

基于板块元的水面舰船远场声目标强度预报方法

王汝夯, 李冰, 魏强

(中国舰船研究设计中心, 湖北武汉 430064)

摘要: 提出了一种基于板块元的水面舰船水下远场声目标强度数值预报方法, 首先根据水面舰船水下船体及附体的型线进行等效建模, 采用板块元方法进行网格划分, 建立了水面舰船特有的复杂附体二次反射、海面散射效应的数值模型, 将各板块元的声散射视为一种“滤波”, 各板块元的散射声传输函数具有不同幅度、相位、时延, 将其叠加之和并进行反傅氏变换后, 获得水面舰船波形的远场声目标强度及方位分布特征。通过分析比较典型声呐探测信号下水面舰船的声目标强度, 验证了该方法的有效性, 为优化与控制水面舰船目标强度, 分析水面舰艇水声对抗的作战效能提供了物理依据。

关键词: 声目标强度; 水面舰船; 预报方法; 板块元

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0006-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.002

A method for predicting far-field target strength of surface ship based on planar elements theory

WANG Ru-hang, LI Bing, WEI Qiang

(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, Hubei, China)

Abstract: A far-field target strength (TS) predicting method of surface ship based on planar elements theory is proposed. First, the equivalent 3D models of the underwater hull and appendages are prepared according to the designed form, and then partitioned to mesh by using planar element theory, then the numerical models of the surface scattering and secondary scattering between appendages are established, and the scattering signal of each planar element is described as a transfer function including amplitude, phase and time delay; finally the far-field TS of surface ship in wave level and its distribution characteristics are achieved by inverse Fourier transforming the plus of the transfer function of each planar element. The availability of the present method is verified via comparing TS of surface ship in different incident directions. As a result, a reliable predicting method for optimizing and controlling the TS of surface ship and for analyzing the operational efficiency of underwater acoustic countermeasure of surface ship is provided.

Key words: acoustic target strength; surface ship; prediction method; planar elements model

0 引言

水面舰船的水下船体部分通常具有不同于水下目标的较强目标回声, 易被对方主动声呐探测, 从而受到水中高精度、远距离、大航深、低噪声强威力的现代精确制导武器攻击的严重威胁。水面舰船远场声目标强度的分析与预报, 是控制降低水面舰船回声目标强度的物理基础和关键环节, 对于提高水面舰船声隐身能力具有重要应用价值和意义, 日益受到关注。从上世纪 60 年代开始, 国内外相关学者和工程技术人员对水中声目标强度进行了大量的研究^[1-6], 但研究对象以水下目标为主, 对水

面舰船水下声目标强度的研究颇少提及。

目前, 主要采用三种方法, 一是基于亮点模型的部件强度法^[1-3], 这种方法将水下目标近似为若干简单的形状或亮点, 计算简单, 物理概念清晰, 但由于船体的凸曲面特征, 回波亮点在不同入射角度下会出现漂移, 而且目标模型较为粗略, 不能反映真实的目标回波构成; 二是数值方法^[4], 采用 Kirchhoff 积分法直接数值积分, 实际只能对少数规则形状的目标, 如平板、圆柱、球体等得到计算解; 三是新近发展提出的板块元方法^[5,6], 用若干平面元近似目标曲面, 将求散射声场的面积分转化为数值运算, 提高了计算速度, 但目前相关研究仅针对潜艇目标, 而水面舰船包含不同型线的多种附体结构和不规则的船体曲面, 且存在海面的二次散射等因素, 其水下声目标强度将更为复杂。

本文从工程应用出发, 将工程建模方法和板块元理论相结合, 提出基于板块元理论的水面舰船远

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2014-02-14

作者简介: 王汝夯(1982—), 男, 河北冀州人, 博士, 工程师, 研究方向为水面舰船声隐身。

通讯作者: 王汝夯, E-mail: wangruhag@126.com

场声目标强度预报方法，将水面舰船的水下船体部分划分为若干满足远场条件的板块元，精确逼近目标外形，同时考虑附体的遮挡和海面二次散射的影响，通过将复杂船体回波的积分运算简化为各板块元散射特性叠加计算，以提高计算效率和预报精度，适用于水面舰船水下声目标强度的分析计算。

