



卸荷板对整体式闸室底板内力的影响分析

白国文¹, 胡 见²

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051; 2. 长江航运发展研究中心, 湖北 武汉 430014)

摘要: 针对整体式闸室底板弯矩较大的问题, 研究闸墙上设置卸荷板对闸室底板内力的影响。采用三维非线性有限元分析方法, 得出结论: 1) 闸墙设置卸荷板将使得边墩处底板上表面压应力、下表面拉应力减小, 跨中处上表面拉应力增加, 边墩处底板沉降增加。2) 相对于卸荷板相对高度, 卸荷板悬臂长度对底板弯矩将产生更大的影响。3) 在工程设计时将卸荷板设置在 $1/3 \sim 1/2$ 闸室墙高, 且位于排水管水位以下、卸荷板悬臂长度设置在 $0.10 \sim 0.15$ 倍闸室墙高度时, 底板受力状况较好。本卸荷板设计的闸室底板受力情况较佳, 可为类似工程的闸室高宽比及地基土质提供参考。

关键词: 卸荷板; 整体式闸室; 闸室底板; 弯矩; 有限单元法

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0112-06

Influence of relieving slab on internal force of monolithic lock chamber floor

BAI Guowen¹, HU Jian²

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. Changjiang Shipping Development Research Center, Wuhan 430014, China)

Abstract: For large bending moments in the monolithic lock chamber floor, this paper studies the influence of setting a relieving slab on the lock wall on the internal force of the lock floor. The paper adopts three-dimensional nonlinear finite element analysis and draws the following conclusions: 1) Setting a relieving slab on the lock wall will reduce the compressive stress on the upper surface and tensile stress on the lower surface of the side pier floor. In addition, it will increase the tensile stress on the upper surface at the mid-span and the settlement at the side pier floor. 2) Compared to the relative height, the cantilever length of the relieving slab will have a greater influence on the lock floor bending moments. 3) During engineering design, the relieving slab is set at a height of $1/3 \sim 1/2$ of the lock chamber wall and below the water level of the drainage pipe. In this condition, the stress condition of the lock floor is good with the cantilever length of the relieving slab set at $0.10 \sim 0.15$ times the lock chamber wall height. The lock chamber floor designed with the relieving slab has better stress conditions, providing references for the height to width ratio and foundation soil quality of similar projects.

Keywords: relieving slab; monolithic lock chamber; lock floor; bending moment; finite element method

整体式闸室在土基上应用十分广泛, 但其底板弯矩往往较大。为减小底板弯矩, 工程上常采用预留施工宽缝的方法, 但未从闸室结构方面解决问题。

席荣等^[1]在南坪船闸中提出带卸荷板整体式闸室结构, 并研究了卸荷板高程、宽度及厚度对闸墙弯矩及水平位移的影响。钟华林等^[2]研究了大高宽比整体式闸室结构内力与位移, 闸墙后方

设置踵板或卸荷板对闸墙受力的影响趋势。本文进一步研究卸荷板对整体式闸室底板的内力影响, 并提出使底板受力状态最佳时的卸荷板相对高度、宽度建议值, 旨在为相关闸室结构的设计提供参考。

1 概述

1.1 闸室尺度

某船闸闸室为整体式结构, 净宽 23 m, 结构段

收稿日期: 2023-03-15

作者简介: 白国文 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计研究工作。

长 20 m, 底板顶面高程 8.9 m(1985 国家高程基准), 墙顶高程为 21.5 m, 墙后排水管高程 14.0 m, 闸墙底板厚 2.4 m。闸室剖面见图 1。参考相关研究成果, 初拟在 14.0 m 高程处设置长 2.2 m、厚 0.8 m 的卸荷板。

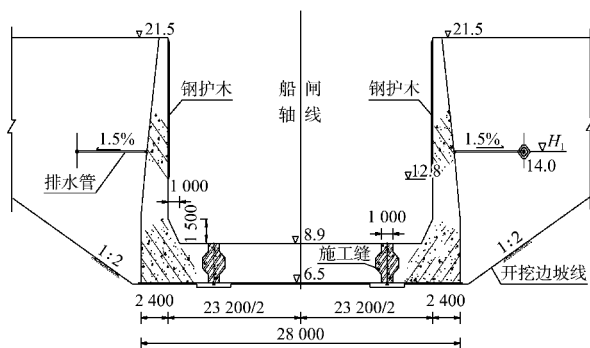


图 1 闸室剖面 (尺寸: mm; 高程: m)

