

文章编号:1672-3031(2021)06-0598-07

基于层次分析法的长距离输水工程管材适应性评价

李江¹, 胡少伟², 杨辉琴¹, 杨金辉³, 陆俊³

(1. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 大口径长距离输水管道是当前水资源调配的主要手段, 在保证水质、管材及线路选择、施工灵活性等方面相对于渠道输水有着较大优势。长输管道工程中管材的选择对工程的运行安全和工程造价至关重要。本文详细分析了钢管、预应力钢筒混凝土管等管材特点, 基于层次分析法理论(AHP), 建立了长距离输水工程管材适应性评价指标体系, 以新疆某长距离输水管道工程为实例, 针对钢管、球墨铸铁管、预应力混凝土钢筒混凝土、PVC管等不同管材的适应性进行评价, 对比分析最终确定了管道最优选取方案。该方法能科学的评价管材适应性, 对于长距离输水工程管材选型设计具有重要的工程应用价值。

关键词: 输调水工程; 管材比选; 适应性评价; 层次分析法

中图分类号: TV672.2

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200178

1 研究背景

近年来, 随着长距离大口径输水工程的数量逐渐增多, 规模逐渐增大, 不同工程中的管材选择问题也日益突出^[1-2]。在大型长距离输水工程中, 管道投资成为工程投资的主要部分(约为50%~70%), 主干管材的选择对于投资、施工和维护影响重大^[3-4]。管材的选择受到工程实际的设计公压、环境条件、地质特征、运行条件及工程造价等多个条件的限制。如何客观地根据工程规模、管材技术特性和使用条件等多方面全面合理地进行长距离大口径输水工程管材经济技术综合比选, 一直是设计人员及决策人面临的技术难题。

目前, 对长距离大口径输水工程主干管材经济技术评价的研究已取得了一些进展^[5], 李江等^[6]分析了供水系统管材中存在的主要问题, 介绍了常用的管材及其主要特性, 为工程人员合理的选取相应的给水管材提供参考依据。令志强等^[7]结合喀斯特山区地质地貌, 从管材从管道强度, 耐腐蚀性、安全可靠、地形的适应性、施工方便, 使用寿命等主要特征出发, 利用价值工程分析法对管材进行经济技术优选。杨春雁^[8]介绍了钢管、球墨铸铁管、玻璃钢夹砂管、预应力钢筒混凝土管等几种目前国内应用广泛的管材, 对管材的选取、干管条数选择、最优管径的确定等环节进行了详细的分析。陈洪松^[9]分析了常用的钢管、聚乙烯管、球墨铸铁管等村镇供水工程输水管材性能, 对贵州喀斯特地区输水管线的管材选择提出了建议。现有的输水管线的管材评价多是针对管材性能进行评价, 对工程的适宜性评价较少, 评价中常见的指标权重确定方法都存在一定的局限性, 指标确权方法难以兼顾主观意见和客观数据, 导致权重的确定难免不够准确可靠^[10-11]。

本文构建了长距离大口径输水工程主干管材适应性评价指标体系, 结合层次分析法确定指标权重, 综合考虑了指标的重要性和互相影响程度, 提出了基于AHP理论的管材适应性评价参数体系, 并将该模型应用于新疆某大口径长距离供水工程主干管材评价实例中, 检验了该模型的实用性和有

收稿日期: 2020-04-12; 网络首发时间: 2021-07-28

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210727.2048.001.html>

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01A67); 新疆天山雪松创新领军人才项目(2018XS22)

作者简介: 李江(1971-), 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程规划设计。E-mail: lj635501@126.com

效性，评价结果可为工程设计决策提供参考。

2 基于层次分析法的管材适应性评价方法

2.1 常用长距离输水管材特点 目前国内长距离大口径输水工程管材主要有钢管、球墨铸铁管等金属管材，玻璃钢夹砂管、钢筋混凝土管、预应力钢筋混凝土管和预应力钢筒混凝土管等无机材料管道，聚乙烯管、硬聚氯乙烯管等有机材料管道和钢塑复合材料管道，输水管道产品实现了多样化^[12-14]。管材类型和特点如表 1 所示。

