

排水系统入海口新型消能工

杨开林,王 涛,董兴林,郭永鑫,乔清松,郭新蕾,崔 巍,付 辉

(中国水利水电科学研究院水力学所,北京 100038)

摘要 通过实体模型试验研究了某排水系统入海口水工建筑物的水力性能,设计提出一种新型的墩栅涡流室消能工。该新型消能工的水力特点是:流出排水隧洞的高速水流大部分通过进口墩栅空隙流入涡流室,小部分在进口墩栅前发生水跃后扎入涡流室中产生强烈的顺时针漩涡,通过水跃、墩栅的阻力和涡流室漩涡的共同作用消能,并将来流的动能转换为势能,之后,涡流室中的大部分水流在重力作用下通过出口墩栅空隙流向下流,其余水流从墩栅顶部溢流。这种新型的墩栅涡流室不仅消能效果良好而且出流均匀,并容许各种杂物如石块、泥沙等自由通过,避免涡流室中发生严重的淤积。

关键词 排水系统;消能工;入海口;模型试验;墩栅涡流室

中图分类号:TV135.2 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)06-0069-04

A new type of energy dissipator for coastal outfall of a drainage project/YANG Kai-lin, WANG Tao, DONG Xing-lin, GUO Yong-xin, QIAO Qing-song, GUO Xin-lei, CUI Wei, FU Hu(Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract : The hydraulic performance of hydraulic structures at coastal outfall of a drainage project was studied by physical model tests. A new structure of energy dissipation, called the baffle-block vortex chamber, was designed. Each of the vortex chambers was bordered by two rows of baffle blocks. Most of the high-velocity water flow from drainage tunnel flowed into vortex chambers through the gaps between the baffle blocks. Hydraulic jumps caused by the other part of the water flow occurred right before the first row of baffle blocks and their nappe plunged into vortex chambers, causing a strong clockwise vortex underwater. By the co-action of the hydraulic jumps, resistance of baffle blocks, and vortexes, the kinetic energy of the inflow was mainly dissipated and the remained was converted into the potential energy. Then most of the water in vortex chambers flowed out of the chambers toward downstream, and the other part flowed over the chambers into a spillway. The new structure is of good effect of energy dissipation with uniform outflow, and it permits some matters, such as stones and sediment to pass through freely, and thus avoids serious deposition in vortex chambers.

Key words : drainage project; dissipator; coastal outfall; model test; baffle-block vortex chamber

在沿海城市,暴雨积水一般通过排水系统流入大海。因此,设计水力性能优良的入海口水工建筑物非常重要。入海口的水工结构应具有足够的消能能力以使海床受到的冲刷作用尽可能小,同时水流排出的速度应对海洋设施没有大的不利影响。

香港葵涌—荃湾排水隧洞长约 5.13 km,内径为 6.5 m。设计通过该排水隧洞将管理区域内的暴雨积水排入大海,按照 200 年一遇暴雨设计,最大排水流量为 209.8 m³/s。初始设计入海口水工建筑物如图 1 和图 2 所示,它由连接隧洞出口的扩大池、台阶式泄水道、箱涵(在油柑头青山公路下)和明渠串联组成。

台阶式泄水道由 18 级台阶组成,每级台阶高 1.6 m,宽 2.0 m,泄水道坡度为 1:1.26。为了方便公

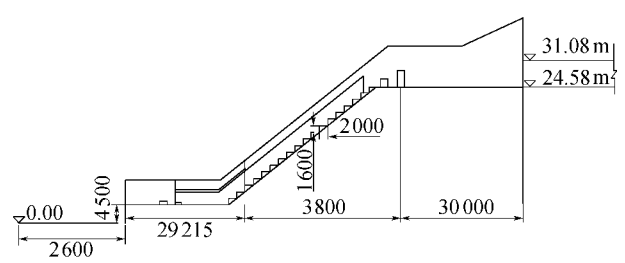


图 1 入海口水工建筑物纵剖面(单位:mm)

众欣赏暴雨在台阶式泄水道上形成的壮丽瀑布景观,台阶式泄水道采用开敞式设计。泄水道下游连接 4 孔 9 m×3.2 m 的箱涵。为使海床免受冲刷,在入海口处用厚 0.85 m、级配 700 mm 的块石铺设成厚 1.85 m、长 26 m 的堆石护坦,或者选用预制钢筋混凝土

