

海底管道失稳过程的模型试验研究*

Experimental research on the instability process of submarine pipelines

高福平 顾小芸 浦群

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

文 摘 直接铺设于砂质海床上的管道的失稳是一“流—管—土”耦合问题。本文利用 U 形水槽产生的振荡流对管道的失稳过程进行了模拟, 通过改变管道水下重量、管径和加载历史研究管道失稳的条件。在试验结果的基础上, 初步得到了管道失稳的临界 Fr 数与管重无量纲参数之间的关系曲线, 并发现不同的加载历史对管道稳定性的影响程度不同。

关键词 海底管道, 管道失稳, 振荡流, 砂质海床

中图法分类号 TV 139.2

文献标识码 A

文章编号 1000 - 4548(2000)03 - 0304 - 05

作者简介 高福平, 男, 1973 年生, 博士生。主要从事岩土力学研究。

Gao Fuping Gu Xiaoyun Pu Qun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract The instability of pipelines directly installed on the seabed is a “fluid - pipe - soil” coupling problem. In this paper, the instability process of pipelines has been investigated for different submerged weight of pipeline, pipeline diameter and loading history. Based on the presently available test data, a design equation is established, relating the critical Fr number inducing pipeline instability to dimensionless pipeline weight parameter. It is also found that different loading history affects pipeline stability with different degree.

Key words submarine pipeline, pipeline instability, oscillating flow, sandy seabed

1 前 言

波浪作用下海底管道的侧向稳定性与管道重量、环境荷载和由于海底土壤产生的阻力等多种因素相关。直铺海底的输油管道的侧向稳定性判据是管道水下重量设计的基础, 管道水下重量的改变是通过增大或减少覆盖层(通常为混凝土)的厚度实现的。因此, 管道稳定性的研究, 对不同的海洋环境下经济安全地设计海底管道有着重要意义。

对于波浪作用下直铺管道的稳定性问题, 文献[1~4]进行了试验研究, 但在以上试验中均利用机械加载模拟波浪荷载, 即对放置在砂床上的试验管道施加水平荷载, 以模拟波浪作用在管道上的拖曳力和惯性力的同时, 施加一定比例的垂直向上的荷载, 以模拟波浪作用在管道上的升力。通过对试验管道匀速施加水平荷载, 同时匀速施加一定比例的垂直向上的荷载, 模拟迅速增长风暴^[4]。闫澍旺^[5]也对管道施加水平机械力来模拟波浪荷载。但由于实际波浪力既作用在管道上同时又对海床产生影响, 海床冲蚀会改变管道两侧的流场, 从而影响管道受力, 因此管道的失稳应视为波浪、管道和海床三者耦合作用的结果。可见, 采用水动力荷载进行研究将更符合实际情况。文献[6]利用水动力进行了研究, 但只研究了半埋管道的失稳问题。本文采用振荡流荷载研究直接铺设在砂质海床上的管道的失稳。

2 试验设备和方法

波浪中的水质点是以一定速度作周期振荡运动的。对于浅水重力波而言, 在水面处水质点近似按椭圆轨迹运动, 水质点的运动幅值随着离水面距离的增加而衰减, 在接近海底处, 水质点的运动可视为水平方向的周期振荡^[7]。铺设在浅水海底的管道, 在波浪作用下主要受到这种水平振荡的影响。因此, 通过振荡流试验可以模拟管道在浅水海底的受力状况。本试验是在 U 形振荡流水槽(见图 1)中进行的, U 形水槽是产生振荡流动的试验装置, 已有效地应用于研究海洋工程的结构荷载问题^[8]。

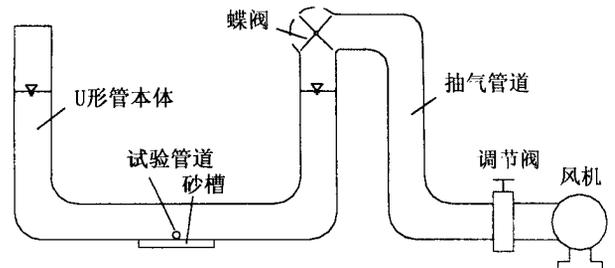


图 1 振荡流水槽示意图

Fig. 1 The sketch of oscillating flow tunnel

* 国家自然科学基金资助项目(No. 19772057)及中科院“九·五”重大项目(No. KZ951 - A1 - 405 - 01)

