



齿轮齿条爬升式升船机驱动系统 运行可靠性分析*

金 锋

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对升船机运行可靠性问题, 以齿轮齿条爬升式升船机驱动系统为研究对象, 根据可靠性理论, 在统计驱动系统运行维护数据的基础上, 综合分析停机故障次数和故障检修停航时间对运行可靠性的影响, 计算得出驱动系统及其部件的运行可靠度, 提出提高驱动系统运行可靠性的建议: 应高度重视驱动齿轮托架机构、电气传动设备、传感检测装置等机电设备的维护检修和优化完善, 充分考虑设备检修的便利性; 基于停机故障次数和故障检修停航时间的运行可靠度计算方法, 能准确反映升船机的运行可靠性。

关键词: 可靠性; 设备故障; 设备维修; 升船机; 驱动系统

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0089-04

Operational reliability analysis of drive system of gear-rack climbing mechanism ship lift

JIN Feng

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the operational reliability of ship lift, this paper takes the drive system of gear-rack climbing mechanism ship lift as the research object, analyzes the impact of the number of faults and the time for maintenance on the operational reliability based on the reliability theory and the statistics of the operation and maintenance data of the drive system, calculates the operational reliability of the drive system and its components, and proposes the following recommendations to improve the operating reliability. It is necessary to attach great importance to maintenance, repair, optimization, and upgrading of electromechanical equipment such as drive gear carrier mechanism, electrical transmission equipment, sensor detection devices, and fully consider the convenience of equipment maintenance. The operation reliability calculation and analysis method are based on the number of faults and the time for maintenance, which can accurately reflect the operation reliability of the ship lift.

Keywords: reliability; equipment fault; equipment maintenance; ship lift; drive system

升船机是利用机械装置升降船舶, 以克服航道集中水位落差的一种通航建筑物^[1], 按承船厢驱动方式可分为齿轮齿条爬升式、钢丝绳卷扬提升式、水力式等^[2]。升船机建成后, 保障其长期安全、稳定运行是其管理单位的首要任务。目前国内建成 60 余座升船机, 部分升船机运行可靠性不高、机械和电气等故障较多, 有些甚至无

法正常投入运行。定量分析评价升船机运行可靠度, 有针对性地采取措施提高升船机的运行可靠性, 对保障升船机安全稳定运行具有重要意义。

在通航建筑物运行可靠性研究方面, 宣国祥等^[3]、须清华等^[4]以葛洲坝 2# 船闸停机故障率数据为基础, 计算了葛洲坝船闸、三峡船闸不同运

收稿日期: 2020-05-06

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007)

作者简介: 金锋(1975—), 男, 高级工程师, 从事通航建筑物运行维护管理和技术研究。

行方式下的可靠度；冒刘燕等^[5]以维修间隔时间界定船闸寿命周期的可靠性，提出基于维修事件数据的船闸可靠性分析模型。作为驱动承船厢升降的关键设备，驱动系统的运行可靠性直接关系到升船机的安全稳定运行。本文以某齿轮齿条爬升式升船机驱动系统为研究对象，根据可靠性理论，结合升船机运行维护实践，在统计驱动系统运行维护数据的基础上，综合分析停机故障次数和故障检修停航时间对运行可靠性的影响，对驱动系统及其部件的运行可靠度进行计算分析，进而提出提高驱动系统运行可靠性的建议。

1 驱动系统设备组成与运行工艺

1.1 设备组成

齿轮齿条爬升式升船机的承船厢由承船厢两

侧对称布置的多套(一般为4套)齿轮-齿条机构驱动，齿轮及其驱动设备安装在承船厢，齿条安装在升船机承重结构。除驱动齿轮、齿条外，驱动系统还包括电气传动设备(含传动控制站、变频调速装置、驱动电机等)、机械传动装置(含减速器、锥齿轮箱、万向联轴节等)、驱动齿轮托架机构(含驱动齿轮轴、支撑及导向机构、位移适应机构、液气弹簧机构等)^[6]、安全制动设备(含安全制动器、工作制动器等)、机械同步轴(含同步轴轴段、联轴器、轴承座、带有离合器及测量法兰的中间轴、锥齿轮箱等)、传感检测装置(含行程、速度、位置、扭矩等传感器和驱动齿轮荷载传感器)等设备。各驱动机构通过电气传动设备实现行程同步或出力均衡，同时通过机械同步轴实现机械同步。某齿轮齿条爬升式升船机驱动系统设备布置如图1所示。

