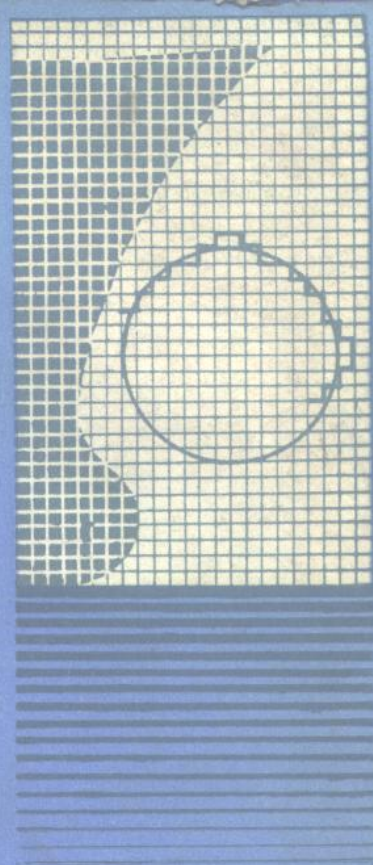


JI SUAN JI FU ZHU
CHUAN TI JIAN ZAO



计算机

辅助船体建造

上海交通大学出版社

5671.1

T 15

计算机辅助船体建造

脱天禄 李传曦 朱崇贤合编

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书是作者在镇江船舶工程学院和上海交通大学多年使用的教学讲义的基础上编写而成的, 经船舶工程专业教材编审小组定为高等院校船舶工程专业的教材。全书由三篇合成。第一篇, 数学准备知识、数学放样与数学展开; 第二篇, 自动控制基本知识、数控机床控制系统、数控绘图机和数控气割机、数控弯管机和数控肋骨冷弯机; 第三篇, 造船集成系统简介、数据处理和数据库方法概述、主要应用模块的设计思想和方法。

三篇均自成体系, 必要时可分开进行教学。全书的资料来源于实践, 但又不拘泥于实践, 而是将实践过程上升到理论高度来分析研究, 使之具备条理性; 同时在叙述上又紧密围绕实践过程而进行, 以资学有所获。全书重点放在数学模型的建立和分析上。

本书除了可作高等院校船舶工程专业教材外, 亦可供从事船舶工程方面的技术人员参考。

计算机辅助船体建造

上海交通大学出版社出版
(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行
常熟文化印刷厂排版印装



开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 431,000

1986 年 4 月第 1 版 1986 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—2,000

统一书号: 15324·183

教目: 2411

定价: 3.40 元

目 录

绪论	(1)
1 电子计算机、数控技术和计算机辅助制造	(1)
2 现代造船工业与电子计算机	(2)
3 造船生产自动化与数控技术	(3)
4 电子计算机和数控技术在造船工业中的应用	(5)
5 造船生产实施自动化应考虑的问题和经济效果	(6)

第一篇 数 学 放 样

第一章 数学准备知识	(8)
§ 1-1 曲面法和剖面线法	(8)
§ 1-2 插值问题	(9)
§ 1-3 拟合问题	(11)
§ 1-4 最小二乘法	(11)
§ 1-5 线性规划法	(13)
§ 1-6 样条函数	(31)
§ 1-7 Coons 曲面	(41)
第二章 数学放样与数学展开	(52)
§ 2-1 型线的光顺准则	(52)
§ 2-2 型值点的初光顺	(53)
§ 2-3 剖面线法船体线型数学放样	(55)
§ 2-4 船体外板的数学展开	(78)

第二篇 数 控 技 术

第三章 自动控制基本知识	(92)
§ 3-1 自动控制系统的分类	(92)
§ 3-2 自动控制系统的的基本环节	(94)
§ 3-3 拉氏变换	(98)
§ 3-4 传递函数与动态框图	(109)
§ 3-5 瞬态响应和稳态响应	(114)
§ 3-6 频率特性	(115)
§ 3-7 对自动控制系统的基本要求	(120)
§ 3-8 稳定性判据	(124)
第四章 数控机床控制系统	(128)
§ 4-1 数控机床概述	(128)

§ 4-2 数控系统中的元件	(131)
第五章 数控绘图机和数控气割机	(159)
§ 5-1 数控绘图机的组成、功能和过程	(159)
§ 5-2 数控绘图机的作图原理	(165)
§ 5-3 数控气割机	(179)
第六章 数控弯管机和数控肋骨冷弯机	(187)
§ 6-1 数控弯管机的工作原理	(187)
§ 6-2 SKWG-2 型数控弯管机简介	(189)
§ 6-3 数控肋骨冷弯机	(193)
第七章 手工编制数控程序	(199)
§ 7-1 程序编制概述	(199)
§ 7-2 手工编程	(206)

第三篇 造船集成系统

第八章 造船集成系统简介	(215)
§ 8-1 集成系统概述	(215)
§ 8-2 AUTOKON 系统简介	(217)
§ 8-3 FORAN 系统简介	(218)
§ 8-4 VIKING 系统简介	(220)
§ 8-5 HCS 系统简介	(221)
第九章 数据处理和数据库方法概述	(223)
§ 9-1 数据结构	(223)
§ 9-2 数据库的存储结构	(227)
§ 9-3 数据的查找	(229)
§ 9-4 排序	(230)
§ 9-5 存储结构和存取方法实例	(232)
§ 9-6 数据库管理系统简述	(234)
第十章 主要应用模块的设计思想和方法	(237)
§ 10-1 船型的产生和光顺	(237)
§ 10-2 自动编程和图形处理语言	(243)
§ 10-3 船体结构零件的生成——结构分析法	(260)
§ 10-4 最优变位胎架	(268)
§ 10-5 船体结构的后处理	(277)