表 1 常用管材类型和特点

管材类型	工作压力/MPa	管径/m	接口	主要特点
钢管(SP)	> 10	0.6~4	焊接刚性接口	机械强度高，可塑性好
预应力钢筒混凝土管(PCCP)	0.58~2.0	0.4~4	柔性承插接口、胶圈密封	抗外载能力强、造价低、使用寿命长
玻璃纤维增强塑料夹砂管(FRPM)	0.6~2.4	0.4~4	柔性承插接口	质量轻、耐腐蚀、内壁光滑、水头损失少
钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP)	0.58~2.0	0.4~4	柔性承插接口、胶圈密封	抗外载能力强、抗渗性好、抗拉强度高
球墨铸铁管(DIP)	0~3.0	0.4~2.6	柔性承插接口、胶圈密封	耐腐蚀、抗震性好、抗拉强度高，韧性好，延伸率高
高密度聚乙烯管(HDPE)	0.6~1.6	0.016~1	承插口和焊接口	耐腐蚀、内壁光滑、流动阻力小、强度高、韧性好、重量轻
高性能聚乙烯管(PVC-UH)	0.5~2.5	0.1~1.6	钢骨架密封圈承插口	绿色环保、强度高，耐腐蚀、使用寿命长

2.2 基于层次分析法的管材适应性评价方法简介 层次分析法(AHP)将决策问题划分为多个相互关联的因素，并分层次归类，使得分析过程更加严谨且条理清晰。该方法在优化和评价结构复杂的系统方面具有天然的优势。它能综合考虑整个系统的影响因素，针对每一个影响指标进行分析评价，逐层研究，最后得到目标值^[15]。

层次分析法首先根据标度表对同层诊断指标的重要度进行对比，构成出整层指标的判断矩阵。然后对矩阵的一致性进行检验。当随机一致性比率 $CR=CI/RI<0.1$ 时，认为层次单排序的一致性满足要求，采用根植法得到诊断指标的初始权重^[16]。

管材适应性评价问题是一个需要考虑多层次影响因素的复杂问题，内在性质和外部条件均对管材选择有很大的影响。对管材选择的合理性进行判断需要对其进行管材适应性评价。因此，建立基于 AHP 的管材适应性评价模型，对长距离大口径供水工程主干管材进行评价。

主要步骤如下：

(1) 建立管材适应性评价指标体系。大口径长距离输水管进行比选时，具体采用某种管材不仅由其本身的性质所决定，施工方式、周边环境的影响也至关重要。依据管材选用原则和以往管材比选经验，影响因素大致可分为管材本身的物理性质、对于施工环境的适应程度、管道运行安全和经济性能 4 个方面。因此，我们建立的管材适应性评价指标体系如图 1 所示。

(2) 指标评分。通过查阅各类管道规范，施工标准等相关资料，根据工程的地质条件，自然环境条件、施工条件等工程情况对比各种类型管道的特点，以行业评估规范为标准，由专家分别对其各个指标的适宜性进行评分，得到适宜性评分矩阵 R。

(3) 评价指标权重。根据专家评价结果构造判断矩阵，使用 AHP 计算得出各评价指标的初始权重，并检验构造的判断矩阵是否满足一致性比率要求。然后对判断矩阵进行规范化处理，根据计算最终得出各评价指标的权重 W。

(4)评价结果。得到综合权重 W 和适宜性评分矩阵 R 后, 如式(1)将综合权重 W 与适宜性评分矩阵 R 利用加权平均型算子进行合成, 得到评价结果矩阵 B 。

$$B = W \times R \quad (1)$$

我们可以用评价得分矩阵 B 表示管材的适应性情况。

3 工程应用实例

以新疆某供水工程项目为例, 基于 AHP 管材适应性评价指标体系, 对国内几种最常用的大口径输水管道的性能进行了比选, 对工程主干管材开展适应性评价, 决定出适合该工程使用的大口径输水管材。

3.1 工程背景 新疆某供水项目位于喀什地区北部, 主要供水对象为喀什市、疏附县、疏勒县等地区城乡居民生产、生活用水。本工程等别为 II 等大(2)型, 设计规模: 近期取水 10555 万 m^3/a , 干管设计流量为 3.98 m^3/s ; 远期取水 15259 万 m^3/a , 干管设计流量为 5.73 m^3/s 。采用双管重力流供水方案。新建干支管共 26 条, 总长 384.57 km, 其中总干管 25.61 km、干管 200.26 km、支管 158.71 km, 设计干管管径范围为 DN1600—DN600, 支管管径范围为 DN500—DN160, 管道设计压力等级最大管段为 3.0 MPa。

