

# 基于调速性能仿真的地铁隧道防淹门 启闭装置设计优化

尚文涛 卢屹东 邢善鹏 王淑敬

(中国建筑标准设计研究院有限公司, 100048, 北京//第一作者, 助理工程师)

**摘要** 对落闸式防淹门启闭装置的应用情况进行了分析, 优化设计了卷扬式启闭机的结构形式, 并在地铁隧道工程中得以应用。针对防淹门快速落闸的时速问题, 通过 AMESim 仿真平台耦合建立了机械离心式调速器的重力加速模型、离心力模型和摩擦力矩模型, 对启闭装置的调速性能进行了仿真研究, 为调速器的参数化设计提供了理论依据和研究方法。

**关键词** 地铁隧道; 落闸式防淹门; 启闭机; 离心式调速器  
**中图分类号** U453.6<sup>+</sup>1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.032

## Optimum Design of Subway Tunnel Floodgate Hoist Based on Speed Regulation Performance Simulation

SHANG Wentao, LU Yidong, XING Shanpeng,  
WANG Shujing

**Abstract** The application of the hoist for drop-out floodgate is introduced, the structural form of winch hoist is optimized, which has been applied to subway tunnel project. Aiming at the speed problem of floodgate falling, the gravity acceleration model of mechanical centrifugal governor, the centrifugal force model and the friction torque model are established through the AMESim simulation platform coupling, aiming to simulate the speed regulation performance of the hoist. The result provides a theoretical basis and research method for the parametric design of centrifugal flywheel governor.

**Key words** metro tunnel; drop-out floodgate; hoist; centrifugal flywheel governor

**Author's address** China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., 100048, Beijing, China

随着我国城市轨道交通技术的迅速发展, 地铁隧道下穿河流、湖泊的规划设计屡见不鲜。考虑到城市轨道交通兼顾人防及地下隧道防水灾的特殊要求, 具备防淹、抗毁、密闭三重功能的防淹机械设

备, 可以迅速消减突发水患对隧道及地下车站的灾难损失。因此, 防淹门的设计在城市轨道交通工程的建设中发挥了重要作用。落闸式防淹门快速下降时, 钢丝绳对卷筒的负载力矩由转动阻力矩变为卷筒提供动力的超越负载力矩, 在实际应用中既要满足快速落闸的需求, 又不会对轨道产生冲击破坏。因此, 对落闸式防淹门启闭装置的调速性能研究显得尤为重要。文献[1]通过试验结果绘制了调速器的调速特性曲线, 分析表明调速器的工作稳定性与调速率的关系随着转速变化而不同; 文献[2]研究了机械离心式转速敏感元件的迟滞特性, 结果表明摩擦力和弹簧刚度差是影响迟滞性的重要因素; 文献[3]建立了单轨吊机车离心释放器的动力学模型, 分析了不同初始角位移对滑动轴伸出位移的影响。

本文提出了地铁隧道落闸式防淹门启闭装置的优化结构, 耦合建立了调速器的重力加速模型、离心力模型及摩擦力矩制动模型, 对防淹门的快速落闸调速性能进行了仿真, 为调速器的参数化设计提供了理论依据和研究方法。

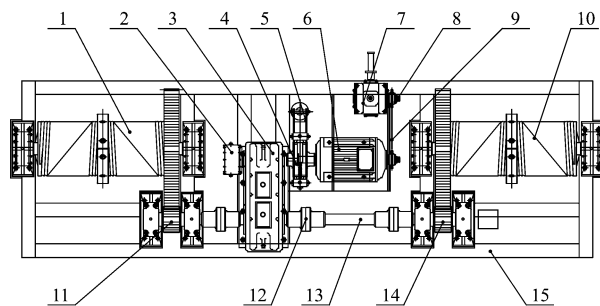
## 1 落闸式防淹门启闭装置的优化设计

地铁隧道落闸式防淹门依靠启闭装置可实现闸门体的升降。既有工程中防淹门的启闭装置一般分为卷扬式和电动葫芦式两类。电动葫芦式启闭装置安装在顶板上, 闸门开启时需要满足车辆运营的限界要求, 受起升极限位置制约, 设备机房净空要求较高; 紧急状态时手动关闭较为困难, 维护成本亦较高; 两台电机驱动的中间传动轴较长, 设备容易振动且对传动轴的疲劳寿命要求严格。卷扬式启闭装置可以节省机房净高, 设计采用单电机集中驱动, 有利于解决双吊点同步振动、维修不便等问题, 在隧道空间内安装更为实用。