1.2 材料力学参数

根据船闸建筑物的地质条件, 该船闸修建在土质地基上, 闸室后方回填土采用砂性土, 不考虑施工宽缝对结构的受力影响, 闸室结构采用 C25 混凝土, 回填土材料性质与地基土一致, 见表 1。

表 1 闸室相关材料力学参数

材料类别	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
土体	1.90	10.7	0.300	23	22
C25 混凝土	2.40	28 000	0.167	-	-

1.3 工况水位组合

船闸设计最高通航水位采用频率 10% 的水位, 设计最低通航水位采用保证率 95% 的水位, 主要特征水位见表 2。

表 2 船闸特征水位

项目	水位/m	
	闸上	闸下
最高通航水位	20.44	19.82
最低通航水位	15.50	12.87
校核高水位	21.62	21.47
检修水位	19.00	15.37
施工水位	18.50	14.60

2 模型建立与验证

2.1 模型建立

应用 ANSYS 分别对有无卸荷板的整体式闸室进行三维非线性有限元分析。建模时采用 SOLID45 通过线弹性材料模拟闸室混凝土结构, 通过弹塑性的 $D-P$ 模型材料模拟地基土体, 在闸室底板底部与地基间设置接触对^[3]。接触类型定义为不抗拉的标准接触, 摩擦系数取 0.45。地基需沿顺水流方向从闸室上下游端面向外拓展 20 m, 垂直水流方向的地基边界从闸室墙外拓展 66 m, 地基模型厚 50 m。带卸荷板的整体式闸室有限元模型见图 2。

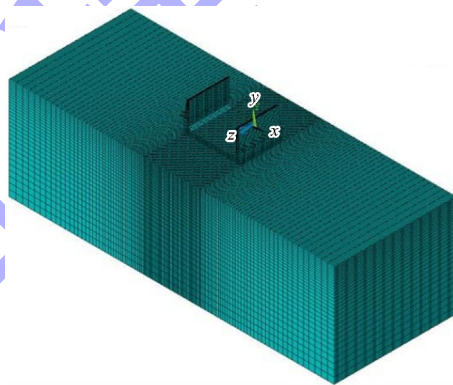


图 2 带卸荷板的整体式闸室有限元模型

2.2 模型验证

对常规整体式模型提取底板横向不同截面处的单宽弯矩, 采用郭氏表法计算常规整体式闸室底板弯矩^[4]。结果显示检修时期有限元法与郭氏表法计算的最大正弯矩分别为 2 438.85、2 889.84 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 且两方法计算所得底板弯矩包络图趋势一致, 表明了有限元算法建模与结果的可靠性。

3 卸荷板对整体式闸室底板影响

3.1 卸荷板对整体式闸室底板横向应力影响

分别对两种整体式闸室底板的完建期、最大水位差运行期、检修期应力分布情况见表 3。最不利工况为检修期, 对应应力云图见图 3。

表 3 卸荷板对整体式闸室底板横向应力计算成果

结构		最大拉应力/ MPa	最大压应力/ MPa
整体式闸室	完建期	2.18	3.92
	运行期	1.05	2.23
	检修期	2.26	3.97
带卸荷板的 整体式闸室	完建期	1.19	2.60
	运行期	1.65	2.84
	检修期	2.86	3.95

