

【引用格式】吴哲, 李可, 谢建国, 等. 水下移动对接坞站设计与试验研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 383-388.

# 水下移动对接坞站设计与试验研究

吴哲, 李可, 谢建国, 杜廷朋

(中国船舶集团有限公司第七一五研究所, 浙江 杭州, 310023)

**摘要** 水下移动对接是无人水下航行器(UUV)回收的重要发展方向, 它对坞站的集成化设计、水动力设计等有较高要求。为进一步研究UUV移动坞站回收技术, 提出一种水面船有缆拖曳式坞站结构, 进行紧凑型布置设计与稳态流体性能评估, 并结合现有UUV, 通过湖试验证了2 kn拖曳航速下的坞站姿态特性与对接性能, 最终对接成功率达80%。结果表明, 该方案具有较高的可行性, 其研究成果对水下移动对接技术研究具有一定借鉴意义。

**关键词** 水下无人航行器; 水下移动对接; 坞站

**中图分类号** TP242

**文献标识码** A

**文章编号** 2096-5753(2024)04-0383-06

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.004

## Design and Experimental Study of Underwater Mobile Docking Station

WU Zhe, LI Ke, XIE Jianguo, DU Tingpeng

(No. 715 Research Institute of CSSC, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** Underwater mobile docking is an important development direction for recovery of an unmanned underwater vehicle (UUV), which has high requirements for integrated design and hydrodynamic design of docking stations. In order to further study the recovery technology of UUV mobile docking station, a cable towed docking station structure for surface ships is proposed, and the compact layout design and steady-state fluid performance evaluation are carried out. The attitude characteristics and docking performance of the docking station at the towed speed of 2 kn are verified through lake test using the existing UUV. The final docking success rate is up to 80%. The results show high feasibility of the proposed scheme, and have certain reference significance for the research of underwater mobile docking technology.

**Key words** unmanned underwater vehicle; underwater mobile docking; docking station

## 0 引言

根据对接坞站在UUV对接过程中的运动和被操纵状态, 可将水下对接形式分为静态对接和移动对接2种。静态对接是指UUV主动与坐落于海底或固定于海底基站上的坞站进行连接, 而移动对接则是指UUV与坞站根据需求主动调整相互位置进

行对接。近年来, 随着机动作业要求的提升, UUV与母平台被要求在不同水域使用, 尤其在无人协同领域(UUV/USV, UUV/潜艇等), 移动对接具有更高的隐蔽性和灵活性, 成为了未来对接技术的重点突破方向<sup>[1-3]</sup>。

移动对接技术在国外起步较早<sup>[4]</sup>, Hydroid公司曾设计一套动态回坞系统, 使用水面艇携带拖曳

收稿日期: 2024-04-27

作者简介: 吴哲(1991-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事无人系统总体设计研究。

装置实现 UUV 的动态回收,在 2011 年通过海上试验验证了方案的可行性,对接成功率达 77%。美国佛罗里达大西洋大学<sup>[5]</sup>提出双体 USV 拖曳缆绳的形式,回收时 UUV 头部咬绳装置定位缆绳进行对接。国内在对接回收领域以中船七一五所、中科院沈阳自动化研究所、浙江大学、哈工程<sup>[6-9]</sup>为代表,但大部分的研究以静态对接为对象展开,直至近几年开始提出移动对接的方案与算法研究<sup>[10-15]</sup>,而在实物样机的测试验证上可查资料较少。目前可查得沈阳自动化所设计的 DAUV,包括 AUV 固定装置,起吊架、3 个纵向推进器,2 个垂向推进器及 6 个浮力桶。

相对静态对接技术,移动对接时 UUV 和坞站间的相对运动关系更复杂,对坞站的拖曳稳定性提出了很高的要求<sup>[16]</sup>。本文为进一步研究 UUV 移动坞站回收技术,探求简洁结构形式,设计了一套水面船缆绳拖曳式坞站样机,进行了紧凑型布置设计与稳态流体性能评估,并在千岛湖开展了拖曳试验与对接试验进行验证,探究拖曳式移动对接的可行性。

