

# 潜水器耐压结构可靠性计算及衡准

曾广武, 吴九强, 黎庆芬, 肖 伟

(华中科技大学交通学院, 湖北 武汉 430074)

## 摘 要

提出了一种潜艇及可潜器耐压结构可靠性分析计算方法。通过遗传算法直接搜索最大失效概率设计验算点的方法, 来获得结构的可靠度值。开发出了实用计算程序。数值计算表明该方法有良好的通用性、收敛性和数值稳定性。分析讨论了各类随机变量变异系数对可靠性的影响。用与确定性设计计算规则所给出的安全性衡准相对比的方法, 换算出可靠性分析中结构所对应的可靠性指标值, 作为建立可靠性衡准的依据。

**关 键 词:** 船舶、舰船工程; 潜艇结构; 可靠性计算; 安全性衡准

**中图分类号:** U674. 971 **文献标识码:** A

## 1 引 言

结构的可靠性计算是以失效概率来衡量的。但对工程问题, 由于涉及随机变量联合概率密度函数的多重积分, 常难以实现失效概率的准确计算。人们转而寻求实用可行的近似计算方法。柯勒尔(Cornell)针对独立正态随机变量和线性化失效函数, 导出以随机变量均值和方差为基础的分析方法, 给出了可靠性指标  $\beta$  的定义, 并导出了可靠性指标与失效概率的对应关系, 称为一次二阶矩法。随后, 被推广到非线性失效函数, 发展了均值一次二阶矩法和改进的一次二阶矩法<sup>[1,2]</sup>。拉克维茨和菲斯勒(Rackwitz, Fiessler)又提出了通过在设计点处当量正态化的做法, 使上述方法适用于非正态分布随机变量的情形<sup>[3]</sup>, 为结构可靠度的计算提供了一个有效、可行的算法, 并被国际结构安全联合委员会(JC-SS)所采纳, 称为 JC 方法。

工程实际问题中, 随机变量往往高度非线性, 有时还有多个失效模式, 这样要不断进行设计验算点处随机变量的当量化和失效函数的线性化, 势必使迭代精度和收敛性难以保证, 从而使同一问题可能出现不同的结果<sup>[2]</sup>。本文在 JC 方法基础上, 运用遗传算法, 通过在失效面上直接搜索具有最大失效概率的设计验算点, 来获得结构的可靠性指标。由于遗传算法基于概率搜索机制, 具有很强的适应性、并行性和鲁棒性, 并具有全局收敛性, 特别适用于多个失效函数所构成的失效面的情形。

作者针对潜艇及可潜器(以下简称为潜器)结构可靠性分析问题, 根据工程中的设计计算规则构建失效函数, 进行了可靠性分析计算, 讨论了各类随机变量变异系数对可靠性的影响; 同时, 采用与当前确定性设计计算规范所给出的结构安全性衡准相对比的方法, 经过反演, 换算出可靠性分析中结构具有同等安全贮备水平所对应的可靠性指标值, 为可靠性评估及以提高结构可靠性为目标的优化设计提供了依据。

## 2 结构可靠性分析方法概述

设有某结构物, 具有  $n$  个相互独立的随机变量  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ ; 其概率分布可知, 均值为  $\mu_{x_i}$ 、标准

差为  $\sigma_{x_i}$ 。可能发生  $m$  个失效模式,相应的失效函数  $Q_j$  和极限状态方程  $q_i$  为

$$Q_j: q_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

如果随机变量中有一部分是非正态随机变量,则将这些随机变量在设计点处转化为当量正态化随机变量。然后对基本随机变量  $x_i$  作标准变换:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

失效函数和极限状态方程相应变换为

$$Q_j: q_j(\sigma_{x_1} \bar{x}_1 + \mu_{x_1}, \sigma_{x_2} \bar{x}_2 + \mu_{x_2}, \dots, \sigma_{x_n} \bar{x}_n + \mu_{x_n}) = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

简记为

$$Q_j: q_j(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

则求可靠性指标的 JC 算法可以归结为下述约束极值问题<sup>[4]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \min \left( \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, i = 1, 2, \dots, n \\ \text{Subject to: } Q_j: q_j(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) &= 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