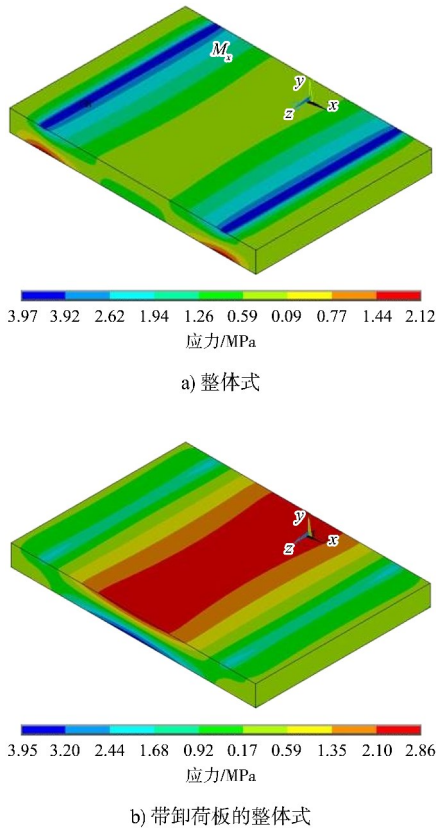


图 3 闸室底板检修期横向主应力分布

对两种整体式闸室结构的底板最大应力分析可知：

1) 对于常规整体式闸室底板跨中上表面的拉应力区域较小，而边墩处的底板上表面受压、下表面受拉；对于带卸荷板的整体式闸室底板在跨中上表面产生拉应力区域较大，而边墩处的拉、压应力都明显减小，且在底板的上下表面均发生拉应力与压应力交替现象。

2) 卸荷板的设置对底板应力的分布与大小作用明显。设置卸荷板后，底板的控制断面由边墩处转变为跨中。

虽然控制断面有所改变，运行期与检修期的拉、压应力相对于整体式闸室底板改变不大，卸荷板的相对高度以及尺寸仍然有进一步优化的可能。

3.2 卸荷板对整体式闸室底板沉降影响

由于闸室底板在竖直方向承受较大的荷载，对底板完建期、最大水位差运行期、检修期进行沉降分析，成果见表 4。最不利工况为完建期，对应应力云图见图 4。

表 4 卸荷板对整体式闸室底板沉降计算成果

结构	底板沉降/mm		
	完建期	运行期	检修期
整体式闸室	220.15	230.57	90.15
带卸荷板的整体式闸室	240.36	250.43	110.39

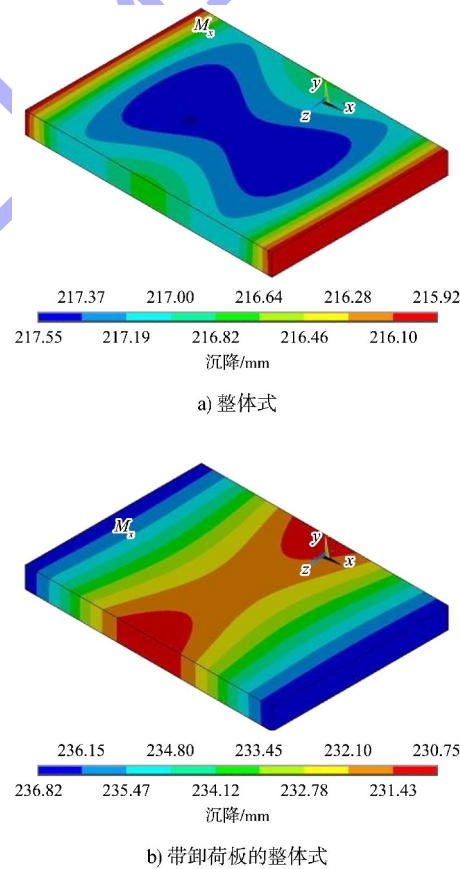


图 4 闸室底板完建期沉降分布

由两种闸室结构的沉降对比可知：

1) 设置卸荷板后边墩及跨中底板的沉降值相较未设置卸荷板时增大。

2) 整体式闸室底板由于闸室墙相对于底板重

力不大, 沉降总体由两侧向跨中均匀增加并达到最大值; 设置卸荷板后, 受卸荷板上土的重力影响, 边墩处底板沉降相较于跨中处明显更大, 且由两侧向跨中连续减小。

3.3 卸荷板对整体式闸室底板等效应力及第三主应力影响

闸室采用的混凝土为脆性材料, 工程上常通过第一主应力采用第一强度理论判别其是否破坏^[5]。但为全面考虑卸荷板对整体式闸室底板影响, 针对检修期荷载条件下, 分别对有、无卸荷板的整体式闸室底板等效应力及第三主应力进行分析, 结果表明:

1) 设置卸荷板前后第三主应力最大值均发生在底板跨中处, 而数值从 4.02 MPa 减小至 3.95 MPa, 边墩处第三主应力也明显减小。

2) 常规的整体式闸室最大等效应力与第一主应力、第三主应力有相同的趋势, 最大等效应力由边墩处 3.87 MPa 转变为底板跨中下表面 3.77 MPa, 边墩处底板上表面由于设置卸荷板, 更不易因塑性变形而屈服, 但对底板跨中下表面则较为不利。

从应力分布上看, 带卸荷板的整体式闸室底板应力分布更均匀, 底板受力状态相较常规的整体式闸室更好。

4 卸荷板相对高度及悬臂长度对底板内力的优化

4.1 卸荷板不同相对高度的底板内力

考虑卸荷板对闸墙受力的影响, 对卸荷板的相对高度 h 取值为 $0.35H$ 、 $0.40H$ 、 $0.45H$ 、 $0.50H$ 、 $0.55H$ 、 $0.60H$ 、 $0.65H$ 及 $0.70H$, 其中 H 为整体式闸室墙高。分别对完建期及检修期进行分析。

4.1.1 完建期底板弯矩

由于完建期间室墙后无水, 因此卸荷板相对高度的改变不受墙后排水管位置影响, 完建期不同卸荷板相对高度所对应的底板弯矩对比见图 5。

完建期随着卸荷板相对高度的不断提高, 底板负弯矩绝对值逐渐减小, 而正弯矩逐渐增大。完建期不同卸荷板高度所对应的最大正负弯矩值见图 6。

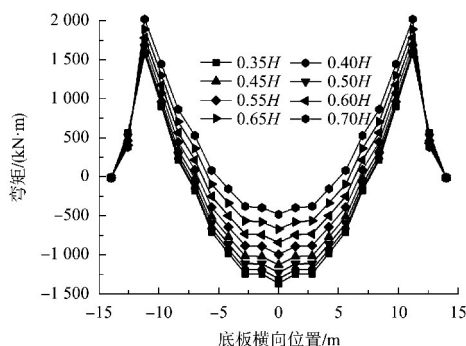


图 5 完建期不同相对高度底板弯矩对比

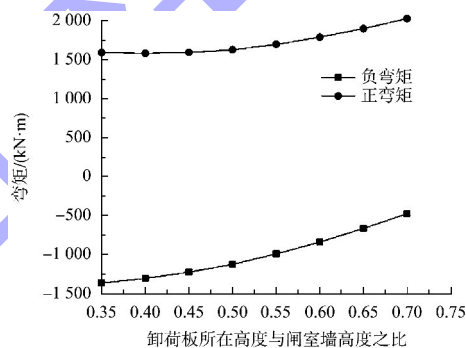


图 6 带卸荷板的整体式闸室完建期底板最大弯矩对比

随着卸荷板相对高度的增加, 底板正、负弯矩数值不断增加, 且增长速度不断加快, 当卸荷板相对高度在 $0.45H$ 以下时最大正弯矩值基本不变, 此后正弯矩越来越大且增幅加快。而负弯矩绝对值随着卸荷板的抬高而不断加速减小。

由完建期结果得出: 将卸荷板设置于 $1/3 \sim 1/2$ 闸室墙高处, 并结合实际工程尽量使正负弯矩绝对值相近, 以优化底板受力状态。

4.1.2 检修期底板弯矩

根据完建期的分析得出卸荷板相对高度对底板内力的影响, 但未考虑到墙后水位的影响。因此对最不利的检修期工况分析, 调整卸荷板的相对高度, 绘制弯矩对比见图 7。

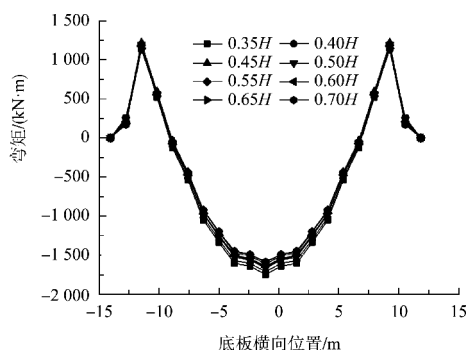


图7 检修期不同相对高度底板弯矩对比

由图7可知：检修期底板弯矩整体趋势为跨中处底板出现负弯矩，边墩处底板出现正弯矩。但是随着卸荷板相对高度的增大，闸室底板弯矩图整体虽有所下降，但相比与完建期并不明显。检修期不同卸荷板高度所对应的最大正负弯矩值见图8。