## 1 设计目标

移动对接主要发生在航行器回收阶段,此时航行器一般已上浮守位在预定地点或处于临近水面位置,母船只需释放回收坞站至水下浅水区域即可进行回收。在回收航速上,鉴于大多数航行器巡航航速在 2~4 kn 范围<sup>[17-18]</sup>,坞站的拖曳速度也不宜太高以形成相对速度差。基于上述需求,提出坞站设计目标如下:1) 工作水深:  $\geq 100$  m; 2) 拖曳速度: 2 kn; 3) 适用 UUV 主体直径: 324 mm; 4) 总重:  $\leq 100$  kg; 5) 稳态纵倾角:  $\leq 10^\circ$ ; 6) 角度变化幅值:  $\leq 5^\circ$ 。

## 2 坞站设计

### 2.1 结构设计

坞站整体布局及结构设计见图 1。主体对接筒呈圆柱形,前端安装有对接喇叭口,筒内布置光源,后部为导流水密电子舱(本研究主要针对移动对接技术,筒内并未安装插拔锁紧装置,仅预留了接口)。电子舱内布置有必要的姿态传感器、深度传

感器、能源、控制板、硬盘等设备。

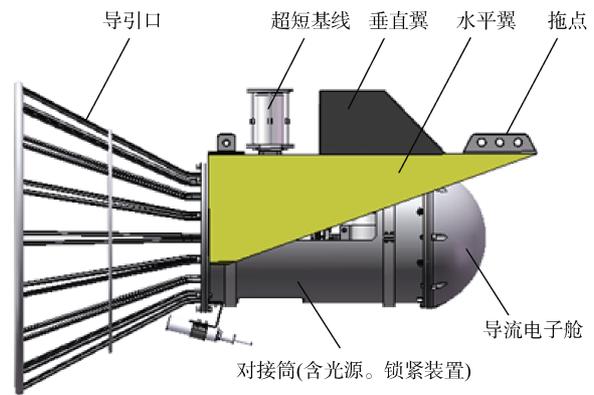


图 1 坞站装配图

Fig. 1 Assembly drawing of docking station

为实现坞站在水下的姿态稳定,对接筒上部布置有水平向与垂直向 2 个水翼,其中水平向水翼还起到提供升力的重要作用,在拖曳状态改变坞站的深度位置。此外,顶部还布置有超短基线用于坞站与航行器的相互定位。

坞站在设计时,充分考虑了轻量化、集成化。主对接筒使用小厚度不锈钢,其余结构以轻质铝合金为主,工程塑料件为辅。导引口使用的也是栅格形的导引结构,而非全包络的喇叭面。设计完成后,对接坞站总重仅 84 kg,浮力 40 kg,最大尺寸为 1.41 m (长)  $\times$  1.44 m (宽)  $\times$  0.86 m (高)。集成化的设计使得该对接坞站可在小型船舶上配合卷扬机灵活使用。

### 2.2 水动力设计

#### 1) 水平翼设计。

水平翼在设计时,两侧对称并采用上单翼加下反角的形式,改善整体的抗横滚稳定性同时又保持一定滚转能力。同时,采用较大的前缘后掠角使升力面靠近重心,减小流体力力臂。通过拖曳姿态仿真计算迭代,最终设计单边水翼水平面投影翼展为 0.6 m,投影面积为 0.3 m<sup>2</sup>,水翼下反角为 27°。

为减少加工难度,水平翼直接使用铝合金薄板折弯,不采用翼型剖面。经 CFD 计算,翼板两侧的流体升力约为 500 N/m<sup>2</sup>,结合翼板下设备重量后,在有限元软件中进行了应变评估,拖曳时最大

变形量出现在翼板的末端, 为 0.47 mm, 满足使用要求。

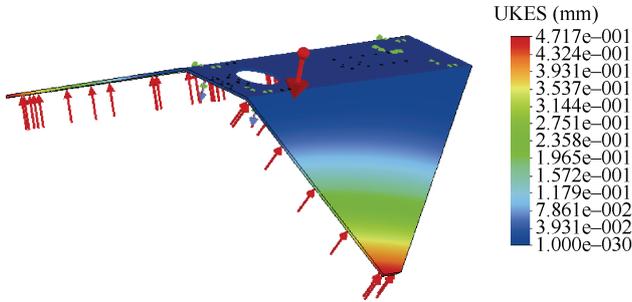


图 2 水平翼应变分析

Fig. 2 Horizontal wing strain analysis

2) 垂直翼设计。

垂直水翼使用 NACA0012 对称翼型, 这种翼型升阻比性能优越, 广泛应用于水下平台稳定翼结构。根据母型推算, 设计剖面投影面积为 0.03 m<sup>2</sup>, 展长 0.18 m, 以提供足够的操纵力矩。