到稿日期: 1999 - 08 - 25

本装置由 U 形管本体和驱动装置两部分组成。本体是高 1.50 m、宽 2.12 m、截面尺寸为 0.20 m × 0.20 m 的有机玻璃管道。驱动方式采用气流驱动,驱动装置包括蝶阀、抽气管道、风机、调节阀和阀门控制系统。气驱动是通过蝶阀周期运动适时地对 U 形管抽气,使水体以自然频率振荡。如果气流补充的能量与水体运动损失的能量平衡时,可实现等幅振荡。利用调节阀调节气流量,水体振幅在 5~200 mm 内可连续变化,振荡周期为 2.60 s。

振荡流水槽的流场:

$$\text{振荡流位移 } A = A_0 \sin t \quad (1)$$

$$\text{振荡流速度 } \dot{A} = A_0 \cos t \quad (2)$$

式中 A_0 为振荡流的振幅; ω 为振荡流的角频率, $\omega = 2\pi / T$, T 为振荡流周期。振荡流中水质点的最大运动速度 U_m :

$$U_m = A_0 \omega \quad (3)$$

U 形管管底中间部位有一长 0.60 m、宽 0.20 m、深 0.035 m 的土槽。试验管道直接铺放在置于土槽中的饱和砂床上,如图 1 所示。管道与两端的 U 形管侧壁之间保持 0.005 m 的距离,以免管道运动时与侧壁接触,影响其运动。

土样制备:土样采用中砂,粒径级配曲线如图 2。采用水下装砂法制备土样,使其充分饱和。为了使试验结果具有可比性,每次试验均严格控制砂的密实状态,湿砂的总质量控制在 (7.30 ± 0.03) kg;并使试验槽中土面水平,模拟水平海床。砂的基本参数见表 1。

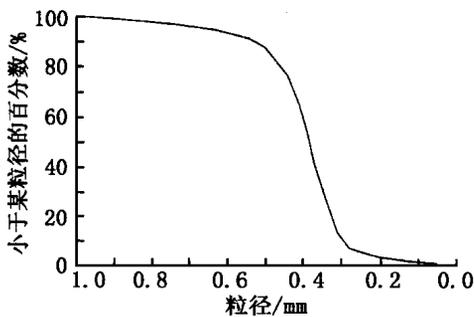


图 2 试验砂粒径级配曲线

Fig. 2 Sand grain size distribution curve

表 1 试验砂的主要参数

Table 1 Main physical parameters of test sand

平均粒径 d_{50}/mm	初始孔隙比 e_0	相对密度 D_r	不均匀系数 C_u	饱和容重 $\gamma_{\text{sat}}/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
0.38	0.73	0.37	1.36	19.0

为了探索不同管重下管道的失稳规律,参考实际海底管道的参数值^[4],并按照管道水下重量的无量纲参数 $G_p / \gamma_{\text{sat}} D^2$ (详见 4.1 节)设计试验管道参数。试验

采用以下 8 种铝管,如表 2 所示。管长均为 0.19 m。对于 $D = 0.014$ m 和 $D = 0.030$ m 两种管道,其长径比分别为 13.57 和 6.33,模拟二维平面应变状态。

本试验分别模拟了不同的管道水下重量和加载历史管道失稳的过程。利用摄像机对试验过程进行了记录。

表 2 试验管道参数

Table 2 Parameters of test pipes

管号	水下重量 $G_p/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	外径 D/m	管号	水下重量 $G_p/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	外径 D/m
1	0.68	0.014	5	1.52	0.030
2	0.96	0.014	6	3.03	0.030
3	1.11	0.014	7	4.13	0.030
4	1.23	0.014	8	5.24	0.030



