

划子口河闸弧形钢闸门三维有限元分析与安全评估

奚肖亚¹, 刘海祥², 叶小强², 柯敏勇²

(1. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:划子口河闸拆建工程闸门为“Π”型弧形钢闸门,为掌握不同工况下的结构变形和应力分布,需要建立三维有限元整体模型进行分析.采用 ANSYS 有限元计算软件建立模型,按不同工况分别施加荷载.计算结果表明,5 种工况下弧形钢闸门的结构变形都在允许范围内,应力值都在钢材的屈服应力以下.采用结构线性屈曲分析闸门结构稳定性,用有限元法求出结构的稳定安全系数,结果表明大部分工况下的稳定安全系数大于 4,最先失稳的部位在跨中水平次梁处,建议适当加密跨中纵梁,以减小水平次梁计算长度,提高稳定性.

关 键 词:弧形闸门;有限元分析;结构安全性

中图分类号:TV663+.2

文献标志码:A

文章编号:1009-640X(2012)05-0036-06

划子口河闸拆建工程闸门为“Π”型潜孔弧形钢闸门,设计为双向挡水,闸孔数是 1 孔,孔口净宽 30 m. 闸门支臂支撑在中墩上,中心距为 20 m,门页两边各悬挑出 5 m. 两边端柱顶部设置吊耳接液压启闭机,启闭机安装在边墩挑出的工作台上. 闸门底槛高程 0.5 m,门顶高程 8.5 m,顶止水高程 8.7 m. 考虑到该闸门每年大部分时间均为挡滁河水,故弧面朝向滁河侧,门顶以上设钢制胸墙兼作人行便桥. 为便于布置启闭机,弧面半径较小,为 8 m. 铰心高程为 4.5 m,中墩顶高程为 6.0 m. 边墩设锁定插销,由液压推杆驱动.

上下两支臂与水平面夹角均为 22.915°. 门页采用多腹板整体箱梁焊接结构,门页两面均用厚 12 mm 钢板整体包裹. 支臂为钢箱梁,内设隔板,与门页及支座板均为焊接连接. 与吊耳相连的边纵梁及与支臂相连的纵梁均为双腹板结构. 边纵梁腹板设侧滚轮,并在其靠门底处设锁定孔. 支铰为双圆柱铰结构,铰支座做成全密封轴承腔,活动面均加设密封圈以防止进水进污. 闸门支铰座埋件采用支承钢梁,并通过锚栓与支铰锚固. 闸门结构和埋件主要材料为 Q345,主锚栓轴类均采用 40Cr 调质钢. 止水座及止水螺栓均为不锈钢材质. 闸门侧止水为 2 道“L”形橡胶止水,顶、底止水为板形止水,MGE 材料,满足双向挡水需要.

为分析划子口河闸拆建工程潜孔弧形钢闸门结构变形和应力分布情况,提出设计改进建议,需要建立三维有限元整体模型. 因此以 ANSYS 为有限元计算软件建立模型.

1 计算模型和参数

1.1 荷载分类及其取值

工况组合分 4 类:(1)设计荷载组合,取闸门自重、设计水位组合下的静水压力、动水压力;(2)开闸荷载组合,取闸门自重、上下游开闸水位组合下静水压力、动水压力、启闭力;(3)校核荷载组合,取闸门自重、校核水位组合下的静水压力;(4)地震荷载组合,取闸门自重、静水压力、动水压力、地震动水压力.

闸门自重的重力加速度取 $10 \text{ m}^2/\text{s}$,钢材重度取 $78 \text{ kN}/\text{m}^3$,青铜为 $85 \text{ kN}/\text{m}^3$. 静水压力垂直作用于门叶,动水压力采用静水压力乘以 1.2 的动力系数. 地震动水压力按下游有水取值,设计烈度为 7 度,占静水压力的 4.33%. 闸门启闭通过约束吊耳的启闭杆方向位移,由模型的力平衡自动计算.

