



# 单级船闸运行可靠性分析及提升措施<sup>\*</sup>

杨 珙，李乐新，杨 冰

(长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002)

**摘要：**为了提升单级船闸运行可靠性，对某单级船闸系统进行可靠性分析。通过对单级船闸进行系统功能结构分析，绘制可靠性框图，并建立运行可靠度模型，结合近年来船闸各设备的失效统计资料，计算得到某单级船闸各系统及设备的可靠度，并针对系统的薄弱环节提出相应的措施。结果表明，船闸人字门和启闭机的可靠性最高，电气控制系统的可靠性最低；传感器和止水带是系统的薄弱环节；采用冗余配置、技术创新、快速检修等技术可显著提高系统稳定性。

**关键词：**船闸；可靠度模型；提升措施

中图分类号：U 641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0017-05

## Operation reliability analysis and improvement measure of single-stage ship lock

YANG Jue, LI Le-xin, YANG Bing

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to improve the operation reliability of single-stage ship lock, we carry out the reliability analysis of a single-stage ship lock system. Through the function structural analysis of the system and equipment, we draw the corresponding reliability block diagram, establish the operation reliability model, obtain the reliability of the single-stage ship lock system and equipment according to the failure statistics of each equipment in recent years, and propose the corresponding measure for the weak link of the system. The results show that the reliability of the miter gate and hoist of single-stage ship lock is the highest, and the reliability of the electrical control system is the lowest. The sensor and water stops are the weak links of the system. The system stability can be significantly improved by using redundant configuration, technology innovation, rapid maintenance, and other technologies.

**Keywords:** ship lock; reliability model; improvement measure

船闸是帮助船舶克服航道上集中水位落差的一种通航水工建筑物，船闸的安全畅通与航运经济发展密切相关。近年来，我国内河水运建设与发展取得了显著成绩，形成以长江、珠江、京杭运河、淮河、黑龙江和松辽水系为主体的内河水运格局。随着航运事业的高速发展，船闸通过能力与船舶过闸需求的矛盾日益突显，过闸船舶对船闸运行安全、高效的要求不断提高，研究船闸运行可靠性并提出提升可靠性的措施成为保障枢纽通航能力和提高枢纽通航技术的必然需求。

为制造尽可能少发生故障的产品所采用的一

切方法，都可称为可靠性技术。可靠性分为狭义可靠性和广义可靠性，可靠性的概率度量称为可靠度。狭义的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力；广义的可靠性还包含可用性和维修性。本文主要从狭义可靠性的角度对某单级船闸进行研究。

### 1 某单级船闸可靠性分析

#### 1.1 船闸系统可靠性框图

可靠性框图是从系统可靠角度出发研究系统与部件之间的逻辑图，是系统单元及其可靠性意

收稿日期：2020-04-10

\*基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0402007)

作者简介：杨珏(1990—)，男，工程师，从事船闸运行维护。

义下连接关系的图形表达。可靠性逻辑框图广泛应用于系统可靠性设计和分析,用来分析系统的可靠度是否与设计的可靠度目标相符,找出系统中的薄弱环节并加以改进<sup>[1]</sup>。

可靠性逻辑框图在系统工作原理框图的基础上绘制<sup>[2]</sup>。某单级船闸主要设备设施包括人字门、阀门、人字门启闭机、阀门启闭机、电气控制系统等17套设备,根据单级船闸的构成、功能和运行工艺,可以绘制该单级船闸的系统结构图和功能图,见图1。根据船闸系统功能结构图,绘制出某单级船闸系统级可靠性框图,见图2( $X_1 \sim X_{17}$ 分别为左上和右上人字门、左下和右下人字门、左上和右上人字门启闭机、左下和右下人字门启闭机、左和右充阀门、左和右泄阀门启闭机、左泄阀门、左泄阀门启闭机、右泄阀门、右泄阀门启闭机、电气控制系统)。



图 1 某单级船闸功能结构简图

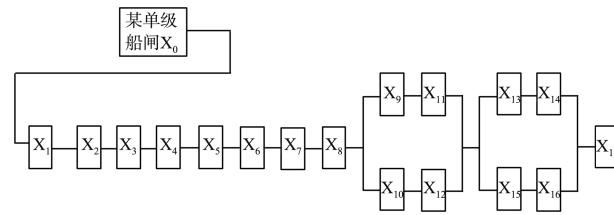


图 2 某单级船闸可靠性框图

由图2可看出,某单级船闸是串、并联组合的复杂系统。船闸实现通航功能时,所有的人字门、人字门启闭机和电气系统都必须处于正常状态<sup>[3]</sup>,而充(泄)水阀门和充(泄)水阀门启闭机可允许有一侧出现故障。根据串联系统和并联系统