绪 论

1 电子计算机、数控技术和计算机辅助制造

电子计算机、光纤通信和生物工程等重大科学技术的发展,带来了一场以信息为核心的新技术革命。这场革命,意义深远,影响甚广,波及世界各国,关系到各行各业。就机器制造、船舶制造行业而论,在这场技术革命中,也受到了重大的冲击,电子计算机迅速得到了应用。当然,这是一个逐步深化,逐步推广的过程。开始时仅是在少数单个项目中采用了计算机,以后扩大到将几个单个项目连接起来,进而根据产品设计与制造两大范畴,将各有关单项程序按最合理的顺序有机地结合起来,以形成计算机辅助设计系统(Computer-Aided Design System, CAD System, 简称机辅设计系统)和计算机辅助制造系统(Computer-Aided Manufacturing System, CAM System, 简称机助制造系统)。目前又按设计、制造、经营管理一体化的思路将这两大系统再行综合和补充,构成大规模的集成系统(integrated system)。这些系统都是以数据库为核心,实现数据共享,以充分运用计算机的运算功能,使设计、制造、经营管理过程达到更为先进的水平。所谓计算机辅助制造,就是利用电子计算机来控制产品的制造过程(例如产品的加工、装配、检验,原材料、预制件和半成品的传输,制造过程中的生产节拍,各种数据和信息的处理,计划调度,财务,销售,库存和设备维修等),并通过交互装置进行监测和调整。

随着计算机应用的推广和深入,也推动了数控技术(Numerical Control Technique, NC Technique)的发展。现代数控机床都有专用计算机作为本身的控制系统,以实现机床加工的自动化。计算机辅助制造是与数控技术的发展密切相关的,两者的结合也就构成了计算机辅助制造系统。机器制造业在开发和应用数控技术方面一直处于领先地位,也是采用数控技术最早、应用最为普遍的行业。数控概念始于二十世纪四十年代后期,首先由帕森斯(J. T. Parsons)提出采用数字方式来控制机床的运动部件,引导铣刀加工出光滑的曲线。当时的设想是将零件的坐标点用代码形式表示在穿孔卡片上,然后输入到机床的控制装置中,使机床的刀具按照微小的步长增量运动,以实现零件的加工要求。1947年,麻省理工学院(MIT)的伺服机构实验室根据帕森斯的设想,研究出一种实用的数控系统。在1957年,为了解决用户编制零件加工程序的困难,麻省理工学院又研制了一种适用于计算机的零件编程语言APT——自动编程方法(Auto Programming Tool)。在1962年,又公布了第一套用于一般工业生产的APT编程系统。以后数控技术在硬件(控制系统和机床)和软件(APT语言的改进和其他数控编程系统的发展)方面都得到了发展。到了七十年代,逐步形成了计算机辅助制造系统,其概念也就更为宽广,而数控技术只是其中的一个组成部分。为了保证加工机床的正确和连续运行,在机床控制装置和计算机的控制系统之间必须满足双向传送信息的条件,使机床控制装置和计算机形成有机的整体,以发挥机助制造系统的强大效能。

大型计算机辅助制造系统,通常含有二级或三级计算机分级结构。其中小型(微型)计算机负责管理一个单一的过程;中型计算机用以监视一群小型计算机,并向它们也发出指令;而中央计算机则负责整个信息的处理,并向中、小型计算机提供信息。理想的机助制造系统通

常应具有如下三个特点：能对整个生产过程进行监控，并将每一个单个过程中的人工干预工作减至最少；系统应当灵活（包括删除、拼接和扩展等），并允许各个过程能单独地编制程序；能方便地与机助设计系统结为一体，以实现数据共享。船舶制造业的技术进步，在很大程度上有赖于机器制造业的技术进步，因而在新技术的应用和开发方面，船舶制造业常滞后于机器制造业一段时期。对于造船业来说，计算机辅助制造系统还刚刚起步，主要是以船体建造为对象，并且局限于一些比较容易实现模拟的方面，如船体型线放样、外板展开、船体内部构件生成、套料、数控切割和数控绘图纸带生成、外板加工样板生成和最优胎架计算等。对于一些难以模拟的工序、甚至需要进行改造的工序而言，机助制造系统还存留着很多空白。至于将船舶动力装置、甲板机械和船舶电气设备等方面都包括进去的船舶计算机辅助制造系统，更非短时间内所能实现。造船工业在电子计算机应用及数控技术开发方面，任务还很艰巨，尚待作出更大的努力。

2 现代造船工业与电子计算机

人类物质文明的日益增长和生产技术水平的不断提高，给现代工业带来了两方面的特点：一是产品设计和生产过程日趋复杂，而且要求生产率高，能源和原材料耗费少、产品质量优良；另一方面要求善于经营管理，使产品适销对路、价格合理。否则，工厂就无法生存和发展。造船业本身具有国际性，我国造船工业除了应满足国内舰船需要之外，也需要进入国际市场，因此造船工业面临的市场竞争必然日趋激烈。分析国内外造船工业现状，利用电子计算机和自动控制技术（尤其是数值控制技术），使船舶设计、建造、经营管理实现自动化和一体化，是造船工业发展的趋势。

