

梯级式爬楼梯装置设计与稳定性研究

韩瑞刚

(太原学院 机械系, 山西 太原 030032)

摘要 针对星轮式爬楼梯装置稳定性欠佳的情况,提出了梯级式爬楼梯装置的构思。对装置进行设计并分析了导轨偏心距 e 对其运动的影响,对 e 分别取6 mm、10 mm和15 mm时3种装置的运行轨迹进行SolidWorks仿真,验证了其运行的稳定性。制作样机并试验测定了上述装置运行的稳定性。结果显示,梯级式爬楼梯装置运行总体平稳,其稳定性与偏心距的大小有较大关系,不稳定性随偏心距的增大而增强。因此,设计此类装置时,在满足使用要求的前提下,偏心距应选用较小值。

关键词 梯级 爬楼梯装置 偏心距 稳定性分析

Design and Stability Study of Stepped Climbing Stair Device

Han Ruigang

(Mechanical Department, Taiyuan Institute, Taiyuan 030032, China)

Abstract In view of the poor stability of the star wheel type stair climbing device, the conception of step climbing staircase device is put forward. The device is designed and the influence of guide rail eccentricity e on its motion is analyzed. The running track of the three devices when e is 6 mm, 10 mm and 15 mm is simulated by SolidWorks to verify the stability of their operation. The prototype is made and its running stability is tested. The results show that the step climbing stair device runs smoothly and the stability of the device has a great relationship with the eccentricity, instability increases with the increase of eccentricity. Therefore, when designing this kind of device, the eccentricity should be chosen to be smaller on the premise of meeting the use requirements.

Key words Step Climbing stair device Eccentricity Stability analysis

0 引言

爬楼梯装置通常分为履带式 and 星轮式两种。英国伯诺曼德公司开发的履带式爬楼梯车,自身质量为34 kg,可爬最大坡度为 35° 的楼梯,具有运行平稳的特点,但易对楼梯造成损坏,其使用受到限制^[1-4]。长春工业大学设计的星轮式装置质量为47 kg,可爬楼梯最大坡度为 35° ,翻越能力较强,但运行时波动较大,稳定性欠佳^[5-8]。

自动扶梯是应用较广的向上或向下倾斜输送物体的设备^[9-12],其通过梯级运动实现物体(楼梯)移动(图1(a)),假如楼梯固定而扶梯是活动的,利用楼梯的反作用力,扶梯就可沿楼梯移动,实现爬楼功能且运行平稳。基于上述分析,本文中提出了梯级式爬楼梯装置的构思。

1 梯级式爬楼梯装置组成与原理

该装置主要由梯级、梯链、导轨、支架、主从动链轮、电机等组成,如图1(b)所示。梯级主销与链条销孔联接,副销带套筒安装在导轨上。当梯链带动梯级运动时,副销沿导轨移动,如图2(a)所示。主动链轮通过链条和支架与从动链轮联接,两侧导轨通过钢板固连,电机轴通过导轨上的支撑座与链轮联接,如图2(b)所示。

当电机驱动主动链轮以图1(b)所示方向转动时,链条带动梯级一起运动。由于受到楼梯台阶的反作用力,装置可以向上移动,从而实现上楼动作,反之,亦可实现下楼动作。

2 梯级式爬楼梯装置参数设计

2.1 梯级设计

通常,居民楼梯台阶的高度 H 取值范围为150~

180 mm, 坡度 $\lambda \leq 38^{\circ}$ ^[13]。此处楼梯高度 H 为 150 mm, 坡度 λ 为 35° , 如图 1(b) 所示。考虑装置的通过性梯级高度 x 应稍大于 H , 这里 x 取值为 155 mm, 宽度 $y = x \cot \lambda = 155 \times \cot 35^{\circ} = 221$ mm, 主销和副销间距为 L , 如图 3 所示。

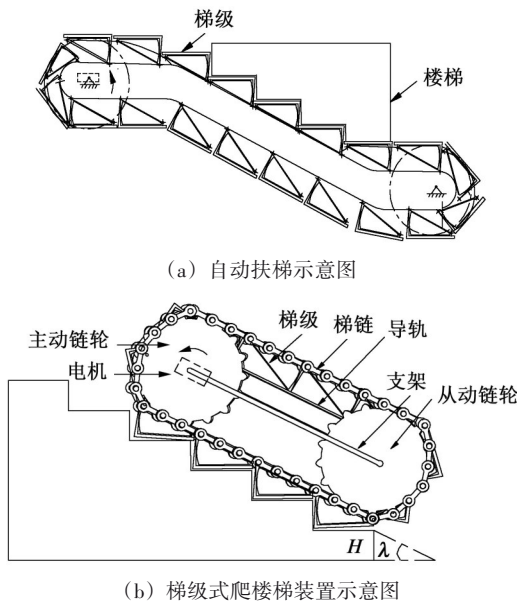


图 1 自动扶梯和梯级式爬楼梯装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of escalator and step climbing stair device