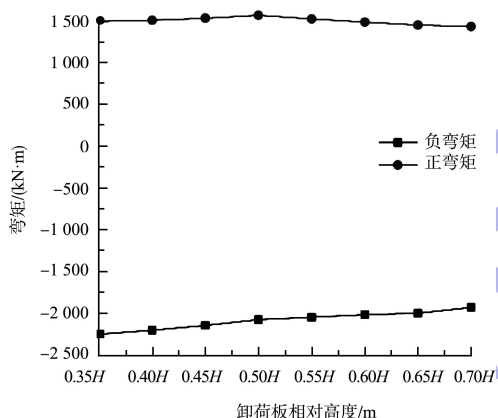


图8 带卸荷板的整体式闸室检修期底板最大弯矩对比

由图8可知，正弯矩最大值出现在卸荷板相对高度为 $0.50H$ 处，负弯矩的增长速率也以 $0.50H$ 处为分界，当卸荷板相对高度在 $0.50H$ 以下时负弯矩增长速度较快，而 $0.50H$ 以上时则增长速率有所放缓。因此位于 $0.50H$ 处的排水管导致的土重力及土压力变化相关。

综上，建议在地基条件及闸室高宽比接近本例时，工程设计可将卸荷板设置在 $1/3 \sim 1/2$ 墙高处，且位于排水管水位以下，此时底板正弯矩将大幅减小，正负弯矩相差不大，闸室底板的受力状态较好。

4.2 卸荷板不同悬臂长度的底板内力

改变卸荷板悬臂长度 L ，建立 $L = 0.10H$ 、

$0.15H$ 、 $0.20H$ 、 $0.25H$ 及 $0.30H$ 的闸室有限元模型。

由于卸荷板悬臂长度的改变与墙外的水位高低关联度较小，因此仅对最不利的检修期工况进行弯矩分析。检修期不同卸荷板悬臂长度所对应的底板弯矩对比见图9。

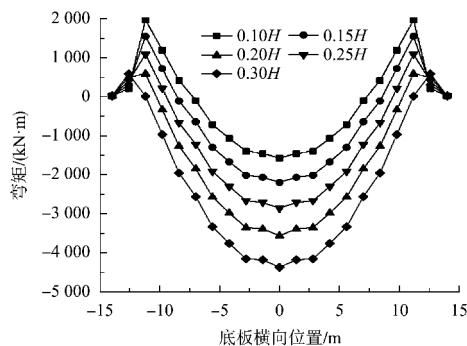


图9 检修期不同悬臂长度底板弯矩对比

检修期底板弯矩整体趋势相同，即跨中的底板出现负弯矩，边墩处的底板出现正弯矩。相对于卸荷板相对高度，卸荷板悬臂长度对底板弯矩将产生更大的影响。检修期下不同卸荷板悬臂长度所对应的最大正负弯矩见图10。

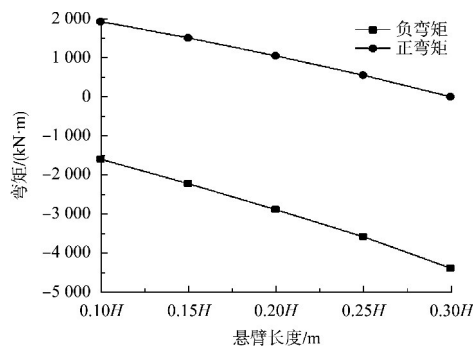


图10 带卸荷板的整体式闸室检修期底板最大弯矩对比

随着卸荷板悬臂长度的增加，闸室底板正弯矩不断减小，负弯矩绝对值不断增加，且弯矩的变化与悬臂长度的变化基本呈线性关系。因此在增大上部填料自重以及减小水平土压力方面，设置卸荷板相较于减小边载的影响更大。