1 基于板块元的声目标强度

目标强度的定义为距离目标声学中心 1 m 处由目标反射的声强与在同一方向上由远处声源的入射声强之比的对数。目标强度与目标的大小、形状和声学性质有关，并随入射声波的入射方向、频率和波形而发生改变。

Freedman 利用 Kirchhoff 近似方法给出了水中刚性静止目标的远场反向散射强度表达式^[7]：

$$TS = 20 \lg \left| -\frac{ik}{2\pi} \int_{s_0} e^{2ik\Delta r} \cos \beta \cdot V(\beta) ds \right| \quad (1)$$

其中： $\Delta r = \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_0$ ； $\cos \beta = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{r}_0$ ， $\boldsymbol{\rho}$ 为目标横切面积所在点的矢径； \mathbf{r} 为面元到声源的位置矢量； \mathbf{r}_0 为面元的法向矢量； $V(\beta)$ 是目标表面的反射系数。

根据板块元散射理论，假设定义板块元是 xoy 平面内的一个平面多边形，这里取为三角形板块，定义 $\mathbf{r}_0 = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ ， $\boldsymbol{\rho} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$ ，可推得声场的势函数为

$$I = \int_{s_0} e^{2ik(kx+iy)V(\beta)dxdy} = V(\beta) \sum_{n=1}^3 \frac{e^{2ik(x_n u + y_n v)} (p_{n-1} - p_n)}{(u + p_{n-1})(u + p_n v)} \quad (2)$$

其中： $p_n = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$ ， $p_0 = \frac{y_1 - y_3}{x_1 - x_3}$ ； (x_n, y_n) 是板块元顶点的坐标。

由此，可定义单个板块元的传输函数为

$$U(\mathbf{r}, \omega) = A(\mathbf{r}, \omega) \cdot e^{j\omega\tau} \cdot e^{j\phi} \quad (3)$$

其中： $A(\mathbf{r}, \omega)$ 是幅度反射因子，可由式(2)解得； τ 是相对于参考点的时延； ϕ 是回波形成时的相位跳变。若将整个目标划分为 $N \times M$ 个网格，则总散射场可表示为

$$H(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{n=1, m=1}^{N, M} A_{n, m}(\mathbf{r}, \omega) \cdot e^{j\omega\tau_{n, m}} \cdot e^{j\phi_{n, m}} \quad (4)$$

2 水面舰船声目标强度预报方法

水面舰船与潜艇声目标强度计算的最大不同是，(1) 外挂附体的数量更多、外形更复杂；(2) 必须考虑附体与船体之间的遮挡与二次散射因素；(3) 水面舰船的声目标强度受海面的影响更大。因此，

水面舰船声目标强度预报方法的关键是目标几何建模和水面的反射特性。

2.1 几何建模

根据水面舰船水下船体及附体的型线信息，建立三维空间坐标系，选取水线与艏部前端的交点为原点 o ，船尾方向为 $+y$ ，向下为 $+z$ 。对水面舰船水下船体结构采用部件分解的方法分为若干部件，如外形平滑的船体、减摇鳍、舭龙骨、尾轴(架)、螺旋桨、尾舵、艏部尖劈等，继而对上述外形复杂的附体进行等效简化，如将尾轴等效为多个圆台和圆柱体的组合，螺旋桨等效为圆盘面，舭龙骨和减摇鳍等效为与外形尺寸一致的梯形。

借助计算机三维辅助设计软件(如 ANSYS、Foran、Patran、Catia 等)将典型肋位的型线利用数值曲面拟合方法建立水面舰船水下船体曲面，继而按照附体的实际线型进行建模并根据附体结构的布置方案进行定位，这样保证了船体结构几何形状的光滑和连续，同时提高了声目标强度预报方法的建模效率和工程应用性。

