

# 基于特征的NURBS滑行艇体曲面构造

由丹丹, 孙丽萍, 刘宁, 孙寒冰

哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001

**摘要** 基于非均匀有理B样条(NURBS)曲线组合算法,将自由曲线与解析曲线进行组合,构造了刚性充气式滑行艇的横剖面曲线,对复杂横剖面特征对应节点进行了特征提取及优化,采用改进蒙皮法生成光滑曲面,准确地构造了这种具有折角线和舷侧气囊的滑行艇型,为构造曲面复杂的船型提供了一种良好的解决方案和思路。通过对充气式刚性滑行艇曲面特征进行准确构造,可为船体曲面面元的自动划分、船舶CAD/CAM表面板格划分、静力学计算和CFD结构化计算网格生成等提供技术支撑。

**关键词** 刚性充气式滑行艇;NURBS;曲面构造

**中图分类号** U622.2

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.006

## Planning Craft Surface Modeling Based on NURBS with Surface Features

YOU Dandan, SUN Liping, LIU Ning, SUN Hanbing

College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract** The section curves of rigid inflatable planning boat are constructed by free curves and analytic curves based on NURBS curves combination algorithm. The feature extraction and optimization have been launched in the characteristics of the complex section points and improved skinning has also been applied in smoothing surface to precisely construct the planning hull form with knuckle line and broadside airbag. The above methods provide a good solution for constructing complex hull surfaces. It can be a great technical support for automatic partition of hull surface bin, surface block dividing by using CAD/CAM, statics calculation and the generation of constructed mesh in CFD.

**Keywords** rigid inflatable planning boat; NURBS; surface modeling

船体曲面是一种具有双曲度的复杂空间曲面,相比之下,以折角线与复杂附体为外形特征的充气式刚性滑行艇具有更加复杂的曲面。在船舶初步设计中,一般采用横剖线、水线和纵剖线所构成的型线图表示船体曲面,而在实际的计算中,构造船体曲面的表达形式对于完成总体性能计算、水动力性能优化具有重要意义,尤其是在网格技术迅猛发展的今天,准确构造船体曲面特征能够为船体曲面面元的自动划分、CFD结构化计算网格的生成等提供技术支撑。

非均匀有理B样条曲线(non-uniform rational B-spline,

NURBS)是目前国际最新标准的曲线表达方式,能够将直线、二次曲线、自由曲线统一的表示<sup>[1,2]</sup>,被广泛地应用到船体曲面构造领域中。林焰等<sup>[3]</sup>应用3次B样条曲面对某船体的几何造型进行了描述,解决了船体曲面片拼接问题,但船型简单;王承翔等<sup>[4]</sup>给出了用NURBS截面曲线构造自由曲面的蒙皮法,但只研究了用一条脊线和一组截面线来构造自由曲面;Nam等<sup>[5]</sup>在船体曲面初始化设计过程中运用NURBS方法表达;作大伟等<sup>[6]</sup>构造了NURBS为统一数学表达式的船体曲面,研究了NURBS曲面与平面求交问题;张萍等<sup>[7,8]</sup>基于

收稿日期:2013-07-11;修回日期:2013-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61004008)

作者简介:由丹丹,博士研究生,研究方向为船舶三维参数化CAD,电子信箱:youdandan@hrbeu.edu.cn;孙丽萍(通信作者),教授,研究方向为船舶与海洋结构物,电子信箱:sunliping@hrbeu.edu.cn

引用格式:由丹丹,孙丽萍,刘宁,等.基于特征的NURBS滑行艇体曲面构造[J].科技导报,2014,32(8):44-48.

NURBS 表达,提出了一种光滑曲线的参数化设计技术,但是无法保证不破坏船体曲面的光滑性;于雁云等<sup>[9]</sup>提出了一种光滑性微分方程的船体曲面变换方法,实现了对 NURBS 表达的船体曲面变换;陆丛红等<sup>[10-12]</sup>在船体曲面 NURBS 表达的基础上,为船舶自由浮态和静稳性、破舱稳性的精确计算提供了基础。