管线段地层岩性以级配不良砾、级配不良砂、粉土质砂、低液限粉土为主。工程大体分为两种地层结构, 山前冲洪积平原区地层为砂砾石, 地下水水位很低; 平原灌区地层岩性为低液限黏土和粉细砂, 地下水埋深 3.0 ~ 5.0 m, 水位高处可达 1.5 ~ 3.0 m, 在管沟开挖深度内可见。工程区季节性冻土标准冻深多为 0.8 m。管线沿线地下水、地基土对混凝土结构、钢筋、钢结构都具有不同程度的腐蚀性。

3.2 管材适应性评价

(1)适应性评价指标体系。依据管材选用原则和以往工程主干管材的比选经验, 建立长距离大口径供水工程主干管材适应性评价指标体系。首先要满足管道施工和运行安全的需要, 提高管网安全性、延长使用寿命、提升输送能力, 避免管道事故发生。其次要根据地形情况, 进行充分的市场调查与经济技术比较, 在保证质量和工程安全的前提下, 做到经济合理、施工方便。从施工、安全、经济、管材性质等方面综合分析后确定。

选择管材时应遵循以下原则: 在管材性质方面, 考虑工程规模及重要性、管道口径及要求承受的内压力和外荷载、防腐蚀性能。随着环保意识的增强, 管材生产工艺的环保程度和使用寿命也需要考虑。在经济性能方面, 除了管道单价和管道的综合造价外, 也需要考虑管道管壁糙率、局部水头损失因素, 这对管道输水效率有非常重要的影响。在施工方面, 需要考虑管道能否满足工程地质、地形条件、现场条件能否满足接口安装、基础和回填施工等要求。在安全运行方面, 由于新疆地区气候恶

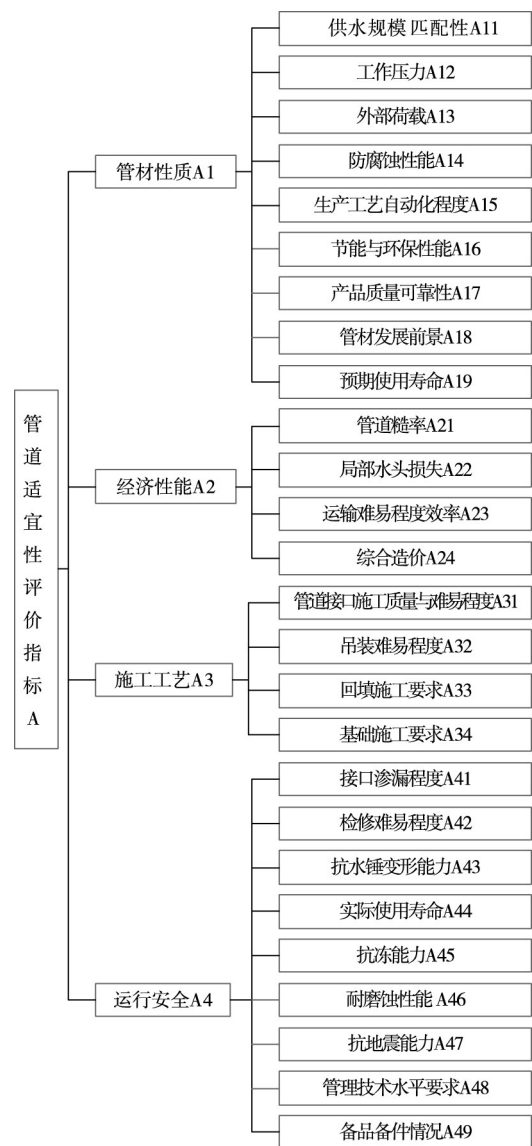


图 1 管材适应性评价指标体系

劣、属于高严寒、高地震、多泥沙、复杂侵蚀的自然环境，在管道选择时，必须考虑管道的防渗漏、防腐蚀、抗冻、抗地震、耐磨蚀能力，同时还需要考虑管道使用性能的安全及维修工程量大小和使用年限长短。综上所述，建立的评价体系指标包括管材本身的物理性质、施工环境的适应程度、管道运行安全和经济性能4个一级指标和26个二级指标，如图1所示。