现代造船工业之所以迅速发展电子计算机的应用，其主要原因有如下几点：

（1）为了应付激烈的市场竞争

在激烈的市场竞争中，某个造船厂或整个造船工业的经营好坏，常以其能否最佳地利用人力、财力、物力，并善于掌握市场动态，及时地设计和建造出价格合理的、如航运业急需的船舶来衡量。为此就需要收集大量数据，分析船舶市场动向，经常了解船东的意向。当应用运筹学原理进行上述工作时，由于所处理的数据量庞大，而且还要及时更新，因此就必须采用储存量大的计算机。同时随着竞争的激烈化，用户对船舶技术经济指标的要求越来越高，故给船舶设计增添了一些苛严的条件，这就必须根据一系列技术要求和约束条件，以某种优化目标来进行船舶的设计，例如要求船舶满足速度最快、重量最轻、造价最低，以及其他综合性能指标等等。优化设计中的计算工作量极为浩繁，非手工计算所能胜任，只有借助于计算机才能实现。此外，为了争得船东的订货，还必须按照用户要求在限期内向他们提供设计方案和报价单。这种既要赶时间，又要检索和处理庞大信息的工作，除了利用计算机外，别无他途。

（2）由于设计过程的错综复杂

船舶设计是一个多种因素互相影响、关系错综复杂的过程。在获得最佳设计之前，必须对各种因素进行多方面的尝试和修改，使之逐步逼近最佳状态。这样，便需对大量数据作出处理和判断，而此种浩繁工作，若依靠人工方法来处理，既会感到时间窘迫，又难对各种可能的方案进行深入探讨，若利用计算机，则可争得充裕时间，可使设计臻于完善。

（3）需要在设计与生产之间建立密切的联系

设计与生产之间密切而有效的联系,对造船的经济效果会带来很大好处。在选择某种设计方案时,设计人员必须了解这种方案将给生产带来哪些影响,並需对此设计方案所需之成本进行估算,作出经济上的评价。而且,在生产中肯定会对设计的优劣作出检验,也应将这些信息反馈给设计人员。以上任务十分繁重,只有投入非常多的人力才能进行综合分析,但若利用计算机就会大大提高效率。

(4) 数控机床的需要

造船中各零部件在装配时的互相配合是很重要的。否则,由于加工的不精确和变形所造成的偏差和不光顺,常会增加修整和矫正工序,甚至造成返工,延误工期。利用数控机床来加工零部件就会获得较高的精确度,有利于提高装配和制造质量。可是数控机床所需要的控制信息,也需借助计算机来生成。

(5) 设计中的大量计算工作

船舶的设计常有大量数据需要处理和计算,这也需要借助计算机来完成。否则就要采取近似方法,使之适合手工计算。显然手工计算的精度不高,这必将影响设计的正确性和经济性。例如在大型油轮的结构设计中,为了详细校核各个区域的应力水平,常需使用大型计算机来处理有限元方法中的矩阵运算。

(6) 可精简人员

船舶设计和生产管理中的大量繁琐工作,可由计算机来处理,而将人力用在那些需要进行决策的部门中,用在从事新产品开发的部门中。这样可精简机构,减少人员,提高工作效率。

(7) 制订生产计划和进行经营管理

为了使生产计划和经营管理达到较高的水平,必须拥有大量数据,並采用适当的处理方法。但要使得到的结果符合客观实际,也只有采用计算机才能实现。

(8) 其他

计算机的数据处理能力和速度,为造船工业采用某些新工艺、新方法提供了更多的机会,也为造船工业走向自动化提供了广阔的前景。而计算机应用上的可扩展性和可修改性,为把其他行业所开发的计算机应用成果进行迅速移植,创造了条件。

3 造船生产自动化与数控技术

由于现代生产过程日趋复杂,因此对其中各道生产节拍的制定和配合要求比较严格,零部件的加工精度要求很高,从而对加工过程本身的响应速度和精度要求也就非常严格。此外,在生产过程中进行调整与控制时,尚需迅速及时地完成庞大的计算工作。这往往会超出人的生理条件,为人力所不及。

生产过程的自动化,是解决上述困难的有效途径。所谓自动化,就是整个生产过程中的各项运行动作不再由人来直接操作,而由机器根据人的事先安排进行控制和调度。实现这种功能的装置称为自动控制装置。如果说机械化可摆脱繁重的体力劳动,那末自动化不仅也可减轻体力劳动,且在某种程度上还可代替人的脑力劳动。实现生产过程的自动化,工人便可通过仪表、显示设备和控制机构,对机器设备的运行情况进行监控。尤其是在一些对人体健康有危害的生产过程中,(如毒性气体、电磁波、超声波、放射性物质、灰尘、高温、低温、潮湿和强烈光

线等),更有必要采用自动控制装置来进行生产。对于长时间从事单一重复作业的工种,易生疲劳,使效率降低,因而也有必要用自动装置来代替。自动化还可减少体力劳动与脑力劳动之间的差距,这给企业无疑会带来更高的效益。当然,生产过程的自动化对人员素质也会提出更高的要求,从而激励和迫使工作人员钻研科学文化,以提高自身的技术和管理水平。

生产过程的自动化并非一蹴而就的,而需经历一段较长的时间,先是某些过程的局部自动化、然后是综合自动化,最后达到全部自动化。局部自动化是指生产过程的自动化程度只限于某些个别的主要工序和辅助工序。综合自动化是指全部主要工序和辅助工序都由自动化机器所取代,并构成一个连续的控制系统,人的作用只限于监督生产过程的实施,分析生产过程的指标和调节设备的工况条件。全部自动化系指生产过程的各道工序均无需人直接参与,全部由机器来完成,其中包括对各项指标的分析,设备工况条件的调节,并使生产过程在给定条件下获得最佳指标等。

