

小洼槽长距离倒虹吸水头损失的数值计算

李娟¹, 牧振伟¹, 何照青², 李新³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000;
3. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为了探索采用 Fluent 软件模拟研究长距离倒虹吸水头损失的准确性, 利用计算流体力学软件 Fluent 的水气两相流 VOF 法, 采用三维标准 $k-\epsilon$ 模型对长距离倒虹吸水头损失进行模拟计算。计算中考虑壁面粗糙程度, 设置不同的粗糙度模拟小洼槽倒虹吸水头损失, 从而得到玻璃钢管材粗糙度范围。对比较大流量下水头损失的模拟值与实测值, 表明通过设置粗糙度模拟长距离倒虹吸水头损失的方法可行, 但网格划分对结果的影响大小还需进一步研究。

关键词: 长距离; 倒虹吸; 数值模拟; 水头损失

中图分类号: TV 134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0070-04

Numerical Simulation of Head Loss of Small trough and Long distance Inverted Siphon

LI Juan¹, MU Zhenwei¹, HE Zhaoqing², LI Xin³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China;
3. Xinjiang Irtysh River Basin Development Project Construction and Management Bureau, Urumqi, 830000, China)

Abstract: In order to explore the accuracy of Fluent software in simulating the head loss of long distance inverted siphon, the water air two phase flow VOF method in the computational fluid dynamics software Fluent and a three dimensional standard $k-\epsilon$ model were used to simulate the head loss of long distance inverted siphon. The calculations considered wall roughness by setting different roughness simulate head loss of small trough inverted siphon to obtain the roughness of glass fiber reinforced plastic pipe. The measured and simulated head loss values under large flow conditions were compared, which showed that it is feasible to set the roughness of the long distance inverted siphon to simulate head loss. However, the effects of mesh discretization on the head loss results need further research.

Key words: long distance; inverted siphon; numerical simulation; head loss

1 研究背景

倒虹吸是输水工程中必不可少的交叉建筑物之一^[1], 一般从实用、经济出发, 以钢筋混凝土为主要管材。不过为保证输水能力, 目前高水头、大口径的倒虹吸开始推广采取各种新型管材, 如预应力钢筒混凝土管、热固性树脂纤维缠绕夹砂管(玻璃钢管)等^[2-4]。新疆北部供水工程中小洼槽倒虹吸就是采用了缠绕式玻璃钢夹砂管作为管材的。小洼槽倒虹吸管道单管长度为 5 766 m, 管长为 2×5 315 m, 最大静水压力水头为 46 m, 最大水头损失为 4. 328 m。

近年来已有较多学者通过数学模型成功模拟了泄水建

筑物中的水流特性, 对水流进行水气二相流数值模拟, 如对冲刷坑的模拟、捕捉水深、进行体形优化, 为工程设计与运行管理提供参考^[5-8]。然而, 针对长距离倒虹吸的水力学问题采用数学模型进行数值模拟的研究较少, 任坤杰等^[9]人应用 VOF 模型模拟了南水北调工程中的黄金河倒虹吸三维水流特性, 何照青^[10]对新疆北部小洼槽倒虹吸在不同流量下进出口流场进行三维流场数值模拟。姚慧敏^[11]则通过三维数值模拟计算, 对引江左岸排水倒虹吸的进口水流条件加以分析, 论证合理经济的倒虹吸进口型式。

本文通过对小洼槽倒虹吸的水流特性进行三维数值模拟, 在考虑管道粗糙度的影响下, 改变水位, 计算相应的水头损失,

收稿日期: 2013-01-08 修回日期: 2013-08-14 网络出版时间: 2013-08-23
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1608.020.html>

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2012211A059)

作者简介: 李娟(1988-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: home.hstlg@163.com

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男(回族), 河南南阳人, 副教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xjmzw@163.com

并将计算值与实测值进行比较,分析模拟方法的可靠性。

2 模型建立

在水流数值模拟中,形式简单的装置或建筑物可进行二维数值模拟。但是由于进出口的宽度方向与管段相差很大,小洼槽倒虹吸管的边界较为复杂,必须采用三维模型进行求解计算。倒虹吸是轴对称结构,采取半结构为研究对象进行模拟,既能反映真实情况又可节省计算时间。