3) 稳态拖曳姿态预估。

对接坞站在水下拖曳时, 以拖点为旋转中心, 受到两种力矩: 对接坞站自身的重浮力合力矩  $M_R$  和流体施加在对接坞站上导致的倾斜力矩  $M_F$ 。本文采用 CFD 方法进行移动对接平台匀速直航仿真, 测算其升阻力和流体力矩。网格采用切割体与棱柱层复合网格, 求解器采用  $k-\varepsilon$  湍流模型, 速度-压力分离算法, 离散方式采用二阶迎风格式。在网格独立性与首层网格高度无量纲数检测后, 最终得到不同偏角下的坞站升阻力、力矩特性如表 1, 压力分布 (对应 2 kn, 偏角 0°) 如图 3。

表 1 流体力矩计算

Table 1 Hydraulic torque calculation

流速/kn	偏角/(°)	力矩/(N·m)	升力/N	阻力/N
2	-12	72.22	-212.67	-131.21
2	-9	45.03	-139.77	-111.77
2	-6	18.60	-66.47	-100.99
2	-3	-5.57	3.62	-98.02
2	0	-24.54	59.00	-108.25
2	3	-50.79	137.23	-123.22
2	6	-75.73	217.43	-145.26
2	9	-98.83	288.85	-175.56
2	12	-121.62	351.22	-211.65

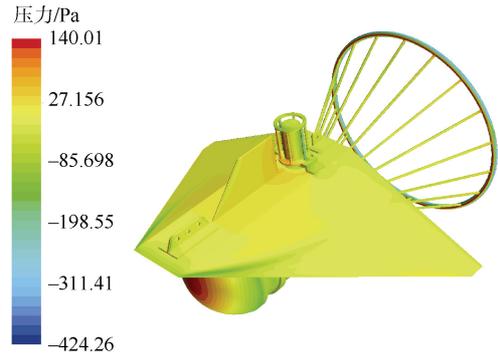


图 3 2 kn、0°偏角下的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution at 2 kn, with pitch angle of 0 degree

重浮心产生的回复力矩可由下式获得:

$$M_R = GL_{OG} \cos(\theta_1 + \theta) - BL_{OB} \cos(\theta_2 + \theta)$$

式中:  $G$  为重力;  $B$  为浮力;  $L_{OG}$  为重心与拖点之间的斜距;  $L_{OB}$  为浮心与拖点之间的斜距;  $\theta$  为坞站纵倾角;  $\theta_1$  为正浮状态重心拖点连线与水平面夹角;  $\theta_2$  为正浮状态浮心拖点连线与水平面夹角。

表 2 合力矩计算

Table 2 Moment calculation

纵倾角	N·m	
	3°	6°
$M_F$	-50.79	-75.73
$M_R$	66.79	60.10
$M_{合}$	16	-15.63

最终拖曳进入稳定后, 根据合力矩为 0 可推出稳定拖曳纵倾角为 4.5°。

2.3 电气设计

该移动坞站采用自容式设计, 与母平台之间使用普通绳索连接, 不产生能源与信息交互, 简化了系统复杂度。电池为二次磷酸铁锂充电电池, 放置于导流水密电子舱内, 通过舱外的水下开关进行上电控制, 且使用过程中可通过舱外专用水密接插件进行连接充电。电池通过电压转换模块将电能供给到光源与传感器。此外根据当前任务状态, 主控板可通过继电器控制各个设备的上电。

水下坞站自身还配置有多传感数据存储系统, 使用固态硬盘记录姿态传感器、摄像头、压力传感器、漏液传感器在使用过程中的回传数据, 便于坞站回收后的数据离线分析。数据可通过电子舱外的网络接口进行非开舱读取。

