



大型单级船闸人字门启闭机开式齿轮 自动润滑系统设计^{*}

王海江，覃 涛，陈慧敏

(长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002)

摘要：针对某大型单级船闸人字门启闭机开式齿轮传统人工润滑效率低、消耗大等问题，对船闸的人字门启闭机运行特点、润滑方式、润滑成膜效果等进行系统分析，结合自动润滑方式比选研究结果，设计出一种开式齿轮外置油轮式自动润滑系统。实际应用结果表明，开式齿轮自动润滑系统能可靠实现人字门启闭机开式齿轮自动润滑和精准定量供油，从而改善人字门启闭机开齿润滑效果，提高设备使用寿命。

关键词：船闸；人字门启闭机；开式齿轮；自动润滑

中图分类号：U 642

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)12-0191-05

Design of open gear automatic lubrication system for miter gate hoist of large single-stage ship lock

WANG Hai-jiang, QIN Tao, CHEN Hui-min

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: To solve the problems of the traditional manual lubrication of the open gear of miter gate hoist of a large single-stage ship lock, such as low efficiency and high consumption, this paper systematically analyzes the current situation of the operation characteristics, lubrication mode and lubrication film-forming effect of the miter gate hoist of the lock, and designs an external tanker type automatic lubrication system for the open gear combined with the research results of the comparison and selection of automatic lubrication modes. The practical application shows that the open gear automatic lubrication system can reliably realize the automatic lubrication of the open gear of the miter gate hoist and precise quantitative oil supply, thus improve the lubrication effect of the opening gear of the miter gate hoist and increase the service life of the equipment.

Keywords: ship lock; miter gate hoist; open gear; automatic lubrication

船闸是利用向两端有闸门控制的航道内充、泄水以升降水位，帮助船舶克服航道上的集中水位落差的一种厢形通航建筑物^[1]。随着长江航运的快速发展，船舶过闸需求呈逐年递增趋势^[2]，船闸人字门启闭机长期处于高负荷运行状态。开式齿轮作为船闸人字门启闭过程中传动系统的关键部件，在运行过程中承受较大的交变应力和接触应力，齿面润滑油膜受到反复挤压、开齿啮合

时沿齿宽方向接触不均匀、载荷分布不均造成开齿齿面局部承受压力大，齿面油膜保持时间短造成齿面磨损加剧^[3-4]，因此，确保船闸人字门启闭机开式齿轮的有效润滑和良好工况尤为重要。

某大型单级船闸通航40余年，人字门启闭机开齿润滑一直采用人工润滑方式，每周1次对齿面涂抹GM-2成膜膏，使齿面保持一层润滑油膜，从而降低齿轮副间的摩擦和磨损。传统人工涂抹

收稿日期：2022-04-14

*基金项目：长江三峡通航管理局科技项目(KJ-2021-06B)

作者简介：王海江(1974—)，男，高级工程师，从事船闸运行维护管理和设备技术研究。

齿面润滑方式总体润滑效果良好，但劳动强度大、工作效率低，齿面润滑给油量无法做到精确控制，存在一定的油脂浪费。

研究船闸人字门启闭机开齿自润滑系统的主要目的是优化润滑的不良工况，实现精准定量供油，有效替代人工涂抹，提高工作效率，从而改善润滑效果，提高设备使用寿命。

1 船闸人字门启闭机开式齿轮润滑现状

1.1 启闭机运行特点

船闸每扇人字门旁布置 1 台启闭机，人字门的启闭主要通过曲柄(扇形齿轮)、推拉杆、人字门、机架组成的四连杆机构完成。如图 1 所示，曲柄固定在扇形齿轮上，推拉杆与曲柄、人字门铰接，电动机驱动减速箱、开式齿轮带动曲柄旋转，同时带动推拉杆伸缩，完成人字门启闭。图 1 中小齿轮与扇形齿轮组成开式齿轮副，参数见表 1。一次完整的人字门开启或关闭，扇形齿轮转动角度为 166.7°，小齿轮转动 2.16 圈。