可靠度计算方法,可得出某单级船闸运行可靠度计算公式:

$$\begin{aligned} R_0 = & R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_{17} \cdot \\ & [1 - (1 - R_9 R_{11})(1 - R_{10} R_{12})] \cdot \\ & [1 - (1 - R_{13} R_{14})(1 - R_{15} R_{16})] \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $R_n$  为对应设备  $X_n$  的可靠度。

## 1.2 船闸设备可靠性框图

为进一步建立可靠性模型,对各设备进行分解,下面以船闸输水阀门为例进行分析。输水阀门是用来控制充(泄)水时流量的船闸设备,输水阀门和进水口、输水廊道、出水口及消能设备等组成某单级船闸的输水系统。某单级船闸输水阀门为反向弧形阀门,由门体、支铰、止水、吊杆等部分组成。根据反弧门的构成、功能和运行工艺,绘制输水阀门的系统结构图和功能图,见图3。根据输水阀门功能结构图,绘制某单级船闸输水阀门可靠性框图,见图4。

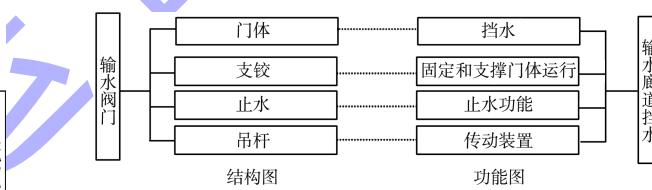


图 3 输水阀门功能结构图

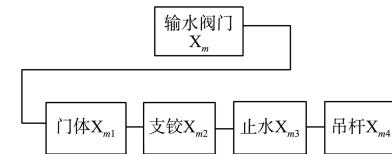


图 4 输水阀门系统可靠性框图

由图4可知,输水阀门可靠性模型是串联模型。根据串联系统可靠性数学模型,其可靠度计算公式为:

$$R_m = R_{x_{m1}} R_{x_{m2}} R_{x_{m3}} R_{x_{m4}} \quad (2)$$

式中:  $R$  为可靠度;  $m$  可取 9、10、13、14, 分别表示左充反弧门、右充反弧门、左泄反弧门、右泄反弧门。

同理,可以得到某单级船闸其他设备的可靠性框图。系统的可靠性框图可按照系统级、分系统级、设备级、部件级、组件级逐步细分下去,直至建立起以元器件为组成部分的可靠性逻辑框

图,并推导出各单元的可靠性数学模型。此处的元器件并不一定是不可再拆分的零部件,也可以是一个小的系统。如门体,若系统维修时采取整件更换的方式而不是单独更换门体的某一部件时,可将门体作为系统的元器件进行可靠性分析。当已知组件中各单元的可靠性指标,就可以由下一级的可靠性框图及数学模型计算上一级的可靠性指标,这样逐级上推,直至计算出系统的可靠性指标。

## 2 船闸运行可靠度计算

### 2.1 可靠度计算方法

可靠度与故障率有关。公式为:

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (3)$$

式中:  $R(t)$  为可靠度函数;  $\lambda(t)$  为故障率函数;  $t$  为时间。

根据可靠度相关知识可知,可靠性是指系统或产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。系统的可靠度是系统在时间  $t$  内不失效的概率,可借助于系统的失效概率函数来表示系统的可靠度函数,即:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

式中:  $F(t)$  为失效概率函数。

对于单级船闸,其可靠性就是指船闸在规定的通航条件下,在规定的时间内,完成船舶过闸功能的能力。船闸失效就是船闸无法完成正常的过闸工艺流程,即无法使船舶由上游驶向下游或下游驶向上游。

船闸各主要设备在船闸完成船舶过闸功能中分别发挥着挡水、输水、控制等不同作用,各设备失效就是设备在规定的通航条件下,在规定的时间内,无法发挥正常的挡水、输水、控制功能,从而导致船闸无法发挥规定的功能。

设备各部件是设备的主要组成部分,使设备能正常发挥挡水、输水、控制等功能的基础,设备各部件失效就是设备组件在规定的通航条件下,在规定的时间内,无法发挥正常功能,从而导致

