

内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化方法研究

杨松林¹, 杨昭龙², 张火明³

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 3. 中国计量学院, 浙江 杭州 310018)

提 要 建立了内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化的数学模型, 基于并行算法、遗传算法和分层思想, 构造了一种基于敏感变量分段的分层并行遗传复合算法, 并将其应用于求解此类综合优化计算问题。对于内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化问题, 进行了遗传算法或并行遗传算法及其分层并行遗传算法的大量优化计算, 结果表明: 该复合算法不但能有效地克服遗传算法的早熟问题, 而且计算可靠、效率高; 为内河大型船舶设计方案的综合评估及综合优化船型设计准备了前提条件。

关键词 内河船 快速性 结构强度 结构稳定性
最优设计 遗传算法

中图分类号 U662 **文献标识码** B

1 引言

随着现代化生产的高速发展和科学技术的进步, 特别是计算机软硬件技术的飞速发展, 使得最优优化理论及其应用日益受到科技人员的广泛重视。目前, 它已渗透到科研与设计、生产与管理、商业与军事等各领域。优化方法通常可分为常规优化方法和现代优化方法两类。常规优化方法常常陷入局部最优而不能自拔, 全局寻优能力差, 一般不适合于多变量、多约束和多目标的复杂优化问题的求解; 而现代优化方法的遗传算法及其复合方法, 具有很强的全局寻优能力。近年来, 遗传算法或模糊遗传等算法已被用于求解复杂船舶工程中的优化问题。但是, 对于兼顾船舶主尺度受限条件下的船舶航行力学性能及结构力学特性综合优化这种必须合理处理大量错综复杂关系的工程优化问题, 如果也采用常规遗传算法或模糊遗传算法完成寻优计算, 那么, 优化计算耗时将会很长; 而如果将优化计算的代数降下来, 那么优化计算过程中, 早熟现象概率较高的问题又不可避免。因此, 本文尝试论述将基于并行算法、遗

传与分层分析思想所构造的一种基于敏感变量分段的分层并行遗传复合算法, 并介绍将其应用于内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化计算中的研究结果。

2 分层并行遗传算法

2.1 分层并行遗传算法概要

遗传算法是基于达尔文的生物遗传及进化原理和遗传学的随机交换理论发展起来的一种新的寻优方法; 遗传算法与一般的优化方法相比, 它具有全局性、快速性、适应性和鲁棒性等优点。近十多年的研究和应用实践表明, 该算法具有解决复杂系统优化问题的非凡能力。但是, 这种算法的运行过程及实现方法本质上仍是串行的。因此, 在求解一些实际优化问题时, 特别是非常复杂的系统优化问题时, 它一般具有很大的群体规模, 从而使得算法的遗传进化运算过程进展缓慢, 导致计算耗时长、效率相对较低。应用实践表明, 并行算法、遗传算法和分层分析思想相结合, 形成一种合理寻优构造有望解决上述问题。考虑到遗传算法用于求解内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化这类非常复杂的多目标、多约束和多变量工程优化设计问题所带来的特大种群规模和特别复杂的适应度函数, 以及处理和计算时间过长或较大概率的早熟问题, 本文采用的基于敏感变量分段的分层并行遗传算法优化计算分两步走: 首先, 采用遗传算法进行 10 个以上种群有限代数计算, 寻优区间为敏感参数可行域各分段全面交叉与剩余变量可行域的组合; 第二步是在遗传算法优化结果(6 至 12 组最优结果)的小范围内, 再采用遗传算法进一步完成最优点的计算。例如, 某优化问题共涉及 6 个变量, 其中 2 个敏感变量, 而这两个敏感变量中, 一个可行域等分为 5 个段, 另一个分为 6 个段。由于两个敏感变量可行域分段全面交叉组合为 30, 因此, 可得新的寻优区间等于 30。一般种群数选定为新寻优区间数的整数倍, 并且将其

