

国外造船精度控制技术

中国船舶工业船舶工艺研究所 唐汉帆

摘 要: 介绍国外造船精度控制技术的现状和发展趋势, 分析造船精度控制技术的国内外主要差距, 提出对策和建议, 为我国造船模式转换工作提供有用的资料。

关键词: 国外造船 精度控制

1 引言

造船精度控制是现代造船中的一项关键技术, 它与生产设计、成组技术、高效焊接、涂装等先进造船技术一样, 在船舶建造中发挥着重要的作用。

造船精度控制技术是以数理统计为理论基础, 以补偿量取代余量为核心, 通过先进的工艺技术手段和科学的管理方法, 对船舶建造进行全过程的尺寸精度分析和控制, 最大限度地减少现场的修整工作量, 从而达到提高生产效率、降低建造成本、保证建造质量、缩短造船周期、增加经济效益的目的。

国外造船精度控制技术经历了一个不断发展、完善与提高的过程。其工艺技术, 归结为以下三个发展阶段。

a) 分段上船台(船坞)前进行预修整, 以满足分段大合拢装配的尺寸精度要求;

b) 平直分段进行建造全过程的尺寸精度控制, 与曲面分段预修整尺寸精度控制相结合;

c) 对全船所有分段进行建造全过程的尺寸精度控制。

这三个发展阶段反映了国外造船精度控制技术所采用的三种工艺方法。目前, 国外先进船厂都已达到了第二阶段水平, 有些船厂已达到第三阶段水平。

尽管造船精度控制技术已在外国船厂达到了较为先进的水平, 但是各国仍通过更新设备, 提高设备的精度和自动化程度, 采用新工艺、新技术、完善管理等一系列措施, 使造船精度控制技术得到了

持续不断地发展。

2 国外现状

2.1 精度控制的基本模式

造船精度控制在日本、韩国和欧美等先进造船国家的各船厂都已形成一个基本模式, 即各厂每年根据生产任务与产品的特点制订一个精度管理计划, 其中包括基本方针、工作重点、各阶段精度控制的项目、控制的目标值、实际测量值、责任单位、工艺流程等内容。其中有的船厂设有精度品质管理委员会, 负责该项工作, 每月召开一次会议检查落实情况, 分析对策、积累经验。有的船厂虽没有设专门委员会, 但已纳入正常的生产管理渠道, 也是每月检查落实。第二层次是各车间按照厂精度管理计划和明确的责任分工, 对要求控制的项目进行细化, 并制订相关的推进计划与措施; 同样每月召开各车间精度品质管理会议、检查落实、跟踪考核、分析存在问题提出改进措施。

日本三菱长崎香烧工场每年根据实际生产的产品制订精度管理计划的具体做法:

a) 精度管理的基本方针:

——实行三确(确实、确认、确信)主义。使交船后重大质量事故为零;

——要使船东、船级社对船舶建造的事故评价为零;

——遵守不给下道工序添麻烦的基本原则, 推行确保恰当的精度质量, 又可赢利的 QC 活动。

说明:

①上述“三确”就是确实按照工艺执行;经设计与执行者共同进行质量检查确认;提供的精度数据是准确可信的。做到“三确”是促进精度管理的基本保证,所以被列入基本方针的第一条。

②精度管理的目的是缩短周期,提高效益,在推进中不忘取得船东与船级社的支持。

③上道工序不给下道工序增加麻烦的原则是再明白不过了,但是过剩的,不必要的高品质是人力、财力、时间的浪费,所以企业要推进的是适当的质量又能赢利的质量控制体系。

b)精度管理的工作要点:

——有效地运作 ISO 质量体系,脚踏实地进行质量创优;

——集装箱船的精度管理(重点为舱口盖、集装箱接头导轨)与事先研讨和跟踪。

——确保新机型、新装置、新工艺及首制品的质量;

——全面实行自主质量检查;

——坚决防止重复质量事故的再发生;

——确保外购件的质量(指海外制造的分段)。

c)实施精度管理的项目

按职能部门与车间分列,由厂部下达,内容包括去年的实绩、今年的目标、责任单位并注明具体要求,每月进行检查记录等。各车间按照总厂的精度管理计划与项目及要求进行细化,每月由各车间召开精度质量管理会议,检查并做出记录报厂部。

d)各车间的精度管理工作:

——内业车间

内业车间包括加工、小中组立和平面分段。

内业是造船精度管理的前道生产工序,也是控制建造精度的关键工序。该车间原来未采用先进切割设备时,由于切割误差给后道工序带来的很大影响,只能通过人工的不断测量,进行数据分析控制,使精度造船的推进受到制约。现在装备了等离子切割机 9 台、龙门数控切割机 2 台、型钢和扁钢切割机 3 台,加工精度得到了控制。目前建造的分段,据统计船长方向最大积累误差为 20mm,宽、高各为 10mm,确保了精度造船工艺的顺利实施。

——组立车间

组立车间主要制造曲面分段。

——外场建造车间

外场建造车间主要任务是总组立和大合拢,精度管理的重点是分段定位。

该厂精度管理信息的收集由内业、组立、外场建造三个部门各抽一人负责,确保数据的真实性。事业部计划科负责汇集、分析、巡查确认,这项工作很艰巨,也很关键。因为处理不及时会影响计划,引起恶性循环。

2.2 采用机械化、自动化确保制造精度

2.2.1 目前日本船厂已把重点放在机器人的开发应用和推广机械化、自动化以替代人工上。他们认为切割、加工、装配精度是实现精度造船的关键。为此国外先进船厂不惜巨资进行技术改造购置各种设备,船体建造的机械化、自动化程度很高,同时也确保了建造的精度。

2.2.2 日本船厂内场加工都是数控设备。其中,香烧船厂有数控双割炬等离子切割机 9 台,型钢划线下料等离子切割机 3 台,等离子门切机 2 台;神户船厂有数控双割炬等离子切割机 4 台,型钢等离子机械手 1 台;千叶船厂有数控双割炬等离子切割机 2 台,单割炬等离子切割机 1 台,数控型钢划线下料机 1 台,数控型钢等离子切割机 2 台,21 米高精度刨边机 2 台。石川岛播磨重工业公司一次即投入 1.5 亿美元进行技术改造,该公司吴船厂改造后拥有 10 台数控切割机,其中 3 台为等离子切割机。川崎重工的坂出船厂拥有 10 台数控切割机,其中 4 台为等离子切割机。住友重工现拥有 7 台数控切割机,其中 5 台为等离子切割机。

2.2.3 韩国造船界凭借雄厚财力,大量购置欧洲一些公司的造船设备。如韩国的 Halla 重工业工程公司最近向挪威 TTS 公司购置了一条型材切割生产线,该生产线包括数控等离子切割机在内。

2.2.4 丹麦 B&W 公司船厂正在实现一项重大的长期发展计划,其中一项为引进瑞典数控等离子切割机线,共 2 条,切割设备为瑞典 ESAB Numored MXB 7000 型数控等离子切割机。

2.2.5 芬兰 Turku 船厂在大规模改造时,除了型钢切割线外,还设置一条采用机器人的平面分段生产线。此外,独联体船厂在数控等离子板材下料切割中占整个下料的 80% 左右。

2.2.6 为了求得更高的切割精度,日本率先使用数控激光切割机。据报道,日本切割机厂商最近开始销售功率 5kW 的数控激光切割机。此外,英国、丹麦、芬兰、瑞典等国的一些船厂已经开始尝试使用数控激光切割钢板。数控激光切割将是未来造船钢板切割的发展方向。

2.2.7 在加工方面,对于复杂的双向曲面板,船厂通常采用水火弯板工艺。由于该工艺主要是凭经验进行手工操作,因此效率低,精度差。目前,水火弯板也已向机械化和自动化方向发展。日本和美国都已研制成功机械化线状加热系统,并与微机数控相结合达到自动化。最近,日本东京大学和追滨船厂联合研究了线状加热厚板弯曲工艺,并研制出线状加热厚板弯曲模拟装置。该装置采用简化的非线性弹性模型和变形分析法,而不采用过去的热弹塑性模型。模拟装置具有良好的人—机界面,使用者可以直观地掌握弯板情况。这种弯板装置尤其适用制造大型船舶。美国和加拿大船厂在驱逐舰和破冰船等民用船舶的建造中也采用了线加热技术,取得令人满意的效果。据称美国还在研究激光线加热系统,用10kW功率的激光器作为线状加热的热源,替代传统的氧乙炔火焰加热。该项研究的下一步工作是辅以小功率激光装置来检测成形钢板的曲度。目前该项研究也已取得相当好的效果。