(a)管道两侧的砂粒启动,砂床开始受到冲蚀



(b)管道轻微晃动



(c)管道失稳

图 3 管道失稳的典型阶段

Fig. 3 Typical phases of the instability of pipelines

3 管道失稳过程

3.1 不同重量的管道的失稳过程

本文为模拟一迅速增长的风暴,试验时通过振荡

流水槽的调节阀改变抽气管道的气流量,逐步增加振荡流的振幅,直至管道失稳,同时记录振荡流的振幅。对表2所列的8种管道进行试验发现,管道失稳一般经历3个阶段:管道两侧砂粒启动,砂床在水动力作用下遭到冲蚀。砂床的冲刷首先发生于管道两侧距管壁约 D 处,随着振荡幅值的增大,冲蚀逐渐向远处发展。砂床上层小部分砂粒转化成悬移质,随尾迹流一起运动;而转变为推移质的砂粒在旋涡尾迹的作用下,边振荡边向管道周围“输运”,逐渐向管道两侧堆积;当振荡流幅值增大到一定数值时,管道会发生轻微晃动,此时管道底部未脱离砂层,管道晃动的频率与振荡流的频率一致;管道轻微晃动一段时间后,管道和砂床几乎突然产生离合,管道失去稳定。图3以水下重量 4.13 N/m 、外径 0.030 m 的试验管道为例表示了管道失稳的典型阶段。

试验发现,对于不同水下重量的管道,失稳现象有所不同(见图4)。当管重较小时(如管1、管5),在一定振幅下管道的轻微晃动及其最后失稳几乎同时发生,此时并未发现砂启动,砂床未遭冲蚀。当管重较大时,随着振幅的增加管道两侧的砂首先启动,并且对不同试验情况而言,引起砂粒启动的振荡流幅值大致相同。管重愈大,其失稳时两侧床面遭冲蚀的程度愈大,管道失稳时的振荡流幅值也越大。

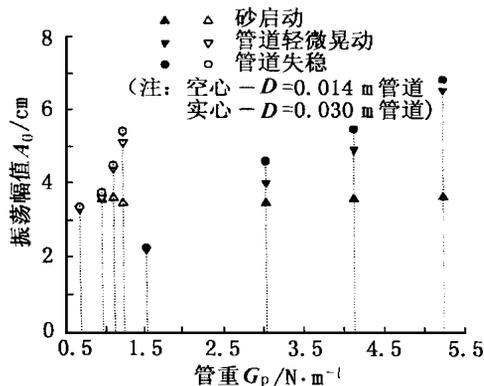


图4 不同管重的管道的失稳过程

Fig. 4 The instability process of pipelines

3.2 管道受不同加载历史作用的失稳过程

海底管道所受的加载历史是多种多样的。对于不同海域的波浪及同一海域不同季节的波浪,其经常出现的波高值是不同的,管道周围水质点运动速度也不同。

本文对水下重量 4.13 N/m 、外径 0.030 m 的管道,通过改变以下加载历史研究其失稳情况,即分别在不同的振幅下,等幅振荡 5 min (振荡约 115 次)然后以匀速加载,使管道失去稳定。试验研究了4种加载历史:均匀速度加载使管道失稳(见图5a);首先均匀增加振荡幅值,当振幅为 2.60 cm 时维持等幅振荡 115

次,再匀速加载直至失稳(见图5b);与类似,所不同的是等幅振荡的幅值为 4.15 cm (见图5c);首先均匀增加振荡幅值,当管道发生轻微晃动时,维持等幅振荡 115 次,再匀速加载使管道失稳(见图5d)。

从图5可以发现,当长历时等幅振荡的幅值小于砂粒启动的幅值时,由于砂床未受扰动,这种小幅值的等幅振荡对管道的稳定性影响很小。当长历时等幅振荡的幅值大于砂启动的振荡流幅值时,管道两侧的砂在涡旋尾迹的作用下向管道周围堆积(如图3),使管道趋于稳定。试验中还发现(见图5加载历史d),当管道发生轻微振动时,如果此时维持等幅振荡,由于管道两侧砂床冲蚀的进一步加剧,管道会渐渐地重新达到静止状态;再加大振荡流幅值,管道又发生轻微晃动,然后发生失稳。可见,对于同一管道,加载历史的改变将对其稳定性产生影响。