2.2 板块元划分

根据输入的信号脉宽 T 、波形(CW 或 LFM)、中心频率 f_0 ，得到照射波的波长 $\lambda = c/f_0$ ，其中 c 为水中声速。根据声波散射理论，满足远场条件的最小距离 $R_{\min} = L^2/\lambda$ ，其中 L 为船长，用 D 表示板块元的最大边长，则板块元的划分尺寸范围为 $R_{\min}/10 > D > 10\lambda$ ，同时板块元的网格划分应充分表现船体结构的曲率和外形结构，对于大多数舰载主动声纳的工作频率在 1 kHz 以上，此时波长 λ 都远小于板块元的尺寸，爬行波可以忽略不计。

将水下船体结构三维模型的各个目标结构进行网格划分，得到水面舰船声目标强度的板块元模型，如图 1 所示，为保证板块元的各个端点在同一平面，取三角形板块元，并将任意一个板块元标记为 $a(i, j)$ ，其逆时针分布的三个端点坐标表示为 $a_{ij}^1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $a_{ij}^2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $a_{ij}^3(x_3, y_3, z_3)$ 。

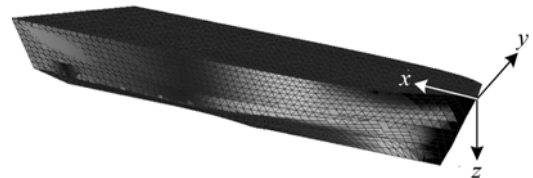


图 1 水面舰船的板块元模型
Fig.1 Planar element model of surface ship

2.3 遮挡与二次散射

利用空间几何知识求解板块元模型的等效中心、面积、法向、相互遮挡等信息，任意板块元

$a(i, j)$ 的等效中心记为 $a(i, j) = (E(x_1, x_2, x_3), E(y_1, y_2, y_3), E(z_1, z_2, z_3))$, 三条边长分别 L_1, L_2, L_3 , 三角形半周长 $P = (L_1 + L_2 + L_3) / 2$, 则板块元的面积 $S_{a(i, j)} = \sqrt{P \cdot (P - L_1) \cdot (P - L_2) \cdot (P - L_3)}$, 其法向量遵从右手法则, $V_{ij} = \langle a_{ij}^2 - a_{ij}^1 \rangle \otimes \langle a_{ij}^3 - a_{ij}^1 \rangle$, \otimes 表示向量的外积。

建立板块元模型的遮挡与二次散射的逻辑判断关系, 海洋界面作为边界纳入二次反射判断, 遮挡的判断逻辑可以理解为板块 1 是否可被入射声波照亮, 并判断任意板块 2 是否在入射波与板块 1 矢量路径上, 即

若 $I_n \cdot V_1 \leq 0$, 则板块 1 未被入射波照亮, 处在阴影区, 其中 I_n 为入射波向量, V_1 为板块 1 的法向量;

若 $I_n \cdot V_1 > 0$, 继续判断板块 1 是否被板块 2 遮挡, 定义变量 $\gamma = \frac{a_2 \cdot V_2 - a_1 \cdot V_2}{I_n \cdot V_2}$, 其中, a_1 和 a_2 分别是板块 1 和板块 2 的等效中心, V_1 和 V_2 分别是板块 1 和板块 2 的法向量。若 $\gamma \leq 0$, 则板块 1 未被板块 2 遮挡, 否则就是遮挡。

判断二次散射, 按照几何声学理论反射定律, 声线在板块 1 产生第一次反射后, 是否存在板块 2 被反射波继续照亮, 若 $V_1 \cdot \langle a_2 - a_1 \rangle > 0$ 且 $V_2 \cdot \langle a_2 - a_1 \rangle < 0$, 则求出板块 1 的反射声波向量, 判断该声线与板块 2 的交点是否在板块 2 内部, 若是继续计算二次散射的回波。

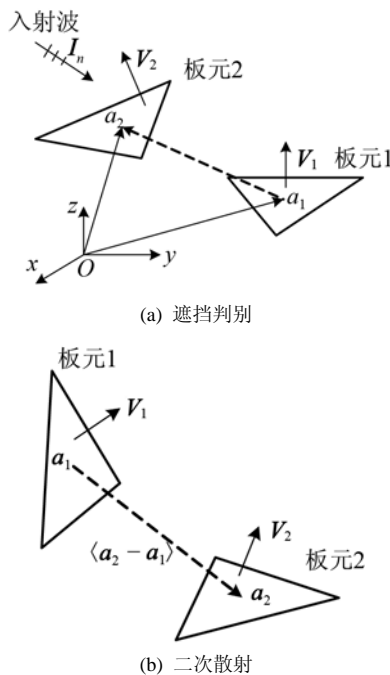


图 2 遮挡和二次散射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shading and secondary scattering