设备无法发挥规定的功能。如果将设备部件失效概率记为  $F_i$ ,则:

$$F_i = \frac{n_s}{N+n_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $n_s$  为设备部件运行失效次数;  $N$  为设备部件运行正常次数。

设备部件的失效分为两个方面:1)设备部件故障,需要通过检修才能恢复功能;2)设备部件受环境条件的影响功能不能正常发挥,一旦外界条件变好,系统功能仍能恢复。前者表现为设备部件故障后检修停航,后者表现为设备部件故障停机。

根据统计资料,可以得到在规定的通航条件下,在规定的时间内,船闸各设备部件故障停机的闸次数、检修停航的时数和正常运行的闸次数。根据船闸运行的平均闸次间隔时间,将设备部件检修停航的时数等效为设备部件检修停机的闸次数,计算公式为:

$$n_j = \frac{T_j}{T} \quad (6)$$

式中:  $n_j$  为设备部件检修停机等效闸次数;  $T_j$  为设备部件检修停航时间;  $T$  为闸次间隔时间。

综上所述,船闸各设备部件失效概率计算公式为:

$$F_i = \frac{n_c + n_j}{N + n_c + n_j} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $n_c$  为设备部件故障停机闸次数。

### 2.2 各系统、设备可靠度计算

2016—2018年某单级船闸运行情况统计见表1。

表1 2016—2018年某单级船闸运行数据

年份	总闸次/次	上行闸次/次	下行闸次/次
2016	9 003	4 501	4 502
2017	8 702	4 351	4 351
2018	9 164	4 582	4 582

根据统计数据某船闸运行平均闸次间隔时间为 90 min。选取左泄阀门、左下人字门、右充阀门启闭机、电气控制系统<sup>[4]</sup> 为代表进行可靠度计算,结果见表2。

表 2 可靠度计算结果

设备	年份	检修项及用时(故障次数)	等效闸次/次	失效概率/%	可靠度
左泄阀门	2016	0	0	0	1
	2017	支铰 80 h;止水 165 h	163.3	1.87	0.9813
	2018	止水 177.5 h	118.3	1.29	0.9871
左下人字门	2016	0	0	0	1
	2017	底止水 97 h	64.67	0.74	0.9926
	2018	0	0	0	1
右充阀门启闭机	2016	油泵轴承 4 h	2.67	0.03	0.9997
	2017	油泵异响 3 h	2	0.02	0.9998
	2018	0	0	0	1
电气控制系统	2016	传感器停机故障 19 次	19	0.22	0.9978
	2017	传感器停机故障 33 次	33	0.38	0.9962
	2018	传感器停机故障 17 次;接触器停机故障 1 次	18	0.19	0.9981

同理,可以计算得到某单级船闸各年度设备可靠度,见表 3。

表 3 单级船闸各设备可靠度

设备	可靠度		
	2016 年	2017 年	2018 年
左上人字门	1	1	1
右上人字门	0.9998	0.9999	1
左下人字门	1	0.9926	1
右下人字门	1	1	1
左上人字门启闭机	1	1	1
右上人字门启闭机	1	1	1
左下人字门启闭机	1	1	1
右下人字门启闭机	1	1	1
左充阀门	1	1	1
右充阀门	0.9995	1	0.9994
左泄阀门	1	0.9992	0.9994
右泄阀门	1	1	0.9998
左充阀门启闭机	1	1	1
右充阀门启闭机	0.9997	1	0.9998
左泄阀门启闭机	1	1	1
右泄阀门启闭机	1	1	1
电气控制系统	0.9973	0.9957	0.9976

根据各设备可靠度,按照单级船闸可靠度计算公式可以得到 2016—2018 年某单级船闸运行可靠度,见表 4。

表 4 某单级船闸运行可靠度

年份	2016	2017	2018
运行可靠度	0.9971	0.9882	0.9976

### 3 船闸运行可靠度提升措施

#### 3.1 船闸系统运行可靠度分析

在某单级船闸中,人字门及其启闭机可靠度

最高,基本未发生过失效现象。输水阀门的可靠度相对较低,主要原因是止水损坏失效。电气系统可靠度最低,主要原因是传感器故障或损坏而失效。

各闸、阀门系统中,止水均为薄弱环节。主要原因是止水为橡胶制品会发生老化而导致性能下降,同时输水阀门止水长期受高速水流冲击,也容易发生损坏。人字门止水在一个大修周期内很少发生损坏,一般发生损坏多为异物挤压而损坏失效。