(2)指标评分。本段工程属于大流量、高压、大口径、腐蚀性环境工况，工程管线线路长，施工地形复杂，在运行过程中，工作压力较大，最大使用压力达到3.0 MPa，对管道的环境适应性和内压承受能力要求较高，目前只有钢管和球墨铸铁管可以满足3.0 MPa；考虑到球墨铸铁管材质为铸铁，其延展性不如钢管。钢管(SP)作为金属管材，虽然施工焊接工作量大，防腐蚀问题严重，但其承受内压能力可达到数十兆帕，抗水锤能力也非常强。高密度聚乙烯管(HDPE)因其管径与工作压力不满足设计要求，故不参与评分。通过成立专家小组评价其他6种管材对此工程适应性，详细分析各管材特点后，对其适宜性进行专家打分，得到评价指标的评分。6类管材指标评分结果如表2所示。

表2 管材指标评分结果

评价指标	SP	PCCP	FRPM	DIP	BCCP	PVC-UH
供水规模匹配性	9	9	9	7	7	3
工作压力	10	7	7	8	7	5
外部荷载	8	8	8	8	8	8
防腐蚀性能	8	8	8	8	8	8
生产工艺自动化程度	8	7	10	8	8	9
节能与环保性能	4	7	8	4	7	7
产品质量可靠性	8	7	9	8	7	6
管材发展前景	6	6	6	6	7	8
预期使用寿命	4	8	8	8	8	8
管道糙率	7	7	9	7	7	9
局部水头损失	9	9	8	8	9	9
运输难易程度(效率)	7	4	8	6	4	9
综合造价	8	6	6	7	6	6
管道接口施工质量与难易程度	4	8	7	8	8	7
吊装难易程度	7	5	8	5	5	8
回填施工要求	8	8	5	9	8	6
基础施工要求	6	6	8	6	6	8
接口渗漏程度	8	8	8	6	8	7
检修难易程度	9	5	8	9	5	8
抗水锤变形能力	9	7	7	8	7	6
实际使用寿命	4	6	7	8	6	7
抗冻能力	5	6	4	7	6	4
耐磨蚀性能	10	10	10	10	10	10
抗地震能力	10	10	10	10	10	10
管理技术水平要求	9	9	8	9	9	9
备品备件情况	10	4	4	10	4	8

(3)评价指标权重。由专家对管材的性能指标根据1~9标度法进行打分，得到指标体系的判断矩阵，使用AHP计算得出各评价指标的权重，对其进行一致性判断后，得到权重结果，如表3和表4所示。

由计算结果可知，在一级指标中，管材性质A1所占的权重系数最大，为0.505，排名第二的是运行安全A4，其权重为0.348，而经济性能A2和施工工艺A3所占的综合权重系数较少，分别为0.047和0.1。在二级指标中，外部荷载A13所占的综合权重系数最大，为0.178，而运输难易程度(效率)

表3 一致性检验结果

评价指标矩阵	λ_{max}	CI	RI	CR=CI/RI
A	4.1118	0.0373	0.9	0.0414<0.1
A1	9.2423	0.0303	1.45	0.0209<0.1
A2	4	0	0.9	0<0.1
A3	4.0096	0.0032	0.9	0.0036<0.1
A4	9.2747	0.0343	1.45	0.0237<0.1