即在多个失效函数所构成的失效面上搜索具有最小可靠度指标(对应于最大失效概率)的设计点。

求得  $\beta$  后,结构对应的失效概率  $P_f$  为

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

式中  $\Phi(-\beta)$  为正态分布函数。

上述约束极值问题,具有非凸的高度非线性的约束界面。搜索该界面上的失效点是较为困难的。本文运用遗传算法,并采取了提高收敛性和数值稳定性的相应措施,获得了较好的效果。

## 2.1 算法概述

遗传算法是模拟自然界生物进化过程与机制,用来解决优化与搜索问题的一类有效算法。作者开发了一个遗传算法程序,用于多目标优化问题,取得了好的效果<sup>[5]</sup>。对于不同的优化或搜索问题,只要按要求的格式编写出针对问题的适应度函数计算模块,就可链接到遗传算法程序中,便可获得适应度最大,即对环境适应能力最强的个体(设计验算点)。针对本文的问题,可构造如下的适度值函数  $F(\bar{X})$ :

$$F(\bar{X}) = M - \left\{ \left( \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 \right)^2 + S q_r(\bar{X}) \right\} \quad (7)$$

式中  $M$  为适当选取的一个大数;  $S$  为迭代控制参数,在迭代过程中取为上升序列,起始值可取为 10;  $q_r(\bar{X})$  为迭代过程中起积极作用的失效函数,  $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ ;  $r = \min\{q_1(\bar{X}), q_2(\bar{X}), \dots, q_m(\bar{X})\}$ 。

式(7)总是从所有可能的失效模式中,选择最有可能的失效模式进入迭代过程,这样就大大减少了迭代过程中的计算量。同时,为了提高收敛效率和防止收敛失败,每轮遗传进化迭代次数不宜过多(建议取 20~30 次)。用下述方法检查每轮迭代后收敛状况:

$$\text{令 } \beta = \left| \left( \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right|, Q = q_r(\bar{X}), \text{ 且 } \beta^{(0)} = 0, Q^{(0)} = 0, \beta^{(k+1)} - \beta^{(k)} = \bar{\beta}, Q^{(k+1)} - Q^{(k)} = \bar{Q}.$$

取  $\epsilon ps$  为一个控制收敛精度的小数:

- ① 如果  $\bar{\beta} = 0$ , 则有可能陷入了局部凹坑,须强行改变初始种群,转入新一轮迭代。
- ② 如果  $\bar{\beta} \neq 0$ , 但  $\bar{\beta} > \epsilon ps, \bar{Q} > \epsilon ps$ , 则用所获得的种群转入新一轮迭代。
- ③ 如果  $\bar{\beta} \neq 0$ , 但  $\bar{\beta} < \epsilon ps, \bar{Q} < \epsilon ps$ , 停止迭代。

## 2.2 潜器耐压结构的可靠性分析方法

### (1) 失效模式及失效基准的确定

文献[6]归纳了潜艇设计计算规则所给出的潜器圆柱形耐压结构的失效模式及失效基准。本文选取了最主要的四个基准:

## 1) 壳板强度失效

$$\sigma_2^0 > 0.85\sigma_s \quad (8)$$

其中,  $\sigma_2^0$  为肋骨跨中壳板的中面应力,  $\sigma_s$  为材料屈服极限。 $\sigma_2^0$  计算方法详见文献[7]。