目前, 卷扬式启闭机大多选用 QPQ 型的标准设

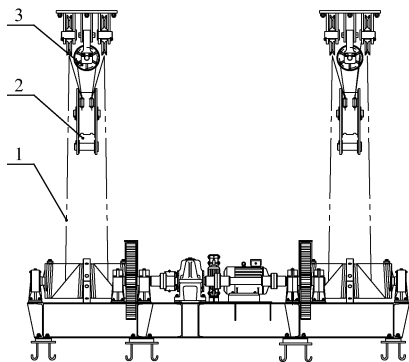
备,设备布置相对复杂但不紧凑,同时在起重质量较大的闸门时,启闭速度较低,往往难以满足孔口高度较大的闸门快速闭门的时间要求。SL 41—2011《水利水电工程启闭机设计规范》明确规定了闸门快速关闭孔口时接近底部门槛的速度不大于5 m/min,同时该规范要求电动开门时间和关门时间均不应大于1.5 min<sup>[4]</sup>。因此,需要加装调速器作为限速装置,并采用非标设计的卷扬机结构进行优化,最终本文采用双吊点卷扬式、双联动滑轮组、单层缠绕双卷筒和开式齿轮传动的组合结构型式<sup>[5]</sup>,如图1所示。卷扬式启闭机在地铁车站内的布置方案如图2所示。优化后的方案几乎不增加设备造价,占据空间较小,大幅降低了土建成本、设备安装和维护保养费用,且具有调速功能的防淹门关闭时对地铁轨道和道床起到一定的缓冲保护。优化后

的防淹门启闭装置具有节约投资和安全可靠的特点,在今后的地铁工程中应用将更为广泛,所带来的经济效益和社会效益更加突出。

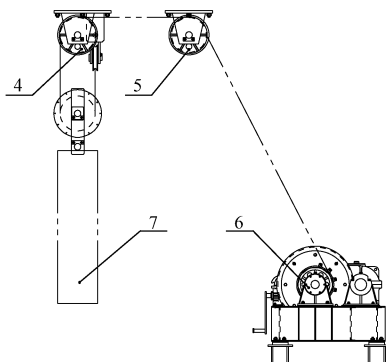


注:1——左卷筒;2——调速器;3——齿轮箱;4——制动轮;5——制动力器;6——电动机;7——手摇装置;8——链轮;9——链条;10——右卷筒;11——左小齿轮;12——联轴器;13——同步轴;14——右小齿轮;15——机架

图1 卷扬式启闭机的结构型式



a) 主视图



b) 右视图

注:1——钢丝绳;2——动滑轮;3——平衡滑轮;4——定滑轮1;5——定滑轮2;6——卷扬式启闭机;7——闸门门体

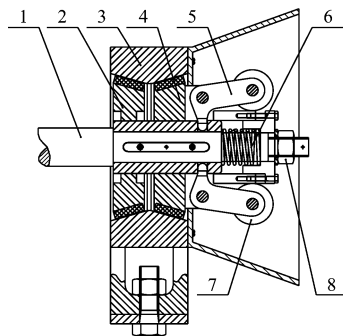
图2 卷扬式启闭机在地铁车站内的布置方案

## 2 快速落闸调速性能分析

图3为LT-200型双锥形机械离心式调速器示意图。当防淹门执行关闭指令时,通过直流电源打开制动器抱闸,闸门门体在重力作用下,克服启闭机的阻力加速下落。当转轴的速度达到离心式调速器的初始速度时,配重片的离心力克服弹簧的阻力,在角形杠杆的作用下带动装有导向键的滑动轴平移,与滑动轴相连的摩擦盘与固定支座上的锥形制动盘通过摩擦力矩来降低轴的转速,当摩擦力矩与转动动力矩平衡时实现限速。

### 2.1 机械离心式调速器的数学模型

图4为角形杠杆受力分析图。图4中,假设配重片的质心位于点A,忽略销轴处的摩擦力,此时沿轴线方向的水平拉(压)力 $F_z$ 为:



注:1——转动轴;2——左摩擦盘;3——锥形制动盘;4——右摩擦盘;5——角形杠杆;6——调节弹簧;7——配重片;8——锁紧螺母

图3 LT-200型双锥形机械离心式调速器示意图

$$F_z = Zm \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 \times [R - a \cos(\theta + \alpha)] \times \frac{a \sin(\theta + \alpha)}{b \cos(\theta - \beta)} \quad (1)$$

式中:

$Z$ ——角形杠杆的数量;

$m$ ——配重片在质心  $A$  处的质量;

$n$ ——杠杆的转速;

$\theta$ ——杠杆的旋转角度,  $\theta \approx 180y/\pi b$ ,  $y$  为轴向

位移;

$a, b$ ——角形杠杆的力臂长度;

$\alpha, \beta$ ——初始力臂与转轴法线的夹角;