但传统的 NURBS 方法已经不能够准确地表达充气式刚性滑行艇的复杂曲面特征。本文基于 Matlab 软件,采用 NURBS 曲线组合算法将自由曲线与解析曲线进行组合,通过型值点坐标构造充气式刚性滑行艇的横剖面曲线,并对复杂横剖面特征对应节点进行特征提取及优化,采用改进蒙皮法构造充气式刚性滑行艇型,为曲面复杂的船型表达提供解决方案。

## 1 NURBS 方法

### 1.1 NURBS 基本定义

#### 1.1.1 B 样条基函数

$U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$  是一个单调不减的实数序列,即  $u_i \leq u_{i+1}, i=0, 1, \dots, n+k+1$ 。其中,  $u_i$  称为节点,  $U$  称为节点矢量,用  $N_{i,k}(u)$  表示第  $i$  个  $k$  次 ( $k+1$  阶) B 样条基函数,由德布尔、考克斯和曼斯菲尔德等提出的递推公式定义为

$$\begin{cases} N_{i,k}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

#### 1.1.2 NURBS 曲线

定义一条  $k$  次的 NURBS 曲线为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) \omega_i d_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) \omega_i}, \quad a \leq u \leq b \quad (2)$$

这里  $d_i, i=0, 1, \dots, n$ , 是控制点(它们形成控制多边形);  $\omega_i, i=0, 1, \dots, n$ , 是依附于相应的控制点多边形顶点  $d_i$  的权因子。一般,假定  $a=0, b=1$ , 并且对于所有的  $i, \omega_i > 0$ , 曲线的定义域  $u \in [u_k, u_{n+1}] = [0, 1]$ 。

本文主要使用齐坐标系,因此引入 NURBS 的齐坐标系表达。对控制点  $d_i$  和权值  $\omega_i$ , 构造带权控制点  $P_i^\omega = [\omega_i x_i, \omega_i y_i, \omega_i z_i, \omega_i]$ ,  $i=0, 1, \dots, n$ 。那么在四维空间中定义一条  $k$  次的 NURBS 曲线为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) P_i^\omega, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3)$$

#### 1.1.3 NURBS 曲面

类似于 NURBS 曲线的定义,可以方便使用齐坐标系定义  $u$  向  $k$  次,  $v$  向  $l$  次 NURBS 曲面方程为

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) P_{ij}^\omega, \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (4)$$

其中,  $P_{ij}^\omega = [\omega_{ij} x_{ij}, \omega_{ij} y_{ij}, \omega_{ij} z_{ij}, \omega_{ij}]$  形成了两个方向上的带权控制网格,  $N_{i,k}(u)$  和  $N_{j,l}(v)$  分别为  $u$  向  $k$  次,  $v$  向  $l$  次的非有理 B 样条基函数。

### 1.2 NURBS 曲线的几何算法

#### 1.2.1 NURBS 曲线的升阶算法

升阶主要是用于实现组合曲线的相容性处理,增加曲线的柔性。升阶不改曲线的形状,通过增加控制顶点的个数来提高曲线曲面的自由度;与节点插入比较,虽然升阶过程对曲线求值的计算量有所增加,但是曲线的连续性并不会降低。

具体的计算公式为

$$\begin{cases} P_i^\omega = \alpha_i P_{i-1}^\omega + (1 - \alpha_i) P_i^\omega \\ \alpha_i = \frac{i}{n+1}, \quad (i=0, 1, \dots, n+1) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_i^\omega$  和  $P_{i-1}^\omega$  分别为升阶后的带权控制顶点。

#### 1.2.2 NURBS 曲线的反求算法

利用已知的一组型值点计算控制点,并使构造出的曲线通过已知点列的过程称为反求算法。反求算法在构造滑行艇曲线曲面的实现过程为:

1) 对型值点  $Q_i = (x_i, y_i, z_i)$  进行齐次坐标系预处理得到  $Q_i^\omega = (x_i, y_i, z_i, 1)$ ;

2) 利用针对型值点的参数化方法得到节点矢量  $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ , 这里推荐使用向心参数化方法,它能够很好地处理数据点突变的情况;

3) 建立插值方程组:根据基函数的定义,在节点上基函数的值为零,且有

$$C(u_{ii}) = \sum_{i=i_0-k}^{ii-1} N_{i,k}(u_{ii}) P_i^\omega = Q_{i_0}^\omega \quad (6)$$

