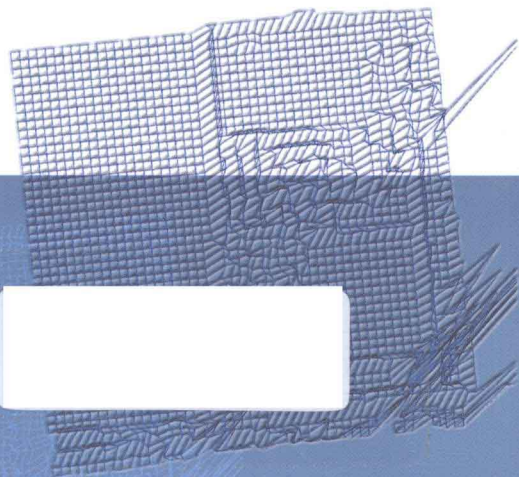


管路布局 优化方法及应用

GUANLU BUJU YOUHUA FANGFA JI YINGYONG

范小宁 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

管路布局优化方法及应用

范小宁 著

北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

船舶管系就像人体里的血管,有了它,才能使船上各系统的功能得以正常连接和发挥作用,它是船舶设计中重要的设计内容之一。管路布局设计类似于三维空间内的机器人路径寻优,从理论上讲属于组合优化 NP-hard 问题,传统优化算法很难在确定的时间内取得满意的优化效果。本书在总结前人研究的基础上,立足于三维空间,从当前最先进的智能优化应用遗传算法、退火遗传算法、蚁群算法、模糊理论、协同进化方法和专家系统方法入手,详细研究了船舶管路的布局优化方法。

本书可供从事船舶设计和研究的工程技术人员参考,也可供相关专业的教师、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

管路布局优化方法及应用/范小宁著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-5024-6206-2

I. ①管… II. ①范… III. ①船舶管系—布局—最佳化
IV. ①U664. 84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 054198 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6206-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 4 月第 1 版, 2013 年 4 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 5.625 印张; 148 千字; 165 页

28.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

船舶管系就像人身体里的血管，有了它，才能使船上各系统的功能得以正常连接和发挥作用，它是船舶设计中重要的设计内容之一。同时，管系设计的好坏直接关系到一条船的经济成本。船舶管系设计由 5 个连续的阶段组成：初步设计、功能设计、详细设计、生产设计和系统支持信息。管路布局设计是在二维或三维布局空间内寻找满足约束准则，并连接给定起点和终点的管道路径。占有管系详细设计 50% 的管路布局设计是管系详细设计阶段的重要组成部分。由于船舶管子数量庞大，约束繁杂及布局空间较大，目前在实践中，还主要依靠经验丰富的专家去完成。所以，管路布局设计优化非常困难、耗时，与整个船舶在利用先进技术方面相比严重滞后，并已成为制约船舶设计周期的“瓶颈”，是一项亟待解决的技术难题。为此，管路布局设计的自动化和优化对船舶设计质量，缩短造船周期有重要意义。

自 20 世纪 70 年代起，国内外学者就开始对管路布局设计问题进行研究，先后经历了从二维空间的简单约束发展到在三维空间内的多目标、多约束，提出了许多解决问题的方法或算法，为管路布局设计的进一步深入研究作了大量的有价值的研究工作，但到目前为止，还没有形成一套成熟的理论和理想的方法。

船舶管路布局设计类似于三维空间的机器人路径寻优,从理论上讲属于组合优化 NP-hard 问题。用经典优化方法去解决这类复杂的组合优化问题可能会花费很多时间去寻找最优解,有时甚至花费很多时间也难以找到最优解,并且随着问题规模的增加,其计算时间将会以指数速度延长。因此,对于这类问题,最合理的方法是那些可以在较短的时间内发现质量较高解的启发式算法。近年来,一类基于生物学、物理学和人工智能的具有全局优化性能、鲁棒性强、通用性强且适于并行处理的现代启发式 (meta-heuristic) 算法得到了很大的发展。这些启发式算法可分为模拟退火算法 (SA)、禁忌搜索算法 (TS)、遗传算法 (GA) 和蚁群优化算法 (ACO) 等。由于其高效的优化性能、无需问题特殊信息等优点,已广泛用于计算机科学、优化调度、运输问题、组合优化、工程优化设计等领域,并取得了一系列较好的实验效果,它们的出现为解决 NP-hard 组合优化问题提供了崭新的途径。