收稿日期:2012-02-20

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AA112106)

作者简介:奚肖亚(1953-),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事水工结构设计研究. E-mail: njslyeml@jssmail.com.cn

1.2 材料的容许应力

在对闸门结构进行强度校核时,应首先确定材料容许应力,而容许应力与钢材的厚度相关.根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)规定,对钢材进行尺寸分组,门体及埋件主要材料均为 Q345,部分较厚板件材料为 Q345-Z15,型钢材料为 Q345.根据设计规范的规定,对于大、中型工程的工作闸门及重要的事故闸门,容许应力应乘以 0.90~0.95 的调整系数.

2 三维有限元分析模型

采用闸门设计图纸建立三维空间几何模型,闸门门叶及支臂采用板单元 SHELL63,板厚按设计值输入;支铰采用三维实体单元 SOLID45.采用线弹性模型,钢材力学特性按《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)取值.边界条件是将支铰的固定支座底部固接,闸门面板底槛按闸门是否被提起分别作自由处理和施加竖向约束;对称面上施加对称约束,对重合节点作耦合处理,除此之外其余节点均为自由点.

2.1 模型和材料属性

整体三维有限元模型见图 1.因闸门结构为对称结构,且荷载对称分布,故按照对称结构建模.有限元模型见图 2.局部有限元网格均按照图纸尺寸建立精细仿真模型.

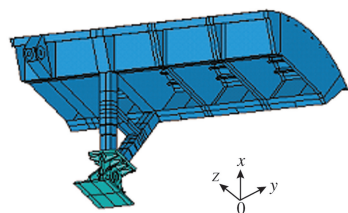


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

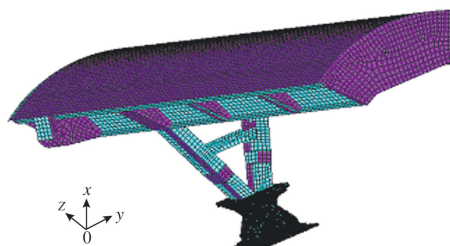


图 2 有限元网格

Fig. 2 FEM model

在数值模拟中,材料特性参数分别为:弹性模量,钢取 2.06×10^5 MPa,青铜取 1.0×10^5 MPa;泊松比,钢取 0.3,青铜取 0.34.支铰轴套材料参数按青铜取值.

2.2 单元类型和网格划分

在进行有限元网格划分时,主要考虑几何形状、研究对象和约束作用范围.网格细分程度应兼顾计算精度与求解效率.网格划分采用自由划分和映射划分相结合方法,精细仿真的有限元网格分别见图 2 和 3,共有 131 195 个单元,40 838 个节点.

采用壳单元 SHELL63 模拟闸门的面板、吊耳、支臂、主横梁、竖纵梁及次梁的上下翼缘和支臂.壳单元可承受平面内荷载和法向荷载,可离散为四边形或三角形薄板单元,相邻单元以结点连接,相互传递法向力和力矩;该类单元每个节点具有 6 个自由度:沿节点坐标系 x, y, z 方向的平动和绕节点坐标系 x, y, z 轴的转动.用 SOLID45 单元模拟闸门的铰支座部分,单元通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个沿着 x, y 和 z 方向平移的自由度.

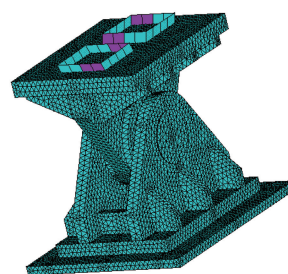


图 3 支铰网格

Fig. 3 FEM model of hinge

2.3 边界条件

边界约束分两类:(1)不开闸工况的边界条件:固定支座底板固结,面板底梁约束 U_y 方向的变形,吊耳自由,跨中面为对称约束.(2)开闸工况的边界条件:固定支座底板固结,面板底部自由,吊耳加启闭力 1 600 kN,边端柱底部取点约束 U_x 方向的变形,跨中面为对称约束.由于启闭力考虑了提闸摩阻,需通过增大闸门自重来弱化边端柱底部取点的约束力.