2.2.8 在船体装配方面,由于切割、加工数控等新工艺的采用,零件精度不断提高,使得船体装配的机械得以实现,并且制造精度很高,在 $\pm 1.5\text{mm}$ 之内,大大降低了装配费用。

2.2.9 日本船厂根据各自工艺要求,配制平面分段、曲面分段装配流水线。如日本IHI公司建立的平面分段流水线共有下列10部分组成:

- a)数控高精度门切机;
- b)纵材自动输送装置;
- c)纵材自动定位装置;
- d)板列自动装配装置;
- e)板列自动焊接装置;
- f)板列自动矫正变形装置;
- g)板列自动除锈涂装装置;
- h)板列接缝(初垫)装置;
- i)横材插入装置;
- j)焊接机器人。

日本钢管公司的在津船厂建立了曲面分段装置流水线,采用了焊接机器人。

2.2.10 韩国汉拿(Halla)公司投资7.5亿美元建造的Samba船厂占地100万平方米。该厂单平面分段制造车间就配有20个机器人,采用KCS的Tribon集成软件。平面分段流水线上配有最新横材插入装置,通过开在肋板或桁材上的小开口插入加强材对准固定,而不必用领板或楔垫,保证了装配的精度。

2.2.11 丹麦B&W公司船厂建有小型双层底分段装配流水线,用于双层底夹层结构及类似构件的制造。此流水线按工作站原理设计,设9个站。施工时,工件置于平台上,由工人逐步装焊;平台置于气垫上,每完成一道工序,气垫将平台移动一个站位,工人在原工位不动。到达末站时,完工的分段运出,平台由吊车吊回到起始站,用作下一个待装分段的基座。由于机械化流水生产,工人重复做同一作业,技术熟练,因此精度和质量都很高,生产效率比原先提高了一倍。

2.3 严格按工艺纪律操作

2.3.1 国外造船先进国家除了具有科学的精度管理和先进的机械化、自动化装备来提高精度以外,船厂都具有严格的工艺纪律,将影响建造精度的主要因素(人、机、工艺、材料、环境等),作为重点对象,切实有效地控制起来,使它们处于被控制、被管理状态,尽量减少系统误差的产生,保证稳定的质量和精度。

2.3.2 日本船厂十分注重树立和增强员工重视质量的观念和责任感。在执行精度品质管理过程中遵循“三确”、即确实、确认、确保和保证产品重大质量事故为零的原则。他们的目标是依靠全体员工的精心技能,造出与客户信赖相称的世界质量最好的产品。他们一致认为精度造船是“我要做的”,做了也是值得的。实际上日本各船厂也在认真、自觉地执行。

2.3.3 在作业方面,日本三菱长崎香烧工场,针对操作工人长期做类似的工作最容易产生不看图纸、不看工艺,凭经验作业的陋习,严格要求每个人按工艺纪律作业,要不错看,不漏看,完全看懂图纸与工艺才能进行作业。并且上道工序流向下道工序前要自检与基准线的偏差,并做好记录,打上印章。特别是分段定位要按基准线控制好精度,并做好记录与反馈。千叶船厂认为在精度造船的控制过程中,宁可修补一个分段,也不要破坏全船精度的基准系统。

2.3.4 在设备方面,日本船厂都制订一个完整的检查、校正、调整和维修的周期规划。加工精度的保证靠设备、但是设备靠人去管理,否则再好的设备也不能保证精度。日本千叶船厂规定,加工设备每天由操作者检查划线与切割的精度,调整加工精度至小于1mm,目标值为0.5mm。每月检查一次对角线、直线度,精度也是1mm;轨道的水平和平行度定期由设备厂来检查维护。

3 发展趋势

国外造船先进国家在面对熟练工人短缺,世界船舶市场竞争激烈的情况下,为了保持适当的造船能力,提高劳动生产率,在对现行的生产工序进行调查的基础上,提出了船体建造精度控制的新概念——高精度生产系统。将精度提高到一个较高的水平。

3.1 采用有限元方法进行数字模拟

在二十世纪 50 年代后期,统计质量管理被引入日本造船业,从此一直广泛地应用于船体建造的整个过程,促进了船舶质量、精度和生产效率的提高。然而,统计质量管理方法仅表明一般的解决办法或趋向,并没有从理论上分析影响造船精度各种因素,如由钢板的火焰切割、热弯、焊接和水火校正产生的变形等相互之间的对应关系,而是把这些因素合在一起处理。因此,在调查船体建造现状时,发现纠正前道工序产生的误差成为不可避免,而且占据了整个工作的绝大部分。仅船坞中的装配阶段,这一纠正工作占了工作量的 40%~50%。影响了精度造船的进一步发展。