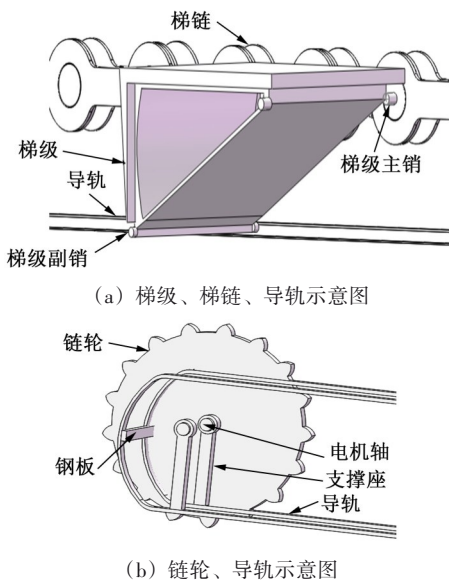


图 2 梯级、梯链、导轨示意图和链轮、导轨示意图
Fig. 2 Schematic diagram of step, chain, guide rail and schematic diagram sprocket, guide rail

2.2 链传动设计

爬楼梯装置设计运行速度为 0.4~0.5 m/s, 参照自动扶梯设计范例^{[14][11-15]}, 梯链设计速度 $v \leq 0.5$ m/s 时, 链轮齿数 $z \geq 16$, 链条节距 p 值范围为 66.675~135 mm。根据该装置大致尺寸, 初选链条链号 48A, 即节距 p 为 76.2 mm, 链轮齿数 z 为 17, 则链轮分度圆直径为

$$d = p / \sin(180^{\circ} / z) = 76.2 / \sin(180^{\circ} / 17) \approx 423 \text{ mm}$$

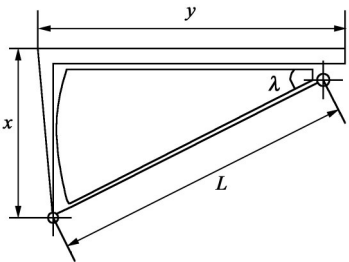


图 3 梯级尺寸示意图
Fig. 3 Schematic diagram of step size

梯级基距 L 的长度等于梯链节距 p 的 3 倍, 中心距 a 为 3 倍梯级基距, 总链节数 L_p 等于 12 个基距链节数, 即

$$\begin{aligned} L &= 3 \times 76.2 = 228.6 \text{ mm} \\ a &= 3L = 3 \times 3 \times p \approx 686 \text{ mm} \\ L_p &= 12 \times 3 = 36 \\ \text{链轮转速 } n &= 20 \text{ r/min, 实际链速为} \\ v &= (n/60) \times \pi \times p / 1000 = (20/60) \times 17 \times \\ &\quad 76.2 / 1000 = 0.43 \text{ m/s} \end{aligned}$$

符合设计要求^[15]。

2.3 导轨设计

2.3.1 导轨尺寸计算

由图 1(b) 所示可知, 转向部梯级主销的回转直径等于链轮分度圆直径, 即

$$\begin{aligned} d_1 &= d = 423 \text{ mm} \\ r_1 &= d_1 / 2 = 423 / 2 = 216.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

由图 4 所示可知, 副销导轨直径为 $d_2 = d_1 - x = 423 - 155 = 268$ mm, 其中, x 为梯级高度。

$$r_2 = d_2 / 2 = 268 / 2 = 134 \text{ mm}$$

该装置梯路由上下两个分支和前后两个转向部分组成(图 4)。

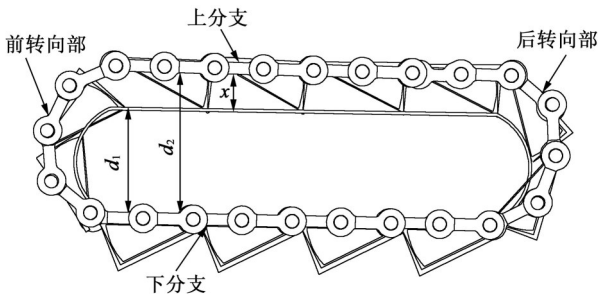
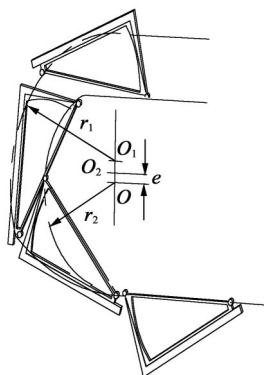