$R$ ——角形杠杆的旋转半径。

双锥形制动盘摩擦面结合所需的轴向压力  $F_z$  与摩擦力矩  $T_c$  之间的计算关系如下<sup>[6]</sup>:

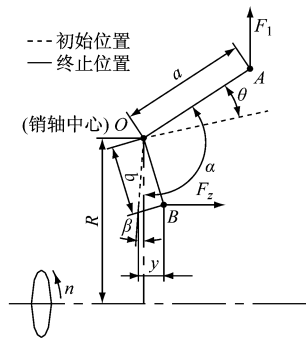
$$T_c = \frac{F_z \mu D_s (\cos \gamma - \mu \sin \gamma)}{(\sin \gamma + \mu \cos \gamma)} \quad (2)$$

式中:

$\gamma$ ——锥面倾斜角;

$\mu$ ——摩擦系数,  $\mu = \tan \gamma$ ;

$D_s$ ——摩擦面的平均直径。



注:  $F_1$  为配重片在质心  $A$  处所受的作用力

图4 角形杠杆受力分析图

## 2.2 机械离心式调速器的仿真模型

通过 AMESim 仿真平台建立防淹门启闭装置的离心力模型、闸门重力加速模型及制动摩擦力矩模型,如图5所示。主要设计参数如下:  $a = 85 \text{ mm}$ ,  $b = 42.5 \text{ mm}$ ,  $R = 74 \text{ mm}$ ,  $D_s = 185 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 91.5^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\gamma = 23^\circ$ ,  $m = 1.3 \text{ kg}$ ,  $K$  (调节弹簧的刚度) =  $1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ 。

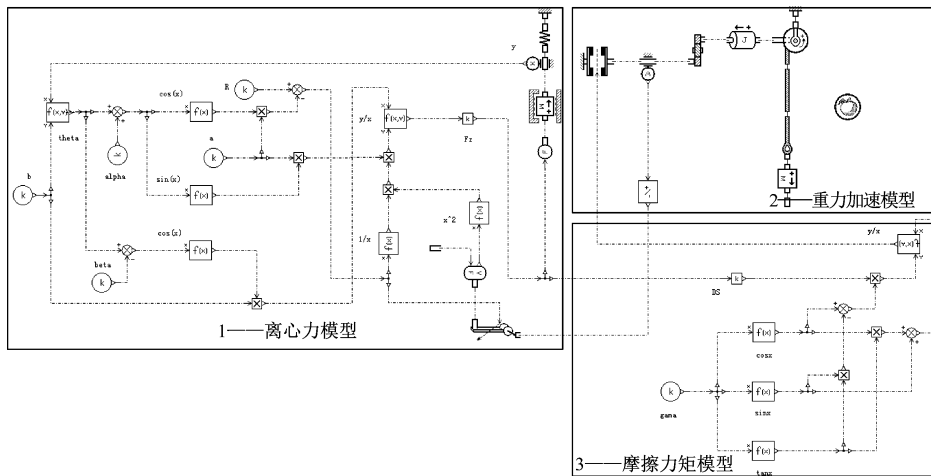


图5 机械离心式调速器计算模型

## 2.3 仿真结果分析

从闸门降落速度和位移曲线(见图6)可知,闸门下降过程大致可分为3个阶段:

(1)在  $0 \sim 0.03 \text{ s}$  内,闸门自由下落。

(2)受锥形摩擦盘的阻尼作用,下落加速度阶跃性减小,最后摩擦力矩与转动力矩相互制衡,下降速度波动幅度逐渐变小。

(3)当闸门降落时间为  $0.3 \text{ s}$  时,下落速度逐渐稳定在  $0.08 \text{ m/s}$ ;闸门在  $5 \text{ s}$  内降落位移达到  $0.033 \text{ m}$ ,整个下落动作用时约  $63.3 \text{ s}$  (以 FYM-J3845 型防淹门、闸门降落总高度为  $4.7 \text{ m}$  计算),满足规范要求;卷筒转速变化趋势与闸门降落趋势一致,最终

稳定在  $3.85 \text{ r/min}$ 。

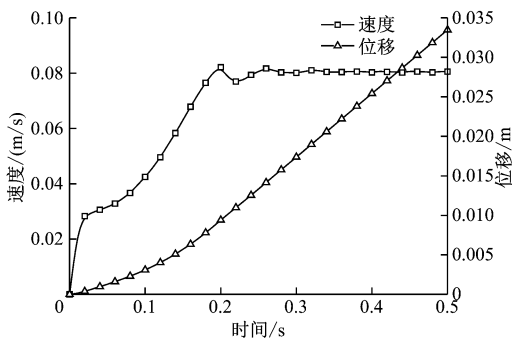


图6 闸门降落速度和位移变化曲线

图7为  $K$  对闸门平衡速度的影响曲线。由图7

可知,当增大 $K$ 时,闸门开始达到平衡速度的时间会缩短,但由初始状态进入平衡速度时的波动较大,平衡速度略有增加。相反地,当减小 $K$ 时,闸门会延长平衡时间,由初始状态进入平衡速度时的波动变小,最终的平衡速度会略有减小。