管路布局设计所要考虑的约束很多,有些约束可以表达成数学函数,进而在优化算法的编程过程中直接使用;但有些描述性约束却很难用数学函数公式化和直接使用。近 20 年来,传统 CAD 技术对设计生产产生了强大的推动力,但是,随着时间的推移,也越来越暴露出它所具有的缺陷:

- (1) 对模糊和不完整的设计表达无能为力;
- (2) 在设计过程中不能提供相关的知识;
- (3) 缺乏携带非几何数据信息的能力。

鉴于管路布局设计的特点和传统 CAD 技术的局限性,需

要寻找与管路布局相适应的基于知识的智能化设计新技术,这就是专家系统 (Expert System, ES)。专家系统是一类包含着知识和推理的智能计算机程序,其内部包含有大量的某个领域专家水平的知识和经验,能够利用人类专家的知识 and 解决问题的方法来处理该领域的问题,这非常适合于类似管路布局这种以设计者的经验为主要工具的多规则、多描述性和不确定性约束的设计任务。专家系统为多描述性规则的管路布局问题提供了可行的解决途径。

任何一种管路布局的优化方法或算法都要依靠相应的软件或软件开发平台来实现。当前,除专业的三维管道设计软件以外,高端三维 CAD 软件 (如 Tribon、CADD5、Pro-E 和 CATIA 等) 的出现,一方面为管路布局的三维放样提供了可能,另一方面也为管路布局的三维优化和自动化设计提供了可开发的软件平台。例如, CADD5 是目前我国船舶设计建造单位应用比较普遍的一种 CAD/CAM/CAE 软件产品,它含有 CADD5-CV HULL、CADD5-HVAC 等多个专业模块,可方便地应用于船舶设计与制造。PIPING 是 CADD5 中的专业管系设计模块,它的功能包括生成管系特征文件,管系建模,出图,生成各种图表、报告并提供程序分析用的数据等,是实际船舶设计生产中不可缺少的重要工具。另外, CADD5 软件还提供了两种强大的二次开发工具, CVMAC 和 CV-DORS。CVMAC 是一种功能强大的宏语言,它不仅可以在语句中直接调用 UNIX 和 CADD5 命令,而且可以通过 CALLF 调用 C 程序,实现 CADD5 的二次开发。由此可见,通过 CADD5 的二次开发工具可以把管路布局优化设计方法集成

到 CADSS5 中, 最终实现管路布局设计的可视化、自动化和优化。

本书主要介绍了船舶管路布局设计的优化方法, 重点介绍船舶管路布局设计的遗传算法、退火遗传算法、蚁群算法及多管路并行敷设的多蚁群协同进化算法及其应用。全书共分 6 章。第 1 章概述了船舶管路布局设计的重要性及其国内外研究现状。第 2 章介绍了船舶管路布局设计的遗传算法及自适应模拟退火遗传算法。第 3 章介绍了蚁群算法及船舶管路布局设计的蚁群管路敷设系统, 特别介绍了一种新的全局信息素更新方式——信息素迭代更新的全局信息素更新方式。第 4 章基于蚁群管路敷设系统对船舶管路布局中的能量函数进行了模糊处理, 使在管路布局设计中, 可以根据不同管路的不同需求建立符合需求的管路路径。第 5 章基于迭代更新蚁群管路敷设系统介绍了多管路并行敷设的多蚁群协同进化算法, 解决存在于船舶管路布局设计中需并行敷设的多管路协同布置的最优化问题。第 6 章介绍了船舶管路布局设计的专家系统模型及其工作过程, 并通过工程实例验证了该系统模型的可行性和有效性。

本书是作者近年来潜心学习和研究国内外计算智能理论、方法和应用, 并将其用于解决船舶管路布局设计的一个总结。目的是拓宽读者思路, 更好地了解智能理论及其在不同学科领域的应用。本书写作时, 考虑到内容的前后连贯, 除对遗传算法, 模拟退火算法及蚁群算法等的生物学背景、算法结构等作了必要的诠释外, 更多的是作者自己的研究成果和心得。