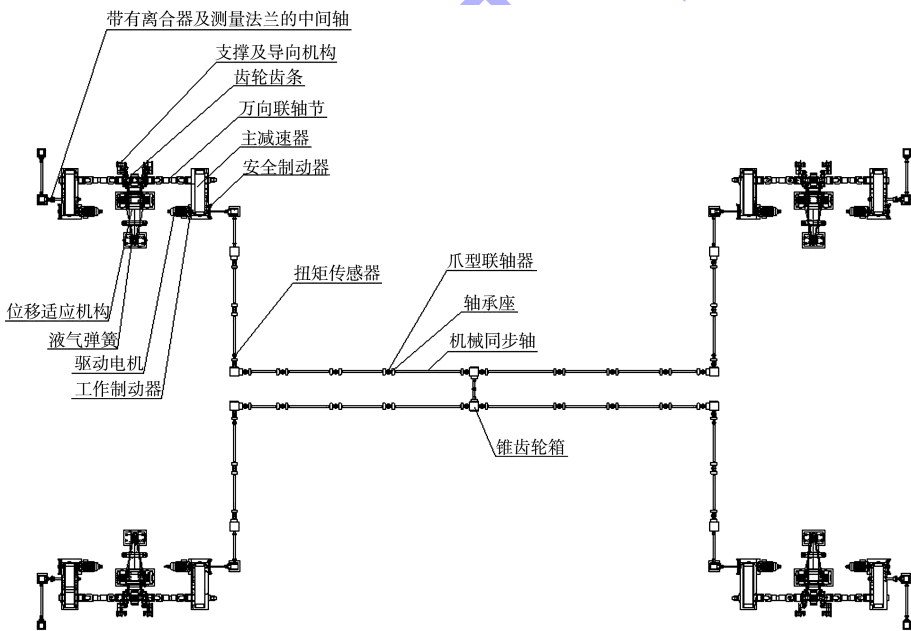


图1 驱动系统设备布置

1.2 运行工艺流程

1.2.1 正常运行流程

1)启动。首先将液气弹簧机构加压预紧，待承船厢锁定机构解锁后，电气传动设备预加持住力矩，随后安全制动器和工作制动器相继松闸，最后电动机运转，通过机械传动装置带动与齿条啮合的驱动齿轮转动，驱动承船厢沿齿条上升、下降。

2)制动。驱动系统减速，当电动机转速接近零时，工作制动器上闸，延时数秒后安全制动器上闸，电动机断电，待承船厢锁定机构锁定后，液气弹簧机构泄压释放。

1.2.2 超载运行流程

当驱动齿轮荷载达到预警值时，系统发出报警；当驱动齿轮荷载达到保护停机值时，电气传动设备开始制动，至承船厢停止升降后，工作制

动器和安全制动器先后上闸，电动机断电。当驱动齿轮荷载继续增大，超过液气弹簧机构的预紧力时，液气弹簧机构开始动作，与驱动系统相连的安全机构螺纹副一侧的间隙逐步减小直至完全消失，承船厢被锁定在升船机承重结构上。

1.2.3 电气传动失效运行流程

当电气传动设备失效时，由工作制动器实施紧急上闸制动，至承船厢停止升降后，安全制动器上闸。

2 驱动系统可靠性分析

2.1 可靠度计算方法

可靠性是指设备在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力，可靠性的概率度量称为可靠度。设备在规定时间内发生故障的概率为不可靠度，又称累计故障率^[7]。相关公式为：

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{1}$$

式中： $R(t)$ 为设备在规定时间 t 内的可靠度； $F(t)$ 为设备在同一时间的不可靠度，公式为：

$$F(t) = \frac{N_f}{N_x} = \frac{N_f}{N_0 + N_f} \tag{2}$$

式中： N_x 为设备运行次数； N_0 为设备运行正常次数； N_f 为设备运行故障次数。

复杂的设备系统可以分析其组成部件的串并联关系，对于纯串联系统、纯并联系统，其可靠度分别为：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \tag{3}$$

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \tag{4}$$

式中： $R_s(t)$ 为系统的可靠度； $R_i(t)$ 为系统部件 i 的可靠度。

2.2 驱动系统运行维护数据统计

升船机设备的不可靠度与两项指标密切相关：1) 设备停机故障率，即发生设备停机故障的厢次数与运行厢次数的比值；2) 设备故障率^[8]，即设备故障检修停航时间与应通航时间的比值，应通航时间指升船机除自然原因停航和计划检修停航之外应处于通航状态的时间。某齿轮齿条爬升式升船机于 3 年前投入试运行，近 3 年的运行数据见表 1，驱动系统故障及检修数据见表 2。