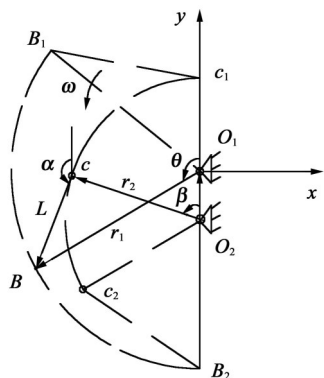
图 4 梯路示意图
Fig. 4 Schematic diagram of ladder

当装置沿楼梯前行时, 前转向部链条带动梯级从上分支转向下分支时, 梯级间的间隙会变小甚至卡滞, 如图 5(a) 所示。因此, 需将副销导轨回转中心从原回转中心 O 升到 O_2 , 二者之间的距离即偏心

距离 e 。



(a) 前转向部运动示意图



(b) 前转向部机构简图

图5 偏心距及运动示意图

Fig. 5 Eccentricity and motion schematic diagram

2.3.2 偏心距对梯级转向的影响

梯级沿转向部转动时,主销和副销做圆周运动,因此,可将其简化为图5(b)所示的双曲柄机构 O_1BCO_2 中的连杆 BC , 曲柄 O_1B 长度为梯级主销中心旋转半径 r_1 且以链轮角速度 ω 转动, 曲柄 O_1B 与 y 轴夹角 $\theta = \omega t$; 曲柄 CO_2 长度为梯级副销中心旋转半径 r_2 , 连杆 BC 长度为梯级基距 L , 与铅垂方向的夹角为 α 、角速度为 ω_1 ; 梯级副销中心与回转中心连线 CO_2 和铅垂方向的夹角为 β 、角速度为 ω_2 ; 机架 O_1O_2 长度为 $r_2 - r_1 - x - e$ 。根据图5(b)所示,可列出位置向量方程为

$$r_2 + L = r_1 + (r_2 - r_1 - x - e) \quad (1)$$

式(1)等同于式(2), 即

$$\begin{cases} r_2 \cos \beta + L \cos \alpha = r_1 \cos \theta + r_2 - r_1 - x - e \\ r_2 \sin \beta + L \sin \alpha = r_1 \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式(2)对时间2阶求得

$$\begin{cases} -r_2 \delta_2 \sin \beta - r_2 \omega_2^2 \cos \beta - L \delta_1 \sin \alpha - \\ r_2 \omega_1^2 \cos \alpha = -r_1 \omega^2 \cos \theta \\ r_2 \delta_2 \cos \beta - r_2 \omega_2^2 \sin \beta + L \delta_1 \cos \alpha - \\ r_2 \omega_1^2 \sin \alpha = -r_1 \omega^2 \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

可以求得梯级的角加速度为

$$\delta_1 = \frac{-r_2 \omega_2^2 - L \omega_1^2 \cos(\alpha - \beta) + r_1 \omega^2 \cos(\theta - \beta)}{L \sin(\alpha - \beta)} \quad (4)$$

其中,

$$\beta = \arccos \frac{A \pm B \sqrt{1 - A^2 + B^2}}{1 + B^2}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{r_1 \sin \theta - r_2 \sin \beta}{L}$$

$$A = \frac{(r_1 \cos \theta + e)^2 + (r_1 \sin \theta)^2 + r_2^2 - L^2}{2(r_1 \cos \theta + e)r_2}$$

$$B = \frac{r_1 \sin \theta}{r_1 \cos \theta + e}$$

$$\omega_1 = \frac{r_1 \omega \sin(\theta - \beta)}{L \sin(\alpha - \beta)}, \omega_2 = \frac{r_1 \omega \sin(\theta - \alpha)}{r_2 \sin(\beta - \alpha)}$$