平均分配给各区间。

2.2 遗传算法实现细节

(1) 初始种群的确定。运用遗传算法进行优化计算时,如何确定初始种群是个很重要的问题,它和编码方案息息相关。在本文给出的算法中,假定一代种群的确定包括每个个体的适值、相对适值、累积适值、对应每维变量下限、对应每维变量上限和基因组共6项。

(2) 编码。一般遗传算法中,染色体编码都采用0、1二进制串。考虑到优化数学模型变量较多,为节约编码、解码过程机时消耗,提高优化进程的速度,本算法的染色体采用浮点数据编码。

(3) 适值(Fitness)。对于无约束优化问题,适值可取为该问题的优化目标值。但对于有约束的优化问题,适值就不一定是该问题的优化目标值,而其对对应关系应是明显的。实际上,正是通过适值的合适选取,可将约束优化问题转化成无约束优化问题。约束优化问题的一个可行解应满足约束条件,而最优解不但要满足约束条件,还必须使得目标函数值最大或最小。这样,“染色体(Chromosome)”的“适值”应包括两方面信息,一是该“染色体”满足约束程度,一是该“染色体”优化目标函数值。

(4) 选择。选择是实现进化的重要一环,许多学者提出了种种不同的选择方法,这里采用比较通用的轮盘赌法。

(5) 交叉。遗传系统的一个重要的参数是杂交概率 p_c ,本算法取为0.8,此概率给出预计要进行杂交的染色体个数是 $p_c=0.85$ 。

(6) 变异。遗传系统的另一个重要系统参数是变异概率 p_m ,它给出预计的变异位数,对杂交后的当前群体中的每个染色体和染色体中的每个位,即产生在区间 $[0,1]$ 里的一随机浮点数 r ;如果 $r < p_m$,变异此位。本算法设定 p_m 为0.1。

(7) 进化停机准则。如果对遗传算法的搜索过程进行跟踪观察,我们会发现它将很快收敛于一稳定的最优解。这样,我们可以设定一个最大叠代次数,例如300,并认为进化到300代即可停止演化,亦即第300代中最好的染色体即是问题的最优解。在实际优化过程中,为提高计算速度,可每隔10代判断一下叠代是否收敛。方法是,计算出该代个体的适值的方差,当它小于给定值 ϵ_s (可取为 $1.0e-5$)时,即认为找到最优解,可提前停止搜索。

3 综合优化数学模型

内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化,包括两大部分:即船舶快速性能和结构力学特性的优化。

本文将快速性能指标和结构力学特性指标的加权和,作为综合优化目标函数,而将稳性和浮性等其他一些性能及船型主要要素(参数)的限制,作为优化约束条件,构成一种内河大型船舶性能和结构力学特性综合优化数学模型。具体描述如下。

3.1 设计变量

内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化计算需要兼顾的关系错综复杂,涉及的船型参数等因素也很多。经分类与分层综合权衡和比较分析,选定以下12个参数作为主要设计变量:船长 L ,船宽 B ,吃水 T ,方形系数 C_b ,中横剖面系数 C_m ,设计水线面系数 C_{wp} ,浮心纵向位置 L_{cb} ,螺旋桨直径 D_p ,螺旋桨盘面比 A_e/A_o ,螺旋桨螺距比 P/D_p ,螺旋桨转速 n ,设计航速 V_s 。为描述简单起见,将设计变量用一向量 X 表示,即:

$$X^T = \{L, B, T, C_b, C_m, C_{wp}, L_{cb}, D_p, A_e/A_o, P/D_p, n, V_s, \text{其他变量}\}.$$

3.2 目标函数

设 $P(X)$ 为总目标函数, $P_p(X)$ 为船舶快速性能优化目标函数, $P_s(X)$ 为船舶结构力学特性优化目标函数,那么有

$$P(X) = A_p P_p(X) + B_p P_s(X);$$

$$P_p(X) = C_{sp};$$

$$P_s(X) = B_{p1} J(X) + B_{p2} D(X),$$

式中

$$A_p \geq 0, B_p \geq 0, A_p + B_p = 1;$$

$$B_{p1} \geq 0, B_{p2} \geq 0, B_{p1} + B_{p2} = 1;$$

C_{sp} 是压缩至 $(0-1)$ 之间的船舶快速性指标 C ;