倒虹吸模拟区域为:顺水流 x 方向桩号为 0+ 170.40 至 5+ 672.49 m;沿水深为 y 方向,高程为 549.36~ 592.62 m,沿宽度 z 方向为 0~ 14 m,管径 $D=3.1$ m。由于管线过长,显示时对 x 、 y 方向进行不同比例的缩放。倒虹吸管线分布见图 1。

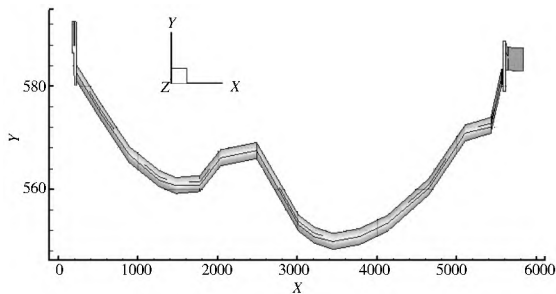


图 1 小洼槽倒虹吸管线

Fig. 1 Pipeline of small trough inverted siphon

2.1 网格划分

采用结构网格与非结构网格相结合的形式对倒虹吸半结构进行了单元划分。为获得精确数据观察流场特性,对边界变化较大部分进行局部网格细化,管道段网格间距适当增大为 3 m,计算区域网格数约 8 万个,倒虹吸进口段结构及网格划分见图 2。模拟时间为 1 h 左右,迭代时间步长为 0.001 s。

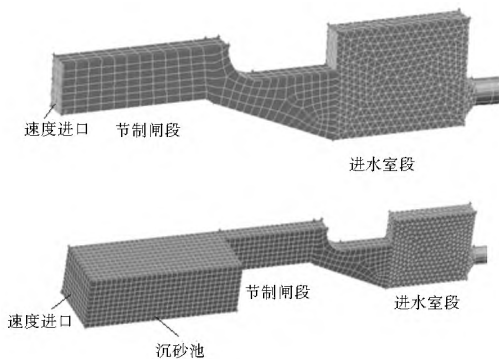


图 2 小洼槽倒虹吸进口段结构及网格划分

Fig. 2 The structure and mesh discretization at the inlet segment of small trough inverted siphon

2.2 边界条件

(1) 固体边壁。倒虹吸管边壁、渐变段、连接段、进口和出水段均为固壁,其边界条件按固壁函数处理。壁面处为无滑移边界,靠近壁面区域则采用标准壁面函数方法处理。长距离倒虹吸的沿程水头损失占总水头损失的比重很大,在计算过程中不可忽略。

在 Fluent 中可以通过修改壁面定律的粗糙度来考虑粗糙度影响。粗糙管实验表明了当用半对数规则画图时,近粗

糙壁面的平均速度分布具有相同坡度 ($1/k$),但是具有不同的截止点(在对数定律中附加了常数 B)。对于粗糙壁面,平均速度的壁面定律形式为:

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\tau} \ln(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu}) - \Delta B \quad (1)$$

式中: $u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$, C_μ 为经验值; τ_w 为壁面剪应力; y_p 为从点 P 到壁面的距离; ρ 为流体的密度; E 为壁面方程常数; u_p 为 P 点流体的平均流速。 ΔB 为粗糙度函数,用来衡量由于粗糙度影响而导致的截止点转移,与粗糙的类型(相同的沙子、铆钉、螺纹、肋、铁丝网等)和尺寸有关,但针对各种类型的粗糙情况没有统一而有效的公式; K_s 是物理粗糙高度,无量纲高度:

$$K_s^+ = \rho K_s u^* / \mu \quad (2)$$

式中: μ 为流体在点 P 的黏性。实验数据分析表明粗糙函数 ΔB 并不是 K_s^+ 的单值函数,而是依据 K_s^+ 的值有不同的形式。观察表明有三种不同的类型:液体动力光滑区 ($K_s^+ < 3 \sim 5$); 过渡区 ($3 \sim 5 < K_s^+ < 70 \sim 90$); 完全粗糙区 ($K_s^+ > 70 \sim 90$)。在光滑区域内粗糙度的影响可以忽略,在过渡区域影响较明显,但在完全粗糙区域影响显著。