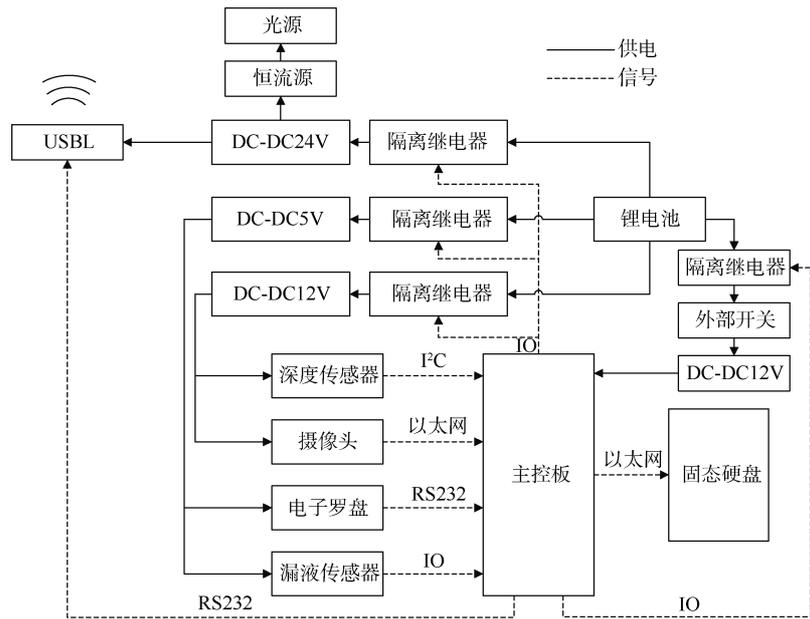


图 4 供电及通信设计

Fig. 4 Electrical and communication design diagram

### 2.4 通信定位设计

根据任务使命，坞站本身无需知晓自身位置，只需与 UUV 进行相对位置确定即可。在导流水密电子舱内，布置的姿态传感器与深度传感器将产生的位姿信息通过超短基线发送给远端 UUV，引导 UUV 进入对接区域。相对于其他定位方式，声学导引的作用范围大，技术成熟，对海洋环境的要求相对较低，不受浊度影响。系统配置的是中船七一五所自研的超短基线系统，作用范围可达 3 km，定位信息最快刷新时间间隔为 2 s，与 GPS 测量结果相对定位精度可达 0.5% 以下。

同时，坞站的水声回复信息将广播给母船端的水声接收端，母船上位机可同步收到目前坞站的状态及对接状态，具体包括目前坞站的电量、姿态、是否漏水、深度、处于的对接阶段等等。采用水声形式而不是拖缆形式的好处是只需在船端固定一个水声接收模块即可完成坞站信息获取，大大减少系统复杂度，而详细的离线数据信息可在坞站回收后通过网络获取。

### 3 动态对接流程

整个移动对接过程可分成以下几个阶段：

1) 准备阶段。UUV 已完成作业任务在指定水

域内游弋，此时母船一边航行一边释放坞站入水至一定深度，减少海流与阳光对回收的影响；

2) 触发阶段。坞站入水稳定拖曳后，母船端水声模块触发 UUV 进入回收状态，UUV 与坞站通过水声交互开启回收任务；

3) 回归阶段。UUV 根据坞站超短基线回传的位姿信息，以高速驶向对接口前方的就位点；

4) 导引阶段。到达就位点后，UUV 降速航行，不断沿接驳口方向最终在视觉与光导引下进入坞站，完成回收。

### 4 湖试

为充分验证所设计移动坞站的性能，样机集成后在中船七一五所千岛湖试验站进行了试验测试。试验站水域可直线航行航道近 1.5 km，水深 40 m，湖底地势较平坦，符合试验条件。同时，试验过程中借用了所内自研的 324 mm 口径航行器配合进行移动对接测试，航行器巡航速度为 3 kn。

坞站采用试验站配试小船进行直线拖曳，为防止太阳光对光学对接的影响，拖曳深度大致为 28 m，初始与 UUV 距离约 10~20 m 左右。UUV 总重在 200 kg 左右，自航至指定就位点，待坞站稳态拖曳后下潜进行对接。