$J(X)$ 和 $D(X)$ 分别是压缩至 $(0-1)$ 之间的船舶结构静力特性和船舶结构动力特性指标。

$$C = P_e / \Delta^{2/3} V_s^3 \eta_o \eta_R \eta_H,$$

式中 Δ 是排水量, P_e 为有效功率, η_o 为螺旋桨敞水效率, η_H 为船身效率, η_R 为相对旋转效率。

3.3 约束条件

3.3.1 等式约束

(1) 满足浮性条件, $\Delta = LBTC_b$;

(2) 螺旋桨的有效推力与船舶航行时遭受的阻力相等;

(3) 设计状态下主机供给螺旋桨的转矩必须等于螺旋桨吸收的转矩。

3.3.2 不等式约束

- (1) 12 个设计变量取值范围;
- (2) 初稳性高度条件: 初稳性高 $G_M > a$;
- (3) 极限横摇幅值衡准条件: $\Phi_0 \leq b^\circ$;
- (4) 回转性衡准条件: 相对回转直径 $D_s' < c$;
- (5) 螺旋桨空泡要求: Keller 公式或其他。

4 优化计算及结果分析

4.1 优化计算

内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化是一个设计变量多、约束条件多和多目标权衡的

非常复杂的工程优化问题。笔者采用如上所述基于敏感变量分段的分层并行遗传算法,并为上述数学模型编制了计算软件。

由于篇幅所限,在此仅以双桨、排水量 4.3 万 t 大型中速内河运输船为计算和比较分析实例,该船优化设计变量范围如表 1。

选取 $A_p=0.75, B_p=0.25, J(x)=(10000-0.28L^{0.9624}B^{0.9014}T^{0.883}C_b^{0.037})/3000$ 。在一台 P4(主频 1.5GHz,内存 512MB,硬盘 40GB)计算机上完成了基于 6000 代遗传算法优化计算、基于 1000 代遗传算法的并行遗传算法的优化计算、基于敏感变量分段分层并行遗传算法的优化计算(第一层和第二层遗传计算分别为 100 代和 300 代),计算结果见表 2。

表 1 设计变量范围

	L	B	T	C_b	C_m	C_{wp}	L_{cb}	D_p	A_e/A_0	P/D_p	n	V_s
下限	219	28	8.8	0.59	0.94	0.74	-2.0	5.7	0.5	0.5	129	22
上限	240	31	9.7	0.696	0.99	0.78	0	6.5	0.9	1.1	160	25

表 2 不同优化方法计算结果

各参数名或符号	遗传算法的结果 (遗传计算 6000 代)	并行遗传算法的结果 (遗传计算 1000 代)	分层并行遗传算法的结果 (遗传计算 100 和 300 代)
总目标函数值	0.85074	0.86350	0.87919
$L(m)$	226.04	221.00	219.7
$B(m)$	29.02	29.06	28.71
$T(m)$	9.152	9.436	9.512
C_b	0.6955	0.6890	0.6958
C_m	0.9481	0.9894	0.9895
C_{wp}	0.7418	0.7436	0.7409
L_{cb}	-1.490	-1.848	-1.912
$D_p(m)$	6.132	6.310	6.330
A_e/A_0	0.5140	0.5020	0.5064
P/D_p	0.7882	0.7936	0.8120
$N(r/min)$	141.3	133.8	131.3
$V_s(kn)$	22.47	22.37	22.50
$1.0/C_{sp}$	69.88	71.43	72.36
桨轴数	2	2	2
桨类型	AU 型	AU 型	AU 型
桨叶数	4	4	4
排水量(t)	43003.69	43001.61	42997.96
有效推力	1654.68	1618.68	1627.21
船体阻力	1654.81	1618.54	1627.14
螺旋桨转矩	1847.78	1879.17	1920.86
主机供给螺旋桨转矩	1847.93	1879.01	1920.78
敞水效率 η_0	0.6735	0.6829	0.6853
有效功率	19122.98	18623.92	18828.33
主机功率	27660.29	26714.92	26815.56
傅汝德数	0.2455	0.2473	0.2494