已知 $r_1=216.5 \text{ mm}$, $r_2=134 \text{ mm}$, $\omega=2\pi n/60=2\pi \times 20/60=2.1 \text{ rad/s}$, $L=228.6 \text{ mm}$ 代入式(4)中得

$$\delta_1 = \frac{64e + \cos(t/1.8\pi)}{900 \sin(t/1.8\pi)}$$

通过编写 Matlab 程序可以得到 δ_1 、 e 、 t 的关系, 如图6所示。

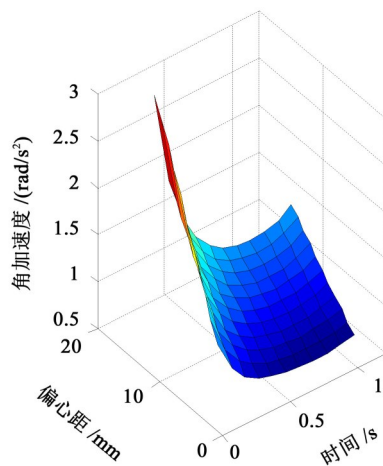


图6 梯级角加速度 Matlab 求解图

Fig. 6 Matlab solution diagram of step angular acceleration

从图6中可以看出,梯级的角加速度 δ_1 随着 e 的增加而增大,装置稳定性会变差。因此,选取 e 值时,在满足设计要求的前提下,应选用较小值。

由梯级、梯链和导轨等零部件组成的梯级式爬楼梯装置如图7所示。

3 装置爬楼梯过程仿真与样机试验

3.1 爬楼过程仿真

对 SolidWorks 软件建立的模型进行仿真，可以分析装置设计的可行性。如图 8(a)所示，在电机驱动链轮作用下，爬楼梯装置前转向部开始靠近第 6 阶台阶；下分支最后一个梯级逐渐离开第 2 阶台阶，如图 8(b)所示；在链轮的继续带动下，梯级由于受到台阶反作用力，整个装置向下一阶台阶移动，如图 8(c)所示；最后，前转向部的梯级与第 6 阶台阶完全接触，下分支最后一个梯级完全离开第 2 阶台阶，如图 8(d)所示。

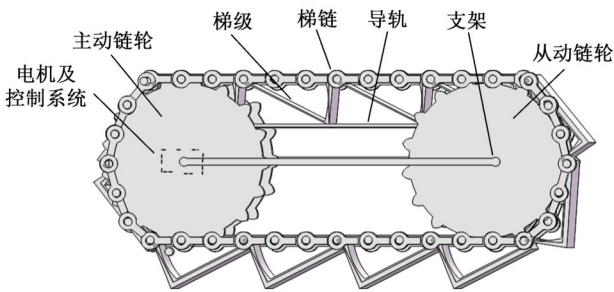


图 7 梯级式爬楼梯装置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of step climbing stair device

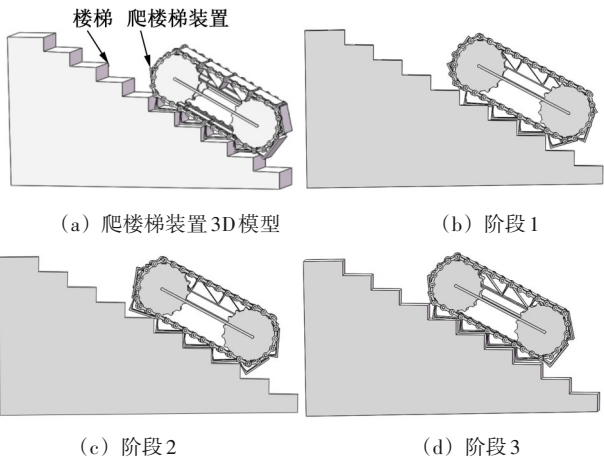


图 8 爬楼梯装置 3D 模型和上楼过程示意图
Fig. 8 3D model of stair climbing device and simulation diagram of stair climbing process

3.2 不同偏心距装置的稳定性研究

借助 SolidWorks 仿真模块功能获得装置轨迹图，可以分析其上楼时的稳定性。根据工程实践经验，一般 e 值取值范围为 6~15 mm^{[14]18-21}，此处 e 分别取 6 mm、10 mm、15 mm 进行研究，其轨迹图分别如图 9 所示。从图 9 中可以看出，3 种偏心距装置的轨迹都沿楼梯斜边方向延伸， $e=6$ mm 的轨迹图整体上近似于一条直线， $e=10$ mm 的轨迹图有些波动， $e=15$ mm 的轨迹图有波动且开始阶段波动较大，说明随着 e 的增大，稳定性变差，与理论分析结果吻合。

