_S$,确定螺旋桨直径 D 、螺距比 P/D 、盘面比 A_e/A_0 等参数,以使航速 V_S 最高。

已知有效功率曲线 $P_E - V_S$ 曲线,要使航速 V_S 最高,目标函数可转化为 P_E 最大,已知主机功率 P_S ,则目标函数可进

一步转化为敞水效率 $\eta(A_e/A_0, P/D, J)$ 最大。

目标函数敞水效率 $\eta(A_e/A_0, P/D, J, Z)$, 即:

$$\eta = (K_t/K_q) \cdot (J/2\pi)$$

式中,盘面比 A_e/A_0 、螺距比 P/D 、进速比 J 为设计变量;桨叶数 Z 为参变量。

约束条件:

(1)推力系数等式条件

$$K_t = 1000 P_E / [(1-t) V_S \rho n^2 D^4] \quad (12)$$

(2)转矩系数等式条件

$$K_q = 1000 P_D / (2\pi \rho n^3 D^5) \quad (13)$$

式中, P_D 为螺旋桨收到的功率。

(3)进速系数

$$J = V_A / (nD) \quad (14)$$

(4)不发生空泡条件

$$\tau_c - \tau_c' \leq 0 \quad (15)$$

(5)直径条件

$$D \leq D_{max} \quad (16)$$

由式(13)可得:

$$D = [1000 P_D / (2\pi \rho n^3 K_q)]^{1/5} \quad (17)$$

由式(14)和式(6)可得:

$$V_S = J n D / [0.5144(1-w)] \quad (18)$$

由于式(16)为隐式约束条件,结合式(18)可转换为不等式约束条件:

$$|K_t D^4 - c P_E / D| \leq \epsilon \quad (19)$$

式中, c 为可得到的常量; ϵ 为精度控制量。

对上述公式进行简化归并后,得到 B 型螺旋桨终结设计优化数学模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta = f(A_e/A_0, P/D, J) \\ \text{s. t.} \quad & g_1 = 8K_t / \{\pi(1.067 - 0.229)P/D \\ & [J^2 + (0.7\pi)^2](A_e/A_0)\} - \tau_c' \leq 0 \\ & g_2 = [1000 P_D / (2\pi \rho n^3 K_q)]^{1/5} - D_{max} \leq 0 \\ & g_3 = |K_t D^4 - c P_E / D| - \epsilon \leq 0 \\ & a_1 \leq J \leq b_1, a_2 \leq P/D \leq b_2, a_3 \leq A_e/A_0 \leq b_3 \end{aligned} \quad (20)$$

3 群智能算法求解螺旋桨参数优化设计问题

群智能算法可以用来直接求解复杂的无约束非线性优化问题,而螺旋桨参数优化问题是带有复杂约束条件的,所以必须采用一些约束处理方法。本文采用最常用的惩罚函数法,通过给目标函数增加惩罚项,将有约束的优化问题转化为无约束的优化问题。本文引用文献[9]的设计实例来进行计算验证,通过结果对比来说明群智能算法解决此类问题的高效性和实用性。

3.1 实验环境和参数设置

本文两种群智能优化算法通过 Matlab 编程实现螺旋桨参数优化设计问题求解。PSO 算法和 ABC 算法的参数设置列于表 1。

表 1 PSO 和 ABC 算法参数设置

算法	PSO					ABC			
参数	m	w	c1	c2	MaxCycle	NP	N	limit	MaxCycle
	100	0.9~0.4	2	2	1000	100	3	500	1000

3.2 实验结果与分析

群智能算法求解螺旋桨参数优化问题的计算结果与其他文献计算结果对比如表 2 所列。

表 2 计算结果比较

项目	文献			PSO		ABC	
	文献 [10]	文献 [9]	文献 [8]	初步 设计	终结 设计	初步 设计	终结 设计
直径 D(m)	4.78	4.77	4.77	4.77	4.78	4.77	4.82
航速 V _S (kn)	15.48	15.41	15.41	15.41	15.69	15.41	16.05
盘面比 A _e /A ₀	0.544	0.550	0.666	0.563	0.623	0.523	0.500
螺距比 P/D	0.683	0.685	0.875	0.765	0.698	0.665	0.687
进速系数 J	0.419	0.418	0.484	0.441	0.425	0.422	0.431
转速 N _s (r/min)	155	155	134	147	155	153	155
敞水效率 η_0	0.545	0.537	0.530	0.534	0.535	0.544	0.548