式中,  $i_0 \in [0, n]$ ,  $ii = i_0 + k$ , 可以构成  $n+1$  个方程,需要添加  $k-1$  个边界条件使方程组封闭。

4) 解该方程组得到控制顶点  $P_i^\omega$ , 将其回代后,即可得到插值曲线。

#### 1.2.3 NURBS 曲线的组合算法

由 NURBS 曲线可以构造任何不同数目的自由曲线与解析曲线按照不同顺序组合而成的曲线,这个过程称为 NURBS 曲线的组合算法。

假设有首尾相接的  $m$  段  $k_i, i=1, 2, \dots, m$  次的曲线  $C_i$ , 齐坐标系下的带权控制顶点为  $P_{i,l}^\omega$ , 参数化之后得到的对应的节点矢量  $U_i = [u_{i,0}^l, u_{i,1}^l, \dots, u_{i,n_i+k_i+1}^l]$ 。它们为可以根据具体需要连接成光滑的或者带有折角的曲线。

1) 确定多条曲线组合之后 NURBS 曲线的次数  $k = \max\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ , 把次数低于  $k$  的升阶到  $k$  次,得到相应的新的控制顶点  $P_{i,l}^\omega$  以及新的节点矢量  $U_i$ 。

2) 估计各曲线长度占组合曲线总长度的比例,分别记做  $e_0, e_1, \dots, e_n$ 。具体估算方法及曲线  $C_i$  的控制多边形边长和为  $h_i$ , 所有曲线控制多边形的总和记为  $h$ , 则  $e_i = h_i/h$ 。

3) 设置  $C_0$  的参数区间为  $[0, e_0]$ ,  $C_i$  的参数区间为  $[\sum_{l=0}^{i-1} e_l, \sum_{l=0}^i e_l]$ , 重新计算各个曲线的节点矢量  $U_i$ 。

4) 重新确定组合曲线的齐次坐标系中的各控制顶点  $P_i^w$ ,  $i=0, 1, \dots, n$ , 其中  $n = \sum_{r=1}^m n_r$ , 更新之后的节点矢量为  $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ , 公式如下:

$$P_i^w = \begin{cases} P_{i,1}^w, & i=0, 1, \dots, n_1 \\ P_{i,j}^w, & i=n_1, n_1+1, \dots, n; \\ & \text{若 } \sum_{r=1}^{f-1} n_r < i \leq \sum_{r=1}^f n_r, \text{ 则 } l=f; j=i - \sum_{r=1}^{l-1} n_r \end{cases} \quad (7)$$

$$u_i = \begin{cases} 0, & i=0, 1, \dots, k \\ u_i^1, & i=k+1, k+2, \dots, n_1+k \\ u_i^l, & i=n_1+k+1, n_1+k+2, \dots, n; \\ 1, & \text{若 } \sum_{r=1}^{f-1} n_r < i-k \leq \sum_{r=1}^f n_r, \text{ 则 } l=f; j=i - \sum_{r=1}^{l-1} n_r, \\ & i=n+1, n+2, \dots, n+k+1 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 充气式刚性滑行艇典型曲线构造

选取某型带气囊的全封闭深V充气式刚性滑行艇作为研究对象, 该艇具有典型的曲面特征, 可以全面地运用NURBS曲面处理方法。下面选取该艇最具有代表性的横剖图进行研究。在图1中, 直线、二次曲线、自由曲线3种不同类型的曲线共存, 首先对于不同类型的曲线分别使用对应次数的NURBS曲线拟合, 然后使用升阶算法, 将所有曲线升阶到3次NURBS曲线, 最后使用组合方法得到整条曲线的NURBS表达。