随着计算机软、硬件技术的发展,日本采用了有限元方法,对由钢板的火焰切割、热弯、焊接和水火校正产生的热变形进行数字模拟。尺寸分布按照诸如板厚、材料、几何形状和热输入等各个因素逐个进行处理,这样就能够更精确地估称出在各个加工和装配阶段板材和船体分段的变形值,并在建造前分别考虑采取相应措施,于是生产工程从统计分析转变到理论分析。

图 1 为采用有限元方法的热分析图,在第一阶段,通过热输入,同时考虑由温度所决定的物理性能,采用不稳定的热传导分析计算在第一时间步骤

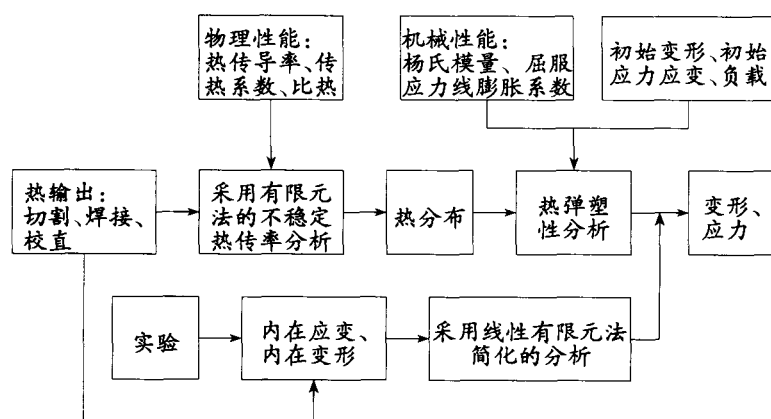


图 1 热分析图

上各个构件的温度分布。在第二阶段,通过输入第一阶段的结果,同时考虑由温度所决定的机械性能,采用热弹塑性分析计算在每一时间步骤上结构的应力和变形。

3.2 根据估算的变形量,改进工艺研制新设备

3.2.1 为了促进船体建造的进一步合理化,日本船厂对占总的船体分段 1/2~2/3 的平面分段的装配工艺作了改进,将目前各国普遍采用的“板列装配工艺”(外板先进行焊接,然后装纵向构件,再装横向构件)和“格栅装配工艺”(将纵向构件和横向构件装配成格栅结构,然后被装配到外板板列上),改变为“单元——板列和切口工艺”。这一方法首先将若干纵向构件装配到平板上,形成单元——板列模块,然后将这些小合拢的单元——板列装配在一起,横向构件采用切口型槽孔,穿过纵向构件插入到单元——板列上,形成平面分段。

3.2.2 平面分段采用“单元——板列和切口工艺”,与“板列装配工艺”或“格栅装配工艺”相比,具有以下优点:

- a) 单元——板列可以作为模块,适用于不同船型;
- b) 单元——板列尺寸较小,有利于采用自动化生产,从而具有较高的精度;
- c) 由于单元——板列精度较高,使横向构件能采用切口型槽孔与纵向构件连接,因而促进机器人自动焊接的应用;
- d) 提高了平面分段的精度,可保证大合拢接头的正确性;
- e) 提高了劳动生产率。

3.2.3 在单元——板列和切口工艺中,必须提供高精度的单元——板列,但是,采用常规的工艺要保证所需的精度是很困难的。为此,日本研究开发了高精度的单元——板列装配机。该设备通过 CAD 系统接收组成单元——板列的平板和纵向构件的数据,自动定位和自动定位焊,并用自动焊机和稳定的焊接规范焊接,使精度保持在规定的 0.2mm 的范围内。该设备能够在 30min 内完成一个单元——板列的装配、焊接工作,生产效率很高。

3.2.4 安装横向构件中研究开发了横向构件推装机和焊接机器人系统。由于所提供的单元——板列和横向构件都具

有较高的精度, 横向构件推装机能顺利地将横向构件的切口插入纵向构件, 并将该构件推进到指定位置。焊接机器人系统由焊接机器人定位装置和焊接机器人组成, 用于焊接单元——板列和横向构件之间连接接缝。该系统的机器人执行定位和操作的数据同样来自 CAD 系统。