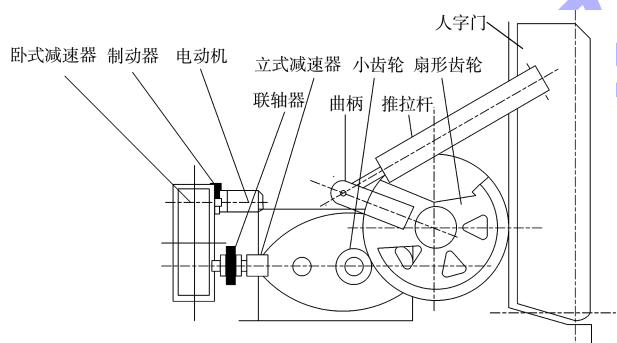


图 1 人字门启闭机结构

表 1 扇齿、小齿轮参数

| 齿数 | 模数/mm | 压力角/(°) | 齿宽/mm | 粗糙度/ μm | 泊松比 |
|------------|-------|---------|-------|--------------------|-----|
| 扇齿: 98(55) | 50 | 20 | 540 | 扇齿: 1.6 | 0.3 |
| 小齿轮: 21 | | | | 小齿轮: 0.8 | |

1.2 润滑状态分析

目前普遍采用最小油膜厚度 h_0 与齿面平均表面粗糙度的比值——油膜比厚 λ 描述齿面的润滑状态^[5]。按照 λ 值的大小，润滑状态主要分为 3 类：当 $\lambda < 0.7$ ，齿轮传动处于边界润滑状态；当 $0.7 < \lambda < 2.0$ ，齿轮传动处于混合润滑状态；当

$\lambda > 2.0$ ，齿轮润滑处于流体动力润滑状态^[6]。计算公式为：

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{q_1}^2 + R_{q_2}^2}} \quad (1)$$

式中： h_0 为轮齿接触面油膜厚度 (μm)； R_{q_1} 、 R_{q_2} 分别为两表面形貌轮廓的均方根偏差 (μm)，约为算术平均偏差 R_{a_1} 、 R_{a_2} 的 1.20~1.25 倍。

处于低速重载工作的齿轮，油膜厚度 h_0 可按道森(Dowson)公式计算：

$$h_0 = 2.65\alpha_0^{0.54} (\eta_0 U)^{0.7} R^{0.43} E^{-0.03} (B/P)^{0.13} \quad (2)$$

式中： α_0 为黏压系数 (m^2/N)， $\alpha_0 = (0.6 + 0.965\lg\eta_0) \times 10^{-8}$ ； η_0 为常压下润滑油的动力黏度 ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)； U 为齿轮副卷吸速度 (m/s)； R 为接触表面综合曲率半径 (m)； E 为材料的综合弹性模量 (N/m^2)， $E = 2 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ ， μ_1 、 μ_2 分别为二者的泊松比； P 为外载荷 (N)； B 为轮齿接触宽度 (m)。

1) 查得动力黏度 $\eta_0 = 614 \times 10^{-3} (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2$ ，则黏压系数 $\alpha_0 = 3.29 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ ；卷吸速度 $U = v_1 \sin\alpha$ ， $v_1 = 2\pi n_1 r / 60$ ， $n_1 = n/i_{12}$ ， n 为电机转速， α 为齿轮的压力角 20°，则卷吸速度 U 为 0.0137 m/s。

2) 轮齿在啮合节点处的综合曲率半径 $R =$

$$(r_1 + r_2) \cdot \frac{i_{12}}{(i_{12} + 1)^2} \cdot \sin\alpha, \text{ 两齿轮节圆半径 } r_1, r_2 \text{ 分别为 } 525, 2450 \text{ mm, 传动比 } i_{12} \text{ 为 } 4.67, \text{ 齿轮的压力角 } \alpha \text{ 为 } 20^\circ, \text{ 轮齿在啮合节点处的综合曲率半径 } R \text{ 为 } 394.56 \text{ mm。}$$

3) 小齿轮材料为 50SiMn，开齿轮材料为 ZG35SiMnMo，都属于合金钢类，取泊松比 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ ，弹性模量 $E_1 = E_2 = 200 \text{ GN/m}^2$ ，综合弹性模量 E 为 220 GN/m^2 ；载荷 $P = 9550 \times \left(\frac{N}{n_1 d \cos\alpha} \right)$ ， N 为人字门电机额定功率， d 为小齿轮的节圆直径，得载荷 P 为 973 kN；齿轮接触宽度 B 为 0.54 m。

将以上参数值带入式(2)，可得油膜厚度 $h_0 = 1.078 \mu\text{m}$ ；两齿轮算数平方偏差 R_{a_1} 、 R_{a_2} 均取 1.6，则 $\sqrt{R_{q_1}^2 + R_{q_2}^2} = 1.25R_{a_1} = 2$ ；代入式(1)可得膜厚比 ($\lambda = 0.54$) < 0.7 ，说明该船闸人字门开式齿

