

# 基于价值工程的钢闸门系统分析

丁 峰<sup>1</sup>, 邢述炳<sup>2</sup>, 邱象玉<sup>1</sup>

(1. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 2. 江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210005)

**摘要:**为了从技术和经济两方面分析水工钢闸门的综合价值效益,实现闸门结构的设计优化,以怀柔水库西溢洪道闸为分析研究对象,引入价值工程概念进行钢闸门系统的分析研究。在计算中,采用层次分析法和成本比重法分别确定功能重要程度系数和功能成本系数。结果表明,价值工程在钢闸门系统的应用是可行的,可以指导钢闸门的优化设计,从而为闸门的优化设计提供新的思路和参考。

**关键词:**价值工程;层次分析法;优化设计;钢闸门

中图分类号:U641

文献标志码:A

水工闸门是水工建筑物中常见的挡泄水设备。现阶段水工闸门的设计仍采用平面结构体系设计方法。该方法将闸门结构进行平面化处理,各构件独立出来计算,虽然计算简单,应用方便,但该方法忽略了闸门的整体工作协调性,从而导致极大的材料浪费。针对这一问题,国内学者从多角度寻找多种方法以实现闸门整体优化。杨兆福在给出预定参数的情况下,寻求满足约束条件使目标函数最大或最小的设计变量值方法,以实现钢闸门的整体优化设计<sup>[1]</sup>。李典庆等人采用浮点编码遗传算法对闸门部分构件进行多目标的优化设计<sup>[2]</sup>。肖卫华、李旭东等人将连续体结构拓扑优化方法应用到水工闸门的优化设计中,得到水工闸门的最优拓扑形式<sup>[3-4]</sup>。彭波等人采用基于遗传算法的拓扑优化方法,充分证明了拓扑优化理论在水工闸门优化设计中的可行性和优越性<sup>[5]</sup>。

目前业内均已大范围采用数值分析方法,通过分析钢闸门的静力特性,考察在静水压力作用下闸门结构的形变和应力分布规律,从而实现闸门结构的优化设计。

本文引入价值工程概念,对水工钢闸门系统进行分析研究,从技术和经济两方面提高工程的经济效益,从而实现水工闸门的综合价值效益最大化。最后结合工程实例,详细指出水工闸门亟待优化的结构部位,为水工闸门的优化设计提供新的思路和参考。

## 1 价值工程

所谓价值工程,是指通过各相关领域的协作,对研究对象的功能和费用进行系统分析,持续创新,旨在提高研究对象价值的一种管理思想和管理技术<sup>[6]</sup>。价值工程着重于产品的功能分析,是以最低的寿命周期成本可靠地实现产品的必要功能,以提高产品价值为目的的有组织、有领导的创造性活动<sup>[7]</sup>。它是从分析产品的功能入手,寻找降低产品成本、改进产品性能的途径。在价值工程中,价值常等同于效益,价值公式为

$$Value(\text{价值}) = \frac{Function(\text{功能})}{Cost(\text{成本})} = \frac{F}{C} \quad (1)$$

从上式可以看出,价值工程重点分析的是价值、功能和成本三者的关系。价值工程的目的是降低产品的成本,而是提高产品的价值。

## 2 功能价值分析

价值工程的核心内容是功能价值分析,功能价值的计量方法主要有绝对值法和相对值法。本文重点研究相对值法。相对值法是把功能或费用按其所占总体功能(或功能成本)比率的大小进行定量。某功能在整体中所占比率,称为该功能的重要程度系数;某功能成本在总体功能成本中所占比率,称为该功能的成本系数。

$$V_i = \frac{F_i}{C_i} \quad (2)$$

式中,  $V_i$  为功能价值系数;  $F_i$  为功能重要程度系数;  $C_i$  为功能成本系数。功能价值系数  $V_i$  有 3 种结果:

(1)  $V_i < 1$ , 表明该功能分配了过多的成本, 其功能的重要程度与所分配的成本不相匹配, 应作为功能改进的对象。

(2)  $V_i = 1$ , 表明该功能与其分配占用的成本相匹配, 可不作为功能改进的对象。

(3)  $V_i > 1$ , 表明该功能重要却分配了较低的成本。对这种情况, 应做着重分析。出现  $V_i > 1$  的情况一般有以下原因: 新技术、新工艺的采用使得成本降低; 成本太低, 使得功能得不到可靠的实现, 这时应该适当增加成本; 功能水平偏高, 出现功能剩余, 可适当剔除剩余部分, 提高价值。