对于造船工业来说,由于产品批量小(有的为单件生产),品种多样,又是综合性的生产,实现生产自动化是有很困难的。但随着计算机和数控技术的发展,使造船工业生产的自动化有了可能。数控是利用数值作为控制手段,即用数字指令来控制一台或一群机械设备进行操作,并可根据所需的精确度监视操作的执行情况。控制的内容一般是位置、角度、速度,也可以是温度、压力、流量等物理量。这些量的大小应是可测的,并可转换成数值形式。利用电子数字计算机来实现的数控称为计算机管理的数控,它又可分为计算机数值控制(Computer Numerical Control, CNC)和直接数值控制(Direct Numerical Control, DNC)。前者是一台专用的计算机,读写存贮器中的控制程序,便可使机床按照给定的控制程序运行,故计算机数值控制又称为存贮程序的数字控制。由于是专用的计算机,所以一台计算机只能用来控制一台数控机床。后者由一组数控机床与一个共同的存贮器相连组成,存贮器用以贮存零件程序或机床程序,以备需要时分发给各个机床。这样,可用一台具有分时功能的计算机同时控制若干台数控机床,故直接数值控制采用的计算机必须是大型的。在直接数值控制的情况下,计算机可在实时基础上接收来自这些机床的反馈,并对所有生产工序作全面观察。直接数值控制还可按分级方式组成,即该计算机可和另外的计算机相连接,使后者执行生产管理和分析的功能,以提高生产效率。

现在,这种计算机管理的数控已用在多种机床(如铣、镗、磨等机床)上,并且增添了一些补偿功能(如刀具磨损),使某些工序的生产精度保持稳定。因此对于现代化先进工业,一提起数控技术,常常意味着要应用电子计算机。随着微型处理机的迅速发展,目前数控机床有直接利用单板作为数控装置的趋向,这为简化机床的控制装置提供了广阔的前景。

数控技术在造船工业中的应用,很大程度上变革了传统的造船工艺,成为促进发展新工艺的动力。从工艺方面来看,借助计算机和数控加工出来的零件,外形甚为精确。这给零件的装配带来了很大方便,使产品的质量提高;同时也为后面工序的机械化和自动化创造了良好的条件。

其次,从信息处理方面来看,信息的形态从图纸上的模拟量形式转变为数字量形式,提高了零件形状加工的准确性,使加工信息的处理速度大为提高;电子计算机的外部记忆装置,可系统地贮存所需要的数据,使数据得以共享。需要时可从中取出,并进行加工、修改和整理,这样就避免了重复工作,减少了由于转换过程中所产生的误差,从而提高了工作效率,缩短了工程周期。

4 电子计算机和数控技术在造船工业中的应用

国外造船工业使用计算机起自二十世纪五十年代。最初用在一些单项的常规设计计算中,如静水力计算、稳性计算等;而且当时只是利用计算机担任一些简单的四则运算,计算步骤与传统的手工计算相仿。以后随着计算技术的发展,计算机处理速度的提高和输入、输出设备的完善,计算机在造船工业中的应用范围迅速扩大。从六十年代起,计算机便陆续在以下各个方面得到应用:

(1) 船舶设计方面

如静水力计算,完整稳性和破舱稳性计算,可浸长度计算,阻力估算,推进器的理论设计和图谱设计计算,静水弯曲力矩和剪切力计算,船体型线或船体曲面生成,结构规范设计计算和有限元法结构分析,经济论证计算和各种优化设计等

(2) 船舶建造方面

如型线放样,外板展开和内部构件展开,船体零件的生成和套料,加工样板的生成,数控绘图机和气割机等数控纸带的生成等等。

(3) 生产经营管理方面

如生产计划和调度,生产进程图表制作,材料设备管理、供应和订货,库存管理,迅速及时地提供经营决策所需的各种信息,经济和财务数据(工资、工时消耗、材料消耗)的处理等。

世界上各主要造船国家(例如日本、瑞典、挪威、英国)为了充分发挥计算机的优点和扩大应用效果,以改变造船工业的面貌,提高竞争能力和取得最大的经济效益,从六十年代中期便开始致力“造船集成系统”的研制,希望达到“船舶设计、建造和经营管理一体化”。到目前为止,国外比较著名的造船集成系统有挪威的“AUTOKON”、日本的“HICAS”[●],瑞典的“VIKING”、西班牙的“FORAN”和英国的“BRITSHIPS”等。至于船舶建造中的数控机床,则以数控绘图机和数控切割机比较成熟,至于数控肋骨冷弯机、数控弯板机、数控胎架、数控电焊机、数控弯管机和数控螺旋桨加工铣床等,有的尚需改进,有的还有待开发。

自六十年代中期起,我国的电子数字计算机和数控技术开始用于造船生产中,以后陆续在船舶设计(如船体线型设计、船体结构设计、性能计算、船舶管系设计、船型方案的经济论证等,船舶建造(如线型光顺、外板展开、内部结构放样和展开、套料、最优胎架、数控绘图和数控切割用的纸带生成等);以及生产管理(如生产计划、劳动工资管理、材料统计等)等方面得到一定程度的应用。在数控技术上,也先后采用了数控绘图机和数控气割机,并研制有数控肋骨冷弯机、数控螺旋桨加工铣床。七十年代后期,我国从“一体化”思想出发,开始研制“造船集成系统”,到八十年代基本获得成功。目前能投入使用的有“HCS-2”(Hull Construction System)和“HDH-1”系统。目前这两个系统只在船体建造的部分工作中得到应用,其功能还有待进一步扩展和完善。

