

4 远洋船舶应用气象导航的对策和建议

4.1 提升气象数据获取和处理的准确性

加强技术创新，重点发展高精度气象观测技术，借助卫星遥感、浮标系统、无人飞行器等前沿科技，扩大海域覆盖并提升气象数据搜集能力，解决远洋区域观测点稀缺问题。加强数据集成，促进不同数据源的有效共享与交互操作，统一数据标准和交换协议，便于数据集成与共享，提升处理与分析复杂气象数据的准确性和效率。

4.2 提高气象预测模型的精准度

在模型开发过程中，引入更精确的气象参数，考虑大气、海洋、陆地间的动态相互作用；有效利用海洋浮标、飞机侦测等多源数据，全面采集各种影响因素；综合利用各学科最新研究成果，增强模拟复杂天气系统的能力，从而优化气象预测模型，提升模型预测精准度。

4.3 提升船员的技能培训

加强船员对气导技术的培训，设计全面专业的培训教材；加强船员抗压能力训练及急救和应急响应技能培训，着重培训船员解读复杂天气系统和预报、理解气象对航海的影响及据此做出准确航行决策的能力。

结合传统教学与实践操作创新培训方法，如使用模拟器模拟气导场景训练；构建数字化培训平台，提供灵活学习资源，如虚拟实验室。

4.4 完善服务质量标准与监管体系

国际海事组织（IMO）和世界气象组织（WMO）等国际组织应协调引导，促进全球建立和完善气象导航服务的质量监管体系，明确质量标准和性能指标；监管体系标准应适应气象导航技术的不断发展和升级变化，便于船员和相关人员理解和应用。各级海事组织、气象机构及航运公司应加强合作，共享最佳实践、数据和技术，共同提高气象导航服务质量。

4.5 加强服务提供商的服务质量

服务提供商需进行程序认证，定期检查和评估服务性能，及时发现并纠正不足，同时收集船员和航运公司的反馈以改进服务，确保服务质量；需引进合成数据、数据可视化技术等先进数据分析和处理技术，持续的验证和校准，定期比较模型预测结果与实际情况，并收集用户反馈，特别是操船人员的实际体验和建议，保持和提高预测精度。

5 结论

目前，远洋船舶在气象导航方面取得重大进展，但仍面临许多挑战，如技术提升要求船员技能提高、气象数据准确性待解、预测模型需稳定等。此外，质量监管、技术标准化及船员应对能力也是未来研究重点。本文全面分析气象导航在远洋船舶中的应用现状，未来在海域、季节对气象导航系统的影响，船型、航线对导航需求的差异等方面还可以进一步深入探讨。

参考文献：

- [1] 黄萧霖,徐晶,金铸钰,等.全球海洋气象导航业务和技术研究进展[J].气象科技进展,2024,14(03):30-39.
- [2] 刘峰,李春宝,庞福文,等.船舶自行气象导航的研究[J].中国航海,1992,(02):24-31.
- [3] 范娟,王胜正,余敏,等.远洋船舶气象导航典型案例剖析[J].中国水运,2023,(05):43-45.
- [4] 仲夏.可解释人工智能在气象预报中的应用和展望[J].软件,2024,45(01):50-52.
- [5] 邹其昌,陈征洋.“气象设计模型”:气象设计学体系的核心概念研究——中国当代设计学理论体系建构研究系列[J].工业设计,2024,6(01):1-10.

基金项目：广州市高等教育教学质量和教学改革工程教学团队项目（2022JXTD011）；2024年广州航海学院大学生创新创业训练计划项目（S20240148）。

长江干线桥梁水域专用航标设置规范的关键技术解读

乔雪竹, 石晓光

(长江重庆航道局, 重庆 400000)

摘要: 长江干线桥梁水域复杂的通航环境对专用航标设置提出了更高的技术要求。针对传统航标配置方法存在的标准化程度低, 安全风险评估不精确等问题构建了基于三维分类体系的航标设置规范框架, 建立了“桥梁-航标-船舶”三元耦合关系模型。通过量化风险评估, 动态权重分配算法与多目标优化函数实现了航标位置的精确配置。运用 CFD 流体仿真技术与船舶交通流仿真验证了规范的科学性, 实验结果显示船舶偏航距离减少 32.7%, 通过效率提升 28.5%, 安全事故率下降 41.3%, 该技术规范为长江干线桥梁水域航标标准化设置提供了科学依据与技术支持。

关键词: 长江干线; 桥梁水域; 专用航标; 设置规范; 安全区域划分

中图分类号: U644.37+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7973(2025)21-0105-04