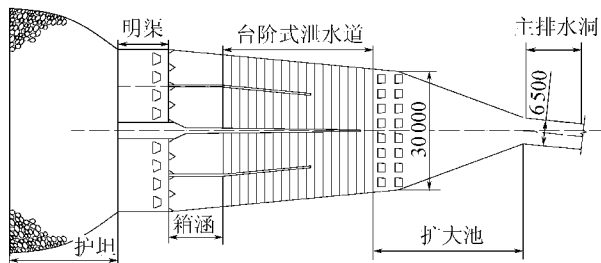


图2 排水系统入海口水工建筑物平面(单位:mm)

土板代替堆石。台阶式泄水道或泄洪道具有良好的消能能力,人们对它的水力特性进行了大量的试验和理论研究^[1-6]。一般说来,台阶式泄水道上的水流流动与进口来流的水力条件有关。为了使流出扩大池的流体平稳地流入台阶式泄水道以形成稳定的滑行流,设计在扩大池出口平行设置两排消力墩。同时,在下游箱涵中设置两排消力墩以进一步消能。

实体模型试验结果表明初始设计的入海口水工结构是不合理的,存在4个严重问题:第一,由于排水隧洞出口轴线与扩大池轴线之间有 14° 的夹角,扩大池中的流动分布不均,右侧流速远远大于左侧流速,导致入海口水工建筑物出口流动分布严重不均;第二,台阶式泄水道进口水流条件差,流出扩大池的水流不是经过第一级台阶顺序下泄,而是飞越前两级台阶撞击到第三级台阶产生浓重的水花,然后如暴雨般飞溅到下游箱涵顶部的公路上,这是设计所不容许的;第三,入海口水工建筑物下游海底堆石护坦冲刷严重,特别是右侧已冲刷见底;第四,入海水流消能不足,导致入海口水工建筑物下游附近海域流速过大,严重威胁有关海洋设施的安全。

1 新型墩栅涡流室的设计

由于排水系统入海口水工建筑物初始设计存在以上问题,只有对它的结构进行重大调整才能满足运行的安全性和可靠性。要解决的关键问题有两个,一是使入海口水工建筑物中的流动分布均匀,二是增大对水流的消能率。基于大量的模型试验,入海口水工建筑物的最终设计结构如图3和图4所示。为了使流速均匀分布,在扩大池进口设置两个三角形导流墩,一个边长2m、高4m,贴在右侧边墙上,另一个边长2m、高3m,安放在扩大池轴线附近。

为了不让各种杂物如石块、泥沙大量滞留在排水系统流道中,设计采用消力墩作为主要消能设施。考虑到排水隧洞出口平均流速超过 8.5 m/s ,台阶式泄水道出口流速超过 10 m/s ,消力墩的尺寸和布置方式、位置非常关键,不仅要容许各种杂物自由通过消力墩之间的空隙,而且要将大部分水流的动能消耗。建立在消力池和水跃具有良好消能效果的基础

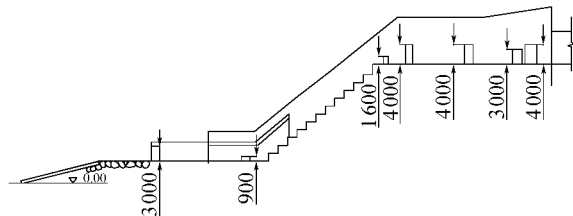


图3 入海口水工建筑物的最终设计纵剖面(单位:mm)

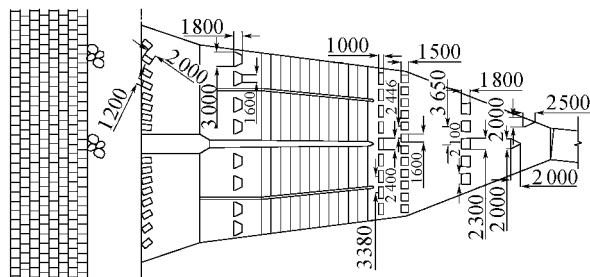


图4 入海口水工建筑物的最终设计纵平面(单位:mm)