图 5 坞站起吊

Fig. 5 Lifted docking station

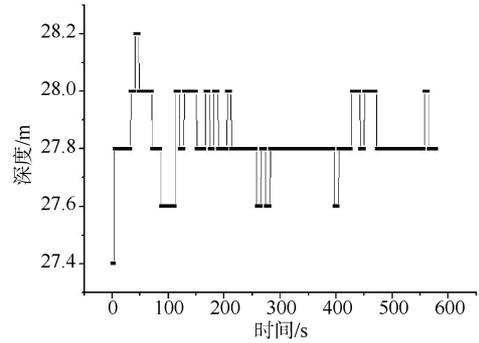


图 8 深度变化

Fig. 8 Change of depth

### 4.1 拖曳试验

保持对接坞站在拖曳过程中的稳定性为移动对接的基本技术需求之一, 故通过拖曳试验优先测试对接航速 (2 kn) 下坞站姿态随时间变化情况, 包括深度、纵倾角、横滚角等, 结果见下图。可以看出, 对接坞站深度稳定在 27.6~28 m 之间, 最高幅度在 0.4 m 以内; 纵倾角变化在 $-3^{\circ}\sim-5^{\circ}$ 之间, 幅度变化在 $2^{\circ}$ 以内, 与前期水动力计算的偏角结果误差较小; 横倾角变化在 $-1^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间, 幅度变化在 $2^{\circ}$ 以内。可知, 拖曳过程中所设计的移动对接坞站深度、姿态变化较平稳, 满足对接条件。

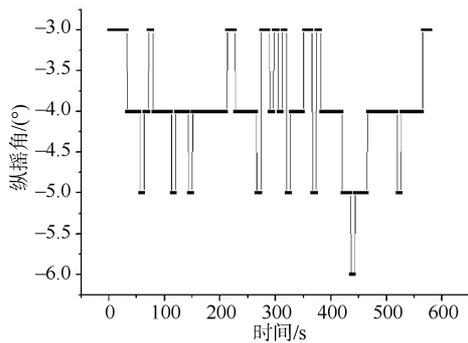


图 6 纵倾角变化

Fig. 6 Change of pitch angle

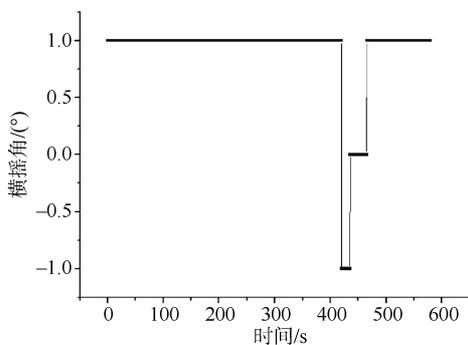


图 7 横摇角变化

Fig. 7 Change of roll angle

### 4.2 对接试验

完成拖曳试验后, 进行了移动对接试验。试验时, 水面船拖曳坞站以一定速度定向航行, UUV 以高速迅速接近坞站执行对接。过程中, 坞站航速不超过 2 kn, UUV 与对接坞站速度差为 0.5 kn。受母船平台自身横滚及千岛湖水面流影响, 实际上坞站的行进路线并不能做到严格的直线, 对接全程是一个不断动态调整航向与姿态的过程, 见图 9。最终试验总计对接 5 次, 成功入坞 4 次, 对接成功率达 80%。

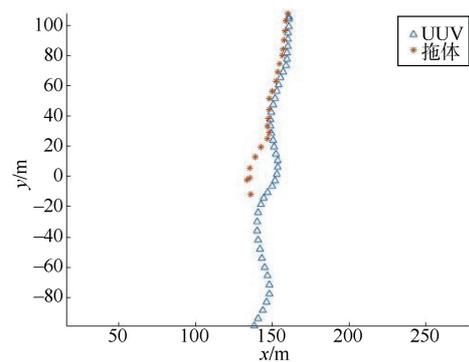


图 9 对接航迹

Fig. 9 Docking path

可以看出, UUV 能够在较远的距离能通过声学进行相对位置定位, 解算出目标信息并驶向目标点, 解算精度较高, 控制策略理想; 在近端, UUV 在入坞前一段时间内能够较准确地跟踪装置喇叭口相对方向, 不断调整自身位置与姿态, 最终进入坞站。