本文螺旋桨参数优化设计通过计算机编程实现,计算时间都不到一分钟,而且只要程序里修改初始设计参数,就能实现不同要求的螺旋桨设计,比起传统的手工图谱设计,大大提高了螺旋桨的设计效率。从表 2 可以看出,PSO 算法和 ABC 算法的优化结果都是令人满意的,特别是 ABC 算法,敞水效率比其他文献计算的敞水效率提高了很多,说明群智能算法解决螺旋桨参数优化设计问题高效且实用。

结束语 本文首先介绍了 PSO 算法和 ABC 算法的基本原理,并且给出了各自的算法流程;其次针对 B 型螺旋桨,在前人工作的基础上建立了螺旋桨的初步设计与终结设计的数学模型,将螺旋桨参数优化问题转化为带约束的非线性函数优化问题;然后采用罚函数的约束处理方法,将有约束优化问题转化为无约束优化问题;最后分别用 PSO 算法和 ABC 算法对问题进行优化求解,并将优化结果与其他文献结果进行比较,说明群智能算法解决此类问题不但能得到较高精度的

(上接第 52 页)

这对提高实时性性能十分有利。所以,通过跨层优化、增强处理能力等手段实现更低的处理延迟也将是发展的趋势。

健全的安全体制:认知无线电的使用允许非授权用户使用授权用户的频带资源,这样就给无线通信系统以及智能电网的数据传输带来了一定的安全隐患,必须采用健全的安全体制来保证数据的安全、接入的安全和系统的安全。

结束语 认知无线电凭借其提高频谱资源利用率、提升频谱资源管理水平等技术优势在多个行业得到了应用研究。电力行业随着智能电网的发展对无线通信的需求更强,解决频谱资源匮乏问题意义重大。本文对国外关于认知无线电技术在智能电网中的相关研究成果的最新进展进行了阐述和分析,并结合我国智能电网发展的实际情况,探讨了下一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] 王军,李少谦. 认知无线电:原理、技术与发展趋势[J]. 中兴通讯技术,2007,13(3):1-4
[2] 刘云浩. 物联网导论[M]. 北京:科学出版社,2010
[3] Ranganathan R, Qiu R, Hu Zhen, et al. Cognitive Radio for Smart Grid: Theory, Algorithms, and Security[J]. International

优化结果,而且具有较高的计算效率,是解决螺旋桨参数优化问题的一种实用方法。

参 考 文 献

[1] Colorania, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[C]// Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. 1991:134-142
[2] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks, IV. Piscataway, NJ, 1995:1942-1948
[3] 李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38
[4] Eusuffm M, Lansey K E. Optimization of Water Distribution Network Design Using Shuffled Frog Leaping Algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(3):210-225
[5] 张超群,郑建国. 蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2011, 28(9):20-28
[6] 魏东. 约束直接搜索法求解螺旋桨参数优化设计问题[J]. 上海交通大学学报,1997,31(11):91-95
[7] 冯峰,黄胜. 人工神经网络在螺旋桨设计中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2002,23(2):1-4
[8] 王广东,杨丽,余建星. 基于改进进化算法的螺旋桨设计方法研究[J]. 船舶工程,2004,26(2):20-23
[9] 张忠业,王言英. 油船大侧斜桨的设计模型试验研究[J]. 船舶工程,1994(3):12-18
[10] 王国强,盛振邦. 船舶推进[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007
Journal of Digital Multimedia Broadcasting; Special Issue: Communications and Networking for Smart Grid: Technology and Practice, 2011:1-14
[4] Qiu R, Hu Zhen, Chen Zhe, et al. Cognitive Radio Network for the Smart Grid: Experimental System Architecture, Control Algorithms, Security, and Microgrid Testbed[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4):724-740
[5] Ettus Research LLC [OL]. URL <http://www.ettus.com/>, 2010-07
[6] Amiri K, Sun Y, Murphy P, et al. WARP, a unified wireless network testbed for education and research[C]// IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education, 2007. San Diego, CA, 2007:53-54
[7] Mango Communications[OL]. URL <http://www.mangocomm.com/>, 2010-09
[8] Tan Kun, Liu He, Zhang Jian-song, et al. Sora: high performance software radio using general purpose multi-core processors[J]. Communications of the ACM, 2011, 54(1):99-107
[9] Yu Rong, Zhang Yan, Gjessing S, et al. Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid[J]. IEEE Network, 2011, 25(5):6-14