2.4 海面的散射强度

对于水面舰船的水下声目标强度特征, 海面散

射效应是其区别于潜艇的一个显著不同, 由于海浪的随机不平整性, 海面成为一个有效的、具有一定粗糙度的声散射体, 如图 3 所示。不平整海面声散射是造成水面舰船声目标强度特征中背景亮带的主要原因^[8]。

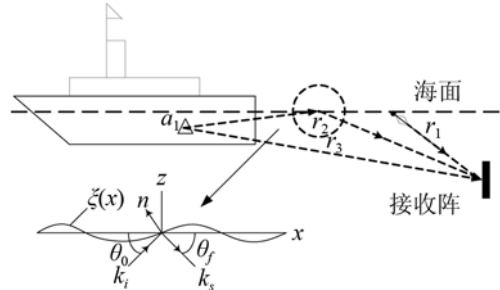


图 3 海洋界面的散射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ocean surface scattering

海面的声散射组成可分为三部分:

- (1) 粗糙的海面作为散射面, 直接形成散射回波, 形成范围较大的背景杂波;
- (2) 海面作为反射面, 对舰船壳体反射的回波进行二次反射;
- (3) 海面的散射信号经舰船壳体的二次反射形成的散射信号。

海面散射信号的第 1 分量可将海面近似为满足一定统计特性的散射面而进行直接计算; 第 2 分量考虑海面与板块元之间的二次反射, 并进行判断和计算, 第 3 分量的量级很小, 对全船总目标强度的影响可忽略不计。

海面的散射特性与入射信号频率、入射角度、海面不平整度等因素有关。本文利用基于小斜率近似的散射系数计算方法^[9]对具有高斯分布粗糙海面的散射系数进行计算。

高斯分布 $\zeta(x)$ 的粗糙海面幅度谱为

$$W(k) = (l\sigma^2 / 2\sqrt{\pi}) e^{-k^2 l^2 / 4} \quad (5)$$

海面的平均反射系数为

$$R = -(1 - \sigma^2 v_0^2 - v_0 \int \frac{dP}{2\pi} W(p) [k^2 - (k_0 - p)^2]^{1/2}) \quad (6)$$

其中: θ_0 为入射波的掠射角; σ 为海面的均方根高度; l 为相关长度; $k = 2\pi/\lambda$ 为声波波数; $v_0 = k \sin \theta_0$, $k_0 = k \cos \theta_0$ 。

3 实例计算

以某水面船舶为目标建模, 船长为 75 m, 船宽为 12.8 m, 其三维模型及坐标系如图 1 所示。

选取四种典型的声呐探测信号为入射声波, 相关参数如表 1 所示, 其中信号 1 和信号 3 为单频填

表 1 入射声波的参数
Table 1 Parameters of the incident wave

序号	中心频率/Hz	带宽/Hz	包络形式	脉宽/ms
1	4000	1	矩形	80
2	4000	1000	矩形	80
3	30000	1	矩形	30
4	30000	1000	矩形	30

充脉冲信号，信号 2 和信号 4 为线性调频脉冲信号。

根据 2.2 节的板块元划分原则，将水面船的目标强度模型进行板块元划分，板块元的尺度范围 $D > 0.59 \text{ m}$ 。

取海面的海浪平方根波高 σ 为 0.1 m，入射频率为 4 kHz，海面的平均反射系数随入射角度的变化曲线，如图 4 所示。

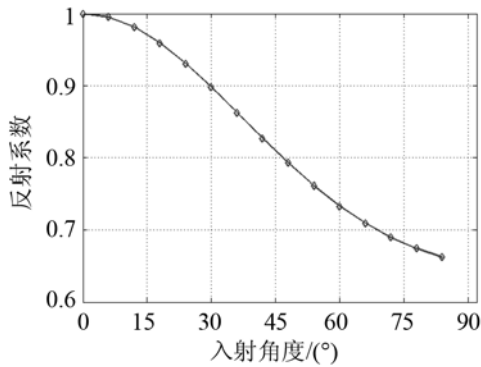


图 4 海面反射系数随入射角变化曲线
Fig.4 Curve of the reflection coefficient versus the incident angle