入 ACCESS 内的一个数据库表内,已经达到整艘船生产设计数据同时能够检索的目的。如果多艘船所有分段零件需同时导入一个数据库的相同数据表内,则应保证两艘船分段名和零件代码不一样,否则系统将覆盖上一次导入的相同数据。多艘船生产设计零件表内容导入 ACCESS 内的数据表,应按上述步骤一一进行导入不同的数据表。在分段数据导入 ACCESS 内的数据表时,对导入数据进行检索分类是按照数据存储规则进行分类的。

4 总结

本文对船体内场业务据流程进行了分析优化,绘制出了船体内场业务流程图,同时设计了内场生产管理辅助软件,该软件能够将零件表内容转入数

据库,集合所有零散分段的加工与制造内容,方便管理人员是编制工作计划,使管理人员在信息处理、物料需求、人员需求等方面提前做好足准备,不至于在某一工位出现人员窝工、物料等待等不利于流水生产的现象。

5 参考文献

- 1 翁德伟. 造船成组技术. 上海:上海交通大学出版社
- 2 中国船舶工业总公司造船生产设计指导组编. 造船生产设计. 北京:国防工业出版社
- 3 姚巍. Visual Basic 数据库开发及工程实例. 北京:人民邮电出版社
- 4 关清玉,陈宇. 船舶生产设计日程管理系统研究. 船舶, 2005,(5):24

[上接第12页]

由上表易得,三个等式约束的满足程度高达 99.99% 以上;同时,不等式约束均获得 100% 的满足,说明上述优化方法计算可靠性良好。

4.2 结果分析

根据表 2,经过比较易得结论如下:

(1) 基于遗传算法 6000 代的优化计算的总目标函数值为 0.85074,较基于 1000 代遗传算法的(12 个种群)并行遗传算法的优化计算的目标函数值 0.86350 低约 1.48%,呈现出明显的早熟特征;可见并行算法明显占优。

(2) 基于分层并行遗传算法优化计算的目标函数值等于 0.87919,比基于 1000 代并行遗传算法的高 1.82%、比 6000 代遗传算法的高 3.34%。可见,分层并行遗传算法构造可以非常有效地提高求解复杂三多(多目标、多约束和多变量)工程优化问题的计算效率。

5 结束语

综上所述,本文提出了一种基于敏感变量分段的分层并行遗传算法,并应用于内河大型船舶快速性能及结构力学特性综合优化计算,结果表明:该算

法不但能有效地克服遗传算法的早熟问题,而且计算效率高。为有效解决复杂的三多(多目标、多约束和多变量)工程优化设计问题,提供了一种可借鉴的途径。

6 参考文献

- 1 [美]Z. 米凯利维茨,著. 周家驹,译. 演化程序——遗传算法与数据编码的结合. 北京:科学出版社,2000.
- 2 刘勇,康立山,陈毓屏. 非数值并行算法第二册·遗传算法. 北京:科学出版社,1998.
- 3 王健,王建华. 标准遗传算法的研究进展. 华东船舶工业学院学报,2000,(3):28
- 4 Yang Songlin, Zhang Huoming, Zhu Renqing, et al. The Synthesis Optimization of Ship Navigation Performance Based on Fuzzy-Genetic Algorithm. Third Conference for New Ship and Marine Technology. May 21-23, 2002. Kobe, Japan.
- 5 Yang Songlin, Zhou Yulong. A design method of hull form parameters for large-scale ship's optimal integrative navigation performance. Journal of Ship Mechanics, 2005,(6):