失效函数及极限状态方程为

$$Q_1: \frac{\sigma_2^0}{0.85\sigma_s} - 1 = 0 \quad (9)$$

## 2) 壳板稳定失效

$$P_{cr} < P \quad (10)$$

式中  $P$  为结构的外载荷;  $P_{cr}$  为理论临界载荷。

失效函数及极限状态方程为

$$Q_2: \frac{P}{P_{cr}} - 1 = 0 \quad (11)$$

## 3) 肋骨强度失效

$$\sigma_l > 0.6\sigma_s \quad (12)$$

式中  $\sigma_l$  为肋骨截面应力。

失效函数及极限状态方程为

$$Q_3: \frac{\sigma_l}{0.6\sigma_s} - 1 = 0 \quad (13)$$

## 4) 肋骨(总体)稳定失效

$$P'_{cr} < 1.2P \quad (14)$$

式中  $P'_{cr}$  为肋骨(总体)失稳载荷。

失效函数及极限状态方程为

$$Q_4: \frac{P'_{cr}}{1.2P} - 1 = 0 \quad (15)$$

## (2) 随机变量及其统计特征的确定

失效函数中所包含的尺寸参数、材料参数、载荷以及可能受随机因素影响的各种系数,均设定为随机变量。本文选取了 6 个基本随机变量,即板厚  $t$ , 舰体半径  $R$ , 肋骨间距  $l$ , 材料屈服极限  $\sigma_s$ , 材料弹性模量  $E$ , 以及外载荷  $P$ 。参考文献[7~9]归纳出它们的统计特征如表 1 所列。

表 1 随机变量的统计特征

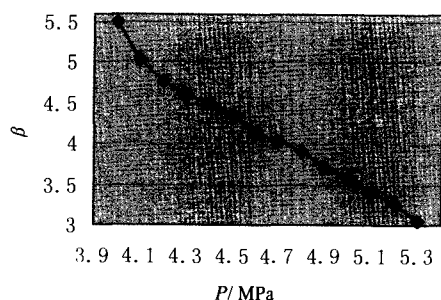
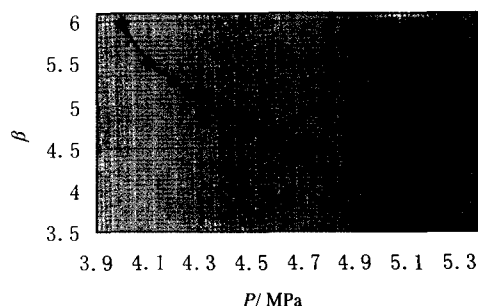
随机变量	尺 寸			材 料		载 荷
	$t / \text{mm}$	$R / \text{mm}$	$l / \text{mm}$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$E / \text{MPa}$	$P / \text{MPa}$
概率分布	正态	正态	正态	正态	对数正态	极值
统计参数范围	10-30	1000-4000	400-700	400-600	1.9e5-2.0e5	3-6
变异系数 $\gamma$	0.02	0.0025	0.0025	0.089	0.03	0.01

## (3) 可靠性指标的计算及随机变量的影响

设已知两艘潜器圆柱形耐压艇体的尺寸、材料、载荷等设计参数,并取表 1 所列的变量为随机变量,其变量的均值和变异系数列于表 2(载荷的均值取相应于最大设计潜深的水压力)。结构的确定性参数为舱长  $L_1 = 4050\text{mm}$ ,  $L_2 = 7700\text{mm}$ ; 肋骨型号: 结构 1 为球扁钢 N0.12a, 结构 2 为球扁钢 No.27b。算得对应于不同外载荷时的失效概率和可靠度水平,如图 1 和图 2 所示。

表 2 某两潜器耐压艇体结构的随机变量及其统计特征

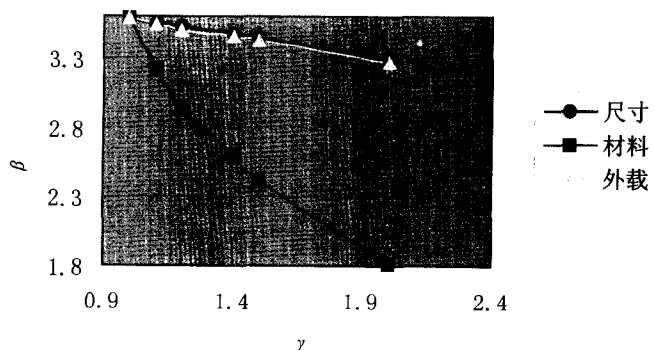
随机变量	尺 寸			材 料		载 荷
	$t / \text{mm}$	$R / \text{mm}$	$l / \text{mm}$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$E / \text{MPa}$	$P / \text{MPa}$
概率分布	正态	正态	正态	正态	对数正态	极值
均值	结构 1	16	1000	450	588	1.96e5
	结构 2	37	2500	700	588	1.95e5
变异系数 $\gamma$	0.02	0.0025	0.0025	0.089	0.03	0.01