4 国内外造船精度控制技术主要差距

国内船厂与日本船厂在造船精度控制方面存在着较大的差距。精度造船与综合水平而言, 与日本船厂差距达 10~15 年, 主要差距与因素大致可以归纳为:

4.1 基本模式

日本各船厂造船精度控制已形成一个基本模式, 即各厂每年根据生产任务与产品的特点制订一个精度管理计划, 其中包括基本方针、工作重点、各阶段精度控制的项目、控制的目标值、实际测量值、责任单位、工艺流程、基准线系统等内容。在管理层上分成第一层次、第二层次。第一层次即厂精度品质管理委员会, 负责该项工作, 每月一次会议检查落实情况, 分析对策, 积累经验。但有的厂并不设专门委员会, 而是纳入正常的生产管理渠道, 也是每月检查落实。第二层次是各车间按照厂精度管理计划和明确的责任分工, 对要求控制的项目进行细化, 并制订相关的推进计划与措施, 同样每月召开各车间的精度品质管理会议, 检查落实, 跟踪考核, 分析存在问题, 提出改进措施。由此, 推进造船控制技术的不断深化和发展。

国内主要船厂大部分也成立了精度造船管理领导小组或相应的管理体制, 并且下设各专题攻关组或管理机构负责开展具体工作, 但是管理计划的内容和力度不如日本。精度管理工作在实际操作过程中经常出现时紧时松、时起时落的现象。精度管理水平发展也不平衡, 尤其是大型船厂和中小型船厂, 差距还比较大, 要提高国内船厂的总体水平, 还需经过很大的努力。

4.2 人员素质

日本各船厂员工都认真、自觉地做好精度控制, 他们一致认为精度造船是“我要做的”, 做了也是值得的。他们遵循“三确”原则、即确实、确认、确信, 保证产品重大质量事故为零。他们的口号是依靠全体员工的精良技术、精心作业, 造出与客户信赖相称的世界质量最好的产品。在制造上严格按工艺纪律操作, 特别是分段定位按基准线控制好精度, 并做好记

录与反馈, 保证数据的真实性。在精度控制过程中, 宁可修补一个分段, 也不要破坏全船精度的基准系统。日本船厂内外场都推行复合工种, 装配焊接一人一档制。装配工作自觉地考虑方便焊接和确保焊接质量, 宁肯在装配上多化些时间, 也比焊接返修来得合算。因为装配与焊接都是他的工作, 职责很清楚, 管理也简单, 做好做坏都是一个人承担, 没法扯皮。

内场加工设备每天由操作者检查划线与切割的精度, 调整加工精度至小于 1mm, 目标值为 0.5mm。产品从上道工序流向下道工序前要自检与基准线的偏差, 并做好记录, 打上钢印。

国内船厂员工对造船精度控制存在着“要我做的”观念, 因此表现在责任性、自觉性方面比较差, 精度控制经常出现反复, 时好时坏。随着外包工人员的增加, 给精度控制带来新的困难。推行复合工种收效不大, 有的用复合班组替代, 没有从根本上解决问题。职工对设备的精度检查和维护保养做得较少, 往往要等到切割、加工精度出了问题才请机修工来维修。自检、互检制度也不能很好地执行, 所记录的数据真实性也存在问题。因此, 提高员工的整体素质是推进我国造船精度控制深入发展的关键之一。

4.3 新技术、新工艺

a) 采用计算机建模, 全面实施 CAD、CAM

这个问题在日本各船厂都已解决, 应用软件都是自己开发的, 无论是三菱还是三井都有自己的造船研究所, 设计开发能力都很强。目前日本船厂已把重点放在机器人的开发应用和推广机械化、自动化以替代人工上。长崎船厂型钢等离子切割机器人, 底部分段全位置焊接机器人, 神户船厂曲面分段电脑控制的活络胎架, 平直分段构架焊接机器人, 千叶船厂弧焊机械手等都已在推广应用。

