

# 关于船体建造补偿量的加放

郭荣奎, 唐建琼

(上海外高桥造船有限公司 综合技术室, 上海 200137)

**提 要** 讨论了精度管理在船体建造中的补偿量加放问题。补偿量是决定精度管理成败的关键内容。本文从补偿量发展过程, 补偿量加放是精度管理的基础, 与造船科技水平的关系, 与国外先进造船国家的差距, 补偿量加放的作用及其经济和社会效益等方面进行论述。

**主题词** 无余量造船法 精度管理 船体装配  
尺寸 补偿

## 1 引言

船体建造精度管理从国外引进至今, 目前已在国内造船上得到较广的应用和较快的发展。精度管理最终要用补偿量来代替余量, 因此, 补偿量的确定是船体精度控制中的核心内容, 补偿量的加放恰当与否, 将直接关系到船体精度控制的成败。

中国船舶工业集团公司将此作为对造船企业技术考核内容之一, 但提出的是无余量制造和无余量下坞的指标。其实, 无余量这个概念比较广, 它包含两层意思, 一是分段有余量, 通过切割余量后为无余量制造; 另一是施工过程本身就是无余量的, 我们一般称为精度分段, 即从内部构件到分段完成直接就是无余量的。显然, 后者相对前者来说, 设计、工艺、施工难度要大多了, 而关键的难点就在补偿量的加放。

## 2 国内外造船精度控制的发展过程和发展趋势

在补偿量加放上, 无论在国外, 还是国内, 都经历了一个漫长的发展过程。

### 2.1 船体建造精度控制的三个发展阶段

船体建造精度控制技术开始于上世纪 40 年代, 到目前为止经历了二个发展阶段。

(1) 分段搭载前进行预修整, 以适应船台或船

坞装配的尺寸精度要求。上世纪 50 年代末, 苏联船厂应用经纬仪检测技术对万吨级油船船体分段采取预修整措施, 使其按净尺寸上船台装配, 实现了船台装配的精度控制, 从而有效地减少了船台装配的现场修整作业。

(2) 对平直分段进行建造全过程的尺寸精度控制。上世纪 70 年代, 苏联、日本、英国、民主德国等一些造船发达国家的造船业, 开展了广泛的尺寸链与公差研究、零部件加工中热弹塑性变形研究等, 通过大量的数据积累与分析, 用经验数值或公式来确定加工变形的补偿量问题, 并对船体平行舢体的平直分段按精度计划从分段制造到船台装配进行有效的精度控制。

(3) 对全船所有分段进行建造全过程的尺寸精度控制。造船精度控制技术发展到上世纪八九十年代, 日本、韩国等国的船厂, 通过多年的现场实测数据的积累与统计分析及理论计算, 掌握了船体建造过程几乎所有加工过程的变形规律, 因而能给绝大部分零部件、分段一个可靠的补偿量及船台装配的调整量, 并开发了计算机辅助补偿量确定系统。

国内虽从上世纪 60 年代中期开始引入船体建造精度控制概念, 通过厂校联合共同努力, 目前精度控制技术在国内外船业得到了广泛研究和应用, 许多船厂都已做到对平行舢体分段加放补偿量, 曲面分段预修整上船台, 并建立了精度管理工作组。

### 2.2 船体建造精度控制的发展趋势

通过对国内外资料的分析, 可以认为当前精度控制技术有如下几个发展趋势。

(1) 变形分析理论化。这主要体现在两个方面: 一方面是几种新的简化热弹塑性变形理论的提出和在焊接变形、线加热成形、激光成形等领域的验证与应用, 使船体建造过程中的热变形有可能从理论分析和计算得到; 另一方面是计算机技术和数值模拟技术的发展, 使船体建造过程中热变形的数值计算已成为可能, 目前日本、韩国都已在此方面开展了大量研究。由于理论计算与数值计算的快速度与

作者简介: 郭荣奎(1952—), 男, 助理工程师。

低成本,使船厂可以不必经过长时间的、大量的数据积累工作即可建立自己的补偿量确定标准。

(2) 精度控制系统集成化。由于精度控制涉及船厂的组织体系、生产流程、生产设计、质量保证等各方面,因而目前另一个趋势是精度控制系统被集成到船厂 CIMS 系统中,是造船 CIMS 的子系统。因此,在精度控制的研究中,应当注意和整体系统及其余子系统间的联系,如数据格式、数据库类型、数据采集传输、数据处理、数据共享、其余子系统对精度控制系统的约束与需求等。