轮处于边界润滑状态, 极易发生胶合。

2 自动润滑方式比选

从自动润滑技术和维护便利性考虑, 有多种适宜船闸人字门启闭机开式齿轮自动润滑的方法。经过前期分市场调研和分析评估, 选取机械手自动润滑、喷雾式自动润滑、外置油轮自动供油润滑 3 种润滑方式进行比选。

机械手自动润滑通过设计相应机构模仿人手和手臂, 按照给定程序, 完成定位、取脂、涂抹等动作, 实现自动涂抹功能; 喷雾式自动润滑将润滑油脂与压缩空气混合后从喷嘴呈雾状喷出至齿面, 达到润滑效果; 外置油轮自动供油润滑是不断将润滑油脂注入与被润滑开齿啮合的外置油轮齿面上, 在开齿转动过程与之啮合实现自动润滑。3 种润滑方式的比选结果见表 2。

表 2 3 种润滑方式比较

| 润滑方式 | 成本 | 系统复杂程度 | 出油量控制 | 安装难易程度 | 维护便利性 | 润滑效果 | 机房整洁度 |
|------|----|--------|-------|--------|-------|------|-------|
| 机械手 | 高 | 较复杂 | 不可控 | 复杂 | 复杂 | 较好 | 较好 |
| 喷雾式 | 低 | 一般 | 不易控 | 简单 | 一般 | 一般 | 差 |
| 外置油轮 | 中 | 简单 | 可控 | 简单 | 简单 | 较好 | 较好 |

根据表 2 比选结果, 结合船闸运行实际, 采用外置油轮自动供油润滑方式的可行性更高。

3 自动润滑系统设计

3.1 系统方案

外置油轮自动供油润滑系统由润滑小齿、泵站、控制箱、管系等组成。如图 2 所示, 其工作原理为: 人字门启闭时, 开式齿轮副的小齿轮驱动外置油轮(润滑小齿), 控制泵站输送成膜膏至外置油轮内部管道, 在小齿轮与外置油轮啮合处形成输出通道, 将润滑脂挤压并涂抹在被润滑小齿轮的齿面, 而没有啮合的部分齿轮不会挤出成膜膏。在小齿轮与扇齿啮合时, 将成膜膏涂抹到扇齿齿面, 从而实现润滑。

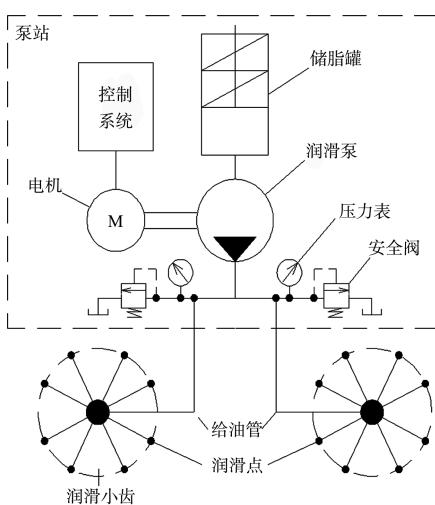


图 2 外置油轮自动供油润滑系统润滑原理

3.2 齿面润滑给油量计算

根据润滑设备的结构, 运行情况和环境条件, 每个齿面一次润滑最低给油量 q_0 按下式计算:

$$q_0 = b e h_0 \quad (3)$$

式中: b 为齿宽 (mm), 取 540 mm; e 为全齿高 (mm), 取 110 mm; h_0 为油膜要求厚度, 开式齿轮的表面润滑油膜要求大于 25.4 μm。计算得开式齿轮每个齿面 1 次润滑最低给油量 $q_0 = 1.5$ mL。

每次启闭需润滑的扇齿总齿数 Z 为 55, 故开式齿轮 1 次润滑给油量 $q = Z q_0 = 82.5$ mL。

3.3 润滑周期确定

开式齿轮在啮合过程中, 齿面上油膜受到反复挤压, 会导致油膜损坏破裂, 此时需及时对齿面进行补油, 避免润滑失效, 目前船闸开齿润滑周期均为 1 周 1 次。为了验证开齿润滑周期是否合适, 对船闸人字门启闭机开齿进行跟踪观察, 对关门过程中主动轮的 21 个轮齿面油膜状况进行比较分析。

通过 1 周内齿面照片对比及比色, 齿面部分低凹表面被固体润滑剂覆盖, 呈现出黑色油膜; 齿面其他部分金属基底没有暴露, 有油膜覆盖, 润滑状态较好。依据计算结果和观测试验, 确定采用每周 1 次的全天候润滑方案。