图 1 不同外载荷  $P$  时小艇的可靠性指标  $\beta$ 图 2 不同外载荷  $P$  时大艇可靠性指标  $\beta$ 

同时,算得结构 1 载荷均值为 5MPa 时,变异系数  $\beta$  变化对结构可靠度的影响,如图 3 所示。由计算结果及图 3 可知:

① 材料参数的变异值明显大于尺度 and 外载荷的变异值。这是由于结构加工精度有较好的检测与控制手段;且有较先进手段保障潜器因超潜深引起的过载。而对于材料质量的控制,就相对较为困难一些<sup>[8~10]</sup>。

② 在不确定性影响因素中,材料参数变异系数对可靠性指标的影响最为严重。因此,应对结构材料进行严格筛选和预处理,以减少和控制材料性能参数的波动,提高潜器的可靠性。

图 3 变异系数  $\gamma$  变化对结构可靠指标  $\beta$  的影响

### 3 潜器耐压结构可靠性衡准的建立

#### 3.1 建立结构可靠性衡准的方法

为确保潜器耐压结构的安全可靠性,必须根据结构物设计制造和使用的具体情况,给出适当的可靠性指标要求值,作为可靠性衡准值,或目标可靠度。它是潜器耐压结构可靠性设计和安全性评估的标准。这标准应由结构设计规范规定。作者认为对于一些尚未制定可靠性设计规范的结构物或一些超出规范的新型结构物,可以采用校准的方法,确定可靠性指标衡准值<sup>[4]</sup>。即根据现行设计规范所给出的同类结构的安全衡准经反演,推算出采用可靠性分析方法具有同等安全水平所对应的可靠性指标值。并根据所

设计结构物的结构重要性及加工制造、材质控制、载荷波动程度等不确定因素,酌情调整,最后得到一个适当的可靠性指标衡准值,作为结构可靠性优化设计和安全性评估的依据。文献[11~16]从不同的角度和实例分析讨论了这类方法的应用。

### 3.2 校准法的实施方法

选取若干典型潜器耐压艇体结构,用确定性设计计算方法及其衡准,计算出这些结构的安全性水平。然后,针对这类结构在设计、制造过程中存在的不确定性因素,选定随机变量并确定其统计特征,用可靠性计算方法,计算其在同等极限载荷下的可靠性指标。此可靠性指标与这些结构确定性设计方法所确定的安全贮备水平相对应。

对结构 1,设其极限载荷  $P_j$  为 4.9 MPa(对应于最大潜深为 500 m)。用确定性设计计算方法,结构受壳体强度失效控制,即壳体强度条件为积极约束,结构首先因壳体强度不足而失效。结构能承受的载荷  $P_c$  为 7.3814 MPa。因此,该结构的实际安全贮备系数  $\lambda_1$  为

$$\lambda_1 = P_c / P_j = 1.5064 \quad (16)$$

若设计规范要求的安全系数为 1.5,则表明该结构具有规范要求的安全贮备水平,并略有富裕。

对结构 1,采用上节中的可靠性分析方法及表 1 所示随机变量的统计特征,进行了可靠性计算,极限载荷为 4.9 MPa 所对应的可靠性指标为 3.718 MPa。

因此可以认为,对结构 1,可靠性指标达到 3.718 MPa 时,结构的安全性水平将相应于上述确定性设计计算方法所确定的安全性水平。显然,如果加工中加工精度提高,材料参数波动减小,则对同样的结构方案,加工制造出的产品,其安全贮备水平提高;反之,安全贮备水平将降低。这是确定性设计计算方法无法反映的。

同样,对结构 2,用确定性设计计算方法,可计算出结构能承受的载荷  $P_c$  为 7.8436 MPa,该结构的安全贮备系数  $\lambda_2$  相应 1.6007,满足规范要求,且比结构 1 安全贮备更富裕。同样采用可靠性分析方法,计算出结构对应的可靠性指标值为 4.0926。可靠性水平也较结构 1 稍高。

从上述分析计算看出:对于不同的结构,确定性设计计算方法中,结构的安全贮备水平是不一样的,有些结构可能有较大的富裕。这与结构尺寸需要规格化,设计师针对设计结构的使用和制造状况,对安全贮备有不同的考虑,以及失效控制条件不相同等因素有关。