本书在写作过程中，得到了大连理工大学船舶工程学院教授、博士生导师林焰和纪卓尚的热心指导和鼓励，特在此向他们表示衷心的感谢。同时感谢为本书的完成提供帮助的陆丛红、于雁云、秦品乐、宋杨、周利东、张喜清、渠晓刚、王全伟博士及程慧、戚其松、陶冶、毕晓恒同学。另外，在写作过程中，参考了大量的相关书籍和文献，在此向这些作者致以诚挚的谢意！

由于本书涉及的研究范围广泛，近年的研究成果如雨后春笋，层出不穷。限于作者的水平，书中难免存有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 船舶管路布局设计概述	1
1.2 管路布局优化设计国内外研究概况	3
1.2.1 迷宫法	4
1.2.2 逃逸法	6
1.2.3 网络优化算法	7
1.2.4 Zhu 算法	8
1.2.5 遗传算法	9
1.2.6 专家系统和模糊集理论	11
1.2.7 单元生成法	12
1.3 国内船舶管路布局设计现状	12
2 基于遗传算法的船舶管路布局优化研究	15
2.1 遗传算法	16
2.1.1 生物进化及遗传算法的产生和发展	16
2.1.2 遗传算法的基本思想和体系结构	18
2.1.3 遗传算法的计算步骤和基本流程	21
2.1.4 遗传算法的主要特点	22
2.1.5 遗传算法在管路布置相关领域中的应用	24
2.2 应用于船舶管路三维布局优化的遗传算法	26
2.2.1 算法操作与关键参数设计	26
2.2.2 计算仿真	35

2.3 改进的遗传算法	40
2.3.1 遗传算法的局限性	40
2.3.2 自适应遗传算法	41
2.3.3 模拟退火遗传算法	42
2.4 自适应退火遗传算法的船舶管路布局优化方法	44
2.4.1 算法改进措施	45
2.4.2 算法计算步骤	48
2.4.3 仿真实验	49
3 蚁群管路敷设系统及其参数的敏感性分析	55
3.1 蚁群优化算法	55
3.1.1 蚂蚁的觅食行为	55
3.1.2 蚁群算法的产生及其研究进展	57
3.1.3 基本蚁群优化算法及其改进算法	59
3.1.4 一般蚁群算法的组织结构	64
3.1.5 蚁群算法的应用	65
3.2 基于全局信息素迭代更新的蚁群管路敷设系统	68
3.2.1 算法构成及实现	68
3.2.2 仿真计算一	73
3.2.3 仿真计算二	79
3.3 迭代更新蚁群管路敷设系统参数的敏感性分析	83
3.3.1 局部信息素残留系数 γ 对算法性能的影响	83
3.3.2 全局信息素残留系数 ρ 对算法性能的影响	85
3.3.3 信息素权重 α 和启发式信息权重 β 对算法性能的影响	87
3.3.4 蚁群总数 m 对算法性能的影响	88
3.3.5 结论	89
4 模糊集合理论在管路布局中的应用	92
4.1 模糊子集和隶属函数	93

4.1.1	集合的特征函数	93
4.1.2	模糊子集定义	93
4.1.3	确定隶属函数的基本原则及常用的隶属函数	94
4.2	存在于船舶管路布局中的模糊问题及其隶属函数的建立	97
4.2.1	阀的操纵频率	97
4.2.2	阀的可操纵性	97
4.2.3	管路布局空间的区域划分	100
4.3	基于模糊的蚁群管路敷设系统	102
4.4	计算仿真	102
4.4.1	参数设置	102
4.4.2	模型空间	103
4.4.3	优化目标	104
4.4.4	布局结果	105
5	多管路并行敷设的多蚁群协同进化算法	110
5.1	协同进化算法	111
5.1.1	生物的竞争、协同及协同进化	111
5.1.2	协同进化算法的模型及其发展	112
5.1.3	协同进化算法的基本特征和类型	114
5.2	多种群互利共生类协同进化算法	115
5.3	多蚁群协作式协同进化算法	117
5.3.1	多蚁群协作式协同进化算法模型	117
5.3.2	多蚁群协作式协同进化算法流程及其实现	119
5.3.3	计算仿真	122
6	船舶管路布置设计专家系统模型	126
6.1	人工智能和专家系统	126
6.2	专家系统在船舶设计中的应用	131
6.3	船舶管路布置设计的专家系统	132