表 1 升船机运行情况

时间	运行厢次数	应通航时间/h
第 1 年	3 647	6 214. 53
第 2 年	6 884	8 005. 25
第 3 年	4 436	7 443. 12

表 2 驱动系统故障及检修情况

部件	停机故障数			故障检修停航时间/h		
	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 1 年	第 2 年	第 3 年
驱动齿轮齿条	0	0	0	0	0	0
电气传动设备	9	8	14	10. 10	0	0. 88
机械传动装置	1	1	0	0	0	0
驱动齿轮托架机构	2	1	0	363. 07	0	0
安全制动设备	9	1	0	4. 88	2. 22	0
机械同步轴	0	1	0	0	13. 00	0
传感检测装置	20	4	4	0. 55	0. 85	0. 65

表 2 中，该升船机驱动系统共计 75 次设备停机故障，有 86. 7% 的故障经排查和处理可快速恢复，单次中断运行时间不超过 30 min，不计故障检修停航时间；有 13. 3% 的故障单次停航检修时间超过 30 min，累计检修停航时间达 396. 2 h。

2.3 驱动系统可靠度计算

为客观、准确地分析升船机驱动系统运行可

靠性，除了设备停机故障次数，还应考虑故障检修停航时间。故障检修停航时间对升船机运行可靠性的影响程度，可等效为故障检修停航厢次数，其公式为：

$$N_f = N_1 + N_j \tag{5}$$

式中： N_f 为故障厢次数（即设备运行故障次数）； N_1 为故障停机厢次数（即停机故障次数）； N_j 为故

障检修停航等效厢次数，其公式为：

$$N_j = \frac{\sum T_j}{T_y} N_x \quad (6)$$

式中： $\sum T_j$ 为故障检修停航累计时间； T_y 为应通航时间； N_x 为运行厢次数(即设备运行次数)。

根据式(2)、(5)和(6)，可得到不可靠度计

算公式：

$$F(t) = \frac{T_y N_t + N_x \sum T_j}{T_y N_x + N_x \sum T_j} \quad (7)$$

根据式(7)和表1、2的数据，可得出驱动系统各部件的不可靠度，进而根据式(1)得出各部件的可靠度，见表3。

表3 驱动系统各部件可靠度

部件	不可靠度/%			可靠度/%		
	第1年	第2年	第3年	第1年	第2年	第3年
驱动齿轮齿条	0	0	0	100.000	100.000	100.000
电气传动设备	0.409	0.116	0.327	99.591	99.884	99.673
机械传动装置	0.027	0.015	0	99.973	99.985	100.000
驱动齿轮托架机构	5.572	0.015	0	94.428	99.985	100.000
安全制动设备	0.325	0.042	0	99.675	99.958	100.000
机械同步轴	0	0.177	0	100.000	99.823	100.000
传感检测装置	0.557	0.069	0.099	99.443	99.931	99.901

根据驱动系统的设备组成、运行工艺流程，其为典型的串联系统，可绘制出可靠性逻辑框图如图2所示。根据式(3)，其可靠度计算公式为：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^7 R_i(t) \quad (8)$$



图2 驱动系统可靠性逻辑框图

经计算，某齿轮齿条爬升式升船机驱动系统近3年的运行可靠度分别为93.189%、99.568%、99.574%。第2年的运行可靠度比第1年有大幅提高，第3年的运行可靠度又比第2年略有提高，表明随着设备系统的磨合完善和运行维护经验的不断积累，驱动系统设备故障逐步下降，技术状

态持续向好。

3 结语

1) 本文对某齿轮齿条爬升式升船机驱动系统的停机故障次数和故障检修停航时间进行综合分析，计算出其运行可靠度，与基于停机故障次数的运行可靠度计算相比，能更为准确地反映设备的运行可靠性，对通航建筑物运行可靠性计算分析具有一定的参考价值。

2) 该升船机已投运3年多时间，其驱动系统运行可靠度逐年上升，符合设备全寿命周期可靠性发展规律，驱动系统的运行可靠性已达到较高水平并趋于稳定。

3) 该升船机投运的第1年，驱动系统运行可靠度相对较低，主要原因是驱动齿轮托架机构等机械设备的故障问题，且因检修难度较大，故障检修停航时间较长。经过设备检修和调整完善，第3年驱动系统未发生机械设备停机故障。在齿轮齿条爬升式升船机驱动系统的设计、建造和初期运行阶段，应高度重视驱动齿轮托架机构等机械设备的可靠性问题，同时充分考虑设备检修的便利性。