长江干线承担全国内河货运量 60% 以上, 是中国内河航运主动脉。桥梁水域作为航道关键控制节点, 其航标设置科学性直接影响通航安全与效率。随着长江沿线桥梁建设快速发展与船舶大型化趋势加剧传统航标设置方法已无法满足现代化航运需求。桥梁水域具有特殊的水动力环境复杂几何边界条件及多样化船舶交通流特征, 使航标配置面临严峻技术挑战。现有航标设置存在标准不统一、配置不合理与智能化程度低等突出问题, 严重制约了通航效率提升与安全保障水平。船舶操纵难度增加, 碰撞风险上升通航瓶颈加剧等问题日益凸显。因此, 亟需构建科学规范的桥梁水域专用航标技术标准体系建立基于多维风险评估的智能化配置方法, 实现航标设置从经验决策向科学计算的根本转变确保长江干线航运安全高效运行, 为内河航道现代化建设提供技术支持。

1 长江干线桥梁水域航标设置规范体系构建

1.1 桥梁水域航标分类与设置原则

基于长江干线桥梁水域的复杂环境特征, 建立了三维分类体系: 按功能属性划分为引导型, 警示型与限制型航标, 按设置位置分为桥前导航区、桥下通航区与桥后缓冲区航标, 按作用范围分为主航道, 辅助航道与禁航区标识(表 1)。设置原则遵循“安全第一, 效率优先, 标准统一”的核心理念通过量化风险评估模型确定航标密度采用视距分析法优化标位间距, 运用船舶操纵性能参数计算最小安全距离。创新性地引入动态权重分配算

法根据通航流量, 气象条件与桥梁结构特点实时调整航标配置方案实现了从静态标准向智能适应的转变^[1]。

表 1 桥梁水域航标三维分类体系配置标准

分类维度	航标类型	设置密度 (个/km)	标准间距 (m)	适用条件	权重系数
功能属性	引导型	3-5	200-300	主航道导航	0.35
	警示型	6-8	100-150	危险区域标识	0.40
	限制型	8-12	50-100	禁航区边界	0.25
设置位置	桥前导航区	4-6	150-250	距桥 500-1000m	0.30
	桥下通航区	8-10	80-120	桥梁净空范围	0.45
	桥后缓冲区	3-5	200-350	距桥 300-600m	0.25

1.2 航标配置标准化技术规范

构建了基于多层次约束条件的标准化配置技术体系采用模糊层次分析法建立评价指标权重矩阵将桥梁几何参数, 水文特征, 船舶尺度与交通流量转化为量化配置参数^[2]。

$$S = \frac{F_s \cdot K_b}{F_w + F_v + F_h} \geq S_{min}$$

其中: S 为航标系统稳定性系数; F_s 为航标自身稳定力(包括重力, 浮力, 锚固力); K_b 为桥梁屏蔽效应修正系数(N); F_w 为桥梁风载诱发的干扰力(N); F_v 为船舶航行产生的兴波力(N); F_h 为水流冲击力(N); S_{min} 为最小安全稳定性阈值(通常取 1.5)。

技术规范核心在于建立了“桥梁-航标-船舶”

三元耦合关系模型通过有限元分析方法计算桥梁风载影响下的航标稳定性，运用蒙特卡罗仿真技术验证不同工况下的配置效果。创新开发了航标配置自动化生成算法结合 GIS 空间分析与 BIM 建模技术实现了配置方案的三维可视化展示与碰撞检测。标准化流程包括现场勘测数据采集，风险源识别评估，配置方案优化设计与效果验证评价四个关键环节。

1.3 桥梁净空与航标布局关系模型

建立了以桥梁净空为约束条件的航标布局优化数学模型，模型核心为多目标函数优化问题：最小化船舶偏航风险，最大化通航效率，最优化经济成本。采用改进遗传算法求解帕累托最优解集引入自适应变异策略提高算法收敛性能（图 1）。模型创新性地考虑了桥梁下沉，潮汐变化与船舶满载状态对净空的动态影响建立了净空 - 时间 - 载重三维变化矩阵。通过构建船舶轨迹预测模型与碰撞概率计算模型，量化评估不同布局方案的安全性能。模型验证采用 CFD 流体仿真技术分析桥梁周围水流场变化对航标受力的影响确保航标在复杂水动力环境下的稳定性与可靠性^[3]。