3 计算结果与分析

3.1 验算项目及方法

弧形闸门各构件需要进行强度与刚度校核,轴心受压与压弯构件(支臂、梁)还要进行稳定性验算。

3.1.1 强度验算 弧形钢闸门的门叶结构,包括面板、梁格、横向联结系和纵向联结系,均处于多向应力状态。根据 Mises 屈服准则,用等效应力 σ_{eq} 来判断钢材是否满足强度条件:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2) + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

式中: σ_{eq} 为多向应力状态下的等效应力,即 Mises 应力; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 轴方向的正应力; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为切应力。当 $\sigma_{eq} \leq f$ 时(f 为钢材的强度设计值),即满足强度条件。

(1) 对于主横梁、纵梁、支臂,按下式计算

$$\sigma_{eq}^{max} \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: σ_{eq}^{max} 为最大等效应力; $[\sigma]$ 为容许应力。

(2) 对于四边固定的面板,还有研究表明,在均布荷载作用下最大弯矩发生在面板支承长边的中点,但是当该点的应力达到所用钢材的屈服点时,面板的承载能力还远远没有耗尽,随着荷载的增加,支承边上其他各点的弯矩都随之增加,而使面板上、下游面逐步达到屈服点。此时,面板仍然能够承受继续增大的荷载。试验表明,当荷载增加到设计荷载的 3.5~4.5 倍时,面板跨中部分才进入弹塑性阶段。这说明钢面板在使用过程中有很大的强度储备。因此,在强度计算中,容许面板在最大应力附近的局部小范围进入弹塑性阶段,故将面板的容许应力 $[\sigma_0]$ 乘以大于 1 的弹塑性调整系数予以提高。因此,按下式计算:

$$\sigma_{eq}^{max} \leq 1.1\alpha[\sigma_0] \quad (3)$$

式中: α 为弹塑性调整系数,当 $b/a \leq 3$ 时, $\alpha = 1.5$; 当 $b/a > 3$ 时, $\alpha = 1.4$ (a 为面板短边, b 为面板长边)。

3.1.2 稳定性验算 弧形钢闸门在各工况荷载作用下,应力分布规律复杂:在正向水位下,支臂为压弯构件;主横梁在跨中受弯,其中下横梁的弯距大于上横梁,在与支臂接触的 1/4 跨范围内,受到支臂支持力的影响,横梁腹板受压力较大;水平次梁由于尺寸小,其应力水平高于主要梁格;纵梁腹板尺寸高达 2.3 m,易受压失稳,所以需要进行稳定验算。

本次验算中,根据理想弹性结构的屈曲理论,求解弧形钢闸门的线弹性最小特征值屈曲问题;通过有限元几何刚度矩阵求解欧拉稳定性。

3.1.3 刚度验算 根据规范规定,闸门主梁的容许挠度值 $[w] = 1L/600$ (L 为计算跨度)。

3.2 计算结果与分析

分别计算正向设计、反向设计、无水提门、反向引水、正向主汛等工况,限于篇幅仅给出前 2 种工况。

3.2.1 正向设计工况 此工况水位组合为:长江侧水位 1.71 m,滁河侧水位 6.50 m,不开闸。闸门结构变形和等效应力见图 4。由图可见,闸门最大总变形在跨中,为 10.015 mm;最大等效应力在底梁 U_y 约束、下支臂与下横梁交接处,最大等效应力为 164.0 MPa。

3.2.2 反向设计工况 此工况水位组合为:长江侧水位 10.39 m,滁河侧水位 7.00 m,不开闸。闸门结构变形和等效应力见图 5。反向设计工况时,闸门最大总变形在跨中,为 11.0 mm;最大等效应力在底梁 U_y 约束、下支臂与下横梁交接处,最大等效应力为 143.0 MPa。

3.2.3 安全评估 对弧形钢闸门主要构件进行变形分析,包括上下主横梁的悬臂和中跨,上下支臂部分(见表 1)。按规范,上横梁悬臂、支臂和下主横梁跨中变形的刚度容许值(最大挠度与计算跨度之比)分别为 16.667, 6.083 和 33.333,刚度验算结果表明,主要构件设计刚度均在允许范围之内。对弧形钢闸门的主要构件进行等效应力分析,包括上下主横梁的悬臂和中跨,上下支臂,应力验算结果不得大于规范容许值,详见表 2。结果表明主要构件设计应力水平在规范允许范围之内。