(2) 进口边界。进口边界分为两部分,一部分为空气进口,设置为大气压力进口;另一部分为水进口,设置为速度进口,速度大小依据实测水位与流量计算出断面平均流速, $V = Q/A = 0.91468 \text{ m}^3/\text{s}$,含有沉砂池模型进口速度为 $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 出口边界。倒虹吸下游出口处为渠道,按大气压力出口设定。

(4) 自由表面。渐变段、连接段和进出口及下游渠道与大气接触,设置为压力入口。

2.3 控制方程

标准 $k-\epsilon$ 湍流模型考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况^[12-14],可以较好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动不可压缩非定常流的张量形式控制方程如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (4)$$

$$\text{k 方程: } \frac{\partial (k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\text{\epsilon 方程: } \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中:紊动能为 $G = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; 紊动黏滞系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; t 为时间; p 为压力; u 为速度; x 为坐标。方程中模型常数为经验值 $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

追踪带有自由表面的水流流动一直是数值模拟研究的重点,解决方法有高度函数法、线段法、标记粒子法、VOF 法^[5]、刚盖法等。本文采用的是 VOF 法,体积分数规定为: $\alpha_q = 0$ 表示控制体内无 q 相流体; $\alpha_q = 1$ 表示控制体内充满 q

相流体; $0 < \alpha_q < 1$ 表示控制体内部分充满 q 相流体, 所有流体的体积分数总和为 1。本文倒虹吸工程水流速度不大, 取 $\alpha_q = 0.5$ 作为水气交界面^[15]较为合理。

3 模拟结果

3.1 水头损失的模拟

选取单管运行方案中较大流量进行计算 ($Q = 16.35 \text{ m}^3/\text{s}$), 验证 Fluent 软件计算中设置粗糙度对上下游水头差的影响。计算范围从小洼槽倒虹吸管节制闸段 $x = 170.4 \text{ m}$ 开始。已知条件为进口处实测水深(上游沉砂池水位为 589.796 m), 用于拟合对应的倒虹吸管口前 ($x = 204 \sim 220 \text{ m}$) 以及下游渠道水位。

参考实测资料, 选取粗糙度为 0 m 、 0.0004 m 、 0.0008 m 及 0.0012 m 进行初步试算沿程水头损失。其中粗糙度为 0.0008 m 时, 计算区域含上游沉砂池。由于模型为半结构, 取对称面 ($z = 0$) 为研究对象时发现水位稍低, 因为所接管道中心处流速大, 因此选择 $z = 1.5$ 断面, 将水面线坐标导出, 选择典型点绘制水面线, 图 3、图 4 为进口节制闸段和进水室的水深沿 x 方向的变化趋势。由图 3 可知设置粗糙度计算的水深较接近, 但设置粗糙度与粗糙度为 0 时上游水深差值很大, 这是由于没有阻水作用水位有突降。图 4 中含沉砂池的进水室段流态更为平稳。

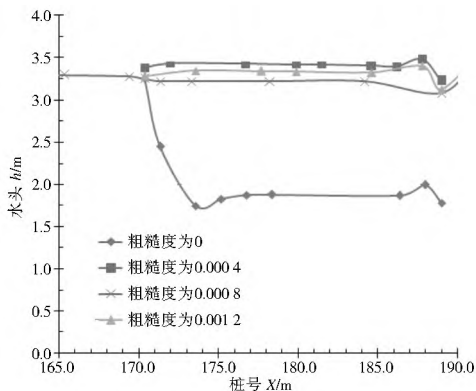


图 3 不同粗糙度所对应节制闸段水面线

Fig. 3 The water surface lines at the sluice segment for different values of roughness

表 1 初步计算小洼槽倒虹吸管道不同粗糙度所对应的水头损失值

Table 1 Preliminary calculations of the head loss of small trough inverted siphon for different values of roughness

粗糙度	坐标								损失
	205	206	207	208	5612	5613	5614	5615	
0	588.435	588.435	588.516	588.544	584.593	584.586	584.58	584.57	3.900
0.0004	589.896	589.896	589.946	589.946	584.559	584.553	584.546	584.569	5.387
0.0008	589.996	590.066	590.046	590.036	584.511	584.506	584.499	584.499	5.530
0.0012	590.021	590.079	590.081	590.001	584.49	584.476	584.475	584.468	5.566

4 结论

(1) 通过建立小洼槽长距离倒虹吸水流的数学模型, 采用水气二相 VOF 法及 $k-\epsilon$ 紊流模型, 并在壁面边界考虑粗糙度的影响, 计算了在流量 $16.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的水头损失, 与实测资料对比误差为 1.41%。