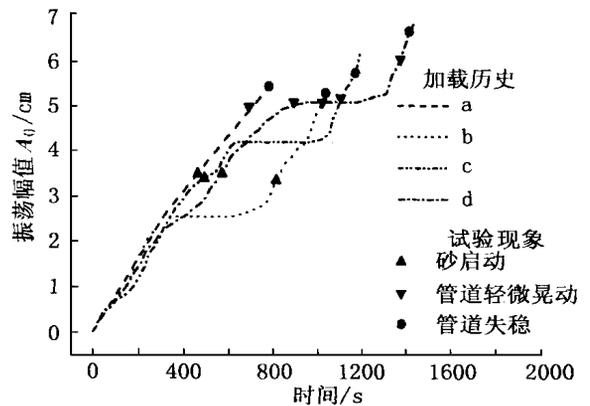


图5 加载历史及试验现象

Fig. 5 Test phenomena in different loading history

4 试验结果无量纲分析

4.1 影响因素分析

振荡流作用下管道的失稳,既与管道、砂的特性有关,又与环境荷载有关。管道的特征参量为管道外径 D 、单位长度管道水下重量 G_p 和管道表面相对粗糙度 k (注: $k = \frac{1}{D}$,为管道表面突起的平均高度)。饱和砂可以视为理想的无粘性材料,其性质主要取决于相对密度 D_r 和饱和重度 γ_{sat} ($\gamma_{sat} = \gamma_{sat} \times g$, γ_{sat} 为砂饱和密度, g 为重力加速度)。对于振荡流而言,取其特征参量为水质点的最大运动速度 U_m 、周期 T 、运动粘滞系数以及表征加载历史的无量纲参数。对本文所研究的加载历史, $\lambda = \frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$,式中 U_{mi} 为等幅振荡的质点运动最大速度, U_{mcr} 为均匀速度加载管道失稳时水质点运动的临界最大速度。

可见,影响管道失稳的因素用一般函数式可表示

如下:

$$F\left\{U_m, G_p, T, D, k, D_r, \rho_{sat}, g, \right\} = 0 \quad (4)$$

取 D 、 ρ_{sat} 和 g 为基本量, 利用 π 定理, 可得到影响管道失稳的无量纲参量:

$$F\left\{Fr, \frac{G_p}{\rho_{sat} D^2}, Re, KC, k, D_r, \right\} = 0 \quad (5)$$

式中

$$Fr = \frac{U_m}{(gD)^{1/2}} \quad (6)$$

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (7)$$

$$Re = \frac{U_m D}{\nu} \quad (8)$$

由式(6) ~ (8) 可知, 试验不能同时保证 Fr 数准则、 KC 数准则和 Re 数准则。鉴于浅水波浪运动是重力起主要作用的流动, 管道的稳定性也与其重量相关, 试验中认为 Fr 数是主要的条件准则数。对风浪下的实际海底管道而言, Fr 数在 0 ~ 0.5 范围内变化, 与本试验相近; 控制管道两侧涡旋的产生和发展的 KC 数在 0 ~ 20 范围内变化, 本试验过程中 KC 数可达到 30 左右, 可认为接近实际管道情况; Re 在 10^6 左右, 粘滞力小到可以忽略, 本试验的 Re 在 10^4 左右。由相似理论可知, 在相似现象中, 如单值条件相似必具有数值相同的相似准则。

为满足相似判据 $\frac{G_p}{\rho_{sat} D^2}$, 应使相似指标 $\frac{G_p}{\rho_{sat} D^2} = 1$, 式中 λ 为原型和模型之间的相似比。由于 $\lambda = 1$, 所以只要 $G_p = \frac{G_p}{\lambda^2}$ 即可满足此判据。同理, 为满足 Fr 判据, 应使相似指标 $\frac{U_m}{(gD)^{1/2}} = 1$ 。因 $g = 1$, 所以 $U_m = \frac{U_m}{\lambda^{1/2}}$ 。

