



船闸闸门滚珠丝杆传动式启闭机的运动及受力分析

王希强, 蔡素文, 余向阳

(京杭运河江苏省交通运输厅苏北航务管理处, 江苏 淮安 223002)

摘要: 京杭运河苏北段上的刘老涧一线船闸首次使用了滚珠丝杆传动式启闭机, 为了揭示其运动规律及受力情况, 为今后的应用和改造提供理论依据, 在启闭机无变频控制及有变频控制两种情况下对其运动及受力进行分析研究。结果表明: 当启闭机螺母导套以1.8 m/min的设计速度沿导轨作直线运动时, 无论是否采用变频控制, 均满足设计300 kN启闭力的要求; 采用变频控制后, 闸门实现了“慢-快-慢”变速运行, 闸门开启关闭时更加平稳、驱动力更大, 闸门角速度及驱动力大小变化率达到了33%左右。

关键词: 刘老涧一线船闸; 运动; 受力; 分析

中图分类号: U 641.3⁺33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0165-04

Motion and force analysis for ball-screw-driven hoist of lock gate

WANG Xi-qiang, CAI Su-wen, YU Xiang-yang

(Waterway Management Bureau of Great Canal in North Jiangsu Province, Huai'an 223002, China)

Abstract: The ball-screw-driven hoist was first used in line 1 ship lock of Liulaojian in north Jiangsu province. In order to reveal the law of motion and force and to provide the theory for further application and transformation, the motion and force of the ball-screw-driven hoist are analyzed under conditions with frequency transformer and without frequency transformer. The result shows that when the nut runs 1.8 meters per minute at track, the force meets the design requirement of 300 kN whether or not we adopt the frequency transformer; when we adopt the frequency transformer, the motion of ship lock gate achieves “slow-fast-slow”, the motion of the lock gate is steadier, the force of gate opening and closing is larger, and the change rate of both the angular velocity and the force reaches about 33%.

Key words: line 1 ship lock of Liulaojian; motion; force; analysis

江苏省内船闸使用的启闭机主要有以下几类: 液压直推式、液压四连杆式、齿条推杆式、钢丝绳卷扬式、齿轮齿条式和液压双齿条式等。而其中液压式启闭机占了80%以上, 液压式启闭机主要存在故障率高、故障判断难、维护成本高、噪音大、使用周期短等问题, 同时, 液压系统的“跑、冒、滴、漏”现象时有发生, 不仅浪费能源、污染环境, 而且导致启闭设备运转异常, 效

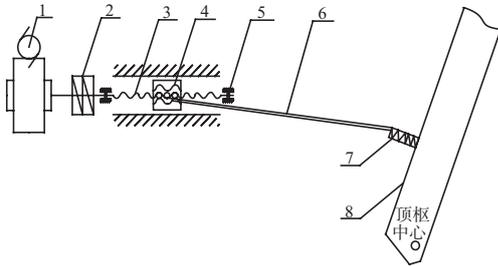
率降低, 严重时导致闸门不能运行^[1]。2009年苏北运河刘老涧一线船闸首次使用了滚珠丝杆传动式启闭机作为新一代大型船闸用启闭机械^[2-3], 其与液压启闭机械相比, 具有运行平稳、可靠性高、同步性好、传动效率高、环保无污染、维修使用方便、使用寿命长等优点。现以刘老涧一线船闸闸门滚珠丝杆传动式启闭机为例, 分析其运动及受力情况, 研究其对闸门开关的影响。

收稿日期: 2012-04-19

作者简介: 王希强(1980—), 男, 工程师, 硕士, 从事京杭大运河船闸机电管理及养护工作。

1 滚珠丝杆传动式启闭机的结构及工作原理

滚珠丝杆传动式启闭机的结构如图1所示。



注：1.电机减速机组，2.扭矩限制器，3.滚珠丝杆，4.螺母导套，5.轴承，6.推拉杆，7.缓冲器，8.闸门。

图1 滚珠丝杆传动式启闭机的结构

滚珠丝杆传动式启闭机工作原理：电机减速机组1输出的动力经过扭矩限制器2带动滚珠丝杆3作旋转运动，滚珠丝杆3两端由轴承5限制，只能作旋转运动而不能沿轴线进行移动。丝杆上的螺母导套4在两侧导轨的限制下沿滚珠丝杆作轴向直线运动并通过推拉杆6带动闸门8绕顶底枢轴线进行转动，从而实现闸门的开启和关闭。扭矩限制器2的作用是在闸门开启关闭遇阻时，限制最大的输出扭矩，从而保护电机减速机组。缓冲器7的作用是实现闸门的平稳开启和关闭，减少冲击。