在可靠性分析中,在基本随机变量选取时,可能没有包括所有可能的不确定因素;典型结构方案也不一定涵盖所有可能的设计情况,因此,在确定可靠性衡准值时,应留有适当的富裕量。根据上述计算分析,可以认为潜器可靠性指标衡准值取为 3.9 是合适的。此时对应的失效概率为  $4.7 \times 10^{-5}$ 。当然结构可靠性衡准值,还应考虑结构的重要程度,加工制造厂家的工艺水平等影响因素,对可靠性指标要求值作适当调整。例如,对核潜器或援潜救生潜艇等特殊用途潜器,其目标可靠性值还可酌情提高。

## 4 结 语

本文根据现行潜艇及可潜器耐压结构设计计算规则,构建了结构可靠性分析的失效模式及相应的极限状态方程,通过在多个失效函数所形成的失效面上运用遗传算法直接搜索最大失效概率的设计验算点,来获得结构的可靠性指标值。开发了一个实用程序系统。数值计算表明本文方法有良好的通用性、收敛性和数值稳定性,且使用方便。在此基础上,分析讨论了各类随机变量变异系数对潜器圆柱形耐压艇体结构可靠性的影响,得出了一些有益的结论。同时,采用与当前确定性设计计算规则所给出的安全性衡准相对比的方法,换算出可靠性分析中结构具有同等安全水平所对应的可靠性指标值,可作为建立可靠性衡准的一种方法。通过计算和分析,初步提出了潜器耐压结构可靠性衡准的建议值,为这类结构的可靠性评估和可靠性优化提供了依据。

## 参考文献:

- [1] 余建星,等. 船舶与海洋结构物可靠性原理[M]. 第1版. 天津:天津大学出版社,2001.
- [2] 董 聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用[M]. 第1版. 北京:科学出版社,2003.
- [3] RACKWITZ R, FIESSLER B. Structural reliability under combined random load sequences[J]. *Computers and Structures*, 1978,(9):498-494.
- [4] 曾广武. 船舶结构优化设计[M]. 第1版. 湖北:华中科技大学出版社,2004:117-118.
- [5] 曾广武,肖 伟,吴九强,等. 一种多目标优化遗传算法格式及其在船舶主尺度优选中的应用[J]. *中国水运*, 2005,(5):6-9.
- [6] 朱国锋,吴剑国,谢祚水. 潜艇结构的失效模式及其影响分析[J]. *船舶工程*, 2002,(6):57-61.
- [7] 谢祚水,王自力,吴剑国. 潜艇结构分析[M]. 第1版. 武汉:华中科技大学出版社,2004:8-109.
- [8] 曹 雷,彭 飞,候 磊. 船厂钢材检验力学性能的统计分析[J]. *船舶*, 2003,(6):57-59.
- [9] 蒋建跃,孙亚群. A 级船用钢板强度的计算机预报和优化[J]. *钢铁*, 1999,(7):38-40.
- [10] 鲁晓声. 连铸 945 钢中板性能数理统计分析[J]. *材料开发与应用*, 1995,10(1):1-6.
- [11] BHATTACHARYA B, BASU R, MA K T. Developing target reliability for novel structures: the case of the Mobile Offshore Base[J]. *Marine Structures*, 2001,(1141):37-58.
- [12] GAYTON N, MOHAMED A, SORENSEN J D. Calibration methods for reliability-based design codes[J]. *Structure Safety*, 2004,(26):91-121.
- [13] ANDROIC B. Safety indices obtained by calibration of existing steel structures in croatia[J]. *J. Construct. Steel Res.*, 1998,(46):132-133.
- [14] 周建方,周美英,李典庆. 现役钢闸门结构最低可靠度标准的确定[J]. *北京:中国农村水利水电*, 2003,(5):48-51.
- [15] GAYTON N, BOURINET J M, LEMAIRE M. CQ2RS: A new statistical approach to the response surface method for reliability analysis[J]. *Structure Safety*, 2003,(25):99-121.
- [16] FOSCHI R O. Reliability theory and application to risk analysis of power components and systems[J]. *Electrical Power & Energy Systems*, 2004,(26):249-256.