卸荷板悬臂长度过长使正弯矩减小，但负弯矩绝对值却大幅上涨，反而对结构不利。为了最大化利用工程材料的强度，应使最大正弯矩与最大负弯矩绝对值相近。根据相关计算分析，建议

将卸荷板悬臂长度设置为 $0.10H \sim 0.15H$, 此时底板受力状态较佳。

4.3 成果合理性分析

为验证以上结论, 将原设计卸荷板进行优化。分别将卸荷板设置在 $1/3$ 墙高处, 悬臂长度分别取为 $0.10H$ 与 $0.15H$; 再将卸荷板设置在 $1/2$ 墙高处, 悬臂长度取 $0.10H$ 与 $0.15H$ 。选择控制工况即检修期进一步计算得弯矩见图 11。

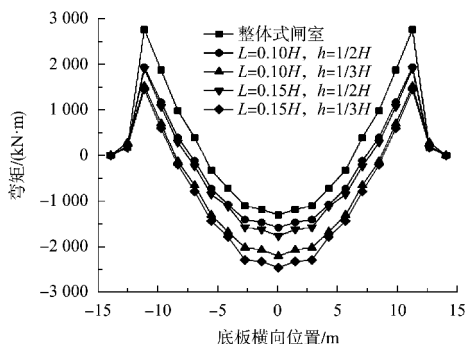


图 11 优化验证弯矩结果

对卸荷板优化设计后, 底板正弯矩显著减小, 而负弯矩绝对值则相对增加, 且正负弯矩的绝对值相差较小。因此, 将卸荷板设置在 $1/3$ 墙高处, 悬臂高度取 $0.10H$ 时底板受力状态较好。

经过优化验证, 对于与本例中闸室高宽比及地基土质类似的情况, 在设计时建议根据具体情况将卸荷板相对高度设置在 $1/3 \sim 1/2$ 闸室墙高处, 且位于排水管水位以下, 悬臂长度设置在 $0.10H \sim 0.15H$ 高度范围内, 选取合理的卸荷板尺寸。

5 结论

1) 相较于整体式闸室, 闸墙设置卸荷板将使得边墩处底板上表面压应力、下表面拉应力减小, 跨中上表面拉应力及边墩处底板沉降增加。设计时需合理确定卸荷板尺寸, 避免过大增加跨中上表面拉应力及边墩处底板沉降。

2) 相对于卸荷板相对高度, 卸荷板悬臂长度对底板弯矩将产生更大的影响。

3) 建议对于类似高宽比及土质的闸室, 工程设计时将卸荷板设置在 $1/3 \sim 1/2$ 闸室墙高处且位于排水管水位以下, 卸荷板悬臂长度设置在 $0.10H \sim 0.15H$ 高度, 使底板正负弯矩相近, 达到最佳的受力状态。

参考文献:

- [1] 席荣, 关云飞, 李夫仲. 带卸荷板的整体式闸室结构受力与变形有限元分析[J]. 水运工程, 2018(5): 116-121, 126.
- [2] 钟华林, 邹永超, 汤建宏. 整体式闸室结构内力分析与优化设计[J]. 水运工程, 2022(9): 135-140.
- [3] 李岩. ANSYS 在大型船闸设计中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [4] 李云勋, 朱振凯. 弹性地基梁郭氏查表法和链杆法计算特点的比较[J]. 科技资讯, 2012(23): 46-46, 48.
- [5] 中交水运规划设计院. 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 93 页)

- [9] KUANG C, CHEN K, WANG J, et al. Responses of hydrodynamics and saline water intrusion to typhoon Fongwong in the north branch of the Yangtze River Estuary[J]. Applied sciences, 2021, 11(19): 8986.
- [10] 惠遇甲. 长江黄河垂线流速和含沙量分布规律[J]. 水利学报, 1996(2): 11-17.

- [11] 周家俞, 陈立, 叶小云, 等. 泥沙影响流速分布规律的试验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 506-510.
- [12] 鞠俊, 夏云峰, 闻云呈. 长江河口段流速沿垂线分布规律[J]. 人民长江, 2008(15): 46-48, 73.

(本文编辑 赵娟)