通过曲线组合算法, 得到每个组合曲线的横剖曲线(图2)、充气式刚性滑行艇全部特征曲线(图3)。

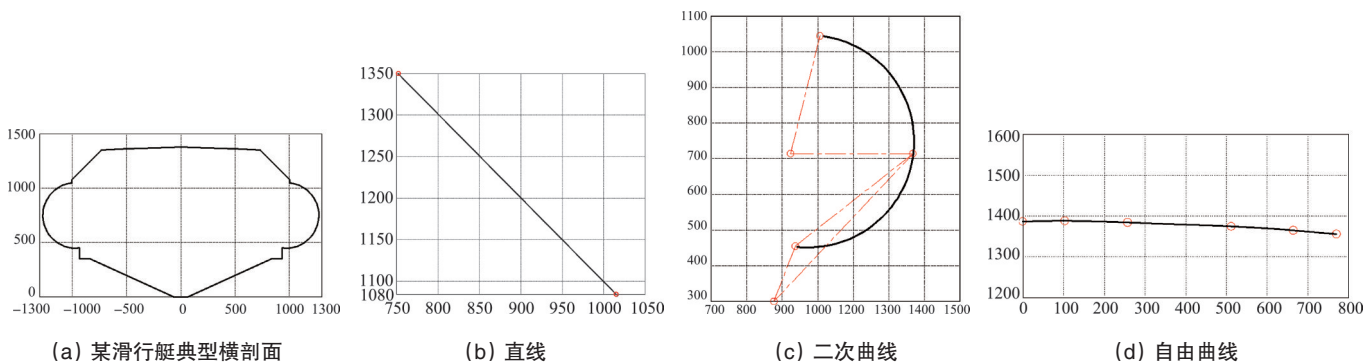


图1 典型横剖面与3类曲线

Fig. 1 Typical cross section and three types of curves

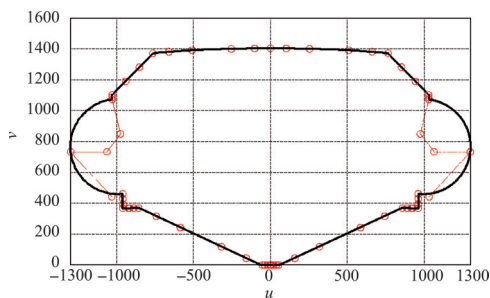


图2 组合横剖曲线与控制点

Fig. 2 Combined cross section curve and control points

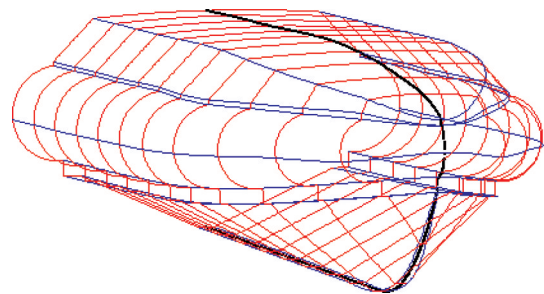


图3 滑行艇特征曲线示意

Fig. 3 Feature curves of planning hull

## 3 充气式刚性滑行艇的曲面构造

使用蒙皮法构造船体曲面, 蒙皮法的实现蒙皮曲线依次选择滑行艇各站横剖面左边部分、艇艏轮廓特征曲线、滑行艇各站横剖面右边部分和艇艉轮廓特征曲线作为截线, 脊线为滑行艇折角线。在使用传统的蒙皮法构造滑行艇曲面时会存在两个缺点:

1) 经过升阶和节点细化处理之后的统一节点矢量维数过大, 数据点太密, 不方便计算和存储。

2) 对于滑行艇的典型特征处理没有针对性, 得不到预期的形状。

因此在本文构造滑行艇船体曲面的过程中, 采用特征点对应、优化节点的改进蒙皮方法。

### 3.1 优化节点

首先, 采用插入节点方法进行相容性处理, 可以得到相同的曲线幂次和相同的节点矢量。相容性处理后, 每条截线上节点矢量的维数会急剧上升, 进一步使后面求得的控制顶

点的数目急剧上升。为了解决这个问题必须进行节点优化。

特征点对应的节点优化就是对于包含相同数目的节点各截线,按照给定的节点删除的误差范围 $\varepsilon$ ,删除相互距离过近的节点,其基本实现过程如下:

1) 选取某一截线 $C_{i_0}$ 作为参考截线,固定各截线 $C_i$ 特征点处节点的位置并记截线的特征节点序列 $U_i^i = [u_{i_0,1}^i, u_{i_0,2}^i, \dots, u_{i_0,s}^i]$ ,设定误差范围 $\varepsilon$ ;

2) 在参考截线 $C$ 中选取第 $j$ 个相邻的特征节点区间 $[u_{i_0,j}^i, u_{i_0,j+1}^i]$ ( $j=1,2,\dots,s$ ),在此区间按照误差范围 $\varepsilon$ 删除节点,得到参考截线 $C_{i_0}$ 的节点矢量 $U = [u_0, \dots, u_{i_0,1}^i, \dots, u_{i_0,s}^i, \dots, u_{n+k+1}]$ ;