(3) 技术成果软件化与商品化。根据精度控制系统的研究,及数据积累与分析的成果,可开发出相应的软件,如补偿量的计算机辅助确定软件、数据采集分析软件、精度监控软件、船厂精度控制系统等,除了因实施精度控制而产生了巨大效益外,这些成果及软件可以作为商品为船厂创造额外的效益。

### 3 补偿量加放需要有控制技术的支持

补偿量加放不仅需要大量数据支持,还需要有一系列控制技术支持。日本从 1967 年开始,一直到 1977 年才完成补偿量加放系统;韩国大概也花了 10 年时间,实行无余量造船。

精度控制技术方面,日本、韩国已经形成了一整套精度控制管理体系,将精度控制管理贯彻于造船全过程,即每年制定一个精度管理计划,确定基本方针、工作重点、各阶段精度控制项目、控制的目标值、实际测量值、责任单位、工艺流程基准线系统等,并配有先进的三维坐标测量系统。

补偿量加放一般与对象、工艺及工艺流程系统、精度控制的管理水平有关。一般来说,企业按设计和技术能力、经济合理性及出于对企业声誉等方面考虑,将产品稳定在一定的类型范围内,而稳定的船舶类型具有相似或相类似的船体结构形式,因此对补偿量的加放具备了有利的条件。

尽管相似或相类似的船体结构形式受各种变形因素影响,但目前补偿量加放一般只考虑焊接,这是由于焊接工艺比较成熟。因此从焊接因素考虑,可以确定设置补偿原则,如与分段的长宽有关,分段越长(宽),补偿量加放越大;与板厚有关,板越薄,补偿量越大;与角焊焊脚有关,焊脚越大,补偿量越大;与结构疏密有关,结构越密,补偿量越大等。另外如切割补偿和大接缝补偿也较成熟。

#### 3.1 精度控制与造船科技的发展密切相关

补偿量加放是精度管理的基础,与造船科技水平密切相关,主要表现在以下四个方面。

(1) 设计软件版本的提高。造船专用集成软件 Tribon 系统的版本不断提高,可以根据全船余量和补偿量布置图的内容,通过生产设计解决板和结构的边缘补偿量、锥型补偿量和内部收缩补偿量等;通过系统建模,可以解决样板、样箱、胎架及各类辅助线的设置,通过建模所体现出的精度内容,细化到作业图纸上,从而对提高装配精度创造了可行的条件,同时也方便了精度数据统计。

(2) 工艺装备改进和创新,科技手段的提高,工作站之类的计算机开发,为推行精度管理创造了硬件条件。平面分段流水线是精度控制技术的成果;数控等离子切割机、高精度门式切割机解决各种形状的切割精度并都具有自动划线功能,为无余量制造创造了条件;大型加工设备如 400 吨肋骨冷弯机、21 米 2200 吨三辊弯板机等设备的使用,解决线型加工问题,提高了加工精度;600 吨大型门式起重机,为总组分段后的无余量搭载创造了硬件条件。

生产布局合理,生产车间、场地大,有利于作业环境和安全施工的改善。

(3) 工艺方法和设施的改进,降低了船体分段尤其是立体分段制造的难度,减少施工工作量。

采用双层底延伸、肋板拉入法等新工艺,已与国外接近。工艺设施的改进如搁墩及其移动架、分段定位支撑和保证尺寸支撑、装配用保距桥型梁的应用等,提高了控制手段。

CO<sub>2</sub> 焊接设备和 FCB 三丝焊机、多头角焊机、垂直气电焊机等自动焊接设备的大量推广,减少了焊接变形。有利于船坞装配合拢时间间隙的控制。自动划线功能可设置 100mm 对合线和直剖线、中心线、肋骨检验线、水线等,有利于控制分段变形和扭曲等。

测量、定位工具如激光经纬仪的开发,为船体分段无余量制造和船台(船坞)无余量装配定位奠定了可行的基础;API 第三代激光自动跟踪仪,能比照设计 CUVRE 建模线型的符合程度,可以确保外板线型施工与设计原型进行实地控制,并能对分段、总段在任何状态下进行测量和准确定位。