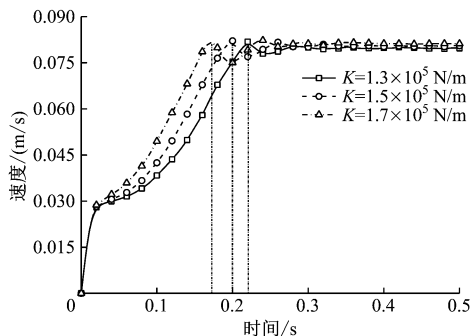


图7  $K$ 对闸门平衡速度的影响曲线

由此可见,当 $K$ 增大时,角形杠杆克服弹簧阻力实现轴向平移的轴向压力会增大,此时需要较大的离心力来维持平衡;同时,在达到平衡状态时,卷筒的转速会提高,闸门下降的平衡速度随之增大。

图8模拟了调速器不同配重片质量对轴向位移的影响曲线。由图8可知,闸门开始下降时轴向位移线性急剧增大,此时配重片的质量对力矩平衡时的轴向位移影响不大,但离合摩擦阶段达到平衡状态的时间差别较大。具体表现为:配重片质量越小,相应地在离合摩擦阶段的轴向位移变化幅度亦较小,因此达到平衡状态的时间越短。

### 3 结论

(1) 对卷扬式启闭机优化为双联动滑轮组、单层缠绕双卷筒、单电机同步集中驱动、开式齿轮传动的组合结构型式。应用该启闭装置的落闸式防淹门可以较好地满足地铁隧道区间防淹的工程需求。

(2) 加装机械离心式调速器可以平衡防淹门落

(上接第66页)

进行仿真计算,对仿真结果进行分析和校核,以此验证设计结构的可靠性。

### 参考文献

- [1] 郑宝奎,吴媚蕊,郑建坤,等. 中低速磁悬浮车辆限界分析与计算[J]. 机车电传动,2013(3):26.
- [2] 赫宏联,栗木功,张海燕. 中低速磁悬浮车辆装配工艺及优化

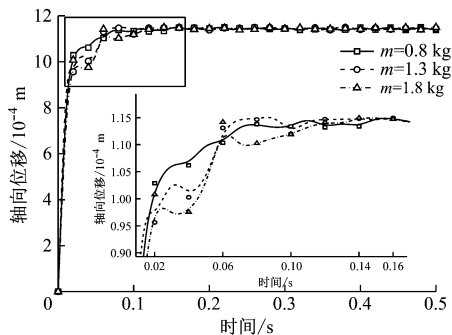


图8 调速器不同配重片质量对轴向位移的影响曲线

闸产生的超越负载力矩,有效地解决防淹门快速落闸的时间限制和速度问题。耦合建立的调速器重力加速模型、离心力模型及摩擦力矩模型仿真为调速器的参数化设计提供了理论依据和研究方法。

(3) 调速器的仿真研究表明, $K$ 对平衡速度和平衡时间影响较大,当增大 $K$ 时,闸门达到平衡的速度会增大,平衡时间会缩短;配重片的质量对轴向位移影响不大,但影响摩擦力矩与转动力矩达到平衡的时间,配重片质量越小,达到平衡状态的时间越短。

### 参考文献

- [1] 关玉琴,王俊森,牛海霞,等. 机械式调速器的工作与调速特性分析[J]. 内蒙古农业大学学报,2012(增刊1):164.
- [2] 白晓,负超,白靖华. 机械离心式转速敏感元件的迟滞特性建模仿真研究[J]. 机电工程,2015,32(9):1156.
- [3] 齐辉,张凡,陈为阳,等. 单轨吊机车离心释放器动力学仿真[J]. 煤矿机械,2015,36(1):131.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁隧道防淹门: CJT 453—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 李丽丽. 启闭机总体设计方案选择及其双吊点同步技术[J]. 水利电力机械,2007,29(12):48.
- [6] 闻邦椿. 机械设计手册(第3卷)[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2010.

(收稿日期:2017-07-17)

[J]. 铁道车辆,2012(9):8.

- [3] CENELEC. 铁路设施——铁路车辆车身的结构要求: EN 12663—2010[S]. Brussels: CENELEC, 2010.
- [4] IEC. 铁路应用——铁道车辆设备——冲击和振动试验: IEC 61373—2010[S]. Geneva: IEC, 2010.

(收稿日期:2018-06-13)