上,消力墩采用了如图3和图4所示的布置方式,形成了一种新型墩栅消能室,墩栅是指由一排消力墩(或者柱子)构成的过水建筑物。

1.1 扩散形的墩栅涡流室

由图3和图4可见,在与排水隧洞出口相接的扩大池中设置两排平行的消力墩,以形成一个扩散形的墩栅消能室。为了具有足够的消能效果,两排墩栅之间应当有足够的距离。基于所研究扩大池的空间,两排墩栅之间的距离取 11.5 m 。如图5所示,设计期望是流出排水隧洞出口的高速水流大部分通过进口墩栅空隙流入消能室,小部分在进口墩栅前发生水跃后扎入消能室中以产生强烈的顺时针漩涡,通过水跃、墩栅的阻力和消能室漩涡的共同作用消能,并将来流的动能转换为势能,然后,消能室中的大部分水流主要在重力作用下通过出口墩栅空隙流向下流,其余水流则从墩栅顶部溢流,以达到使扩大池出流均匀、平稳地流入台阶式泄水道的目的。根据流动特点,称这种新型的消能室为墩栅涡流室。与传统消力池不同,墩栅涡流室不需要降低流道底高程(在排水系统入海口建筑物中通常不容许开挖水池),并且由于墩栅涡流室是在流道平面修建,各种杂物如石块、泥沙可以通过墩栅之间的空隙通过,不会淤积,不需经常清淤。

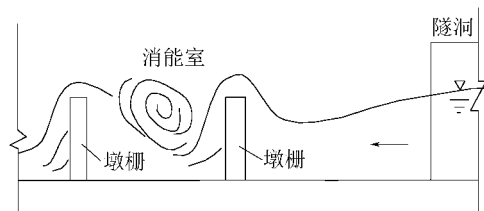


图5 墩栅涡流室流动示意图

墩栅涡流室消能与传统排水系统入海口消力墩

消能的区别是:①消能理论不同。墩栅涡流室复合消能装置是依靠水跃、漩流、墩栅的阻力三者联合消能,而传统消力墩布设仅仅依靠消力墩的阻力消能。②消能效果不同。墩栅涡流室比传统消力墩布设消能效果好。③扩大池水力性能差别大。墩栅涡流室复合消能装置具有很好的调节扩大池出流分布的作用,而传统消力墩布设在这方面的作用较小,这在扩大池和排水隧洞不同轴的情况下特别重要,后者条件下扩大池出口水流分布会严重不均匀。④达到同样消能效果投资差别大。一般情况下,墩栅涡流室复合消能装置只需平行布设两排墩栅,而传统消力墩布设要达到同样的消能效果必须布设很多消力墩,一旦扩大池中的流动影响排水管道的出流能力,势必要求增大排水管道的直径,从而大大增加了整个排水系统的投资。

在设计墩栅涡流室消力墩尺寸和布置的过程中,应当考虑以下因素。

a. 为了使水流均匀、平稳地进入台阶式泄水道第一级台阶,必须限制扩大池出流速度。假设把扩大池出流视为连续的自由落体质点,如图6所示,任一质点的运动轨迹可以用式(1)~(2)来计算:

$$y = \frac{g}{2} t^2 \tag{1}$$

$$x = v_{out} t \tag{2}$$

式中: x 为质点离开扩大池出口的水平距离; y 为质点离开扩大池出口底部的距离; v_{out} 为扩大池出流平均速度; g 为重力加速度; t 为时间。

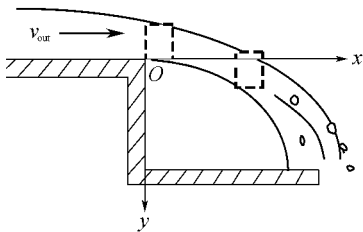


图6 流体质点运动轨迹

由于台阶式泄水道每级台阶高1.6m、宽2m,计算可知,任一流体质点从扩大池出口降落到第一级台阶平面的时间是0.57s,由式(2)可得使扩大池出流落到第一级台阶上的流速限制条件为