2 运动分析

为方便滚珠丝杆传动式启闭机运动分析，根据其设计参数及安装位置情况作简化，如图2所示。其中闸门受力点旋转半径 $OA=3\ 690\text{ mm}$ ，推拉杆长度 $AB=5\ 300\text{ mm}$ ，闸门开关角度 $\alpha=22.5^\circ\sim 90^\circ$ ，推拉杆轴线与水平面夹角为 β ， B 点螺母导套的速度大小 $v_B=1.8\text{ m/min}$ 。

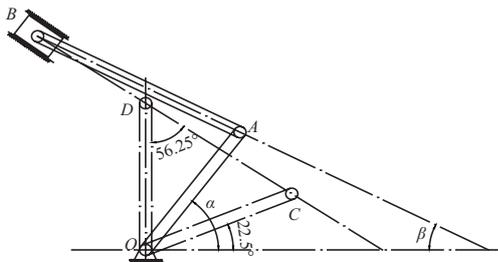


图2 滚珠丝杆传动式启闭机简化运动分析

图2机构中，连杆 AB 作平面运动，取 AB 杆为研究对象， B 点速度大小为 $v_B=1.8\text{ m/min}$ ，方向沿

着 BDC 连线方向， A 点绕 O 点作旋转运动，方向垂直于 OA 杆。根据速度合成定理^[4]有

$$v_B = v_A + v_{BA} \quad (1)$$

式中： v_B 为螺母导套的速度，大小已知，方向沿 BDC 连线方向； v_A 为闸门与推拉杆连接点 A 处的速度，方向已知，垂直于 OA 杆； v_{BA} 为点 B 相对于点 A 的速度，方向已知，垂直于 AB 杆。

作速度三角形如图3所示，由正弦定理有

$$\frac{v_A}{\sin(123.75^\circ - \beta)} = \frac{v_B}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{v_{AB}}{\sin(56.25^\circ - \alpha)} \quad (2)$$

式中： α 为闸门与闸室横轴线的夹角； β 为推拉杆 AB 与闸室横轴线的夹角。

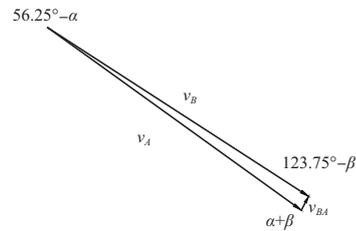


图3 速度三角形

计算可得：

$$v_A = \frac{v_B \sin(123.75^\circ - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{v_B \sin(56.25^\circ + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

由图2可知， $\alpha + \beta = 56.25^\circ \sim 123.75^\circ$ ， $\beta = 27.26^\circ \sim 33.75^\circ$ ，当 $\alpha + \beta$ 从 56.25° 变化到 123.75° 时，即闸门从关门位置到开门位置变化时， β 从最大值 33.75° 变化到最小值 27.26° ，再变化到最大值 33.75° ，其角度与正弦值对应关系如图4所示。由图4可知

$$v_{A_{\max}} = \frac{v_B \sin(56.25^\circ + \beta_2)}{\sin 56.25^\circ} = \frac{v_B \sin 90^\circ}{\sin 56.25^\circ} = \frac{v_B}{0.83} = 1.2v_B \quad (4)$$

式中： $v_{A_{\max}}$ 为闸门与推拉杆连接点 A 处速度的最大值； β_2 为当闸门开启和关闭到位时，推拉杆 AB 与闸室横轴线的最大夹角。

$$v_{A_{\min}} = \frac{v_B \sin(56.25^\circ + \beta_1)}{\sin 90^\circ} = v_B \sin 83.51^\circ = 0.99v_B \quad (5)$$

式中： $v_{A_{\min}}$ 为闸门与推拉杆连接点 A 处速度的最小值； β_1 为当推拉杆 AB 与闸门旋转半径 OA 垂直时，推拉杆 AB 与闸室横轴线的最小夹角。

$$\omega_{\max} = \frac{v_{A\max}}{R_{OA}} = \frac{1.2v_B}{R_{OA}} = 0.59 \text{ rad/min} \quad (6)$$

式中: ω_{\max} 为闸门的理论最大旋转角速度。

$$\omega_{\min} = \frac{v_{A\min}}{R_{OA}} = \frac{0.99v_B}{R_{OA}} = 0.48 \text{ rad/min} \quad (7)$$