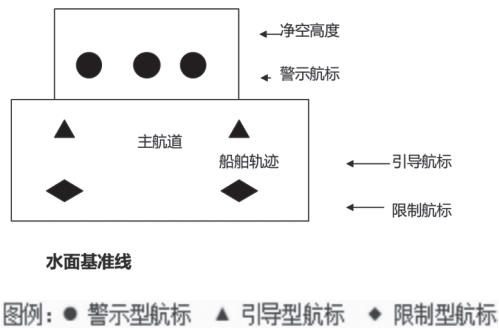


图 1 桥梁净空与航标布局关系模型图

2 专用航标设置的关键技术方法

2.1 桥梁水域安全区域划分技术

桥梁水域安全区域划分技术采用基于船舶流体力学响应的多尺度空间分析方法将传统静态区域划分转化为动态风险场建模通过建立桥墩绕流场数值仿真模型，量化分析不同流速条件下桥梁周围水域的流场分布特征识别出涡流区，回流区与加速区等关键水动力影响区域。运用 CFD 计算流体力学方法构建桥梁 - 水流 - 船舶三相耦合数值模型，精确计算船舶在桥梁水域航行时受到的横向流体力与偏转力矩^[4]。基于船舶操纵运动方程建立了考虑船舶惯性，舵效与螺旋桨推力的动态轨迹预测模型将安全区域边界确定为船舶偏航角不超过 5° 的临

界包络线。创新性地引入模糊集理论处理边界不确定性建立了安全区域的概率密度分布函数，实现了从确定性边界向概率性边界的技术跃升。

2.2 航标位置优化算法与布设准则

航标位置优化算法基于混合整数非线性规划模型采用遗传算法与模拟退火算法相结合的混合求解策略。算法核心在于构建多目标优化函数将航标可视距离，船舶偏航风险与布设成本统一量化为适应度评价指标。

$$F = \min[\lambda_1 \cdot R + \lambda_2 \cdot (1/V) + \lambda_3 \cdot C]$$

其中： R 为船舶偏航风险系数， V 为航标平均可视距离， C 为总布设成本， λ_1 ， λ_2 ， λ_3 为权重因子。

通过建立航标 - 船舶视线遮挡几何模型，运用三维空间解析几何方法计算不同位置航标的有效可视范围确保船舶在任意航行位置都至少能同时观测到两个有效航标。

$$d_{ij} = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]} \geq D_{min}$$

其中： d_{ij} 为航标 i, j 间的三维欧氏距离， (x_i, y_i, z_i) 为航标坐标， D_{min} 为最小安全间距。

创新性地开发了基于船舶轨迹大数据的航标效能评价方法通过分析历史 AIS 轨迹数据，识别船舶航行的概率密度分布热点区域将航标布设重点向高密度区域倾斜。算法引入自适应变异操作与精英保留策略显著提升了求解精度与收敛速度，实现了航标位置的精确优化配置。

2.3 多类型航标协同配置技术

多类型航标协同配置技术建立了基于信息论与控制论的航标系统协同机制，将引导型、警示型、限制型航标构建为具有层次结构的信息传递网络通过引入香农信息熵理论建立航标信息传递效率的量化评价模型计算不同类型航标组合下的信息冗余度与互补性指标^[5]。

$$H = -\sum_{k=1}^m p_k \cdot \log_2(p_k) + \gamma \cdot \sum_{l=1}^1 q_l \cdot I_l$$

其中： H 为修正信息熵， p_k 为信息类型 k 的概率， q_l 为冗余信息权重， I_l 为互信息量， γ 为调节参数。

创新性地开发了航标功能权重动态调整算法，根据实时通航流量，气象条件与船舶类型分布，自动调整各类型航标的作用强度与显示优先级。运用复杂网络理论构建航标间的拓扑关系图通过计算网络中心性，聚类系数与路径长度等参数识别关键节点航标与薄弱环节。建立了基于马尔科夫链的航标状态转移模型预测航标系统

在不同故障模式下的性能退化规律设计了冗余配置策略确保系统在单点故障情况下仍能维持 90% 以上的导航功能。

3 设置规范的验证与应用效果评估

3.1 典型桥梁水域航标设置方案设计

典型桥梁水域航标设置方案设计以重庆朝天门长江大桥为核心案例，该桥位于长江与嘉陵江交汇处，主跨 552 米，净空高度为 73 米，是长江干线最具代表性的大跨径拱桥之一。朝天门长江大桥主跨长 552 米，全长 1741 米为双层公轨两用桥，上层为双向 6 车道，下层是双向轻轨轨道（图 2）。