$$v_{out} \leq \frac{2m}{0.57s} = 3.5\text{ m/s} \tag{3}$$

只要扩大池出流的平均流速小于3.5m/s,水流就可能平稳地流入台阶式泄水道第一级台阶。

b. 消力墩必须具有很高的强度承受水流的长时间冲击。由于扩大池进口流速超过8.5m/s,故消力墩断面尺寸不宜过小。

c. 墩栅消力墩间空隙要恰当。如果空隙太大,

则对水流的阻力不够,致使消能不足;如果空隙太小,则大部分流体会越过墩栅顶,形成较高的出流速度,也会影响消能效果。

建立在上述分析的基础上,设计采用的涡流室进口墩栅的5个消力墩尺寸为长2.3m、宽1.8m、高4m,相邻消力墩间隔为1.35m,总的空隙长度为8m。通过试验观察,将它们布置在能够诱发强烈水跃的地方。涡流室出口墩栅的12个消力墩的尺寸为长1.6m、宽1.5m、高4m,相邻消力墩间隔为0.846m,总的空隙长度为11m。

通过涡流室出口墩栅的消力墩间空隙流量可以近似用无坎宽顶堰公式估计,即

$$Q = \mu B \sqrt{2g} H^{1.5} \tag{4}$$

式中: Q 为流量; B 为墩栅总的空隙长度; H 为墩栅上游水深; μ 为流量系数,取值范围在0.3~0.385之间^[7]。令 $B=11\text{ m}$, $H=4\text{ m}$, $\mu=0.3\sim0.385$,则由涡流室出口墩栅空隙流出的流量 $Q=117\sim150\text{ m}^3/\text{s}$ 。在设计200年一遇暴雨条件下,排水系统的最大流量为 $209.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。这表明涡流室的水流大部分将从墩栅的空隙流出,其余水流将从墩栅顶部溢流流出。对应地,通过涡流室出口墩栅空隙的平均流速可能在2.5~3.4m/s之间,这满足了式(3)对出流速度的限制要求。

不过,考虑到通过消力墩间的流速总是上层高、下层低,为了让墩栅涡流室出流能安全、平稳地进入台阶式泄水道的第一级台阶,增设了第三排较矮的墩栅,消力墩高只有1.6m,长2.4m,宽1m。

1.2 箱涵和明渠中的墩栅涡流室

箱涵和明渠中的墩栅涡流室也由两排平行的墩栅构成。第一排墩栅布置在箱涵进口,第二排墩栅布置在明渠出口。

由于台阶式泄水道在箱涵进口的流速超过10m/s,只要第一排墩栅的8个梯形消力墩布置位置恰当,例如将它们布置在台阶式泄水道出流水舌的下游位置,即使墩栅很矮(只有0.9m高),也会在箱涵中发生强烈的水跃。

为了使墩栅涡流室有良好的消能效果,明渠出口墩栅应当有足够的高度,以便将来流的大部分动能转变为势能。此外,为了使明渠出流尽可能扩散以减小下游海域水流的速度,明渠出口墩栅的消力墩布置在一个90°的扇形区域内,并且相邻消力墩之间的夹角相同,为5°。这样,消力墩间的空隙存在较大差别,越靠近明渠轴线消力墩间空隙越小,越向外消力墩间空隙越大。设计意图就是使入海水流形成较大扇面的流动,避免下游海域因水流集中在轴线附近形成局部高流速。换句话说,这样布置消力墩

后,消力墩不仅具有消能功能而且具有导流功能。对于其他排水系统,导流消力墩布置的扇形面可根据具体情况调整。

2 试验验证

本文所研究排水系统入海口水工建筑物新型墩栅涡流室的实体模型如图 7 所示,模型和原型的比尺是 1:20。出口海底用预制钢筋混凝土板代替堆石护坦。

图 8 给出了在 200 年一遇暴雨排水流量 $209.8\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下扩大池中的流动情况。两个三角形导流墩不仅有很好的导流作用,而且有很好的消能作用。最重要的是在第一和第二排墩栅之间形成涡流室空间。一方面,大部分水体通过墩栅空隙流入、流出涡流室;另一方面,在第一排墩栅前形成水跃,其水舌越过第一排墩栅在涡流室中部投入,然后在涡流室中诱发形成一个顺时针的大漩涡。第二排墩栅前左边、中部、右边的水深分别为 4.6 m、4.4 m、4.6 m。第三排矮墩栅前左边、中部、右边的水深分别为 2.4 m、2.6 m、2.2 m。