3.4 润滑脂选择

船闸采用的润滑脂是由中国科学院兰州化学物理研究所研制的 GM-2 号齿轮润滑成膜膏, 主要

以 24 号气缸油为基础油，添加二硫化钼粉、石墨粉、氧化亚铜、环氧树脂等固体润滑剂高温皂化

而成。产品主要性能见表 3。

表 3 GM-2 号齿轮润滑成膜膏主要性能

| 针入度(25 ℃, 60 次)/(1/10 mm) | 滴点/℃ | 腐蚀性(铜片, 100 ℃, 3 h) | 水分 | 蒸发度/% (120 ℃, 1 h) | 临界负荷 (四球机)/kg | 烧结负荷 (四球机)/kg | 适用温度/℃ | 适用速度/(m·s⁻¹) |
|---------------------------|---------|---------------------|----|--------------------|---------------|---------------|---------|--------------|
| 34~280 | 180~200 | 合格 | 合格 | 0.27~0.30 | 150 | 670 | -25~120 | <5(齿轮节圆线速度) |

由表 3 可知，船闸润滑脂选用符合 NB/SHT 0985—2019 工程机械用润滑脂标准：1) 四球烧结负荷 > 191 kg；2) 一般润滑脂的最高使用温度应比滴点温度低 15 ℃ 以上；3) 工程机械用润滑脂的蒸发损失指标要求均不大于 2.0%。

船闸人字门齿轮润滑为边界润滑，齿轮齿面有表面粗糙峰相接触的情况发生，需使用添加剂二硫化钼粉、石墨粉等与齿面形成的物理吸附膜或化学反应膜来保护齿面。

3.5 润滑小齿结构

润滑小齿采用尼龙材料加工而成，模数为 50，齿数为 8，齿形角为 20°，如图 3 所示。润滑小齿通过安装板与小开齿配合安装，润滑小齿轴芯通过供油管路与润滑泵连接，内部供油管道沿半径方向布置，润滑小齿齿面对称设置出脂孔与内部油道连通。工作时，润滑泵输送的润滑脂可通过进脂孔泵入润滑小齿内部油道，并从出脂孔溢出。

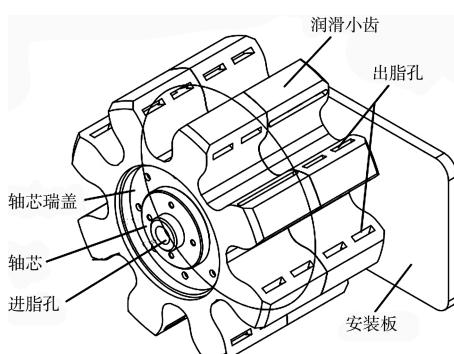


图 3 润滑小齿结构

3.6 给油管布置

给油管应选择合适的内径，管径小会使系统压力过大，润滑点供脂量偏少；管径太大，则容

易造成润滑脂浪费。根据 GB/T 8163—2018《输送流体用无缝钢管》中对冷拔(冷轧)无缝钢管的要求，开式齿轮自动润滑系统给油管选择 $\phi 11.0 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 规格的无缝钢管，材料为 10 或 20 号钢。根据现场实际情况选定润滑泵在系统中的最佳位置，要求润滑脂泵接近润滑小齿，至润滑点的距离越近越好，据此确定给油管路的布置。

3.7 润滑泵选择

该船闸平均 1.5 h 运行 1 次，每天运行闸次为 16 个，人字门启闭时间 5~6 min，则齿轮副运转总时间 90 min；而润滑小齿与开式齿轮啮合时内部油路导通时为有效润滑时间，约为全部工作时间的 2/3，即 48 min，则每个润滑小齿每分钟的排量为：

$$Q_0 = \frac{q}{48n} \quad (4)$$

式中：n 为外置油轮个数，2 个。计算得到小齿供油量为 0.86 mL/min。

根据计算结果选择林肯系列泵型号为 P215-M100-30XYBU-2K7-380-420，参数见表 4。

表 4 润滑泵参数

| 出油口/个 | 每口排量/(mL·h⁻¹) | 工作电压/V AC | 油箱容积/L | 最大输出油压/MPa |
|-------|---------------|-----------|--------|------------|
| 2 | 189 | 380~420 | 30 | 35 |

3.8 控制系统设计

自动润滑系统控制流程见图 4，当系统自动工作时，通过检测外置油轮转动情况及累计工作时间控制润滑泵启停，实现自动润滑，同时可系统设置手动模式，以满足特殊情况下的补脂工作。