目前国内外的“造船集成系统”虽各有特色,功能有大有小,但它们离“设计、建造和生产管理一体化”的要求还有相当差距,需进一步扩大和完善。随着计算机硬件和软件(高度的数据处理技术水平和数据库)的发展,随着设计与建造方法的改进以及造船专用的数控机床的开发和完善,可以预期造船集成系统的内容将越来越丰富,范围愈来愈广,一种包括有设计、生产和

● 原为“HIZAC”,经改进后1980年起改为“HICAS”。

经营管理(包括报价)、财务器材管理等多功能的、高效率的集成系统的出现,将为期不远了。造船集成系统的出现,必将促进和加速企业之间和企业内部的专业化分工,而各项工作之间的衔接、作业调度和管理等,也将愈来愈显得重要。其结果必将使造船工业的体制发生深刻的变化,面貌为之一新,而经济效益更为显著。

5 造船生产实施自动化应考虑的问题和经济效果

造船生产过程实现自动化,首先要求其中各道基本工序和辅助工序实现机械化,并使生产过程形成流水作业线。满足流水作业法的基本原则是:

- 1) 制件由一个工位到另一工位的传送,应保持连续和均衡;
- 2) 应保证所有各工位上的作业都能同时(同步地)完成;
- 3) 作业人员的劳动分工比较明确;
- 4) 制件由一个工位传送到另一个工位的路径应最短。

由于造船工业的品种并非单一的,而且很少是大批量生产的,产品的改型和换代,产品的多样化,无疑给工艺装备的适应性带来很大困难;再加上产品的形状复杂和庞大,给流水生产带来很多不便。针对此种情况,就有必要使船体中的零部件实现标准化、系列化;明确划分生产中的各道工序,并保持各道工序的生产均衡;改进制造方法,使工艺装备得以规格化。这样才能建立合理的局部流水线,以后再逐步连接起来,以便达到全过程流水生产的目的。例如国内有的船厂已经在采用数学放样和号料(甚至包括气割)的流水线,钢材预处理流水线,以及船体平面分段装焊等局部流水线。造船生产自动化的流水线,还应考虑它的通用性,以便通过调整来适应产品的改型或更换产品的需要。

在实现自动化生产过程中,利用电子计算机和数控技术,除了可降低产品成本、提高经济效益外,而且还由于以下原因:

- 1) 设计和放样作业质量稳定;
- 2) 零部件加工精度提高,减少了修整工作量或返工,给后阶段装配焊接等工序带来方便(如有利于实现公差造船);
- 3) 加工工时和原材料消耗减少;
- 4) 现场施工质量比较稳定,产品的质量得到了保证等等。

这些都会给直接生产部门带来收益,也会给整个企业带来好处,前者称为直接经济收益,后者称为综合性经济收益。这两项之和即为总经济收益。

在拟定自动化规划并准备实施时,应根据基建投资的总经济效果 η 来衡量该项目的经济性:

$$\eta = \frac{F}{K},$$

式中 F 为自动化项目的每年总收益(元); K 为基建投资数(元)。

亦可根据基建投资回收期的年数 n 来衡量:

$$n = \frac{1}{\eta} = \frac{K}{F}.$$

在对若干个设计方案的经济性进行比较时,可根据其总成本 c 是否最小来衡量:

$$c = c_1 + \frac{K}{n_1} = \min,$$

式中 c_1 为生产中每年的日常费用(元); n_1 为规定或预期的投资回收期(年); K 为基建投资(元)。

确定投资回收期应考虑的因素很多,除了设备折旧率应符合国家的实际情况外,还应考虑市场的变动因素。如果投资回收期过长,除要承担沉重的利息外,而且资金周转慢,不利于设备更新和扩大再生产。同时设备陈旧后,技术性能下降,影响产品的质量,使产品失去竞争能力。如果投资回收期过短,每年摊入成本的设备折旧费用大,使得产品成本有所提高,也不利于市场竞争。同时由于利润减少,影响生产人员的物质利益,对调动生产积极性不利。严重时,甚至影响自动化设施效果的充分发挥。总之,确定投资回收期时,最根本的着眼点应放在获得最佳经济效益上。

生产过程的自动化虽是今后生产发展的总趋势,但自动化本身并不是目的,真正的目的则在于使生产过程能发挥最大的效益,满足社会的需要。在特定的社会条件下,生产过程自动化的实现,无时不受到社会实际需要和经济效果(除了企业本身,还要考虑能否促进整个国民经济效果的提高)的制约。脱离社会实际需要的前提,脱离经济效益,盲目地追求自动化,是毫无现实意义的。此种自动化必然也只能是空中楼阁而已。

