

基于低劣化数值法的船闸底枢更新周期研究

薛 扬¹, 金彬彬²

(1. 京杭运河江苏省交通运输厅苏北航务管理处, 江苏 淮安 223002; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 基于设备低劣化理论, 分析了人字门船闸底枢低劣化过程, 得到底枢劣化是由有形磨损引起的, 其故障率随时间呈非线性增加, 低劣化值随时间变化呈指数型分布. 以苏北航务管理处(以下简称“苏北处”)下属15座人字门船闸底枢的大修和维护统计资料为依据, 分析确定了底枢低劣化数值模型的参数——底枢的原始价值、低劣化值、年正常运转费. 采用低劣化数值法的静态和动态两种计算模型, 计算底枢的经济更新周期, 得出人字门船闸底枢经济合理的使用年限为13~15年. 文中研究结果符合苏北处人字门船闸大修时底枢磨损的实际情况, 该方法可供底枢维修更换决策和确定船闸大修周期参考借鉴.

关 键 词: 底枢; 劣化值; 更新周期

中图分类号: U 641.8

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)04-0012-06

底枢作为人字门船闸的重要构件, 但目前对其更新周期的研究较少. 文献[1]基于可靠性理论研究了底枢安全运行周期, 但没有考虑设备更新的经济合理性. 国外学者从设备的故障率对设备寿命影响角度, 提出一系列对设备进行维修、维护的策略^[2-5]. 国内学者用低劣化数值法对汽车、发电设备等的劣化磨损特性和费用变化趋势进行分析, 定量地决策出设备的最佳更新周期^[6-9].

本文根据苏北航务管理处(以下简称“苏北处”)船闸维修运营费用的调研数据, 采用低劣化数值法, 开展底枢经济寿命研究, 为船闸底枢更新周期决策提供依据.

1 底枢的低劣化与更新模式

1.1 底枢的低劣化

设备的低劣化是由设备的有形磨损和无形磨损引起的, 前者对设备的影响是使设备的实际维持费用随时间增加, 是绝对磨损; 后者是由于设备技术更新导致现有设备的生产效率下降, 生产成本提高, 利润降低, 是一种相对磨损.

人字闸门底枢的2个关键部件是蘑菇头和摩擦副, 两者之间的磨耗是引起故障的主要原因. 闸门启闭时, 由于门体自重而产生低速重载下的转动磨损属于正常磨损. 底枢把门体重力及闸门启闭时的水平力传递给闸首混凝土层时, 其自身所受荷载很大, 在荷载的作用下, 底枢的蘑菇头和摩擦副之间的润滑液被挤开时, 局部接触点压应力非常大, 当局部压应力超过材料的屈服极限时, 接触点就会发生塑性变形, 产生磨耗. 同时, 在重载和摩擦产生的高温情况下, 接触点的微凸体表面膜极易破裂, 使得接触点局部软化或融化, 产生黏结点, 在下次转动时, 会被剪断同时重复上述过程产生粘着磨损. 此外, 蘑菇头和摩擦副间密封不严时会导致水体对其腐蚀磨损、老化、变形, 影响使用性能. 综上可见, 底枢的低劣化是由有形磨损引起的.

1.2 底枢更新方式

就人字门船闸底枢而言, 苏北处经过近20年的技术改造和试验研究, 发现底枢运转件的加工工艺及形

收稿日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009028); 江苏省交通科技项目资助项目(12T06)

作者简介: 薛 扬(1967-), 男, 江苏淮安人, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事船闸管理及研究工作.

E-mail: 1269653077@qq.com

式基本稳定.目前苏北处人字门船闸底枢的蘑菇头及摩擦副采用 40Cr 的蘑菇头及 QT600-3 带自润功能的摩擦副进行搭配.因此,底枢的更新是非技术淘汰式更换,主要是遭到严重有形磨损不堪再用,利用完全相同的设备进行更换.

2 低劣化数值模型

低劣化数值法通过分析设备劣化趋势,考虑设备原始投资成本和设备劣化带来的年运营维持费用的增加,从而计算得到其年均总费用最低的使用年限.该法适用于设备在使用期间不过时,仅由于其有形磨损严重致不堪再用而需要更新的设备.