在本次试验中, 移动对接展现了以下几点技术优势:

1) 导引时间长。静态对接的一大技术难点在于 UUV 需保持最低可航行航速用于抵抗海流与维持位姿,与坞站相对速度较大,最终末端导引时间较短,而在移动对接时,两者的速度差可调至极小值,大大延长了 UUV 末端光学导引的响应时间;

2) 复位速度快。移动对接在对接失败后,坞站与 UUV 可迅速通过速度差实现复位,再次开始对接,效率相较于静态对接更高。



图 10 航行器捕捉光源与进坞

Fig. 10 UUV capturing light source and docking

## 5 结束语

移动对接技术对提高水下机器人综合作业能力具有重要的意义。本文设计了一种水面船拖曳式 UUV 回收坞站结构。该设计结构紧凑,工艺简单,经湖试验验证具有较好的位姿稳定性。在与 324 口径 UUV 联合进行的移动对接试验中,坞站能够有效导引 UUV 进入对接筒,5 次对接成功 4 次,试验结果符合预期。

当然目前所做的工作主要是为了验证移动对接的工程可行性,并未考虑环境载荷如海流、波浪等对对接过程的影响,后续将继续在这方面开展工作。

## 参考文献

[1] 岳丽军,王凡,赵朝先. 海战场无人作战体系协同运用与指挥控制设想[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44

(4): 1-7.

- [2] 孙彧,潘宣宏,王幸军,等. 无人潜航器装备技术发展及作战运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 104-109.
- [3] 刘菲菲,郑荣. AUV 多域平台动态对接技术研究现状及展望[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 97-103.
- [4] 郑荣,辛传龙,汤钟. 无人水面艇自主部署自主水下机器人平台技术综述[J]. 兵工学报, 2020, 41(8): 1675-1687.
- [5] 曹和云,倪先胜,何利勇,等. 国外潜载 UUV 布放与回收技术研究综述[J]. 中国造船, 2014, 55(2): 200-208.
- [6] 吴哲,羊云石. 一种 AUV 水下接驳系统的设计与研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(9): 130-132.
- [7] 燕奎臣,吴利红. AUV 水下对接关键技术研究[J]. 机器人, 2007, (03): 267-273.
- [8] 孙叶义,武皓微,李晔,等. 智能无人水下航行器水下回收对接技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(1): 1-11.
- [9] 袁学庆,刁家宇,李卫民. AUV 水下对接的发展与应用现状[J]. 舰船科学技术 2023, 45(5): 1-8.
- [10] 杜俊,谷海涛,孟令帅,等. 面向 USV 的 AUV 自主回收装置设计及其水动力分析[J]. 工程设计学报, 2018, 25(1): 35-42.
- [11] MENG L S, LIN Y, GU H T, et al. Study on the mechanics characteristics of an underwater towing system for recycling an autonomous underwater vehicle (AUV) [J]. Applied Ocean Research, 2018, 79: 123-133.
- [12] 高东勇,郭忠峰,谷海涛,等. USV 拖曳回收 AUV 动态过程仿真研究[J]. 舰船科学技术 2022, 44(21): 74-79.
- [13] 时常鸣,刘开周,赵洋,等. 面向 AUV 水下移动对接的实时路径规划方法[J]. 舰船科学技术 2020, 42(5): 148-152.
- [14] 潘薇. 水下机器人移动对接碰撞及控制研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [15] 唐东生,谷海涛,冯萌萌,等. 面向 AUV 自主回收的拖曳装置水动力特性研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(5): 107-114.
- [16] GU H T, MENG L S, TANG D S, et al. The lake trial about the autonomous recovery of the UUV by the USV towed system[C]// OCEANS 2019. Marseille: IEEE, 2019.
- [17] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 215-225.
- [18] 陈强,张林根. 美国军用 UUV 现状及发展趋势分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(7): 129-134.

(责任编辑: 张曼莉)