参 考 文 献

- [1] 《第二届计算机在船舶设计和船厂生产自动化中应用国际会议的技术总结》,上海造船工艺研究所,1976年7月。
- [2] 《挪威电子计算机及数控技术在造船上应用考察总结》,上海造船工艺研究所,1976年8月。
- [3] 《一个面向船体建造的集成系统 HCS》,上海造船工艺研究所,1980年6月。
- [4] 何文蛟:《自动调整原理》,上海科学技术出版社,1959年5月。
- [5] B. K. Кузьменко, (上海造船工艺研究所译)《造船生产过程自动化与机械化》,上海人民出版社,1975年3月。
- [6] Roger S. Pressman, John E. Williams: Numerical Control and Computer-aided Manufacturing, John Wiley and Sons, Inc., 1977。
中译本:北京航空学院制造工程教研室译,《数字控制与计算机辅助制造》,国防工业出版社,1982年11月。
- [7] Chengi Kuo: Computer Application in Ship Technology, Heyden and Son, Ltd, 1977
中译本:周安庆译,《计算机在造船中的应用》,国防工业出版社 1983。

第一篇 数学放样

第一章 数学准备知识

以电子计算机为工具,运用数学原理和方法进行船体放样的工作称为“数学放样”,简称“数放”。“数放”的工作内容与手工放样相同,包括如下三个方面:

1. 船体线型放样;
2. 船体结构放样;
3. 外板展开。

目前,船体数学放样,在相当程度上仍处于模拟手工放样的水平。但随着数学理论和方法的不断改进,可以预期将它完全脱离模拟手工的放样方式,而使设计、放样以及优化技术浑然一体,而“数放”只不过是数学船型中光顺型线的一个组成部分。

数放在船体建造中之所以得到重视和不断发展,主要是由于以下原因:

1. 为造船自动化的完整体系奠定了基础。放样工作是船体建造中的第一道工序,采用数放后,必然会促进后续工序的发展。目前所应用的数控绘图机、数控切割机等所需数据都来自数放。数放无疑也会给其他数控机床提供数据,这样必将使造船工业形成一个完整的自动化体系,而数放正是这一体系的基础。

2. 进一步沟通设计和建造的关系。目前正在发展中的数学船型,既是一种船型设计方法,又是采用了数放中线型光顺的一种手段,使设计和生产之间的关系更为紧密。

3. 能减轻放样工人的劳动强度,缩短放样周期,降低原材料消耗,並提高放样的精度。

4. 可以取消造价昂贵的放样楼和样板贮存室。

§ 1-1 曲面法和剖面线法

从数学意义上说,数学放样就是在满足设计意图的前提下,根据线型图上的数据找出某种数学函数式,来表达船体的曲面形状、船体表面上的板缝线、内部结构与船体曲面的交线等。根据已知的函数式便可算出有关构件的各种数据和尺寸,求取它们的展开图形和加工成形的样板等。表达船体曲面的方法有两种,即曲面法和剖面线法。曲面法是将船体划分成许多曲面片,每一曲面片都用一个二元函数来表达。曲面法不象剖面线法那样需要考虑三个视图上所有投影点的一致性问题。但曲面法也存在不够完善的地方,主要有:

1. 缺乏曲面的光顺准则。用二元函数表达的曲面片,在拼接中很难进行光顺判断,因此,仍需在曲面上作出一系列剖面线,利用单根曲线的光顺准则予以检验。

2. 不易判别表面上的坏点,即使用剖面线法找出多余拐点,也不容易进行修改,而且在改坏坏点时,往往会使远离坏点处的好点变坏。

3. 用曲面法表达的区域最好是矩形,但对船体曲面而言,往往很难做到。故需经过变换

使其成为矩形,或用参数形式来表示曲面: $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$, $z = z(u, v)$ 。但这两种方法都会使计算工作量大大增加。

4. 对电子计算机的内存容量要求较大。

剖面线法与绘制船体的线型图一样,是用三组相互正交的平面来截割船体,各个平面与船体的交线即为剖面线。对这些剖面线,再分别找出一元函数予以表示。显然剖面线法所表达的船体只是三组离散的曲线,不是连续的曲面。为了保证船体的光顺性,不但需要对剖面线上相应点的一致性加以检验,而且对介于两邻近剖面之间曲面的光顺性,也需通过适当方法加以检验。这是剖面线法不及曲面法之处。但剖面线法需要找寻的是一元函数,这要比找二元函数方便;此外,单根曲线的光顺准则比较容易建立,曲线上坏点的判断和修改也比较容易。因此国内外目前采用剖面线法仍较多

计算过程中,输入数据的多少、迭代过程的长短、收敛性的好坏,以及所需电子计算机内存容量的大小,是评价数学放样方法的主要指标。

§ 1-2 插值问题

在船舶制造中,船体的几何形状是以船体型线图来表达的,从图中量取的数据,通常制成一型值表,用以表达船体的几何尺寸。但在绘制型线图的过程中,由于反复量取数据,不可避免地存在误差;加上型线图是一种缩小了的图形,使隐含的误差更难暴露,因此,必须放大型线图,并经过光顺、保证剖面线上各对应点的一致性后,方能作为施工的依据。技术设计所提供的型值表,姑且不论制图工具以及人工读取型值方面所带来的误差,就是型值表中型值的个数,也远远不敷确定构架(肋骨、纵向构件)轮廓形状的需要。型线图上的站线间距比肋骨间距要大若干倍,这必将产生这样的问题,即如何根据为数较少的型值来精确地找出那些介于站线间的肋骨框架的型值,从而确定船体纵向的线型,保证船体的光顺性。

从数学上说,型值是船体模曲面在三维直角坐标系中按一定规则分布的一系列离散点,因而型值表是船体模曲面函数(或船体曲面方程)的一种表达形式。当然,船体模曲面的值域是由一些边界条件来限定的。根据满足某曲面函数的一些已知离散点的坐标,来寻找该曲面上其他点的坐标,这在数学上称为插值问题。