2.1 静态方法

根据设备的劣化规律,设备的劣化主要反映在设备耗能增加和故障频率增加等方面,而且这种增加的趋势是呈加速状态的,也是非线性的.对于底枢而言,劣化损失主要为故障频率的增加,故可参考设备故障率的浴盆曲线,忽略底枢相对较短的初始磨合期,底枢劣化值随时间增长的曲线与指数曲线形状相近.因此,假定底枢每年的劣化值呈指数型增长,取第 1 年的底枢劣化值为 0,则第 j 年的底枢劣化值 $\lambda(j) = ae^{j-1} - a$.若第 1 年底枢正常运转费为 C ,考虑一定的年均增长率 q ,第 j 年底枢年正常运转费 C_j 为:

$$C_j = C(1+q)^{j-1} \quad (1)$$

底枢的原始价值为 K_0 ,使用 T 年后的残值为 V_L ,则年均资金恢复成本为 $\frac{K_0 - V_L}{T}$,底枢年均总费用 AC 的计算公式为:

$$AC = \frac{K_0 - V_L}{T} + \frac{\sum_{j=1}^T C(1+q)^{j-1}}{T} + \sum_{j=1}^T \lambda(j) \quad (2)$$

当 T 年 AC 达到最小值时,该年即为底枢的最经济更新年.

2.2 动态方法

考虑资金的时间价值,把底枢各年正常运转费、劣化值和设备残值贴现到第 1 年,与设备原始价值求总和,而后将总费用乘以投资还本系数 $(A/P, i, T)$,则 T 年更新时 AC 的计算公式为:

$$AC = \left[K_0 + \sum_{j=1}^T \frac{C(1+q)^{j-1}}{(1+i)^j} + \sum_{j=1}^T \frac{\lambda(j)}{(1+i)^j} - \frac{V_L}{(1+i)^T} \right] \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (3)$$

式中: i 为折现率.

当 T 年 AC 达到最小值时,该年即为底枢的最经济更新年^[10].

3 底枢的更新周期

3.1 底枢的原始价值分析

船闸底枢的原始价值 K_0 主要包括底枢更换时各工序所产生的人工费用、安装调试费用及材料费用等.当船闸运行过程中底枢出现故障需要进行修理更换时,施工工序如下:放下下游修理门→闸室抽水→顶移闸门→底枢修理→落门→调门→吊上下游修理门.

根据以上底枢更新施工工序,2012 年对底枢构件进行全部更换所产生的直接费用为 493 209 元,因此底枢的原始价值 $K_0 = 493\,209$ 元.

3.2 底枢低劣化值的确定

底枢低劣化不仅造成自身在使用期内因相关部件故障维护费用增加,而且受其连带影响造成相关运转件损坏,使得相关运转件的维护修理费用增加.据调查,因底枢磨损而导致维护修理费增加的项目有:

(1)底枢偏磨导致门枢轴线偏移,造成门底端下垂,一方面使得底止水、侧止水磨损加剧,更新时间变

短;另一方面开关闸门时震动加剧,可能造成蘑菇头帽与底梁联接的抗剪螺栓松动甚至剪断.此外,伴随着止水磨损闸门漏水加剧,会造成相关运转件与门体的联接松动,如顶枢拉杆调整次数增加等.

(2)底枢严重磨损时,会造成闸门旋转中心与支承轴线的偏移,导致斜接柱承压条和支枕垫块的挤卡和磨损,严重时导致支枕垫块挤出.

(3)由于闸门的水平力是通过底枢轴套上两个开脚铜垫块传至闸墙的弧形钢圈,再传至闸墙上,当底枢磨损门体倾斜时,会导致底枢的固定钢圈因受力过大而挤出.

(4)底枢蘑菇头和摩擦副之间发生磨损时,会破坏两者间的润滑楔,有时会使蘑菇头和摩擦副咬合抱死,使底枢支承座和蘑菇头之间卡住而发生跟转,进而导致支承螺栓的剪断.

综上,按 2012 年价计算,上述各项底枢低劣化带来的维护修理总计费用为 55 803 元.

根据船闸运行经验和底枢低劣化分析,上述项目发生的概率随时间的增加而增大,假定更新年上述项目全部发生,对于静态法,因不考虑资金的时间价值,取更新年底枢劣化值 $\lambda(T) = a(e^{T-1} - 1) = 55\,803(1 + i)^{T-1}$ 元,则有 $a = \frac{55\,803(1+i)^{T-1}}{e^{T-1} - 1}$ 元;而对于动态法,在考虑了资金的时间价值因素后,取 $\lambda(T) = a(e^{T-1} - 1) = 55\,803(1+i)^{T-1}$ 元,则有 $a = \frac{55\,803(1+i)^{T-1}}{e^{T-1} - 1}$ 元.