由此可见, 功能重要程度系数、功能成本系数是功能价值系数的重要影响因素。

### 2.1 功能重要程度系数的确定

功能重要程度系数的确定有多种主观量定的技术方法, 如成对比较法、直接估值法、层次分析法等, 本文采用层次分析法确定功能重要程度系数。

层次分析法的过程可分为 4 个步骤: ① 建立系统层次结构; ② 构造两两比较判断矩阵; ③ 计算相对权重; ④ 计算合成权重并排序。其流程如图 1 所示。

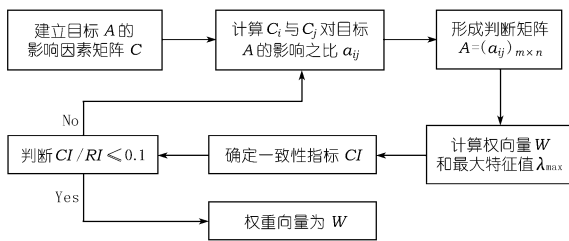


图 1 层次分析法流程

图 1 中, 判断矩阵是采用 saaty 的 1~9 标度法对各影响因子两两比较构造建成的<sup>[8]</sup>。最大特征值  $\lambda_{max}$  为

$$= \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}, W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}, A \text{ 为判断矩阵, } W \text{ 为矩阵 } A$$

的特征向量,  $n$  为矩阵阶数,  $(AW)_i$  为向量  $AW$  的第  $i$  个分量。一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ , 随机性一致性指标  $RI$  如表 1 所示<sup>[9]</sup>。一致性比率  $CR = \frac{CI}{RI}$ 。

如表 1 所示<sup>[9]</sup>。一致性比率  $CR = \frac{CI}{RI}$ 。

### 2.2 功能成本系数的确定

功能成本系数的确定可以采用成对比较法、成本比重法等。本文采用成本比重法, 即通过被研究对象

的造价成本占总造价成本的比重大小确定功能成本系数。

表 1 随机一致性指标 RI 值

$n$	$RI$	$n$	$RI$
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

## 3 应用实例

### 3.1 工程概况

怀柔水库西溢洪道建于 1964 年, 按 100 a 一遇洪水标准设计, 1 000 a 一遇洪水校核。闸室段全长 750 m, 最大泄量  $Q = 880 \text{ m}^3/\text{s}$  (300 a 一遇洪水), 闸型为开敞式无坎宽顶堰, 共设两孔, 每孔净宽 12 m, 底槛高程 56.0 m, 支铰高程 60.0 m, 正常蓄水位 62.0 m; 闸门为露顶式斜支臂弧形钢闸门, 设计水头 6.0 m, 门高 6.3 m; 采用  $2 \times 100 \text{ kN}$  固定卷扬式启闭机启闭。怀柔水库西溢洪道闸室布置如图 2 所示。

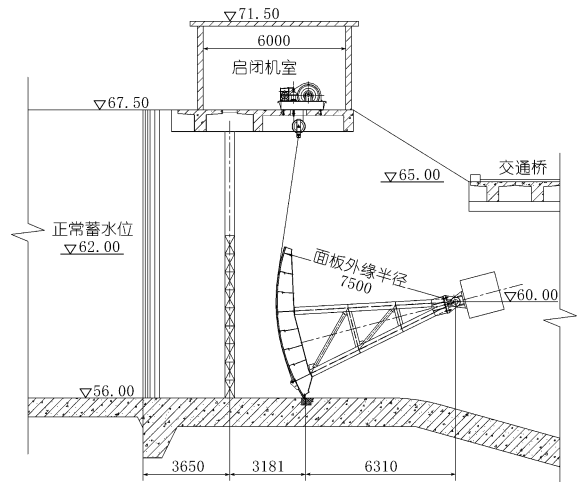


图 2 怀柔水库西溢洪道闸室布置示意 (尺寸 mm, 高程 m)

2010 年, 对怀柔水库西溢洪道闸进行了维修改造设计, 闸门启闭机更换, 闸门固定铰座保留。改造设计后的闸门型式仍采用露顶式斜支臂弧形钢闸门, 闸门主体材料为 Q345B, 门重约 18 t。闸门启闭设备为 QH 型弧门卷扬式启闭机。西溢洪道闸的改造设计完全按照国家相关规范标准进行, 但改造后的弧形钢闸门系统功能价值如何以及闸门结构设计是否仍有进一步的优化空间仍是疑问, 亟需评价和考虑。