X 目 录

6.3.1 系统框架	134
6.3.2 工作过程	137
6.3.3 知识分类	143
6.3.4 知识表示	145
6.3.5 推理机制	147
6.4 应用实例	149
6.5 船舶管路布置设计专家系统发展前景展望	151
参考文献	153

1 绪 论

1.1 船舶管路布局设计概述

船舶管系是分布于船舶各舱室及甲板用以传输气体或液体的管路系统,其主要由管子、阀、法兰、管子支撑、管子连接件、设备等组成。管系设计是船舶设计中重要的设计步骤之一,良好的管系设计对于整个船舶安全可靠地、方便地操作、维修及保证船舶各种机械的正常运转和船舶的安全航行起着不可替代的作用。同时,管系设计的好坏也直接关系到一条船的经济成本。随着市场竞争的激烈,低成本、高性能及满足制造、安装和维护约束的生产产品已成为各大船厂努力追求的目标。在现代船舶设计中,管系设计占有很大的比重,即使最简单的商船也需要 15~20 种管路系统。所以,管系设计对船舶的性能及成本均产生重大影响。

船舶管系设计由以下 5 个连续的阶段组成:初步设计、功能设计、详细设计、生产设计和系统支持信息(system-supports information)。管路布局设计是管系详细设计阶段的重要组成部分,其决定着管系详细设计中及其后的其他各个设计步骤,因此,可以说管路布局设计是管系设计的重要内容,管路布局设计在管系设计中所处的地位如图 1.1 所示。管路布局设计是在给定的几何、拓扑、技术、规则等约束中求解各种可行管路布置结果的过程。从几何意义上看,也就是在限定的布置空间中,管线从指定起点开始寻找出一条不与其他布置物体发生干涉,且满足各种约束条件的到指定终点的无碰撞路径,其中的一些主要约束有:

(1) 物理约束:避开障碍物(舱壁,机器设备,过道,已敷设的管路等)。

(2) 经济约束:管路长度最短,弯头数最少。

(3) 安全及规范约束:保证管路和管路之间,及管路与设

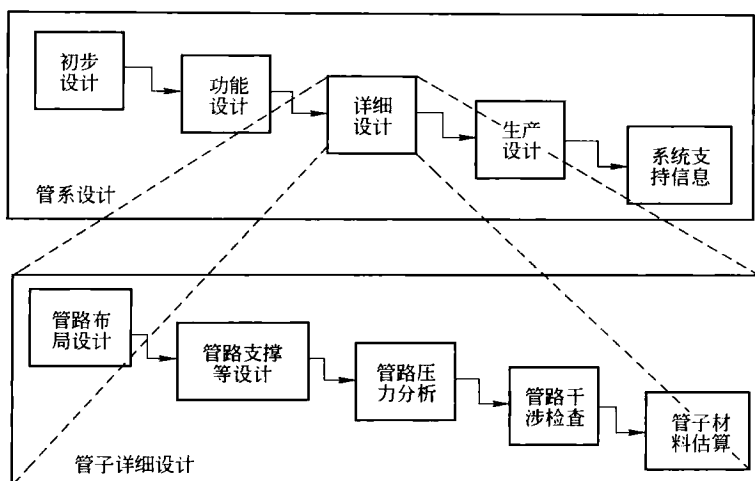


图 1.1 管路布局设计在管系设计中所处的地位

备之间的最小间距；油管应避免在锅炉、烟道、蒸汽管、废气管及消声器的上方。

(4) 生产及安装约束：先布置粗管后布置细管，管路应尽量沿着舱壁、设备及管路支架正交并成束敷设，以简化支撑、节省空间及美化外观。

(5) 操作及维护性约束：阀及控制装置应避开障碍物并处在易维护的范围内。

(6) 力学约束：管路布局同时应满足管系的力学要求。

另外，管路布局还应该考虑其他一些问题，例如：

(1) 管路必须排列整齐，对各个系统的每个阀门需要做有规则的整齐布置。

(2) 要为建造和维修阶段所用的吊车、绞车和移动设备提供操作空间。

(3) 应尽可能不要将管路放置在像泵和压缩机这样的设备上。

(4) 水平与垂直管路敷设应在管路垂直位移最小的位置支撑。

(5) 由于热膨胀的因素要考虑管子布置的灵活性。

(6) 需经常操作及维修的设备要留有较大的维修和操作空间, 等等。

由于船舶上管子及其附件的数量和种类较多, 约束条件纷繁复杂, 不同种类的管子约束条件不同, 同种管子在不同的布局环境中, 约束条件也不一样。良好的管路布局设计, 不仅需要对系统工艺、设备情况、有关标准规范、操作维修方式、船舶安全防火、各种配管材料性能价格以及结构、振动、支撑、绝缘等多方面情况的透彻了解和实际经验, 而且需要各种方案的反复比较, 并非只是简单遵循规范就能解决的问题。再有, 许多实际管路设计所需的知识经验和技巧不可能由现成的标准规范所涵盖, 需设计人员反复思考才能逐步积累, 而一些宝贵的设计经验有可能会随着有经验的管路设计专业人员的逐年离退而丢失, 这就使得管子设计任务十分繁重。因此, 如何缩短管系设计时间, 提高管系设计质量, 对于缩短整个造船周期, 提高经济效益, 有着重要的意义。

1.2 管路布局优化设计国内外研究概况

自 20 世纪 70 年代起, 国内外学者就开始对管路布局设计问题进行研究, 先后经历了从二维空间的简单约束发展到在三维空间内的多目标、多约束。所使用的方法在总体上可分为: 单元分解法、智能法及单元生成法。它们是试凑法、动态规划法、迷宫法、逃逸法、网络优化法、Zhu 算法、遗传算法、专家系统和模糊集理论及单元生成法, 见表 1.1 ~ 表 1.2。有些方法在一定程度上已被应用在实践中并解决了一定的实际问题, 但到目前为止, 由于管路敷设约束的复杂性, 管路布局设计还没有形成一套成熟的理论和理想的方法, 其仍然是一个有待于彻底解决的智能问题。下面简要介绍一些应用在管路布局中的主要方法。

表 1.1 管路布局设计国内研究概况

方 法	报道时间	作 者	应用领域
CAD 试探法	1997 年	王志红	试验台
迷宫法	1997 年, 1998 年 2003 年	陈鹰 樊江	液压 航空发动机
遗传算法	2004 年	樊江	航空发动机
专家系统方法	2001 年	张大船	工厂

表 1.2 管路布局设计国外研究概况

方 法	报道时间	作 者	应用领域
迷宫法	1975 年 1986 年	Rourke P. W. Mitsuta T.	一般 一般
迷宫法 和逃逸法	1998 年 2000 年 2004 年	Schmidt-Traub Aleksander Burdorf A.	工厂 船舶 工厂
网络优化算法	1972 年 1974 年 1993 年 1998 年	Newell Wangdahl G. E. Guiradello R. Guiradello R.	工厂 船舶 工厂 工厂
Zhu 算法	1991 年	David Zhu	一般
遗传算法	1997 年, 1998 年 1998 年 1999 年	Dae Gyu Kim Wei Chen Ito T.	工厂 汽车 一般
专家系统方法	1998 年 1999 年	Wu B. C. Kang S.	船舶 船舶
单元生成方法	2002 年	Jin Hyung Park	船舶

1.2.1 迷宫法

为解决像电子线路图这样的逻辑图的最短连接路径问题, Lee 于 1961 年首次提出了迷宫算法 (maze algorithm)。迷宫法主要是基于波的连续扩散原理, 如图 1.2 所示。本质上是一种遍历性质的逐点查找法。首先, 将布局空间划分为单元网格, 带阴影

的单元表示障碍物；其次，路径从起点单元 S 开始向外扩散，扩散的方法是把与 S 单元在正交方向邻接的单元标为 1，再把与 1 单元在正交方向邻接的单元标为 2，以此类推，直到到达目标单元 T 为止；最后，按数字递增的顺序顺次从起点连接到终点就形成了一条最短可行路径。

2	1	2	3								
1	S	1	2								
2	1	2	3	4	5	6	7				
3	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
4	3	4	5	6	7	8	9				
5	4	5	6	7	8	9	10				
					9	10	11				
					10	11	12	13	14	15	
					11	12	13	14	15		
					12	13	14	15	T		
					13	14	15	16			