3) 计算参考截线 $C_{i_0}$ 的节点矢量占其特征节点区间比例,记做 $Ue_{i_0,1}, Ue_{i_0,2}, \dots, Ue_{i_0,s}$ ,计算方法为 $Ue_{i_0,j} = u_i / (u_{i_0,j+1}^i - u_{i_0,j}^i)$ ;

4) 根据计算参考截线 $C_{i_0}$ 的节点矢量比例对各截线 $C_i$ 进行节点删除,最终得到特征节点对应的统一节点矢量。

优化前后对比如图4和图5所示。

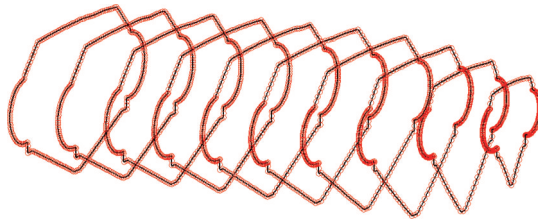


图4 未经节点优化的截线

Fig. 4 Without optimization section curves

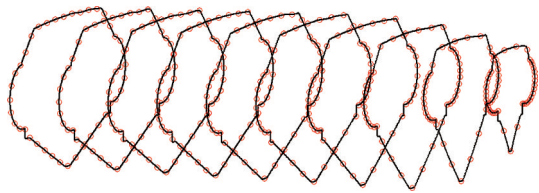


图5 特征对应节点优化之后的截线

Fig. 5 Optimized section curves

### 3.2 改进蒙皮算法实现

改进后的蒙皮法实现步骤如下:

1) 按照型值表中各站的横剖线和首尾轮廓线的型值数据,使用反求算法和曲线组合法得到对应的NURBS截线 $C_i$ ;

2) 对所有截线进行节点细化,得到统一的节点矢量 $U_0$ ,并对该节点矢量进行基于特征节点的节点优化,得到优化后的节点矢量 $U$ ;

3) 计算 $v$ 向的节点矢量: $v$ 向的节点矢量由求得的控制顶点确定,取统一数值。可取各个截面曲线节点矢量的平均值作为 $v$ 向的节点矢量 $V$ ;

4) 以第2步求得的截线控制顶点为型值点,采用第3步

求得的节点矢量计算基函数,逐个反算得到 $v$ 向的控制顶点,即为蒙皮法计算得到的NURBS曲面的控制顶点。

计算后的船体曲面图如图6所示,船体曲面控制顶点网格如图7所示,滑水艇整体曲面构造如图8所示。

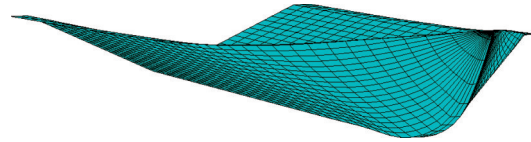


图6 部分船体曲面

Fig. 6 Part of hull surface

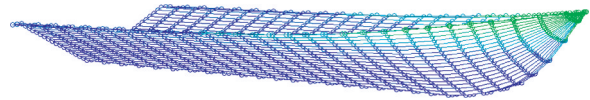


图7 船体曲面控制顶点网格

Fig. 7 Control vertices grid on hull surface

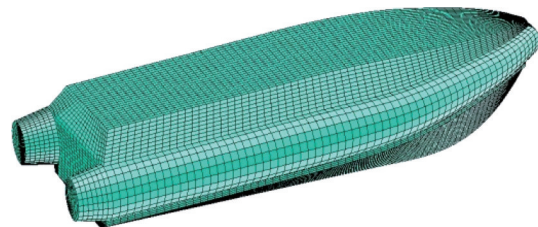


图8 滑水艇整体曲面构造

Fig. 8 Whole surface construction of planing hull

## 4 结论

采用基于特征的NURBS曲面构造方法对于具有折角线及舷侧气囊特征的充气式刚性滑水艇进行了船体表面重构,主要结论有:

1) 针对刚性充气式滑水艇的型线特征,采用NURBS曲线组合法能够有效地保留横剖面的角点信息;