(4) 体制体系的建立是精度管理有效推进的保证。从日本、韩国等国家看,精度管理要形成一套体制体系,贯穿造船全过程。如制定年度精度管理计划,确定基本方针、工作重点、各阶段精度控制项目、

控制的目标值和实际测量值、责任单位、工艺流程基准系统等。

补偿量加放与管理水平有关。应建立精度控制计划,主要解决参考线、收缩因素、计划余量、精度目标和实际结果分析等。为了实施精度控制计划,同时须建立尺寸控制制度和内部信息交流制度。

### 3.2 设立精度管理组织推进造船精度管理

精度控制的含义是制造过程的统计控制,就是用数理统计的方法,通过对造船生产过程中的加工精度管理和焊接热变形的误差控制,用补偿量代替余量的办法,减少造船加工、装配和焊接当中的无效劳动。补偿量加放是造船精度控制的需要,精度控制反馈信息的分析结果可指导详细设计、公差和工艺方法的调整,从而协调各分道生产线的工艺流程。造船过程作业流所需要的精度水平几乎总是在船东和船级社所规定的公差范围内。随着科学技术的发展,以及在生产实践中不断认识尺寸偏差发生的规律,船体建造精度管理的水平将随之提高,但船体建造精度管理水平等级的提高,在很大程度上受船厂的生产技术、管理水平、设备能力、工人的技术素质、建造船舶的类型与等级、经济合理性等一系列因素的制约。因此,盲目追求过高水平的船体建造精度管理是不现实的。精度控制技术除补偿量的设置与分配外,重要的还有对合线设置、设备加工精度和施工工艺技术及统计技术等。为了解决这些问题,日、韩等船厂一般都专设精度管理组织,负责组织和推进全厂的造船精度管理。

## 4 在补偿量加放上国内船厂与国外先进造船国家的差距

由于对精度管理的认识及技术等方面的原因,目前国内的精度管理工作虽然取得了一些成绩,但与国外先进造船国家相比,还存在许多问题,主要表现在以下方面。

(1)研究工作不系统,未建立完整的补偿量确定系统。目前国外一些造船先进国家的船体建造精度管理水平发展很快,许多船厂在20世纪80年代初就已应用计算机技术开发了补偿系统,通过该系统,对全船百分之百的分段加放零部件的尺寸补偿与船台(船坞)装配的调整量,使船体结构从设计到补偿量的加放,完全实现了计算机辅助处理。之后,在实现壳、舾、涂一体化现代造船模式的基础上,正积极引进精良生产、并行工程、敏捷制造、柔性制造和计

算机集成制造系统等新技术,向设计、工艺、制造一体化造船的更高水平发展。国内则处于起步阶段。

(2)按照精益管理观点,精度是在工序内实现,因此每个工序的精度直接决定产品精度,从质量上追求零缺陷看,精度控制需要由操作工一次做好。国内在管理习惯上尚未达到精益管理的要求。主要体现在工位(岗位)、人员固化和产品固化;作业方法如装配方法的统一等方面未建立有效的体制和制度。

(3)数据积累不连续、数据分析不深入。如各个阶段的数据不能形成数据链,对补偿量、变形等方面的理论分析不够,统计技术和统计手段落后等。

据国内专家评价:我国在精度造船和综合管理水平方面要比日本船厂落后10~15年。由此可见,我国现行的精度控制无论在技术内容上,还是在技术水平上均与国外先进造船国家有明显的差距,尚不适应建立以中间产品为导向,以生产任务包形式组织生产的作业体系的要求。

## 5 精度管理在补偿量加放系统确立的优点和作用

### 5.1 确立补偿量加放系统的作用

精度管理的目的是推行无余量造船,加快船体建造速度,降低成本,从而提高企业总体技术和管理水平,其优点十分明显。推行无余量造船可以发挥以下作用。

(1)减少了无效劳动。不实行造船精度管理,分段在装配过程中会产生大量的间隙或错位,需要去修补,对留有余量的结构部分还需要进行切割,这些工作大大延缓了工程进度。通过用补偿量代替余量,可以大大减少不必要的作业时间,提高作业效率。

(2)降低了作业难度。造船精度较差的船体装配,一般都需要水平较高的有经验的高级技工来进行安装的调整和定位。实施精度造船后,各种部件、结构件和分段的尺寸精度提高了,船体装配成为简单的要素作业,这就大大降低了对工人的熟练化程度要求,从而减少了作业时间,缩短了生产周期。