式中: ω_{\min} 为闸门的理论最小旋转角速度。

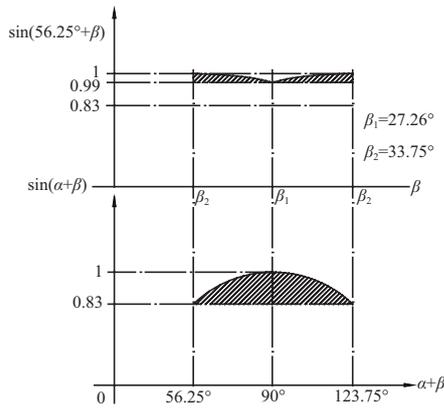


图4 $(\alpha + \beta)$ 与 β 的正弦变化关系

3 受力分析

根据功率公式有

$$P = Fv_A \cos[90^\circ - (\alpha + \beta)] = Fv_A \sin(\alpha + \beta) =$$

$$F \frac{v_B \sin(56.25^\circ + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \sin(\alpha + \beta) = Fv_B \sin(56.25^\circ + \beta) \quad (8)$$

式中: P 为电机输出功率; F 为闸门与推拉杆连接点 A 处的受力。由式 (8), 得

$$F = \frac{P}{v_B \sin(56.25^\circ + \beta)} \quad (9)$$

$$F_{\max} = \frac{P}{v_B \sin(56.25^\circ + \beta_1)} = \frac{P}{v_B \sin 83.51^\circ} = \frac{1.01P}{v_B} = 370.3 \text{ kN} \quad (10)$$

式中: F_{\max} 为闸门与推拉杆连接点 A 处的理论最大驱动力。

$$F_{\min} = \frac{P}{v_B \sin(56.25^\circ + \beta_2)} = \frac{P}{v_B \sin 90^\circ} = \frac{P}{v_B} = 366.7 \text{ kN} \quad (11)$$

式中: F_{\min} 为闸门与推拉杆连接点 A 处的理论最小驱动力。

4 实际应用中的运动与受力分析

4.1 应用变频器后闸门的受力分析

为了使闸门开启、关闭更加平稳, 尽可能地

减少闸门运行冲击, 保护船闸上的机电设备, 实际应用中, 主要采用变频器来控制闸门电机的转速, 实现闸门“慢-快-慢”的变速运行^[5]。为了获得较大的闸门开启动力, 同时使闸门平稳关闭, 电机在闸门开启后和关闭前低频运行 10 s 左右, 对应螺母导套的运行速度为 $0.75v_B$, 即电机以 0.75 倍的额定转速在低频下运转; 中间过程电机在额定转速下运行, 对应螺母导套的运行速度为 v_B 。

已知电机输出功率 $P=11 \text{ kW}$, 查手册取机械传动效率^[6]为 $\eta=0.85$, $\beta=27.26^\circ \sim 33.75^\circ$, 由式 (10) 和 (11) 可知, A 处的理论最大驱动力和最小驱动力变化很小, 为方便计算, 取 $\beta=\beta_2=33.75^\circ$ 。

$$F_{\text{实max}} \approx \frac{\eta P}{0.75v_B \sin(56.25^\circ + \beta_2)} = \frac{\eta P}{0.75v_B \sin 90^\circ} = \frac{1.13P}{v_B} = 414.3 \text{ kN} \quad (12)$$

式中: $F_{\text{实max}}$ 为闸门与推拉杆连接点 A 处的实际最大驱动力。

$$F_{\text{实min}} \approx \frac{\eta P}{v_B \sin(56.25^\circ + \beta_2)} = \frac{\eta P}{v_B \sin 90^\circ} = \frac{\eta P}{v_B} = 311.7 \text{ kN} \geq 300 \text{ kN} \quad (13)$$

式中: $F_{\text{实min}}$ 为闸门与推拉杆连接点 A 处的实际最小驱动力。可以看出, 采用变频控制后, 闸门实际的最大驱动力和最小驱动力大于设计要求的 300 kN, 完全满足闸门的运行要求。

4.2 应用变频器后闸门的运动分析

由于电机在低频运行时间很短, 故闸门实际运行的最大旋转角速度与理论最大旋转角速度基本相等, 而闸门实际运行的最小旋转角速度出现在闸门低频运行期间。

$$\omega_{\text{实max}} \approx \omega_{\max} = \frac{v_{A\max}}{R_{OA}} = \frac{1.2v_B}{R_{OA}} = 0.59 \text{ rad/min} \quad (14)$$