3.3 底枢年正常运转费的确定

底枢的年正常运转费,是每年船闸日常维护费用中与底枢直接相关的部分.详细项目如下:(1)每日操作人员放闸时观测闸门底枢运转灵活情况、门底止水有无漏水情况、下游面观察止水是否漏水.(2)每月检查闸门各支承是否良好,止水工作是否正常,进行必要的调整;检查底枢润滑系统工作正常情况、润滑点供油情况、适时添加润滑油保持各油杯量.(3)每季度下水检查闸门水下运转件及止水磨损及损坏状况.闸门运行水平跳动检测及异常处理.

按 2012 年水平,取苏北处管辖的 15 个人字门船闸的上述 3 项费用平均值,作为底枢年正常运转费,则 $C = 31\,000$ 元.

3.4 底枢经济寿命的确定

3.4.1 静态法 船闸更换下来的底枢一般不再回收利用,无再使用价值,残值 V_L 可取为 0;底枢年正常运转费年均增长率 q 取 10%.根据以上参数,利用式(2)计算得静态法各年份平均费用,详见表 1.根据表 1 可知,第 13 年时年均总费用值达到最小.

表 1 底枢不同更新年限的年均总费用(静态法)

Tab. 1 Annual average costs of different bottom assembly renewal time (static method)

更新年/年	年正常运转费/元	劣化值累计/元	总费用/元	年均总费用 AC/元
	$C_T = C(1+q)^{T-1}$	$\sum_{j=1}^T \lambda(j)$	$K_0 + \sum_{j=1}^T C_T + \sum_{j=1}^T \lambda(j)$	
①	②	③	④ = ① + ② + ③	⑤ = ④ ÷ ①
9	66 451.3	88 129.24	1 002 302.0	111 366.89
10	73 096.4	88 217.06	1 075 486.2	107 548.62
11	80 406.0	88 253.71	1 155 928.9	105 084.44
12	88 446.6	88 268.79	1 244 390.6	103 699.22
13	97 291.3	88 274.93	1 341 688.0	103 206.77
14	107 020.4	88 277.41	1 448 710.9	103 479.35
15	117 722.4	88 278.40	1 566 434.3	104 428.96
16	129 494.7	88 278.79	1 695 929.4	105 995.59
17	142 444.2	88 278.95	1 838 373.7	108 139.63
18	156 688.6	88 279.01	1 995 062.4	110 836.80

3.4.2 动态法 考虑资金的时间价值因素,根据《水运建设项目经济评价方法与参数》取年利率 $i = 8\%$.

利用式(3)计算得底枢年均使用费用随更新年限的变化(见表2)。由表2可知,当 $T=15$ 年时底枢年均总费用最低。

表2 底枢不同更新年限的年均总费用(动态法)

Tab.2 Annual average costs of different bottom assembly renewal time (dynamic method)

更新年 T / 年	年正常运转费 C_T /元	现值系数 ($P/F, i, T$)	劣化值现值 累计/元	总费用/ 元	投资还本系数 ($A/P, i, T$)	年均总费用/ 元
①	②	③	④	⑤= $K_0 + \sum (② \times ③) + ④$	⑥	⑦=⑤÷⑥
9	66 451.25	0.50	81 601.15	853 129.54	0.16	136 568.73
10	73 096.38	0.46	81 682.46	887 068.62	0.15	132 199.38
11	80 406.02	0.43	81 716.40	921 587.32	0.14	129 092.58
12	88 446.62	0.40	81 730.36	956 724.65	0.13	126 952.59
13	97 291.28	0.37	81 736.05	992 504.14	0.13	125 573.42
14	107 020.41	0.34	81 738.34	1 028 942.71	0.12	124 807.51
15	117 722.45	0.32	81 739.26	1 066 054.65	0.12	124 546.68
16	129 494.69	0.29	81 739.62	1 103 853.28	0.11	124 709.89
17	142 444.16	0.27	81 739.76	1 142 351.66	0.11	125 235.36
18	156 688.58	0.25	81 739.82	1 181 562.88	0.11	126 075.24

注:表中 $(P/F, i, T) = \frac{1}{(1+i)^T}$, $(A/P, i, T) = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$ 。