概括地讲,当给定了函数 $f(x)$ 在区域 Ω 上的若干个互异点 $x_j = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 的函数值 $f(x_j)$ (或导数值 $f'(x_j)$, 或部分函数值及部分导数值), $j = 1, 2, \dots, n$, 或称给出函数 $f(x)$ 的一个数据表,现要寻求一个函数 $\varphi(x)$ 来近似地代替(或称逼近) $f(x)$, 使得它们在相应节点处的函数值(或导数值)相等,对非节点处的 $(x \in \Omega, x \neq x_j)$ 函数值,则用 $f(x) \approx \varphi(x)$ 来代替。这就是插值问题的一般定义。

$\varphi(x)$ 称为 $f(x)$ 的插值函数, x_j 称为插值节点。

插值问题通常涉及到以下三个方面的数学内涵:

1. 插值问题是否有解(即能否找到插值函数 $\varphi(x)$), 如果有解,解是否唯一;
2. 插值函数 $\varphi(x)$ 逼近于 $f(x)$ 的误差,即 $|\varphi(x) - f(x)|$ 如何估计;
3. 当插值节点无限加密时,插值函数 $\varphi(x)$ 是否收敛于 $f(x)$ 。

工程技术人员关心的只是应用问题,即根据实际情况恰当地选择插值函数,并希望计算方便,使逼近误差能在可接受的范围内。

一俟选定插值函数式, 就可根据所有离散点 $\varphi(x_j) = f(x_j)$, $j=1, 2, \dots, n$ (或简称点通过) 的条件, 建立方程组并解出该函数式的参量 (即插值函数各项的系数)。如果 $\varphi(x)$ 为含适当项数的代数多项式, 只要满足上述点点通过的条件, 线性方程组中系数矩阵的秩和参量的个数就保持相等, 则参量的解就是唯一的, 亦即该函数式的插值函数是唯一的。这种确定插值函数各项系数的方法称为待定系数法。

例 1-2-1: 若取一元二次代数多项式作为插值函数, 且三个相异的离散点的坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 求该代数多项式的系数。

解: 设插值函数 $y = f(x) = a_0x^2 + a_1x + a_2$, 根据点点通过的条件有

$$a_0x_1^2 + a_1x_1 + a_2 = y_1,$$

$$a_0x_2^2 + a_1x_2 + a_2 = y_2,$$

$$a_0x_3^2 + a_1x_3 + a_2 = y_3.$$

$$\begin{vmatrix} y_1 & x_1 & 1 \\ y_2 & x_2 & 1 \\ y_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

解得

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} y_1 & x_1 & 1 \\ y_2 & x_2 & 1 \\ y_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}},$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & y_3 & 1 \end{vmatrix}},$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

$$a_2 = \frac{\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}}.$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

因为三个离散点互异

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix} \neq 0,$$

所以 a_0, a_1, a_2 是唯一的。

从上例不难推论, 若已知 n 个互异的离散点的坐标为 (x_j, y_j) , $j=1, 2, \dots, n$, 当选择 $(n-1)$ 次代数多项式作为插值函数时, 其系数的解总是唯一的。

§ 1-3 拟合问题

上述插值问题,是针对离散点处的函数值 $\varphi(x_j) = y_j$, 在其他点处 $\varphi(x) \approx f(x)$ 的情况而言的。但型值表中所列各离散点的坐标,由于绘图工具、坐标读取等原因,总含有一定的误差,致使这些点的坐标不能满足未知函数关系式 $y = f(x)$ 。若此时仍以点点通过来求其逼近函数,则逼近效果显然是不会好的。为了使所求函数逼近效果更佳,这就产生了所谓拟合问题。拟合问题是,已知一系列实验数据 (x_j, y_j) , 其中 $x_j = (x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_m^{(j)})$, $y_j = f(x_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$, 如何使根据实践经验或理论分析所建立的数学模型,在包含有最大限度消除数据误差的优化判据条件下(或包含有最大限度消除数据误差在内的某种综合性优化目标条件下)找出函数 $y = \varphi(x)$, 来逼近未知函数 $y = f(x)$ 。

船体线型的数学放样,实质上就是根据综合性优化目标来求取船体曲面的拟合函数,而常用的方法有最小二乘法和线性规划法。

§ 1-4 最小二乘法

设真正的未知函数为 $y = f(x)$, 由实验测得表达此未知函数的一系列离散点坐标为 (x_j, y_j) , $j = 1, 2, \dots, n$, 现要在选定的函数式情况下,按概率最佳这一目标来求取其函数式的参数,以确定拟合函数 $y = \varphi(x)$ 。

在测量离散点坐标时,假定影响误差的各种偶然因素是相互独立的(或弱相关的),而且引起的误差都较微小。否则,必可分析出造成误差过大的那些非偶然因素,并予以剔除。

在坐标 x_j 处,每次测量所得的 $F(x_j)$ 值,都可看成是一实验或事件,而其读数 y_j , 就是实验或事件的结果,也可以认为是实验结果这个随机变量 Y_j 的取值。根据李雅普诺夫(Лъяпунов)定理可推得,当实验次数 $m \rightarrow \infty$ 时, Y_j 取值 y_j 的概率趋近于正态分布。在拟合时,既然用 $y = \varphi(x)$ 来逼近 $y = F(x)$, 于是随机变量 Y_j 的数学期望便为 $E(Y_j) = \varphi(x_j)$ 。再设随机变量 Y_j 的均方差为 σ_j , 且在各个 x_j 处 $F(x_j)$ 的测量精度都一样,即