4.2 管道水下重量对管道稳定性的影响分析

为了探索管道失稳时管道重量和环境荷载之间的关系, 试验中改变了判据 $\frac{G_p}{\rho_{sat} D^2}$ 中的管道参数 G_p 和 D , 不改变饱和砂参数 ρ_{sat} 和相对密度 D_r , 并且研究一迅速增长的风暴作用下管道的失稳, 即忽略 ρ_{sat} 的影响。试验中采用光滑铝管, $k = 0$ 。将管道失稳时振荡流振幅实测值(见图 4) 代入式(6), 可得到管道失稳的临界 Fr_{cr} 数。对所得数据进行分析发现, Fr_{cr} 和管重无量纲数 $\frac{G_p}{\rho_{sat} D^2}$ 之间存在以下关系(如图 6 所示):

$$Fr_{cr} = 0.029 + 0.23 \frac{G_p}{\rho_{sat} D^2} \quad (9)$$

(当 $0.1 < \frac{G_p}{\rho_{sat} D^2} < 0.3$)

可见, 随着管道重量无量纲数的增加管道失稳的临界 Fr_{cr} 数大致呈线性增长。对于不同的管重无量纲数, 当环境荷载的 Fr 数低于管道失稳的临界线时, 管道是稳定的, 否则, 管道将失稳。

4.3 加载历史对管道稳定性的影响分析

为分析本文所研究的加载历史(见图 5) 对管道稳定性影响, 以等幅振荡水质点的最大运动速度 U_{mi} 与匀速加载管道失稳时的水质点最大速度 U_{mcr} 的比值 $\frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$ 来表征等幅加载的水质点速度水平, 即加载历史的无量纲参数;

以不同等幅振荡的加载历史情形下管道失稳的临界 Fr_i 与匀速加载管道失稳的临界 Fr_{cr}

的比值 $\frac{Fr_i}{Fr_{cr}}$ 表征不同加载历史对管道稳定性的影响程度。试验数据分析发现(如图 5, 图 7), $\frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$ 较小时, 特别是当等幅振荡的水质点速度小于引起砂粒启动的水质点速度时, 加载历史对管道的稳定性影响很小。如果

等幅振荡时砂粒已启动, 那么 $\frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$ 越大, 则 $\frac{Fr_i}{Fr_{cr}}$ 也越大, 即管道愈加趋于稳定。

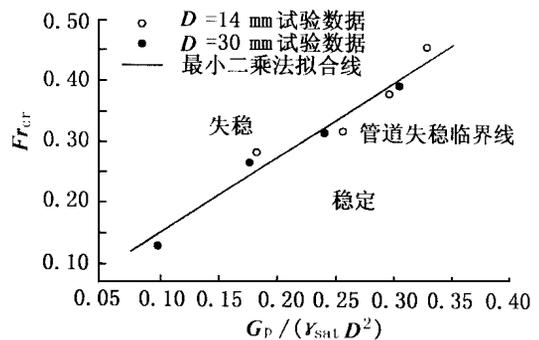


图 6 Fr_{cr} 与 $\frac{G_p}{\rho_{sat} D^2}$ 的关系

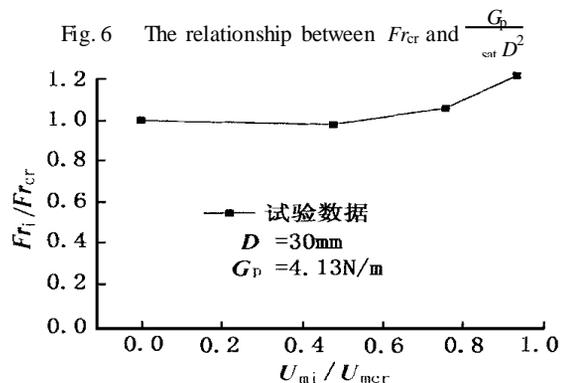


图 7 $\frac{Fr_i}{Fr_{cr}}$ 与 $\frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$ 的关系