图 5 给出了舰船正横(90°)方向下四种探测声脉冲的回波信号。可以看出，由于信号 1 和信号 3 为单频填充脉冲，其回波的尺度分辨率低，因此在时域上对目标回波亮点的分辨能力弱于具有一定频带宽度的信号 2 和信号 4。比较不同脉宽的回波信号，因为短脉冲不能同时覆盖所有目标亮点，目标亮点之间的延时使回波脉冲不能完全重叠，因此反映出的目标亮点信息更丰富一些。

图 6 给出了表 1 中四种探测脉冲下，水面舰船水下目标强度的方位分布特性。水面舰船的水下声目标强度特征呈现出与潜艇类似的“蝴蝶”形分布，不同在于船艏部的目标强度比潜艇更加突出，分析原因主要是水面舰船的船艏安装有尾轴架、尾轴、尾舵、螺旋桨等多种尺度较大的附体。

另外可见，宽带调频信号(图 6(b)、图 6(d))的目标强度比单频填充信号(图 6(a)、图 6(c))的强度方位分布更平滑稳定，这种声目标强度随观察方位变化而变化的现象，也称为目标强度的“闪烁”，是由声波的干涉作用而产生的，由于线性调频脉冲信号具有时变的载频和更为丰富的频率分量，声波干涉被“平滑”了，同时也验证了水面舰艇和潜艇在

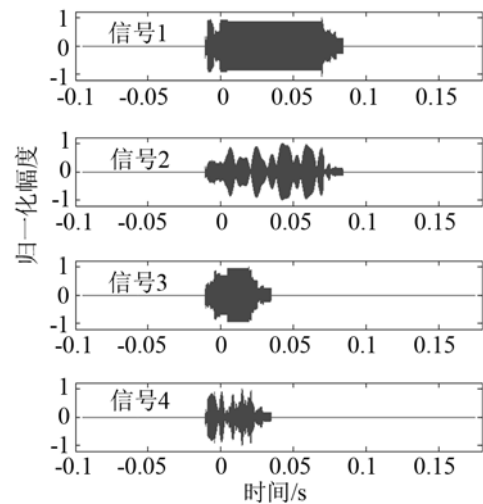


图 5 正横方向不同入射脉冲的回波信号
Fig.5 Echoes of different incident pulses in abeam direction

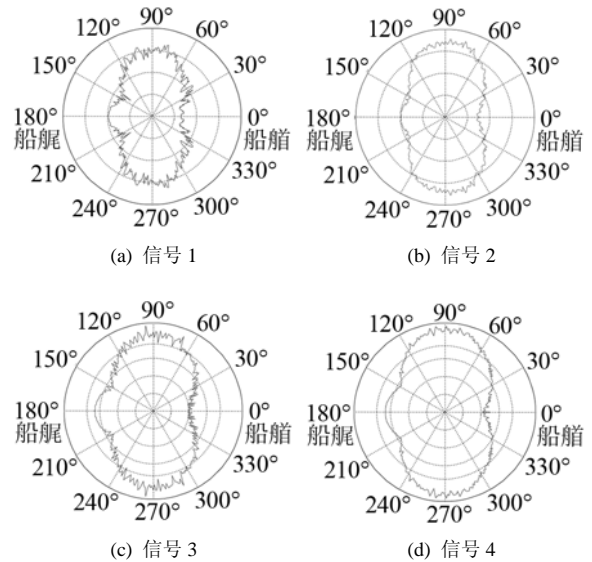


图 6 水面舰船声目标强度的方位分布特性
Fig.6 Bearing characteristics of acoustic target strength of surface ship
水下声目标强度测试中的“闪烁”现象。

4 结语

本文提出了一种基于板块元理论的水面舰船远场声目标强度预报方法，可得到任意入射角度和海况下水面舰船目标回波的波形级信号，能较准确的预报水面舰船水下声目标强度和方位分布特性，为优化与控制水面舰船的声目标强度，分析水面舰艇水声对抗的作战效能，提供了物理基础，所提出的上述数值预报方法使用较简便，结果直观。

参 考 文 献

[1] 汤渭霖. 用物理声学方法计算界面附近目标的回波[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 1-5.