式中: $\omega_{\text{实max}}$ 为闸门的实际最大旋转角速度。

$$\omega_{\text{实min}} \approx \frac{0.75v_{A\max}}{R_{OA}} = \frac{1.2 \times 0.7v_B}{R_{OA}} = 0.44 \text{ rad/min} \quad (15)$$

式中: $\omega_{\text{实min}}$ 为闸门的实际最小旋转角速度。

5 结论

闸门滚珠丝杆启闭机螺母导套以 1.8 m/min 的速度沿导轨作直线运动。1) 电机在无变频控制情况下: 闸门运行的理论角速度大小在 0.48 ~ 0.59 rad/min,

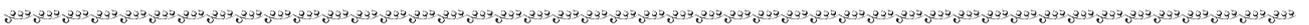
角速度变化率大小为21%；在机械传动效率100%情况下，闸门理论驱动力基本不变，驱动力大小在370 kN左右。2)电机在有变频器控制情况下：闸门驱动力和闸门旋转角速度大小与频率变化有关，当电机以0.75倍的额定转速在低频下运转，机械传动效率为0.85时，闸门实际驱动力大小在311.7~414.3 kN，驱动力变化率为33%；闸门角速度大小在0.44~0.59 rad/min，角速度变化率大小为33%。

实践证明，闸门采用变频控制后，运行平稳，开启关闭时受到的冲击小，完全满足设计和使用要求，为滚珠丝杆传动式启闭机的推广使用积累了经验。

参考文献：

[1] 梁妙金. 浅议水闸启闭机液压系统漏油的防治[J]. 浙江水利科技, 2007(4):86-87.
 [2] 江苏省科技查新咨询中心. 大型船闸通用型滚珠丝杆传动式启闭机研制及应用[R]. 南京: 江苏省科技查新咨询中心, 2010.
 [3] 朱浩贤, 王建民. 滚珠丝杆传动式启闭机. 中国: ZL03278043.5[P]. 2005-02-09.
 [4] 南京工学院, 西安交通大学. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
 [5] 陈刚. 变频器在船闸控制系统中的应用[J]. 江苏电气, 2005(4):31-35.
 [6] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第164页)

4) 服务创新。全方位化、标准化、智能化的航道服务应用，展现航道服务全面性，保证航道服务，实现航道服务科学性。

5 结语

长江兰家沱一大埠街河段智能航道示范工程的建设实施，将完成船舶感知、航道感知平台的建设，成立宜昌、重庆区域智能航道管理中心，实现长江航道智能机务服务、长江航道智能养护与管理、长江航道信息服务以及长江航道智能助航服务等对内、对外的综合服务，从而更全面地保障船舶航行安全，更深入地挖掘航道的潜力，全面提升船舶通过能力，实现长江干线航道局部河段（示范河段）初步智能化，进一步加快长江智能航道系统建设步伐，推进长江航道现代化进程。

智能航道示范建设在长江还没有先例可借鉴，为推进兰家沱一大埠街智能航道示范工程顺利实施，建议：

1) 加强内部组织与协调：确保与各依托工程统一制定同步的工程实施进度计划，避免重复开发建设，使各系统集成开发与安装部署能够有效衔

接，最终形成完整的兰家沱一大埠街智能航道。

2) 加强外部协作：需尽早与相关单位部门进行沟通，研究确立长期进行数据共享交换的合作机制，签订合作协议，并出台正式文件、确定责任部门，保障数据交换共享的安全、可靠。

3) 建立系统长效运行机制：围绕资源共享、协同联动、扁平化管理等理念，逐步推进各级机构的管理机制变革，以将智能航道国内外最新的研究成果结合起来，不断摸索，不断总结经验，逐步提升。

参考文献：

[1] 长江航道局. 智能航道专题研究[R]. 武汉: 长江航道局, 2012.
 [2] 杨品福, 陈先桥, 初秀民. 长江航道测量信息化处理相关技术研究[J]. 中国水运, 2011(11): 79-81.
 [3] 殷岳, 梅深. 大运河无锡段建成首条“感知航道”[J]. 水道港口, 2011(5): 335.
 [4] 杨本, 李芬, 谭士国. Zigbee技术在航道管理中的应用[J]. 中国水运, 2012(1): 23-25, 39.

(本文编辑 郭雪珍)