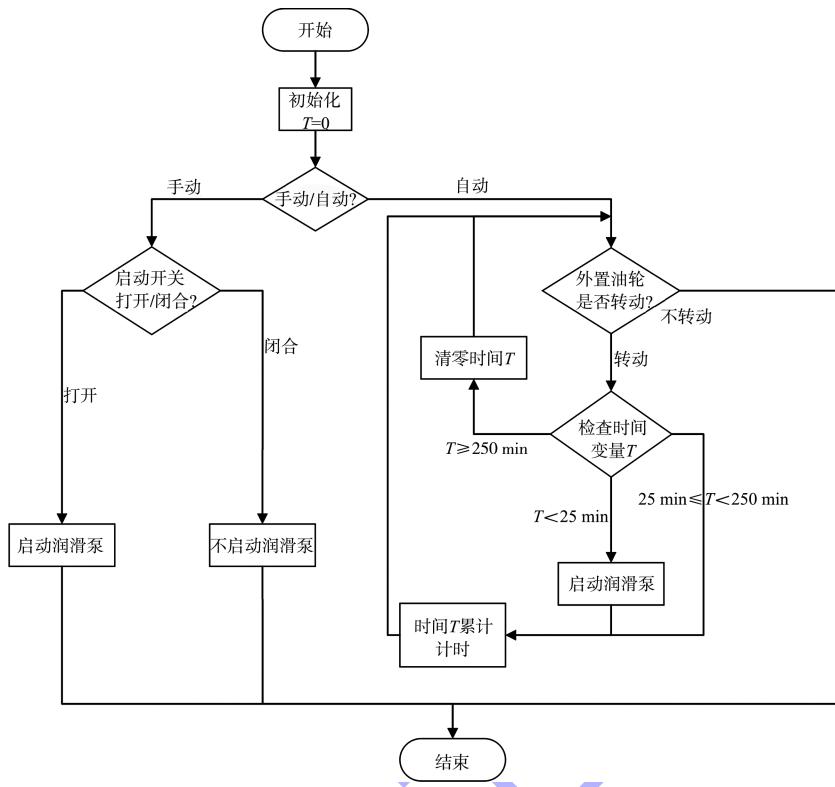


图 4 自动润滑系统控制流程

4 成果应用

开式齿轮自动润滑系统在某大型单级船闸人字门启闭机开式齿轮润滑中得到应用, 结果表明:

1) 该系统有效实现自动给油润滑方式, 大幅降低了人工润滑劳力成本; 2) 精准实现定量供油润滑方式, 有效控制实际润滑中的油脂消耗和环境污染; 3) 科学设计安全保护系统和连接固定装置, 使得实际应用中安全可控、维修简易。

5 结语

1) 分析了某大型单级船闸人字门启闭机运行特点和人字门启闭机开式齿轮润滑状态, 该船闸的开式齿轮属于边界润滑状态, 润滑状况相对较恶劣, 易磨损、胶合。

2) 设计的外置油轮式船闸人字门启闭机开齿自润滑系统, 结构简单、费用低, 安装、维护方便, 实现了开式齿轮自动润滑, 确保润滑作业安全、方便。

3) 通过应用船闸人字门启闭机开齿自润滑系统, 能有效替代人工涂抹, 提高工作效率, 实现

精准定量供油, 改善人字门启闭机开齿润滑效果, 提高设备使用寿命。

参考文献:

- [1] 杨珏, 李乐新, 杨冰. 单级船闸运行可靠性分析及提升措施[J]. 水运工程, 2021(2): 17-21.
- [2] 齐俊麟. 加强三峡通航技术研究, 促进航运高质量发展[J]. 水运工程, 2020 (2): 1-5.
- [3] 杨冰. 船闸用齿轮油粘温特性研究[J]. 中国水运, 2021 (1): 90-92.
- [4] 刘明维, 徐光亮, 吴林键, 等. 船闸运行状态下闸门及支承运转件敏感区应力关系研究[J]. 水道港口, 2021, 42(2): 220-228.
- [5] MARCO A, MURARO, FÁBIO K, et al. The influence of contact stress distribution and specific film thickness on the wear of spur gears during pitting tests[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2012, 34(2): 135-144.
- [6] 袁玉鹏, 李权才, 刘忠明, 等. 低速重载开式齿轮齿条传动润滑状态分析[J]. 润滑与密封, 2015, 40(5): 98-103.