## The Study of Calculation and Criterion Based on Reliability for Submarine Pressure Hulls

ZENG Guang-wu, WU Jiu-qiang, LI Qing-fen, XIAO Wei  
(College of Traffic Science and Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

### Abstract

An analysis and calculation method of reliability of submarine cylindrical pressure hulls is presented in this paper. The method uses Genetic Algorithms to search design point of the most failure probability to get the value of reliability index. An applied computer program is developed, which has good astringency, stability and in common use. The influence of coefficient of variation of all kinds of random variables on reliability is analyzed and discussed. Meanwhile, the authors adopt the method compared with safety criterion given by deterministic design rules to calculate the reliability index of corresponding structures as the standards to establish the criterion of reliability.

**Key words:** ship engineering; submarine structure; reliability analysis; reliability criterion

## 作者简介

曾广武 男,1937 年生,教授,博士生导师。主要从事船舶与海洋结构物系统分析、优化及损害控制方面的研究。

吴九强 男,1980 年生,硕士研究生。主要从事船舶与海洋结构物设计制造与检验方面的研究。

黎庆芬 男,1982 年生,硕士研究生。主要从事船舶与海洋结构物设计制造与检验方面的研究。

肖伟 男,1979 年生,博士研究生。主要从事船舶与海洋结构物系统分析、优化及振动控制方面的研究。

# 第九届国际海上高速运输会议(FAST2007)在上海举行

天高气爽的中秋时节,来自世界各地的 160 余名专家学者汇聚在美丽的黄浦之滨,隆重举行了第九届国际海上高速运输会议,共同研讨了近年来国际海上高速运输的有关学术发展和技术进步,并深入探究该领域今后的趋向和热点问题。

本次会议经中船重工集团公司批准,由中国造船工程学会、中国船舶科学研究中心和上海交通大学共同主办,并有中船重工集团、中船工业集团、中国船级社以及有关高等院校、研究所和省市造船工程学会支持。

9 月 24 日上午,会议在上海光大国际大酒店开幕,会议主席、七〇二所副所长崔维成教授发表了热情洋溢的欢迎词。会议国际常委会主席契尔·霍登概要介绍了国际海上高速运输会议的历史和宗旨。中国造船工程学会理事长黄平涛出席了开幕式。

开幕式之后,七〇二所名誉所长吴有生院士和韩国学者分别作了有关中国高性能船技术进展和黄海运输系统评述的专题报告。

从 24 日下午开始,会议分四个分会场进行了论文宣读和讨论。在三天的会议过程中,中外学者共宣读论文 80 余篇,内容涉及高速船的设计、船舶阻力、推进与空泡、船舶耐波性、船舶操纵性、船舶安全、船舶结构、复合材料等。

24 日晚,会议组委会在华亭宾馆举行盛大招待会,欢迎各国代表。会议组委会副主席董世汤教授主持招待会。崔维成和上海市人大副主任、上海市造船工程学会理事长张圣坤,中国造船工程学会理事长黄平涛先后致辞。招待会在幽雅温馨的氛围中持续了两个多小时,中外宾客甚感满意。

在随后两天的会议中,中外学者对共同感兴趣的问题进行了认真而深入的交流和分析讨论,有时分会场座无虚席,有时超过会议时间,讨论仍在继续。

27 日,与会代表一早乘车前往无锡,途中代表们游览了苏州拙政园,外宾被这座中国古典园林的美景深深吸引。下午外宾参观了七〇二所实验室,对中国有如此规模和配套齐全的试验设施,赞叹不置。

当晚,在无锡花园大酒店举行宴会,祝贺会议圆满成功和欢送全体宾朋。宴会上,崔维成代表会议组织委员会致辞感谢各国学者来华参加会议,他表示会议的圆满成功是各国专家共同努力的结果,他还感谢全体工作人员在会议组织和服务工作中所付出的辛劳和卓越功效。曾多次来华的美国泰勒水池原所长摩根怀关着对中国的深情厚谊,展示了他 60 年前首次乘船来华,在黄浦江码头所拍摄的老照片。

宴会结束前,霍登主席向本次会议组织委员会主席崔维成和副主席董世汤赠送了国际海上高速运输会议的纪念品,以感谢中方所做出的努力和贡献。随后,他宣布第 10 届会议将于 2009 年在希腊举行。在祝贺会议圆满成功的掌声中,中外学者相约两年后在希腊再见。

(康伯霖)