(3)有利于高效焊接的应用。由于船体的焊缝精度得到了控制与提高,这使得高效焊接设备的使用成为可能。同时,高效焊接设备的使用使生产效

[下转第15页]

将  $N^1$  代入式(5),由式(6)转换成清晰的 0—1 指派问题,再应用匈牙利算法求解,可得  $P_1$  对三种方案评价的排列矩阵为:

$$Y^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

同理,可得  $P_2$  与  $P_3$  对三种 AIP 方案评价的排列矩阵为:

$$Y^2 = Y^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

利用式(7)和式(8),可计算得到多人决策群赋予三种 AIP 方案  $x_j(j=1,2,3)$  的波达选择函数值分别为:

$$b(x_1) = 0; b(x_2) = 6; b(x_3) = 3$$

#### 4.2 结果分析

仿真计算结果表明,第二种 AIP 方案(CCCAIP)即  $x_2$  是多人决策优选模型中最满意的方案,且多人决策群体对上述三种 AIP 方案的优劣排序为  $x_2 > x_3 > x_1$ 。

可见,针对假设的有特殊用途的 150 吨级无人驾驶微型常规潜艇,CCAIP 是综合性能最佳的方案。

### 5 结束语

模糊多目标多人决策的模糊线性分配法应用于特定的 150 吨级微型潜艇 AIP 方案优选,能够将定

[上接第 18 页]率得到了明显的提高,焊接的质量也得到了进一步的稳定和提高。

(4) 提高了产品质量。裂纹或变形之类的船体结构的缺陷,主要是由于初始的不完善或不精确的结构零件的强制连接引起的残余应力产生的,造船精度提高后,各种间隙、余量和错位大大减少,船体结构内的应力分布趋于均匀,船体强度得到了可靠的保证。

#### 5.2 确立补偿量加放系统的效益

补偿量加放系统的确立,具有重要的经济效益。其经济效益主要体现在以下几个方面:

- ① 以补偿量代替余量,可以提高材料利用率;
- ② 以补偿量代替余量,可以减少余量修割及变形矫正工作;
- ③ 以补偿量代替余量,缩短了造船周期,有利

性和定量相结合,解决了各决策者策略选择的依赖、制约关系对整体决策的影响,使得 AIP 方案优选结果更加客观、准确。

通过多年的开发研究,在很多常规潜艇和潜水器的动力系统选型中,AIP 已有良好的应用前景。为了达到潜艇 AIP 方案真正优选的目标,本文认为还需要提出更为全面的评价指标体系。因此,如何建立更合理的评价指标体系,是今后尚需深入研究的课题。

### 6 参考文献

- 1 Ude V. Trends in conventional submarine developments. Naval Force, 2001, 22(3): 33
- 2 边金尧,丁宁,胡松伟,等.当代外军常规潜艇技术及发展.舰船科学技术,2003,(5): 14
- 3 宋伟峰.海狼的后代——德国新宠 U-31 潜艇.舰载武器, 2003,(9): 63
- 4 宫杰,万彪,吴梵. 21 世纪潜艇发展. 船海工程, 2004, (1): 45.
- 5 杨晔,李宗,马运义. AIP 技术在国外研究及应用综述. 武汉造船, 2001, (1): 4.
- 6 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- 7 薛强,贺国. 怎样选择 3 种 AIP. 武汉造船, 1999, (5): 31
- 8 郭国才. AIP 方案——现代常规潜艇动力推进系统配置选择趋势. 船电技术, 2003, (5): 15
- 9 钱颂迪,甘应爱,等. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- 10 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.

于提高年产量。

补偿量加放系统的确立,具有重要的社会效益。其社会效益主要体现在以下几个方面:

① 补偿量加放的确定对造船模式完善有着重要的促进作用。精度造船是现代造船模式的一个重要标志,而以补偿量代替余量,并逐步实现造船全过程的精度控制,则是精度造船追求的目标。因而,补偿量加放系统的确定,对这一目标的实现有着决定性的意义。

② 补偿量加放系统的确定将使企业的精度管理工作在技术上实现一次较大的跨越,并对设计、生产等各环节提出较为严格的要求,对提高企业的综合管理水平,提高企业的技术水平,提高企业船舶建造质量等方面具有重大意义,从而有利于提高企业的整体社会形象。