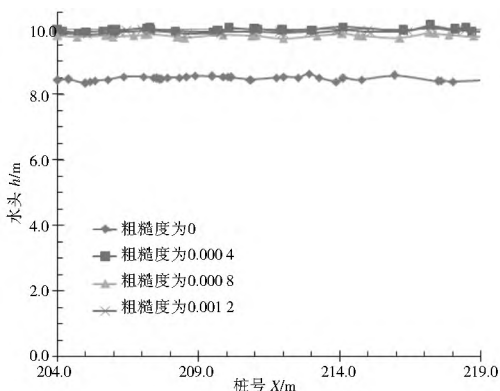


图 4 不同粗糙度所对应进水室段水面线

Fig. 4 The water surface lines at the inlet chamber segment for different values of roughness

根据实测资料 $Q = 16.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的节制闸段进口处 $x = 170.4 \text{ m}$, 水深为 3.2 m , 进水室水深为 9.74 m 。从进水室前段取四个断面读取水位, 同一断面水面波动大小约为 $0.5 \sim 2 \text{ cm}$, 因此取平均值用以减小误差。读取水位时发现含有沉砂池的算例管口前水位相对平稳, 计算结果见表 1。

上游含有沉砂池段模型中采取相同粗糙度 0.0008 , 改变进口的边界条件, 用以确定边界条件对水位的影响大小。将进口变为压力进口, 压力大小由水压力计算, 压力值为 $p = \rho gh$, 计算水头损失为 5.5 m , 表示改变进口边界条件对结果影响较小。因此, 根据实测资料中 $Q = 16.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水头损失为 4.612 m , 可知粗糙度范围在 $0 \sim 0.0004 \text{ m}$ 的范围内。继续减小粗糙度, 依据相同的方法读取水位, 水头损失计算值见表 2。

采取上表中的方法计算得出, 粗糙度为 0.0003 m 时对应的水头损失为 5.18 m 。依次推算得到粗糙度为 0.00002 m 时对应的水头损失为 4.547 m , 与实测资料 4.612 接近, 误差为 1.41%, 因此可推测运行一段时间后的玻璃钢粗糙度约为 0.00002 m 。

3.2 粗糙度对压力值的影响

对比管道压强最大值, 可知粗糙度对水位差有影响, 因而影响管道的压强, 压强变化范围较小, 但随粗糙度的增大有增大的趋势, 见表 3。

(2) 在 Fluent 软件中, 设置不同的管道粗糙度进行计算, 将计算水位与实测进行对比后表明, 在进行长距离输水工程的过程中, 需要考虑沿程的水头损失, 并得到运行一段时间后玻璃钢管材的粗糙度约为 0.00002 m 。

(3) 采用数值模拟的手段, 在研究水头损失方面可得到与实测资料比较接近的结果。须注意的是, 在水位波动较大

表 2 小洼槽倒虹吸管道不同粗糙度所对应的水头损失值

Table 2 The head loss values of small trough inverted siphon for different values of roughness

粗糙度	坐标								损失
	205	206	207	208	5612	5613	5614	5615	
0.000 30	589.830	589.789	589.790	589.785	584.63	584.626	584.623	584.617	5.180
0.000 02	588.854	588.843	588.836	588.834	584.290	584.294	584.301	584.295	4.547
0.000 01	588.420	588.450	588.480	588.520	584.294	584.300	584.300	584.295	4.170

表 3 相同流量下不同粗糙度对应压力值

Table 3 Different pressure values for different values of roughness under the same flow rate

粗糙度/m	0	0.00001	0.00002	0.0003	0.0004	0.0008	0.0012
最大压强/MPa	0.366	0.368	0.367	0.371	0.372	0.371	0.372

处,有一定的度数误差,边界复杂区域划分网格对结果有影响,网格对计算结果的影响还需进行更深入的研究。

参考文献(References):

[1] 杨亚伦,戴梅.南水北调中线工程渠道倒虹吸导流堤型式试验研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(3):14. (YANG Yalun, DAI Mei. Test Research for Diversion Dike Forms of Channel Inverted Siphon in the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(3): 14. (in Chinese))