- TANG Weilin. Calculation of acoustic scattering form object near an interface using physical acoustic method[J]. Acta Acoustica, 1999, **24**(1): 1-5.
- [2] 何心怡, 蒋兴舟, 林建域. 基于亮点模型的潜艇回波仿真[J]. 鱼雷技术, 2001, **9**(3): 15-18.
HE Xinyi, JIANG Xingzhou, LIN Jianyu. Simulation of submarine echo base on highlight model[J]. Torpedo Technology, 2001, **9**(3): 15-18.
- [3] 朱利超, 魏鹏举, 高杰, 等. 基于亮点模型的水下目标近程回波仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2011, **31**(11): 153-155.
ZHU Lichao, WEI Pengju, GAO Jie, et al. Simulation of echos from underwater scaling targets in short range based on highlight model[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, **31**(11): 153-155.
- [4] 成刚, 徐海亭. 水下目标回波特性建模软件 TESSYS 及其应用[J]. 声学技术, 2003, **22**(2): 85-87.
CHENG Gang, XU Haiting. Calculating software TESSYS of the echo characteristics of submerged targets and its application[J]. Technical Acoustics, 2003, **22**(2): 85-87.
- [5] 冯奇. 基于板块元的水下复杂目标强度预报[J]. 鱼雷技术, 2010, **18**(4): 258-267.
FENG Qi. Strength prediction of underwater complicated target based on planar element method[J]. Torpedo Technology, 2010, **18**(4): 258-267.
- [6] 范军, 汤渭霖, 卓琳凯. 声呐目标回波特性预报的板块元方法[J]. 船舶力学, 2012, **16**(1-2): 171-180.
FAN Jun, TANG Weilin, ZHUO Linkai. Planar elements method for forecasting the echo characteristics from sonar targets[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, **16**(1-2): 171-180.
- [7] Freedman A. Recent approaches to echo structure theory[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36.
- [8] 李继续, 张明敏, 陈宝柱, 等. 波动水面对近水面目标声反射的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2011, **31**(1): 149-152.
LI Jixu, ZHANG Mingmin, CHEN Baozhu, et al. Effects of the wave fluctuation on the acoustic scattering of the near surface target[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, **31**(1): 149-152.
- [9] 陈小泉, 马忠成. 小斜率近似方法分析粗糙界面声散射问题[J]. 声学技术, 2009, **28**(6): 725-728.
CHEN Xiaoquan, MA Zhongcheng. Study of acoustic scattering form rough surface by the small-scope approximation theory[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(6): 725-728.

• 简讯 •

上海市国防科工办领导莅临中国科学院声学研究所东海研究站调研

2015年1月29日,上海市国防科技工业办公室副主任伍继宏、副调研员叶先扬等3人冒雨莅临中国科学院声学研究所东海研究站(简称东海站)调研工作。

在站长胡长青等的陪同下,伍副主任一行参观了东海站水池、相关研究室等科研生产部位,详细了解了产品指标、性能以及应用情况,并听取了站长助理张伟才关于单位规划、近期科研成果、专项资助项目进展情况等几方面的汇报。

伍继宏副主任对东海站在国防科技领域做出的贡献表示肯定,并对东海站在现有条件下取得的成绩表示欣慰。对东海站科研生产模式、市场拓展情况、军民融合发展等问题进行了梳理讨论,并提出了建设性的意见和建议。

最后伍继宏副主任希望东海站能继续深挖技术研发潜力,充分发挥自身小而精的技术和地位优势,争取空间、开拓市场,依托新园区实现跨越发展,并表示科工办会继续支持东海站的创新和发展。

《声学技术》编辑部