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma = \text{常数}。$$

于是随机变量 Y_j 取值 y_j 的概率密度(或分布密度)按正态分布,则为

$$f_j(y_j) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[y_j - \varphi(x_j)]^2}{2\sigma^2}}$$

严格地说,随机变量 Y_j 是连续的,事件 $Y_j = y_j$ 的概率等于零。为此,我们就用概率元素来表达 Y_j 的概率,即计算 Y_j 落在区间 $[y_j, y_j + dy_j]$ 的概率,此时

$$P(y_j < Y_j < y_j + dy_j) = f_j(y_j) dy_j = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[y_j - \varphi(x_j)]^2}{2\sigma^2}} \cdot dy_j。$$

因实验是独立的,故随机变量 $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ 分别落在区间 $[y_j, y_j + dy_j]$, $j = 1, 2, \dots, n$ 的概率等于

$$\prod_{j=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[y_j - \varphi(x_j)]^2}{2\sigma^2}} \cdot \prod_{j=1}^n dy_j = k e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2} \cdot \prod_{j=1}^n dy_j, \quad (1-4-1)$$

式中 k 为不依赖于 $\varphi(x_j)$ 的系数。

从上式可知,欲使随机变量 $Y_j, j=1, 2, \dots, n$ 之概率为最大,必须使

$$I = \sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2 = \min.$$

因 $\varphi(x)$ 的具体确定,取决于它的各项的系数,即 $\varphi(x)$ 的参量 $a_1, a_2, \dots, a_k$, 故要解得一组参量 $a_1, a_2, \dots, a_k$ 使 $\sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2 = \min$ 。根据多元函数极值的必要条件,此时有

$$\frac{\partial I}{\partial a_i} = \frac{\partial I}{\partial a_i} \sum_{j=1}^n [y_j + \varphi(x_j)]^2 = 0, i=1, 2, \dots, k, \quad (1-4-2)$$

或
$$\sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)] \frac{\partial \varphi}{\partial a_i} = 0, i=1, 2, \dots, k. \quad (1-4-2')$$

(1-4-2') 式是一包含 $a_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的线性方程组,如能从中解出 a_i , 则可得到 $y = \varphi(x, a_0, a_1, \dots, a_k)$ 。由于 $i \neq j$ 时, $x_i \neq x_j$, 若要使 (1-4-2') 式线性方程组有唯一的解,则 n 应大于 k , 或是所给出的 x_i 的总个数应大于待定系数的个数。

以上所谓的概率最大,是相对于已选定的拟合函数式而言的。函数式不同,其最大概率也不同。所以要提高拟合效果,仍在于如何根据实践经验选取拟合函数式。

最小二乘法的物理意义可解释如下: $I = \sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2$ 为各节点处测量误差的平方和,即表征测量结果 y_j 和拟合函数值 $\varphi(x_j) (j=1, 2, \dots, n)$ 偏离的程度。 $I = \sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2 = \min$, 是使离散点对于所选定的拟合函数偏离最小。这种确定拟合函数参数 $a_1, a_2, \dots, a_k$ 的方法,是建立在以测量误差平方和为最小的基础上,故称为最小二乘法。

例 1-4-1: 已知 n 个型值点 $P_j(x_j, y_j), j=1, 2, \dots, n$, 若选用 m 次多项式 $\varphi(x) = \sum_{i=0}^m a_i x_i^i$ 并用最小二乘法来拟合时,试求出他的以 $a_i (i=0, 1, 2, \dots, m)$ 为系数的线性方程组。

解:
$$I = \sum_{j=1}^n [y_j - \varphi(x_j)]^2 = \sum_{j=1}^n [y_j - \sum_{i=0}^m a_i x_j^i]^2 = \min,$$

$$\frac{\partial I}{\partial a_k} = 2 \sum_{j=1}^n x_j^k (y_j - \sum_{i=0}^m a_i x_j^i) = 0, k=0, 1, 2, \dots, m,$$

即
$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^m a_i x_j^{i+k} = \sum_{j=1}^n x_j^k y_j, k=0, 1, 2, \dots, m.$$

故系数 $a_i (i=0, 1, 2, \dots, m)$ 的线性方程组为

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^m a_i x_j^{i+k} = \sum_{j=1}^n \left[\left(\sum_{i=0}^m x_j^{i+k} \right) a_i \right] = \sum_{j=1}^n x_j^k y_j, k=0, 1, 2, \dots, m.$$

但此处约定,当 $x_j=0$ 及 $i+k=0$ 时, $x_j^{i+k}=1$ 。

如果在各个节点 x_j 处的测量精确度不同,或要求对各个节点 x_j 处的测量精确度作不同程度的限制,这在(1-4-1)式中便反映为各个节点 x_j 处的 σ_j 不同,此时(1-4-1)式相应地变成

$$\prod_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[y_j - \varphi(x_j)]^2}{2\sigma_j^2}} \cdot \prod_{j=1}^n dy_j = k' e^{-\sum_{j=1}^n \frac{1}{2\sigma_j^2} [y_j - \varphi(x_j)]^2} \cdot \prod_{j=1}^n dy_j, \quad (1-4-3)$$

式中 k' 为不依赖于 $\varphi(x_j)$ 的系数。

令 $W_j = \frac{1}{2\sigma_j^2}$, 并称 W_j 为权因子,于是

$$I = \sum_{j=1}^n W_j [y_j - \varphi(x_j)]^2 = \min. \quad (1-4-4)$$