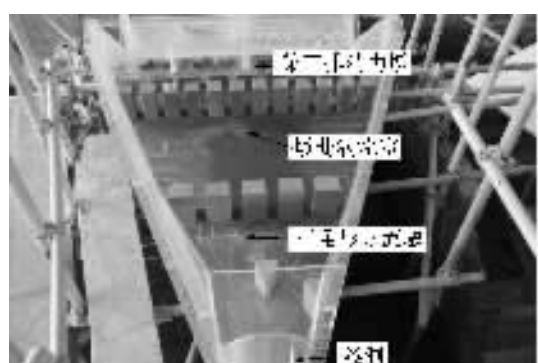


图 7 扩大池实体模型



图 8 扩大池和台阶式泄水道结合部流动场景

在台阶式泄水道上,流动状态从前 3 级台阶上的过渡流演变到稳定的滑行流。在每一级台阶上都存在逆时针的涡团,滑行流水深为 1.7 m。

图 9 给出了箱涵和明渠中的流动。来自台阶式泄水道的水舌撞击在箱涵进口墩栅前,在底板上发生强烈的水跃,其水舌冲撞到箱涵顶板。由于下游



图 9 箱涵和明渠流动场景

明渠水深足够高,所以箱涵中的流动为掺气有压流动,该明渠转变成成为导流墩栅涡流室。它有两个作用,一是大幅度减小了箱涵来流的流速,使大部分动能转变为势能;二是使明渠流动分布均匀,明渠墩栅前水深约为 3.2 m。

排水系统入海口水工建筑物内的流速分布是:排水隧洞出口平均流速为 8.50 m/s,跌落到台阶式泄水道第一级台阶上的平均流速为 6.6 m/s,最后一级台阶上的平均流速为 10.4 m/s。明渠出口导流墩栅前平均流速为 2.2~2.5 m/s。这表明新型墩栅涡流室的消能效果是令人满意的。试验也证实了采用预制钢筋混凝土板形成护坦可以防止海底被冲刷。同时,由于入海水流消能充分,并且形成大范围的扇形出流,大大减小了下游附近海域的流速。

3 结 语

为沿海排水系统设计一个合理的入海口水工建筑物非常重要。入海口的水工结构应具有足够的消能能力,同时要求排出水流的流速对海洋设施没有大的不利影响。通过实体模型试验,本文研究了一种新型墩栅涡流室消能工,墩栅涡流室以两排墩栅为界。为具有足够的消能效果,两排墩栅之间留有足够的距离。流出排水隧洞出口的高速水流大部分通过进口墩栅空隙流入消能室,一部分水流在进口墩栅前发生水跃后扎入消能室中以产生强烈的顺时针漩涡,通过水跃、墩栅的阻力和消能室漩涡的共同作用消能,并将来流的动能转换为势能,然后,消能室中的大部分水流主要在重力作用下通过出口墩栅空隙流向下游,其余水流则从墩栅顶部溢流,以达到出流均匀、低速的目的。为了使明渠出流尽可能扩散以减小下游海域水流的速度,将明渠出口墩栅的消力墩布置在一个 90° 的扇形区域内,相邻消力墩之间的夹角均为 5° 。这样,可以使入海水流形成较大扇面的流动,避免下游海域因水流集中在轴线附近形成局部高速流,此时消力墩既具有消能功能又具有导流功能。实体模型试验证实了所研究的新型墩栅涡流室具有良好的消能效果,可以推广应用到其他沿海排水系统中。

(下转第 76 页)

过墩群后的两个渐变流控制断面列动量方程：

$$\frac{Q^2}{gA_1'} + A_1'h_{c1}' + \frac{F_c}{\rho g} = \frac{Q^2}{gA_2'} + A_2'h_{c2}' + \frac{F_R}{\rho g} + \frac{F_c}{\rho g} \quad (2)$$