3.4.3 模型参数的敏感性分析 这里模型参数敏感性分析是将低劣化数值模型中的底枢原始价值、年正常运转费、更新年劣化值等参数作为不确定因素,当其中1种参数发生变化时,分析其对最经济更新年产生的影响,并用敏感度系数来表示产生影响的程度。敏感度系数计算式: $E = \Delta A / \Delta F$,其中: ΔF 为不确定因素 F 的变化率(%); ΔA 为不确定因素 F 发生 ΔF 变化率时,评价指标 A 的相应变化率; E 为评价指标 A 对于不确定因素 F 的敏感度系数。计算得到敏感性分析结果见表3。

表3 基本参数对最经济更新年敏感性分析

Tab.3 Sensitivity analysis of basic parameters to the most economic renewal year

模型参数 变化率/%	参数1:底枢原始价值 K_0		参数2:更新年劣化值 λ		参数3:年正常运转费用 C	
	最经济更新年/年	敏感度系数	最经济更新年/年	敏感度系数	最经济更新年/年	敏感度系数
-20	12.59/14.43	0.32/0.26	13.59/15.32	0.05/0.04	14.41/16.00	0.35/0.25
-10	13.04/14.85	0.30/0.24	13.52/15.27	0.05/0.04	13.92/15.60	0.34/0.26
0	13.45/15.21	0/0	13.45/15.21	0/0	13.45/15.21	0/0
+10	13.81/15.52	0.27/0.20	13.38/15.16	0.05/0.03	13.01/14.83	0.33/0.25
+20	14.14/15.78	0.26/0.19	13.31/15.10	0.05/0.04	12.60/14.46	0.32/0.25

注:“/”前面数值为静态法计算结果,后面数值为动态法计算结果。

由表3可见:(1)最经济更新年对3个参数的敏感度系数在0.35~0.03之间,各参数的不确定性对最经济更新年的确定影响不大,低劣化模型计算底枢经济寿命结果较为稳定。(2)底枢低劣化数值模型中,最经济更新年对底枢年正常运转费和底枢原始价值敏感性稍大(敏感度系数0.19~0.35),对更新年劣化值的敏感性很小(敏感度系数0.03~0.05)。因此,本文中采用2012年的调查数据进行计算对计算结果的精度影响很小。(3)底枢原始价值和年正常运转费在静态法模型中的敏感度比动态法模型中的要大,这表明动态法通过考虑资金的时间价值因素,能有效降低以上参数不确定性的风险。

3.4.4 底枢的经济寿命 静态法计算得底枢经济寿命是13年,而用动态法计算的是15年,2种计算相差了2年。究其原因:静态法忽略资金的时间价值,多用于计算维护费用相对于设备初始投资较小或更新时间较短的设备的经济寿命;动态法考虑了资金的时间价值,多用来估算投资及维护费用较大的大型设备及更新年限较长的设备的经济寿命。人字门船闸底枢非大型设备,但更新时间较长,因此需要用2种方法进行综合

分析确定底枢的更新周期。

根据表 1 和 2 可以得出静态法和动态法底枢年均总费用随时间变化曲线,结果如图 1。

由图 1 可见,动态法总费用的 U 型底部从第 14 年开始形成,U 型曲线底部比较平缓,最低点在第 15 年,第 14 年与第 15 年费用相差 0.21%。静态法总费用的 U 型底部在第 12 至第 14 年之间,第 13 年为最低点,但是第 13、14 年的费用相差很小为 0.26%。因此,对于本问题,综合动态法和静态法的费用曲线,取底枢更新的经济周期为 13~15 年。

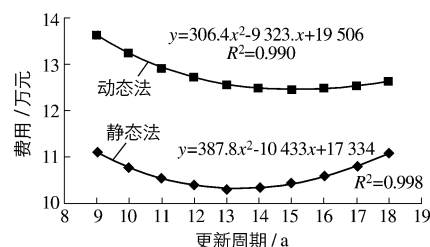


图 1 底枢年均总费用与更新周期的关系曲线
Fig. 1 Relationship curves between bottom assembly's annual average cost and renewal year

4 结 语

(1)通过设备低劣化原理计算底枢的经济寿命,根据静态方法所得经济寿命为 13 年,根据动态法,所得结果为 15 年,对比两者适用条件和所得的年均总费用,最终确定底枢经济合理的更新年限为 13~15 年。