启闭机械中,油泵、电机容易发生故障而失效,主要原因多为油泵密封件损坏漏油或油泵、电机轴承损坏而导致油泵电机组整体失效。

电气系统中,传感器为其薄弱环节,传感器故障的原因很多,传感器受环境温、湿度变化影响会导致性能下降,同时传感机构本身受环境影响变形也会造成传感器误发信号,有时人字门门体形状变化也会影响传感器正常发射信号。

#### 3.2 船闸系统运行可靠度提升措施

1)采用技术手段对可靠度较低的设备进行改型或改造,如改进底止水安装方式和安装工艺,输水阀门底止水改用钢止水,人字门底止水在厂内一次性成型制造,传感器装置优化升级,研发人字门门缝错位自动校准系统、水位计自动校准系统等。

2)对重要设备和检修周期长的设备采取冗余配置,如阀门启闭机设置冗余油泵电机组、互为

备用, 自动控制网络设置双环网, 阀门启闭机主回路采用变频控制和接触器控制双回路, 传感器和行程开关采用冗余配置等。如果确实不能采取热备用方式冗余的, 也应尽可能采取冷备用方式冗余。

3) 加强设备维修维护, 定期检查、调整设备状态。制定船闸设备维护规程等规范性文件, 定期按技术标准开展设备维护, 提升设备养护水平。制定设备预检预修计划, 及时消除缺陷, 确保系统设备处于良好工作状态。制定维修技术规程, 明确检修标准和检修工艺, 适时开展船闸设备计划性检修。

4) 研究船闸各设备快速检修技术, 如使用人字闸门同步顶升系统, 阀门启闭机金属结构检测装置<sup>[5]</sup>, 水下机器人摸探系统。加强应急演练, 提升应急反应能力, 减少故障碍航时间。研究改善检修工艺, 如人字门底枢检修工艺优化, 人字门检修顶落门固门工艺改进等, 提升检修质量和缩短检修时间<sup>[6]</sup>。

#### 4 结语

1) 本文提出的船闸可靠性分析方法能根据船闸系统结构和运行统计数据对船闸各设备运行可靠性, 找出薄弱环节, 可供船闸可靠性设计时参考,

(上接第 11 页)

#### 参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院. 大藤峡水利枢纽船闸输水系统优化布置与水力学物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2015.
- [2] 南京水利科学研究院. 安谷水电站船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.
- [3] 南京水利科学研究院. 乌江银盘水电站船闸输水系统分析和整体水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.
- [4] 南京水利科学研究院. 葛洲坝 1 号船闸水工模型试验总结报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1985.

也可给船闸日常维修、维护工作提供指导意见。

2) 船闸系统整体而言是一个串联系统, 各系统和设备均为船闸安全运行不可或缺的部分, 电气系统相对可靠性较低, 可采取冗余设置和定期检查维护的方式提高可靠性。

3) 对于运行繁忙和安全畅通要求高的船闸建议定期开展可靠性分析, 逐步建立设备及元器件失效数据库, 通过数据分析和可靠性模型指导船闸制定预检预修计划和设备维护保养计划。

#### 参考文献:

- [1] 何军红, 李皓, 康凤举, 等. 三峡五级船闸控制系统可靠性分析[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(2): 45-47.
- [2] 宣国祥, 张瑞凯, 宗慕伟. 船闸运行可靠性分析[J]. 水利学报, 1996(1): 1-7.
- [3] 黄国潜. 浅谈邵伯三线船闸电气系统的安全可靠性[J]. 交通科技, 2012(6): 82-83.
- [4] 苏禹. 提高船闸 PLC 自动控制系统可靠性的方法[J]. 现代交通技术 2005, 2(5): 78-81.
- [5] 李家熹. 液压启闭机密封装置的可靠性与失效分析[J]. 水利电力机械, 1992(6): 42-45, 13.
- [6] 宣国祥, 张瑞凯, 宗慕伟. 葛洲坝 2 号船闸运行故障情况分析及运行可靠度估算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997(6): 48-53.

(本文编辑 王璁)

- [5] 南京水利科学研究院. 葛洲坝 2 号船闸水工模型试验总结报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1981.
- [6] 南京水利科学研究院. 三峡工程永久船闸水力学关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1995.
- [7] 南京水利科学研究院. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [8] 南京水利科学研究院. 江西赣江万安枢纽二线船闸输水系统布置和水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.

(本文编辑 武亚庆)