与日本船厂相比, 国内船厂应用软件开发能力有相当的差距, 目前 KCS 全面电子建模尚未突破, 与 CAM 的接口还是瓶颈, 至于机器人尚未开始在生产中应用;

b) 艉轴管先镗孔, 后定主机新工艺

长崎船厂 VLCC 船在艉部上甲板分段尚未就位、主船体没有形成的情况下, 已开始艉轴管镗孔, 并装好了螺旋桨, 这种新工艺大大缩短了造船周期。

国内还是采用先形成主船体后进行艉轴管镗孔的工艺。由于艉轴管先镗孔后定位的新工艺, 精度控制要求高, 难度较大, 因此尚未立项研究;

c) 垂直自动焊、CO₂ 单面焊工艺

日本船厂的船台(或船坞)分段大合拢焊缝已全部采用垂直自动焊和 CO₂ 单面焊。大合拢间隙基本控制在 $5\text{mm} \pm 3\text{mm}$ 。焊接采用垫铁板焊后再反面碳刨手工仰焊处理。由于分段大合拢接缝无余量并且采用垂直自动焊和 CO₂ 单面焊, 所以日本各船厂造船已取消了脚手架、局部修补和半垫, 采用液压升降车。

国内主要船厂也已开始使用垂直自动焊和 CO₂ 单面焊工艺垂直自动焊机也实现了国产化。CO₂ 陶质补垫单面焊大间隙工艺研究已完成认可试验并予采用。大间隙垂直自动气焊工艺研究, 由于线能量较大、技术难度高, 目前尚在试验之中;

d) 工艺装备

日本船厂都认为内场加工精度是实现精度造船的关键, 加工精度要靠设备来保证。因此, 日本船厂内场加工都是数控设备, 其中, 香烧船厂有数控双割炬等离子切割机 3 台, 等离子门切机 2 台; 神户船厂有数控双割炬等离子切割机 4 台, 型钢等离子切割机 1 台; 千叶船厂有数控双割炬等离子切割机 2 台, 单割炬等离子切割机 1 台, 数控型钢划线下料机 1 台, 数控型钢等离子切割机 2 台, 21 米高精度刨边机 2 台。

日本船厂在工艺装备上还重视对一些小的工艺工装的改革与改进。大拼板配用电磁小油泵, 一人操作, 简捷实用, 不用烧马, 不用铁楔与榔头, 对建造化学品船等高附加值船尤显优越。又如装配型钢用的定位工夹具, 省略了焊接、批磨与修补等工序, 实现了分段制造不用风割, 少动榔头, 提高了工作效率, 净化了环境。

日本各船厂内场作业场地大, 操作人员少, 其共同点是钢板或型钢从预处理——划线切割——分流集配——小组立——中组立, 都是在滚道上流动, 流向清楚, 互不干扰。为了保持全厂生产均衡, 内场加工是 24 小时工作制。

与日本船厂相比, 国内船厂内场作业场地较小, 数控切割机和数控等离子切割机数量较少, 特别是

缺乏型钢数控切割设备和大型高精度刨边机。在设备管理、保养和 CAM 的开发应用上存在较大差距。装配工仍使用烧马、铁楔、榔头等简易落后的工具, 大量的电焊马脚要进行批磨与修补, 效率低, 质量差。

5 对策和建议

造船精度控制是采用先进造船技术建造船舶的方法之一。它与生产设计、成组技术、高效焊接、涂装等先进造船技术一样是现代造船模式的支撑技术, 在船舶建造中发挥着重要的作用。造船精度控制除了专业技术外还涉及大量管理内容, 因此与推行现代造船模式具有更加密切的关系。为此, 提出如下对策和建议:

a) 国外先进船厂的造船精度控制都已形成了自身的一个基本模式, 并纳入正常造船生产管理, 取得了很好的效果。国内船厂经历了多年的探索和实践, 也形成了一些开展造船精度控制的基本方法, 这些方法可在造船模式的不断转换中, 结合各船厂的特点, 不断完善和提高, 理顺体制、明确分工、层层推进精度管理, 扎扎实实地把精度控制工作纳入正常的生产管理中, 最终建立起精度控制的运作模式;

b) 结合产品特点, 开展与精度控制相关的关键技术研究。例如: 焊接与装配精度, 船台合拢的大间隙焊, 焊接变形控制, 焊接收缩量与精度补偿量, 精度控制 CAD、CAM 等等。广泛采用新工艺、新技术, 提高精度控制的技术水平;

c) 加强精度控制基础工艺研究, 对船厂来说着重把精度控制的各种信息反映在生产设计图纸上, 把一些技术数据、工艺、检测要求上升为厂标, 使操作者“有法可依”, 严格按图施工;

d) 强化各工种的上岗培训, 严格检验考核制度和反馈数据的真实性, 提高员工的责任性和整体素质;

e) 内场加工精度是实现精度控制的关键, 工厂技术改造应向保证精度控制倾斜, 给予必要的自动化、高精度装备的投入。