或
$$\mathcal{K}(h_1') = \mathcal{K}(h_2') + \frac{F_R}{\rho g} \quad (3)$$

式中： A_1' 及 A_2' 分别为有出池墩群时水跃前及墩群后断面的面积； h_{c1}' 及 h_{c2}' 分别为有墩群时水跃前及墩群后断面上的形心距水面的距离； F_R 为墩群的反击力； F_c 为一级消力池尾坎及二级消力池尾部的反击力； $\mathcal{K}(h') = \frac{Q^2}{gA'} + A'h_c' + \frac{F_c}{\rho g}$ 。

无墩群时水跃方程为

$$\mathcal{K}(h_1) = \mathcal{K}(h_2) \quad (4)$$

因为有无墩群时的流量和跃前水深基本相同，故

$$\mathcal{K}(h_1) = \mathcal{K}(h_2) \approx \mathcal{K}(h_1') \quad (5)$$

于是，由方程(3)得

$$\mathcal{K}(h_2') = \mathcal{K}(h_1') - \frac{F_R}{\rho g} = \mathcal{K}(h_2) - \frac{F_R}{\rho g} \quad (6)$$

或
$$\mathcal{K}(h_2') < \mathcal{K}(h_2) \quad (7)$$

根据水跃函数曲线特性，水跃函数随着跃后水深的减小而减小，可知

$$h_2' < h_2$$

即墩群的作用使跃后水深减小，可使出池水流与下游水面更为平顺地衔接。

总之，墩群的存在从能量方面考虑增加了出池后水深，从动量方面考虑降低了消力池内的跃后水深，使出池后水流更为平顺地与下游衔接。

4 结 论

a. 消力池修改方案5对增加海漫段水深、均化

海漫段流速横向分布、减小海漫段最大垂线平均流速效果较为明显。

b. 由于墩群对出池水流的阻击和折转作用，增加了水流的能量耗散，提高了闸下水流的消能效率，同时墩群的存在起到了整流的作用，使池后水流平稳均匀地扩散到整个河道断面，有效地避免了折冲水流的发生。

c. 池后梅花形布置墩群可应用于超低弗劳德数、低水头、低尾水的底流消能工程中，可有效解决波状水跃消能不充分的问题。

d. 对墩群的布置形式及单个墩体的体型参数等还需进一步研究。

参考文献：

[1] 梁跃平,刘海凌,梁国亭.辅助消能工应用于低佛氏数水流消能的试验研究[J].华北水利水电学报,2000,21(1):13-16.

[2] 冬俊瑞,李永祥,李玉柱.中小型水工建筑物底流水跃消能技术新进展[J].海河水利,1998(6):4-8.

[3] 陈宝华,张世儒.水闸[M].北京:中国水利水电出版社,2003:65-76.

[4] 刘韩生,花立峰,纪志强,等.跌水与陡坡[M].北京:中国水利水电出版社,2004:143-183.

[5] 花立峰,卢军,寿伟冈.综合式消能工的水力特性及工程应用[J].水利水电工程设计,1998(3):17-19.

[6] 吴宇峰.消力墩对水跃跃长的影响[J].四川水力发电,2004,23(3):52-53.

[7] 刘沛清,冬俊瑞.消力池及辅助消能工设计的探讨[J].水利学报,1998(6):48-56.

[8] 吴持恭.水力学[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:285-305.

(收稿日期:2007-07-15 编辑:骆超)

(上接第72页)

参考文献：

[1] CHANSON H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators[J]. Dam Engineering, 2001, 11(4):205-242.

[2] CHAIYUTH C. Assessing the flow resistance of skimming flow on the step faces of stepped spillways[J]. Dam Engineering, 2002, 12(4):303-313.

[3] CHANSON H, TOOMBES L. Energy dissipation and air entrainment in stepped storm waterway: experimental study[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2002, 128(5):305-315.

[4] BOES R M, HAGER W H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

ASCE, 2003, 129(9):661-670.

[5] BOES R M, HAGER W H. Hydraulic design of stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2003, 129(9):671-679.

[6] OHTSU I, YASUDA Y, TAKAHASHI M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(9):860-869.

[7] 黄文.水力学[M].北京:人民教育出版社,1980.

(收稿日期:2007-07-15 编辑:骆超)