[2] 陈德亮,李惠英.倒虹吸管[M].中国水利水电出版社,2006. (CHEN Deliang, LI Huiying. Inverted Siphons[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))

[3] 吴青胜.玻璃钢夹砂管在双峰水库输水工程中的应用[J].山西水利科技,2009(4):53-54. (WU Qingsheng. Application of the RPMP in the Hydraulic Engineering of Shuangfeng Reservoir[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2009(4): 53-54. (in Chinese))

[4] 蒋东方.正反悬链线形倒虹吸管身断面研究[J].水电能源科学,2011,29(11):132-134. (JIANG Dongfang. Research on Pros and Cons Catenary Inverted Siphon Section[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 132-134. (in Chinese))

[5] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等.挑流消能水气两相流数值模拟[J].水利学报,2003,(9):77-82. (DIAO Mingjun, YANG Yongquan, WANG Yurong, et al. Numerical Simulation of Water air two-phase Jet Flow from Flip Bucket to Plunge Pool[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2003, (9): 77-82. (in Chinese))

[6] 王晓玲,段琦琦,佟大威,等.长距离无压引水隧洞水气两相流数值模拟[J].水利学报,2009,40(5):596-602. (WANG Xiaoling, DU ANQi qi, TONG Dawei, et al. Numerical Simulation of Water air two-phase Flow with Free Surface in Long Tunnel[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2009, 40(5): 596-602. (in Chinese))

[7] 张志雁,牧振伟,万连宾.克孜加尔溢洪道控制段体形优化的数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):69-72. (ZHANG Zhiyan, MU Zhenwei, WAN Lianbin. Numerical Simulation of Shape Optimization for Control Section of Kezijaer Spillway[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(6): 69-72. (in Chinese))

[8] 李玲,陈永旭,李永红.三维VOF模型及其在溢洪道水流计算中的应用[J].水力发电学报,2007,26(2):83-87. (LI Ling, CHEN Yongcan, LI Yonghong. Three dimensional VOF

Model and its Application to the Water Flow Calculation in the Spillway[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 83-87. (in Chinese))

[9] 任坤杰,韩继斌,严伟.渠道倒虹吸水流三维数值模拟[A].水力学与水利信息学进展[C].西安交通大学出版社,2009,637-642. (REN Shun Jie, HAN Ji bin, YAN Wei. The Three dimensional Numerical Simulation of Channel Inverted Siphon[A]. Hydraulics and Water Information Advances[C]. Xi'an Jiaotong University Press, 2009, 637-642. (in Chinese))

[10] 何照青,牧振伟,李新,等.基于VOF模型的倒虹吸进出口流场数值模拟[J].中国农村水利水电,2012(3):94-96. (HE Zhaoqing, MU Zhenwei, LI Xin, et al. Numerical Simulation of 3D Flow Field of Inverted Siphon Imports and Exports Based on VOF Method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(3): 94-96. (in Chinese))

[11] 姚慧敏,靳翠红,耿运生.北中冯工程左岸排水倒虹吸进口水流的数值模拟[A].水力学与水利信息进展[C].西安交通大学出版社,2007,570-576. (YAO Huimin, JIN Cuihong, GENG Yunsheng. Numerical Simulation of the Flow on the Left Bank Drainage Inverted Siphon Imports at Bei Zhongfeng Engineering[A]. Hydraulics and Water Information Advances[C]. Xi'an Jiaotong University Press, 2007, 570-576. (in Chinese))

[12] 巨江,刘少斌,杨晓池. Fluent 软件在泄水工程中的应用[J].水力发电学报,2009,28(2):110-114. (JU Jiang, LIU Shaobin, YANG Xiaochi. The Application of Fluent Software on Discharge Engineering[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 110-114. (in Chinese))

[13] 韩占中,王敬,兰小平. Fluent 流体工程仿真计算与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004,6. (HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. Simulation and Application Examples in Fluid Engineering Based on Fluent Software[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese))

[14] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2006. (WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))

[15] 邓军,许唯临,雷军,等.高水头岸边泄洪洞水力特性的数值模拟[J].水利学报,2005,36(10):1209-1212. (NIU Zhengming, HE Liqiang, WANG Zhen, et al. Effect of Downstream Water Level on Horizontal Rotary Flow in Internal Energy Dissipation Tunnel[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2005, 36(10): 1209-1212. (in Chinese))