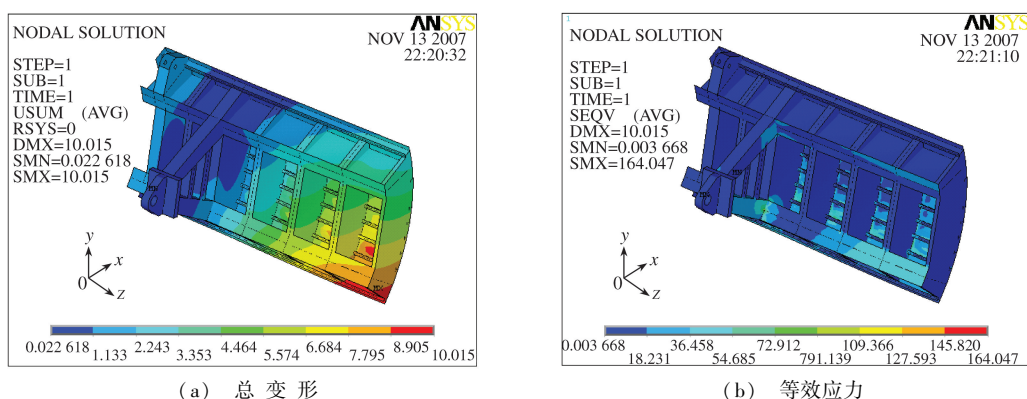


图4 闸门结构总变形和等效应力(正向设计工况)(单位: MPa)

Fig. 4 Deformation and equivalent stress of steel gate (forward design working condition) (unit: MPa)

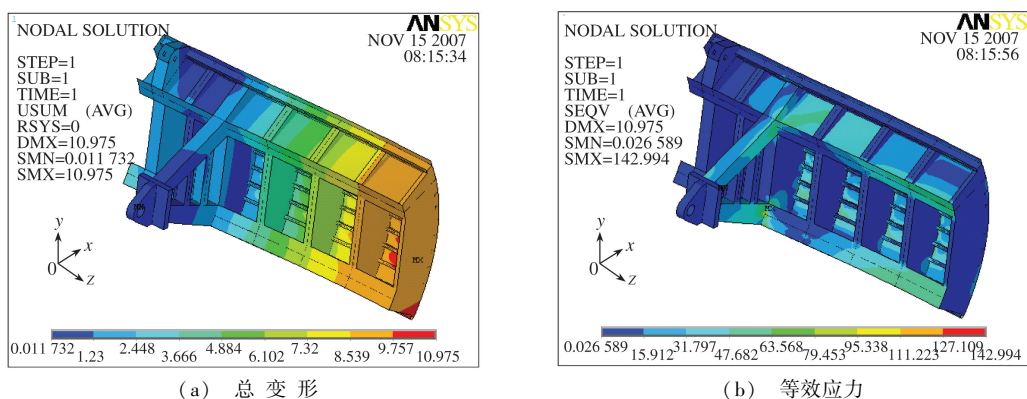


图5 闸门结构总变形和等效应力图(反向设计工况)(单位: MPa)

Fig. 5 Deformation and equivalent stress of steel gate (reverse design working condition) (unit: MPa)

表1 闸门主要构件变形

Tab. 1 Deformation of the main parts of the gate

mm

工 况	上横梁悬臂变形			支臂变形		闸门变形		下主横梁
	悬臂端	根 部	相对变形	上支臂	下支臂	最大变形	变形部位	跨中变形
正向设计	1.606	-0.217	1.823	-0.812	-1.217	-10.335	跨中面板	-4.055
反向设计	-2.078	0.935	-3.013	1.588	1.618	11.217	跨中面板	9.395
无水提门	-8.392	-1.482	-6.91	1.698	1.163	-9.496	吊点侧边端	2.305
正向主汛	-6.824	-2.071	-4.753	0.524	-0.952	-9.106	跨中面板	-5.144
反向引水	-9.597	-1.432	-8.165	2.559	1.872	11.01	跨中面板	7.143