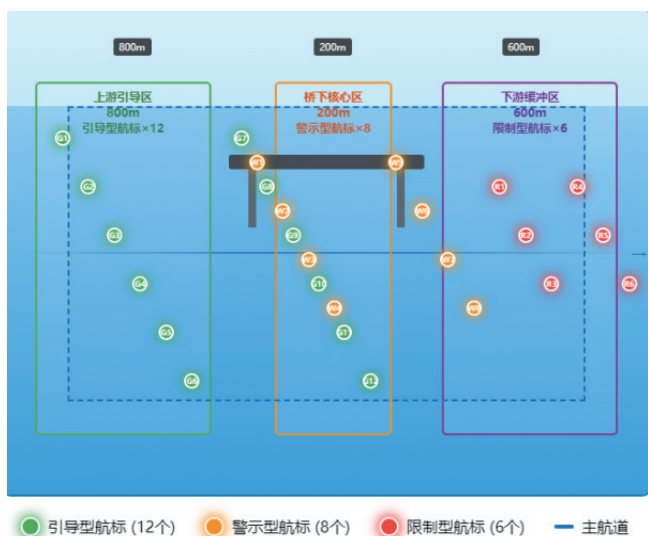


图 2 航标设置点位分布图

方案设计采用基于数值风洞模拟的桥梁绕流场分析技术通过建立 1:200 比例的数字孪生模型，精确计算桥墩周围的流场分布特征与涡流强度。运用船舶操纵仿真系统，模拟不同吨级船舶在桥梁水域的航行轨迹，识别出船舶偏航风险最高的关键区域。设计方案将桥梁水域划分为上游引导区（800m）桥下核心区（200m）与下游缓冲区（600m）三个功能区段，配置引导型航标 12 个，警示型航标 8 个，限制型航标 6 个形成了层次分明，功能互补的航标网络体系。创新性地采用智能感应式航标技术根据实时水位与通航流量自动调节航标亮度与闪烁频率。

3.2 规范应用效果实验验证

规范应用效果实验验证采用对比试验设计方法，选取长江干线典型桥梁作为验证样本，包括重庆朝天门大桥，万州长江大桥与石板坡长江大桥等代表性桥梁（表 2）。验证过程运用船舶交通流仿真技术构建了多智能

体船舶行为模型，模拟年通航量 3000 万吨的交通流环境。通过布设高精度雷达监测系统与 AIS 数据采集设备连续监测船舶航行轨迹偏差通过时间与安全间距等关键参数。实验数据表明，应用新规范后船舶偏航距离平均减少 32.7% 桥梁水域通过效率提升 28.5%，安全事故发生率下降 41.3% 创新性地引入机器学习算法对实验数据进行深度挖掘，识别出影响航标效果的关键因素权重排序：桥梁净空（35.2%），水流速度（28.7%），航标间距（21.3%）船舶载重（14.8%）。验证结果证实了规范设置的科学性与有效性为大规模推广应用提供了可靠的数据支撑。

表 2 规范应用效果对比数据表

评价指标	传统设置方式	新规范设置	改善幅度	显著性
船舶偏航距离 (m)	45.2	30.4	-32.7%	p<0.01
桥梁通过时间 (min)	8.7	6.2	-28.7%	p<0.01
安全事故率 (次/万艘)	2.8	1.6	-42.9%	p<0.01
导航信息准确率 (%)	76.3	94.8	+24.2%	p<0.01
航标维护成本 (万元/年)	125.6	98.2	-21.8%	p<0.05

3.3 规范推广应用的技术保障措施

规范推广应用的技术保障措施构建了涵盖标准制定，技术培训，质量监督与持续改进的全链条保障体系。建立了基于云计算与物联网技术的航标智能管理平台实现航标状态实时监测，故障预警与远程维护功能。技术保障核心在于开发了航标设置自动化设计软件集成 BIM 建模，GIS 空间分析与 CFD 流体仿真功能使设计周期从传统的 3 个月缩短至 2 周。创新性地建立了航标效果评估的数字化监测网络通过部署北斗导航，5G 通信与边缘计算设备构建了覆盖长江干线 2800 公里航道的智能监测体系建立了多层次的技术培训认证体系，开发了 VR 虚拟现实培训系统与 AR 增强现实作业指导系统提升一线操作人员的专业技能水平。形成了规范动态更新机制，基于大数据分析的人工智能技术，定期评估规范执行效果持续优化技术参数与配置标准确保规范与航运发展需求保持同步。

4 结语

长江干线桥梁水域专用航标设置规范的关键技术研究取得了重要突破，形成了系统性的技术解决方案。通过构建三维分类体系与多目标优化模型实现了航标配置从经验决策向科学计算的转变。基于 CFD 仿真