Fig. 7 $\frac{Fr_i}{Fr_{cr}} - \frac{U_{mi}}{U_{mcr}}$ curve

5 结 语

(1) 波浪作用下海底管道的失稳是波浪、管道和海床三者耦合作用的结果。通过振荡流水动力荷载试验发现,管道两侧砂床的冲蚀将影响管道的稳定性,这是机械加载所不能模拟的。

(2) 管道失稳过程一般包括管道两侧砂的启动(床面冲蚀)、管道的轻微晃动和管道失稳三个阶段。管重和加载历史的不同,其失稳过程略有不同。

(3) 在不改变其它参数的情况下,初步得到了管道失稳的临界 Fr 数与 $G_p / (\rho_{sat} D^2)$ 之间大致呈线性增长的关系,即同样直径的管道若水下重不同,其抵御风暴的能力不同。这样,对于特定的环境条件,应设计满足侧向稳定性要求的相应重量的管道。

(4) 海底环境条件是多变的,不同的加载历史对管道稳定性的影响程度不同。对于本文所研究的加载历史, U_{mi} / U_{mcr} 的增大将提高管道的稳定性。

(5) 本文通过 12 组试验研究了管重无量纲量和加载历史对管道稳定性的影响,初步得到了一些规律,但这仍需大量补充试验的验证。另外,其它加载历史对管道稳定性的影响还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Lyons C G. Soil resistance to lateral sliding of marine pipelines. Proceedings of the Fifth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 1876, Houston, 1973. 479 ~ 484
- 2 Brennodden H, Sveggen O, Wagner D A, Muff J D. Full-scale pipe-soil interaction tests. Proceedings of the Eighteenth Annual Offshore Technology Conference, paper OTC 5338, Houston, 1986. 433 ~ 440
- 3 Wagner D A, Muff J D, Brennodden H, Sveggen O. Pipe-soil interaction model. Proceedings of the Nineteenth Annual Offshore Technology Conference, paper OTC 5504, Houston, 1987. 181 ~ 190
- 4 Palmer A C, Steinfeldt J S, Jacobsen V. Lateral resistance of marine pipelines on sand. Proceeding of the 20th Annual Offshore Technology Conference, paper OTC 5853, Houston, 1988. 399 ~ 408
- 5 闫澍旺. 砂土对管道约束力的模型试验研究. 海洋工程, 1996, 14(1): 62 ~ 72
- 6 Foda M A, et al. Wave induced breakout of half-burial marine pipes. J Wtrway Port Coast and Oc Engrg, ASCE, 1990, 116(2): 267 ~ 285
- 7 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学. 天津: 天津大学出版社, 1991
- 8 李战华, 袁茂竹. 小型气驱动式 U 形振荡水槽. 试验力学, 1987, 2(3): 9 ~ 15

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的核心期刊。由南京水利科学研究所承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先利用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、展望 21 世纪岩土力学、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊获“国家自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助。

凡本刊刊登的文稿均收入相应光盘版及 Internet 网;

本刊于 1992 年,1996 年两次被确认为我国核心期刊;

本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》收录。

本刊被美国《工程索引》(Ei)确认为 Ei Page One 数据库收录

期刊;

本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center (GE-IRC) 确认为岩土工程核心期刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等系统中的科研、教学及其他工程技术人员。

本刊为双月刊,大 16 开本,双栏排版,120 页左右,单月 30 日出版。每期定价 10 元(邮购每册另加 1 元),全年 60 元(邮购 66 元)。漏订或缺者请向编辑部邮购。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548,国内统一刊号 CN32 - 1249/TU,国内发行代号 28 - 62,国外发行代号 BM520。

本刊还承办广告业务,欢迎惠顾。

编辑部地址:南京虎踞关 34 号 邮编:210024

(南京水利科学研究所土工所内)

电话:(025)3739178 - 512 传真:(025)3734321 电挂:5710

E-mail:ge@njhri.edu.cn

(本刊编辑部)