注: 闸门变形部位对应闸门的最大变形。

表2 上下主梁悬臂根部应力

Tab. 2 Root stresses in cantilever of the main beams

MPa

工 况	根 部		跨 中		跨 中		容 许 值
	上悬臂	下悬臂	上主梁	下主梁	上支臂	下支臂	
正向设计	33.7	100.5	24.8	56.9	35.1	110.0	160
反向设计	64.0	107.4	61.8	67.3	88.7	119.8	160
无水提门	94.7	48.2	32.8	17.9	99.6	32.2	160
正向主汛	112.2	108.9	19.7	60.6	112.9	118.9	160
反向引水	83.9	92.3	63.7	59.7	95.2	105.3	160

闸门整体稳定性采用 ANSYS 的结构特征值屈曲分析,正(反)向设计、正向主汛期和反向引水工况下的特征值系数分别为 6.887, 3.221 和 9.173,最先失稳部位分别为上横梁支臂跨中侧腹板,水平次梁跨中中部和上横梁支臂悬臂侧腹板.大部分工况下的稳定安全系数大于 4.正向主汛期的稳定安全系数最小(3.221),最先失稳的部位在跨中水平次梁处,建议适当加密跨中纵梁,减小水平次梁的计算长度,以提高稳定性.

4 结 语

(1)本文采用 ANSYS 有限元分析软件进行了弧形闸门三维有限元整体建模,分析了闸门在不开闸工况下正向设计、反向设计和开闸 0°时正向主汛期、反向引水、无水提门等 5 个工况,分析了结构整体变形和刚度.结果表明弧形钢闸门在 5 个工况下的结构变形都在允许范围内,应力值均小于钢材的屈服应力.

(2)闸门结构稳定性采用结构线性屈曲分析,用有限元法求出结构稳定安全系数.大部分工况下的稳定安全系数大于 4.正向主汛期工况下的稳定安全系数最小,为 3.22,最先失稳部位在跨中水平次梁处.建议适当加密跨中纵梁,减小水平次梁的计算长度,提高稳定性.

参 考 文 献:

- [1] 曹青,才君眉,王光纶. 弧形钢闸门的静力分析[J]. 水力发电, 2005, 23(3): 64-66. (CAO Qing, CAI Jun-mei, WANG Guang-lun. The static force analysis of steel radial-gate[J]. Water Power, 2005, 23(3): 64-66. (in Chinese))
- [2] 李文娟,沈炜良,马兆敏. 弧形钢闸门三维有限元分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2003, 33(3): 265-270. (LI Wen-juan, SHEN Wei-liang, MA Zhao-min. Three dimensional finite element analysis of radial steel gate[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2003, 33(3): 265-270. (in Chinese))
- [3] 郭光林,蒋桐. 大型弧形钢闸门的结构分析及计算[J]. 南京建筑工程学院学报, 1999(3): 45-50. (GUO Guang-lin, JIANG Tong. The calculation and analysis about the structure of the large size steel arch lock gate[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1999(3): 45-50. (in Chinese))
- [4] 卜现港,郑圣义. 用有限元方法安全评估水库门式启闭机的金属结构[J]. 起重运输机械, 2006(5): 7-9. (BU Xian-gang, ZHENG Sheng-yi. Application of 3D FEM to the safety evaluation of steel structure of reservoir gantry crane[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2006(5): 7-9. (in Chinese))
- [5] 余卫华,王正中,王志刚. 弧形钢闸门主框架的稳定性[J]. 人民长江, 2008(6): 62-64. (YU Wei-hua, WANG Zheng-zhong, WANG Zhi-gang. The stability of main frame for steel radial-gate[J]. Yangtze River, 2008(6): 62-64. (in Chinese))
- [6] 周军,周建方. 平面闸门主梁有限元分析的几种建模方法比较[J]. 水利电力机械, 2007(11): 25-28. (ZHOU Jun, ZHOU Jian-fang. Comparison between several modeling methods in finite element analysis of the flat gate beam[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2007(11): 25-28. (in Chinese))
- [7] 申永康,王正中,邵建华. 弧形钢闸门主框架柱计算长度系数实用计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2006(4): 56-58. (SHEN Yong-kang, WANG Zheng-zhong, SHAO Jian-hua. Practical method for calculating effective length coefficient for pillar of main frame of steel arc gates[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006(4): 56-58. (in Chinese))
- [8] 宋咏春,陈家权,李文娟. 弧形钢闸门的安全性能评估研究[J]. 现代制造工程, 2005(11): 53-55. (SONG Yong-chun, CHEN Jia-quan, LI Wen-juan. Research on evaluation of steel radial gate safety performance[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(11): 53-55. (in Chinese))
- [9] 曹青,才君眉,王光纶. 弧形钢闸门支臂的空间屈曲荷载影响因素的研究[J]. 水力发电, 2002(1): 33-37. (CAO Qing, CAI Jun-mei, WANG Guang-lun. Study on the affecting factors on the spatial bending load of the arm of steel arch-gate[J]. Water Power, 2002(1): 33-37. (in Chinese))
- [10] 胡友安,王苗苗,宋戈. 蒙城弧形钢闸门的三维数值分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 112-115. (HU You-an, WANG Miao-miao, SONG Ge. Three-dimensional numerical analysis of Mengcheng steel tainter gate[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1): 112-115. (in Chinese))