表4 适应性评价指标权重计算结果

一级指标	权重	二级指标	权重	总权重 W	
管材性质 A1	0.505	供水规模匹配性	A11	0.101	0.051
		工作压力	A12	0.159	0.080
		外部荷载	A13	0.353	0.178
		防腐蚀性能	A14	0.224	0.113
		生产工艺自动化程度	A15	0.045	0.022
		节能与环保性能	A16	0.025	0.013
		产品质量可靠性	A17	0.025	0.013
		管材发展前景	A18	0.025	0.013
		预期使用寿命	A19	0.045	0.022
经济性能 A2	0.047	管道糙率	A21	0.400	0.019
		局部水头损失	A22	0.200	0.009
		运输难易程度(效率)	A23	0.200	0.009
		综合造价	A24	0.200	0.009
施工工艺 A3	0.100	管道接口	A31	0.214	0.021
		安装难易程度	A32	0.115	0.011
		回填施工要求	A33	0.557	0.056
		基础施工要求	A34	0.115	0.011
运行安全 A4	0.348	防渗漏能力	A41	0.162	0.056
		检修难易程度	A42	0.036	0.012
		抗水锤变形能力	A43	0.036	0.012
		实际使用寿命	A44	0.036	0.012
		抗冻能力	A45	0.102	0.035
		耐磨蚀性能	A46	0.036	0.012
		抗地震能力	A47	0.063	0.022
		管理技术水平要求	A48	0.494	0.172
		备品备件情况	A49	0.036	0.012

A23所占的综合权重系数最小, 仅占0.009。综上所述, 在管道适应性评价指标体系中, 管材性质和运行安全是影响管道选择的关键影响因素。

(4)适应性评价结果。将各评价指标所赋予的具体分值进行加权计算, 得出最终评价结果。6种管材适应性评价结果如表5所示。适应性评价结果从大到小排列为: 钢管(SP)>球墨铸铁管(DIP)>预应力钢筒混凝土管(PCCP)>钢筋缠绕钢筒混凝土管(BCCP)>玻璃钢管(FRPM)>PVC-UH。适宜采用钢管作为本工程输水管材。在进行施工时, 管道内外均需做好防腐蚀措施, 内壁采用常温型环氧涂料

表5 管材指标适应性评价结果

管材类型	钢管(SP)	预应力钢筒混凝土管(PCCP)	玻璃钢管(FRPM)	球墨铸铁管(DIP)	钢筋缠绕钢筒混凝土管(BCCP)	高性能聚乙烯管(PVC-UH)
得分	8.043	7.822	7.669	7.956	7.755	7.382

或者热固性环氧树脂, 外壁采用涂塑或者3PE防腐层。

4 结论

本研究引入层次分析法, 建立了基于AHP的管材适应性评价指标体系, 并利用该指标体系对新疆某长距离输水管道工程管材选择进行适应性评价, 计算了钢管、球墨铸铁管、预应力混凝土钢筒混凝土、PVC管等不同管材适应性得分, 得到了该工程主干管道管材最优选取方案。研究表明:

(1)建立的评价指标体系符合工程实际, 体系层次划分合理, 充分考虑了各评价因素的重要程度, 能全面的体现各评价因素在管材比选中的重要性。

(2)在该工程的管材适应性评分结果中, 钢管得分最高, 最适合作为本工程主干管道的输水管材。该工程在运行过程中, 工作压力较大, 最大使用压力达到3.0 MPa, 对管道的内压承受能力要求较高。钢管(SP)作为金属管材, 机械性能好, 其承受内压能力可达到数十兆帕, 抗水锤能力非常强, 满足该工程的工压要求。同时, 该管线线路长, 施工地形复杂, 而钢管对施工地形的要求较低, 在各种地形复杂的环境中都可以进行安装施工, 对环境适应性好。因此, 适宜采用钢管作为本工程主干管道的输水管材。在进行施工时, 管道内外均需做好防腐措施。

(3)管材适应性评价中的各指标数量众多且各指标互相联系, 难以进行分析评价, 而AHP法在优化和评价结构复杂的系统方面具有天然的优势。AHP能综合考虑管材适应性的影响因素, 所需定量数据信息较少, 简洁实用, 结果可靠, 但比较依赖于专家主观判断, 难以规避主观判断误差。

参 考 文 献:

- [1] 王成丽, 韩宇平, 阮本清, 等. 中国区域发展的水安全评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 34-38.
- [2] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于地下水压采和水源置换的城市供水安全研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 178-187.
- [3] 冯平, 王仲珏, 刘增明. 长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J]. 水利学报, 2008(11): 112-116.
- [4] 蒙世仟, 朱新民, 崔炜, 等. 广西百色水库灌区长距离输水管道设计研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(5): 347-353.
- [5] 杜培文. 长距离输水工程应用技术研究[M]. 河南: 黄河水利出版社, 2009.
- [6] 李江, 杨辉琴, 金波, 等. 新疆长距离输水管道工程管材选择与安全防护技术进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 56-65.
- [7] 令志强, 屈月雷, 尹亚敏, 等. 喀斯特山区人饮工程管材选择及应用评价[J]. 中国农村水利水电, 2018(11): 127-130.
- [8] 杨春雁. 大口径长距离输水管道优化设计探讨[J]. 地下水, 2018, 40(5): 212-213.
- [9] 陈洪松. 贵州村镇供水工程输水管线管材选择的影响因素分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(11): 99-100.
- [10] 徐建新, 郭文献, 王鸿翔, 等. 多层次灰色关联度在输水管材选择中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(2): 67-69.
- [11] 杨辉琴, 李江, 马军, 等. 长输管道工程管材选择探析[J]. 水利规划与设计, 2018(10): 150-154.
- [12] 胡少伟. 超大口径预存裂缝的预应力钢筒混凝土管结构分析与试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 876-882.
- [13] 孙岳阳, 胡少伟, 王洋, 等. 钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP)承受内、外压能力有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 89-96.
- [14] 袁本海, 朱瑞霞, 贾金金. 给水用PVC-UH管材及连接件的性能特点和应用[J]. 中国给水排水, 2017(14): 42-45, 48.

- [15] 刘扬, 杨玉楠, 王勇. 层次分析法在我国小城镇分散型生活污水处理技术综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1146-1150.
- [16] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65-70.

Research on adaptability evaluation of long-distance water transmission project pipe based on AHP theory

LI Jiang¹, HU Shaowei², YANG Huiqin¹, YANG Jinhui³, LU Jun³

(1. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830000, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Large-diameter and long-distance water pipelines are the main means of current water resource allocation. They have great advantages over water transmission by channel in terms of ensuring water quality, pipe material and line selection, and construction flexibility. The selection of pipe materials in long-distance pipeline projects is very important to the safety of the project and the cost of the project. This paper analyzes in detail the characteristics of pipes such as steel pipes and prestressed steel cylinder concrete pipes. Based on the analytic hierarchy process (AHP), a long-distance water transmission project pipe adaptability evaluation index system is established, taking a long-distance water transmission pipeline project in Xinjiang as an example. According to the applicability of different pipe materials such as steel pipe, ductile iron pipe, prestressed concrete steel cylinder concrete, PVC pipe, etc., the comparative analysis finally determined the optimal pipeline selection scheme. This method can scientifically evaluate the adaptability of pipes and has important engineering application value for the selection and design of pipes for long-distance water transmission projects.

Keywords: water transmission and transfer project; comparison of pipes; adaptability evaluation; AHP

(责任编辑: 祁 伟)

《中国水利水电科学研究院学报》2020年度优秀论文公告

为不断提高论文质量和学术影响力, 鼓励为《中国水利水电科学研究院学报》撰写高水平学术论文的作者, 根据《〈中国水利水电科学研究院学报〉优秀论文和优秀审稿人奖励办法》规定, 经编委会投票推荐、编委会主任审定, 《基于卫星降雨的辽宁省气象干旱实时监测研究》等6篇论文被评选为2020年度优秀论文。

2020年度《中国水利水电科学研究院学报》优秀论文

序号	论文题目	第一作者	第一作者单位	发表期数
1	基于卫星降雨的辽宁省气象干旱实时监测研究	张学君	中国水利水电科学研究院	第1期
2	关于坝体混凝土的强度分级、结构抗力标准值及其分项系数	陈厚群	中国水利水电科学研究院	第2期
3	玉龙喀什枢纽超高面板堆石坝的渗控方案及渗流分析	朱银邦	中国水利水电科学研究院	第3期
4	水泵水轮机无叶区压力脉动产生机理研究	徐洪泉	中国水利水电科学研究院	第4期
5	基于InVEST模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究	贾婉琳	中国水利水电科学研究院	第4期
6	塔里木河流域绿色生态空间与景观格局变化研究	邓晓雅	中国水利水电科学研究院	第5期

《中国水利水电科学研究院学报》编辑部