### 3.2 闸门系统各构件功能重要程度系数

该工程弧形钢闸门系统主要由卷扬式启闭机和弧形钢闸门组成。卷扬式启闭机又可细分为钢丝绳和机

械零件,弧形钢闸门可细分为面板、上下主横梁、支臂、纵梁和次梁。弧形钢闸门系统层次图如图3所示。

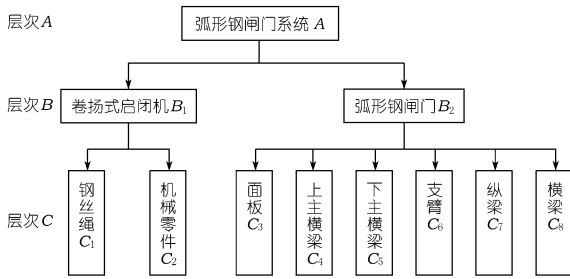


图3 弧形钢闸门系统层次

弧形钢闸门系统的构造判断矩阵A为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵A的最大特征向量为  $W = (0.25, 0.75)^T$ , 二阶矩阵满足一致性要求,  $RI = CI = CR = 0$ , 判断矩阵  $B_1$  和  $B_2$  分别为

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 3 \\ 5 & 5 & 5 & 1 & 6 & 6 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

判断矩阵  $B_1$  和  $B_2$  的最大特征向量分别为  $W_1 = (0.25, 0.75)^T$ ,  $W_2 = (0.134, 0.134, 0.134, 0.494, 0.052, 0.052)^T$ 。矩阵  $B_1$  的一二阶矩阵满足一致性要求。矩阵  $B_2$  检验一致性为:  $n = 6, RI = 1.24, \lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = 7.716, CI = \frac{\lambda_{max} - 6}{5} = 0.027, CR = \frac{CI}{RI} = 0.02 < 0.1$ , 满足一致性要求。弧形钢闸门系统各构件的功能重要程度系数计算结果如表2所示。

表2 弧形钢闸门系统C层合成排序计算结果

层次项	$B_1$	$B_2$	C层次 总排序重要程度权重
	0.25	0.75	
$C_1$	0.75	0	0.188
$C_2$	0.25	0	0.063
$C_3$	0	0.134	0.119
$C_4$	0	0.134	0.101
$C_5$	0	0.134	0.101
$C_6$	0	0.494	0.371
$C_7$	0	0.052	0.039
$C_8$	0	0.052	0.039

从表2可以看出,弧形钢闸门系统中,各构件的功能重要程度系数分别为:钢丝绳18.8%,机械零件6.3%,面板11.9%,主横梁(含上下)20.2%,支臂37.1%,纵梁3.9%,横梁3.9%。

### 3.3 闸门系统各构件功能成本系数

弧形钢闸门系统各构件成本计价包括设备单价和安装单价。安装单价取设备单价的15%<sup>[10]</sup>。各构件成本系数计算结果如表3所示。

表3 弧形钢闸门系统各构件成本系数计算结果

项目	数量/ t	设备单价/ 万元	安装单价/ 万元	成本/ 万元	成本系数/ %
钢丝绳	-	4	0.6	4.6	10.3
机械零件	-	12	1.8	13.8	31.0
面板	4.9	1.3	0.195	7.3255	16.4
主横梁	2.8	1.3	0.195	4.1860	9.4
支臂	4.7	1.3	0.195	7.0265	15.8
纵梁	2.9	1.3	0.195	4.3355	9.7
横梁	2.2	1.3	0.195	3.2890	7.4
总计				44.5625	100

### 3.4 闸门系统各构件功能价值分析

弧形钢闸门各构件功能价值计算结果如表4所示。

表4 弧形钢闸门系统各构件功能价值计算结果

功能项	功能重要程度系数/%	功能成本系数/%	功能价值系数
钢丝绳	18.8	10.3	1.83
机械零件	6.3	31.0	0.20
面板	10.1	16.4	0.62
主横梁	20.2	9.4	2.15
支臂	37.1	15.8	2.35
纵梁	3.9	9.7	0.40
横梁	3.9	7.4	0.53

从表4分析得出:

(1) 功能价值系数超过1的构件有钢丝绳、主横梁、支臂,说明这些构件的设计价值较高,用较低的成本承担了较高的功能。构件受力计算按照目前规范采用的允许应力设计法和有限元数值分析两种方法求得的结果显示,钢丝绳、主横梁和支臂的设计应力值均较接近自身材料的允许应力值。这3个构件可以不做设计上的优化改进。可以看出,从价值分析角度和单一技术角度出发在优化设计对象的指明上显得较为一致。