Three dimensional finite element analysis and reliability of radial steel gate for Huazikou River sluice

XI Xiao-ya¹, LIU Hai-xiang², YE Xiao-qiang², KE Min-yong²

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute Ltd., Nanjing 210006, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Large size “II” radial steel gate is applied for Huazikou River sluice. It is necessary to establish a finite element analysis model to analyze structure deformation and stress distribution under different working conditions. Taking ANSYS finite element analysis software as a simulation platform, a finite element integrated model is established, and loadings of different working conditions are applied respectively. The calculated results show that structure deformations with five working conditions are smaller than those allowed by specifications, and stress values are smaller than yield stress of steel. Linear buckling analysis is made on the structural stability of the steel gate, and the safety coefficient is obtained by finite element method. The safety coefficients of the most of the working conditions are larger than 4, and the instability of the horizontal beams appears first at the middle span. To improve the stability of the horizontal beams at the middle span, it is proposed that additional longitudinal beams should be added to reduce the length of the secondary beam.

Key words: radial steel gate; finite element analysis; structural reliability

征订《水利科技与经济》月刊

欢迎投稿订阅刊登广告 刊号: ISSN1006-7175
CN23-1397/TV

《水利科技与经济》是中国核心期刊(遴选)数据库刊源,中国期刊网收录期刊,中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊,美国《剑桥科学文摘》CSA数据库刊源,俄罗斯《文摘杂志》AJ数据库刊源,被美国《气象学与地球天体物理学文摘》网络数据库收录。

《水利科技与经济》是国家新闻出版总署、国家科委批准的正式科技期刊,是哈尔滨市水务科学研究院主办的综合性技术类期刊,国内外公开发行,具有权威性高、信息量大、可读性强的特点,受到广大读者及水利经济界专家、学者的欢迎。

《水利科技与经济》的服务对象主要是从事水利水电建设的规划、勘测、设计、施工、科研、监理、生产运行和管理等方面工程技术人员,以及相关专业的本专科院校师生。

《水利科技与经济》为月刊,大16开(A4),110页,月末(30日)出版,邮发代号14-316;国内定价:每册10元,全年120元(含邮费),国内读者可通过邮局或本刊发行部订阅,国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)国外代号:M1988。

主管单位:哈尔滨市水务局

主办单位:哈尔滨市水务科学研究院

哈尔滨市水利规划设计研究院哈尔滨市水利学会

主 编:郭 胜

地 址:哈尔滨市南岗区宣礼街35号

邮 编:150001

电 话:(0451)82719704 转 8204/8205/8206

传 真:(0451)82724300

电子邮箱:shuilikeji@163.com

联 系 人:杨 文