(2)根据经济寿命计算所得的底枢更新时间,比根据调查统计所得的底枢的更换年限 10 年要长。近年来,在底枢新型材料和润滑系统投入应用后,底枢的寿命得到了相应的提高,淮安一线、淮阴一线、刘老涧一线及泗阳一线船闸大修检测报告显示,底枢蘑菇头及蘑菇头帽的磨损都较为轻微,这表示船闸大修时,底枢存在过修的现象。因此,考虑底枢作为船闸大修的关键因素,船闸大修周期可以适当延长。

参 考 文 献:

- [1] 陈一梅, 马丽佳, 王建民. 船闸底枢可靠性模型及其应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(1): 205-209. (CHEN Yi-mei, MA Li-jia, WANG Jian-min. Reliability model of lock bottom assembly and its application[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(1): 205-209. (in Chinese))
- [2] YE H R, KAO K C, CHANG W L. Optimal preventive maintenance policy for leased equipment using failure rate reduction [J]. Computer & Industrial Engineering, 2009, 57(1): 304-309.
- [3] OKASHA N M, FRANGOPOL D M. Redundancy of structural systems with and without maintenance: An approach based on lifetime functions[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(5): 520-533.
- [4] HRITONENKO N, YATSENKO Y. The dynamics of asset lifetime under technological change[J]. Operations Research Letters, 2008, 36: 565-568.
- [5] GIORGIO M, GUIDA M, PULCINI G. A wear model for assessing the reliability of cylinder liners in marine diesel engines[J]. Transactions on Reliability, 2007, 56(1): 158-166.
- [6] 刘景珍, 王奉涛, 马孝江, 等. 设备更新决策系统中抽油机经济寿命的计算[J]. 油气田地面工程, 2007, 26(1): 14-15. (LIU Jing-zhen, WANG Feng-tao, MA Xiao-jiang, et al. Economical life calculation of the oil pumps in the equipment renewal decision system[J]. Oil-gasfield Surface Engineering, 2007, 26(1): 14-15. (in Chinese))
- [7] 刘闯, 韩印. 关于汽车最佳经济使用寿命的研究[J]. 工业技术经济, 2003, 22(6): 116-117. (LIU Chuang, HAN Yin. A study on the most economic life of vehicle[J]. Industry Technology & Economy, 2003, 22(6): 116-117. (in Chinese))
- [8] 张明华. 车辆退役决策: 政策、模型与软件[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009. (ZHANG Ming-hua. Vehicle fleet retirement decision-making: policies, models and software package[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese))
- [9] 饶永波, 常治元, 杨宗霄, 等. 高速公路机电设备使用寿命预测模型[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 12-15. (RAO Yong-bo, CHANG Zhi-yuan, YANG Zong-xiao, et al. Service lifetime prediction modeling for expressway electromechanical equipments[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 12-15. (in Chinese))

- [10] 马丽佳, 陈一梅. 一种基于经济寿命理论的船闸大修周期确定方法[J]. 水运工程, 2010(3): 121-125. (MA Li-jia, CHEN Yi-mei. Determination of cycle of lock overhaul based on the theory of economical life [J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3): 121-125. (in Chinese))

A study of the replacement cycle of lock bottom assembly based on inferior value method

XUE Yang¹, JIN Bin-bin²

- (1. Waterway Management Bureau of Grand Canal in North Jiangsu Province, Huaian 223002, China;
2. School of Transportations, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the theory of equipment deterioration, this study analyzes the deterioration process of the bottom assembly. The results show that material attrition is the main inducement of bottom assembly wearing. As the time elapses, its failure rate is increasing nonlinearly, and the inferior value is distributed in the form of exponential function. According to the actual survey data of the overhaul and maintenance costs of fifteen major locks' bottom assembly attached to Waterway Management Bureau of Grand Canal in North Jiangsu Province (WMBGCNJP), the original value, inferior value and annual running cost of bottom assembly are determined. The economic life of the locks' bottom assembly is determined to be 13 ~ 15 years by using the static model and dynamic model having the inferior value method. Comparing with the wear loss of the bottom assembly in an overhaul period, this method is reliable and has reference value for decision making of bottom assembly replacement and determination of the cycle of lock overhaul.

Key words: bottom assembly; inferior value; replacement cycle

版 权 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。

该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《水利水运工程学报》编辑部