2) 通过引入相容性处理方法对蒙皮法中的截线统一节点矢量进行优化,在空间和时间复杂度上都有所改进;

3) 使用基于特征点的蒙皮法对刚性充气式滑水艇的典型特征设定各横截线相应节点,能够保证滑水艇曲面的准确构造,如折角线,气囊边线,甲板边线等;

4) 为了处理刚性充气式滑水艇的外形特征,实现过程中添加具有针对性的运算和操作,可能影响算法的通用性,有待进一步优化。

### 参考文献(References)

- [1] Piegl L A, Tiller W. The NURBS book[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [2] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.  
Shi Fazhong. CAGD & NURBS[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

- [3] 林焰, 纪卓尚, 戴寅生. 船体B样条曲面的数学描述及计算机方法[J]. 中国造船, 1996(4): 83-86.  
Lin Yan, Ji Zhuoshang, Dai Yinsheng. Mathematical description and computer method for B spline hull surface[J]. Shipbuilding of China, 1996(4): 83-86.
- [4] 王承祥, 李元君, 黄天泽. 基于蒙皮法的NURBS自由曲面设计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1996, 23(4): 77-81.  
Wang Chengxiang, Li Yuanjun, Huang Tianze. NURBS free- from surface based on skinning surface[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 1996, 23(4): 77-81.
- [5] Nam J, Parsons M G. Aparametric approach for initial hull form modeling using NURBS representation[J]. Journal of Ship Production, 2000, 16(2): 76-89.
- [6] 作大伟, 林焰, 纪卓尚. 船体曲面的NURBS表达与设计[J]. 大连理工大学学报: 自然科学版, 2002, 42(5): 569-573.  
Wu Dawei, Lin Yan, Ji Zhuoshang. Ship hull surface' s NURBS representation and design[J]. Journal of Dalian University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 42(5): 569-573.
- [7] 张萍, 朱德祥, 何术龙. 参数化的船型设计方法[J]. 中国造船, 2008, 49(4): 26-35.  
Zhang Ping, Zhu Dexiang, He Shulong. The parametric design method of hull form[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(4): 26-35.
- [8] 张萍, 冷文浩, 朱德祥, 等. 船型参数化建模[J]. 船舶力学, 2009, 13(1): 47-54.  
Zhang Ping, Leng Wenhao, Zhu Dexiang, et al. Parametric modeling approach of hull form[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(1): 47-54.
- [9] 于雁云, 林焰, 纪卓尚. 船体曲面参数化设计新方法[J]. 中国造船, 2013, 54(1): 21-29.  
Yu Yanyun, Lin Yan, Ji Zhuoshang. A new method for parametric design of hull surface[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(1): 21-29.
- [10] 陆丛红, 林焰, 纪卓尚. 基于NURBS表达的船舶静水力特性精确计算[J]. 船舶力学, 2007, 11(5): 691-701.  
Lu Conghong, Lin Yan, Ji Zhuoshang. Precise calculation of ship hydrostatic performances based on NURBS shipform[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(5): 691-701.
- [11] 陆丛红. 基于NURBS表达的船舶初步设计关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
Lu Conghong. Key technologies in preliminary ship design based on NURBS representation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [12] 张明霞. 基于NURBS曲面的船舶破舱稳性计算方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.  
Zhang Mingxia. Study of damage stability calculation with NURBS technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- (责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·



## 中国科协将举办第6届科技摄影展

为更好展示科技发展、传播科技信息、诠释科技成果、普及科技知识,彰显广大科技工作者的形象和风采,激发科技工作者的创新热情和创造活力,同时引导公众关注科技、了解科技,激发公众对科学的好奇和探究,中国科协拟于2014年7月举办主题为“创造·分享——视觉诠释科学技术”的第6届科技摄影展。

摄影展主要展示2013—2014年的摄影作品:

- 1) 年度科技事件:体现年度具有重大影响、体现创新精神的科技事件。
- 2) 科技成果:体现年度具有一定影响力的科技成果。
- 3) 科技人物:反映科技工作者形象、风貌或具有代表性瞬间影像。
- 4) 科技工作者拍科学:展示科技工作者的优秀摄影作品。

欢迎全国各行各业的科技工作者提交符合要求的摄影作品。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/15453806.html>。