(2) 功能价值系数小于1的构件有机械零件、面板、纵梁、横梁等。说明这些构件的设计价值不高,可进一步进行结构设计优化。其中机械零件的价值最低,说明用较高的成本承担了较低的性能,因此启闭机的机械装置部分应作为重点改进对象,可通过新工艺、

新材料的采用或新技术的改进降低成本,从而提高产品价值。面板、纵梁和横梁价值较小的原因在于:从构件的受力计算过程来看,三者均受力较小,但其截面积设计较大,导致相当部分的材料浪费,由此承担较高的成本,导致价值不高。以面板为例,按照受力计算结果,闸门底部梁格所需厚度最大为 6 mm,闸门上部梁格面板厚度最小处仅为 2 mm,但面板整体截面都采用 8 mm 厚的钢板,虽然这种设计做法保留了相当大的设计安全裕度,但实际造成的材料浪费也不容忽视。

从上述分析可知,在该工程中,闸门的面板、纵梁、横梁和机械零件应作为闸门系统优化设计的对象;另外,工程中弧形闸门的主体材料采用 Q345B 也加大了这三者的成本造价,在满足其受力条件的前提下,如材料改用价格较为便宜的 Q235B 可降低其成本系数,从而提高弧形闸门的价值。

## 4 结 语

(1) 价值工程分析方法可以从技术和经济两方面提高工程的经济效益,从而实现水工闸门的综合价值效益分析,其在钢闸门系统中的应用是可行的。

(2) 怀柔水库西溢洪道弧形钢闸门系统的价值分析表明,价值工程可以详细计算出水工闸门亟待优化

的结构部位,可以为钢闸门系统的优化设计指明优化对象,从而为钢闸门系统的优化设计提供了新的思路及参考。

## 参考文献:

- [1] 杨兆福. 水工金属结构[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [2] 李典庆,唐文勇,张圣坤. 基于浮点编码遗传算法的钢闸门主梁优化设计[J]. 中国农村水利水电,2003,(4):29-32.
- [3] 肖卫华. 拓扑优化理论及其在水工闸门优化设计中的应用[M]. 南京:河海大学出版社,2007.
- [4] 李旭东,彭晓平. 拓扑优化理论在二维深孔弧形闸门设计中的应用研究[J]. 西北水电,2008,(3):54-56.
- [5] 彭波. 基于遗传算法的新优化理论研究及其在弧形闸门优化设计中的应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
- [6] GB/T 8223.1-2009 价值工程 第1部分:基本术语[S]. 北京:中国标准化研究院,2009.
- [7] 魏法杰,王玉灵,郑筠. 工程经济学[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [8] Satty T L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, Int. J [J]. Services Sciences,2008,(1).
- [9] 许树伯. 实用决策方法-层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988.
- [10] 中华人民共和国水利部. 水利水电设备安装工程概算定额[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.

(编辑:徐诗银)

## Analysis on steel gate system based on value engineering

DING Feng<sup>1</sup>, XING Shubing<sup>2</sup>, QIU Xiangyu<sup>1</sup>

(1. Beijing Water Resources Planning and Design Institute, Beijing 100048, China; 2. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 210005, China)

**Abstract:** The comprehensive gains of hydraulic steel gate are analyzed from technical and economic aspects to achieve the design optimization of gate structure. The steel gate system of west spillway gates of Huairou Reservoir is researched by introducing the concept of value engineering. The functional importance coefficients indicators and functional cost coefficients are determined by adopting Analytic Hierarchy Process (AHP) and cost proportion method. The results show that the application of value engineering in steel gate system is feasible; it can guide the optimization design of steel gate, so as to provide new ideas and reference for the optimized design of the gate.

**Key words:** value engineering; Analytic Hierarchy Process; optimization design; steel gate

· 简 讯 ·

## 丹江口大坝加高工程通过蓄水验收

2013年8月19日,国务院南水北调办公室组织验收委员会对丹江口大坝加高工程进行蓄水验收。国务院南水北调办公室副主任张野宣布:丹江口大坝加高工程具备蓄水条件。验收委员会听取了工程建设管理、安全评估、质量监督和初步验收报告,查看了施工现场,进行了讨论,形成验收意见。

验收委员会认为:大坝加高工程形象面貌满足蓄水要求;尾工工程已有明确安排;库区和坝区征地补偿和移民安置已通

过验收;设计符合南水北调总体规划和现行相关标准和设计要求,质量缺陷经处理后满足设计要求,工程质量合格;历次验收遗留问题大部分已得到妥善处理,尚未处理的不影响水库蓄水;各建筑物、主要设备及安全监测系统工作正常;运行管理措施和调度运用方案已有安排,同意丹江口大坝加高工程通过蓄水验收。

(长江)