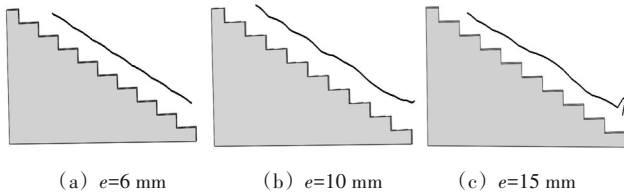


图 9 不同偏心距爬楼梯装置运动轨迹仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of movement track of different eccentricities stair climbing device

3.3 样机试验

爬楼梯装置质量为 30 kg，对其进行受力分析。如图 10 所示。其中， $\alpha = \lambda = 35^\circ$ ，得

$$G' = G \sin \alpha = Mg \sin \alpha =$$

$$30 \times 9.8 \times \sin 35^\circ \approx 169 \text{ N}$$

由于 $F = G'$ ，则所需电机功率为

$$P = Fv = 169 \times 0.43 \approx 0.07 \text{ kW}$$

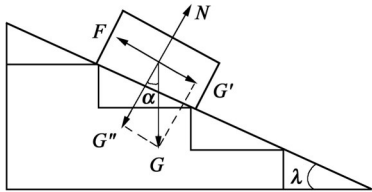


图 10 爬楼梯装置受力图

Fig. 10 Stress diagram of stair climbing device

装置样机按 1:3 比例制作，所需功率则为 0.07/3≈0.023 kW，由 2 台直流减速电机(无线遥控形式控制)分别驱动两个主动链轮，测试系统由测试块、传感器和计算机组成如图 11 所示，采样频率为 25 Hz，采样时间为 15 s，传感器将采集到的位移数据传给计算机进行处理，装置在 3 种情况下的运动轨迹曲线分别如图 12 所示。



图 11 梯级式爬楼梯装置试验实物图

Fig. 11 Test physical diagram of stair climbing device

从图 12 中可以看出， $e=6$ mm 的轨迹图整体上是直线， $e=10$ mm 的轨迹图有波动， $e=15$ mm 的轨迹图波动较大，其与仿真结果相似。

以上情况说明，导轨偏心距的大小影响爬楼梯装置稳定性， e 值若增大，稳定性会变差。

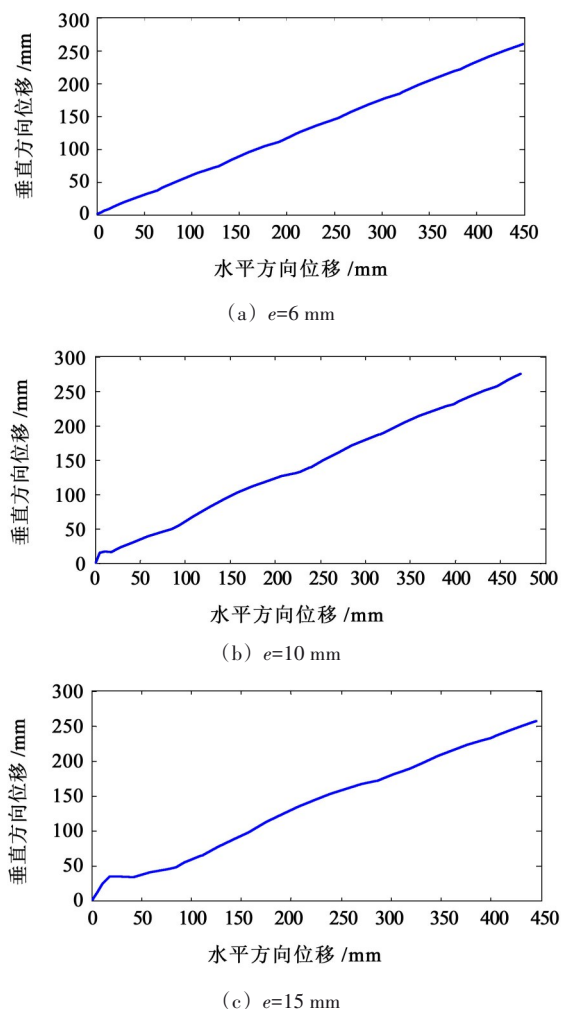


图 12 不同偏心距爬楼梯装置运动轨迹图

Fig. 12 Running trace diagram of different eccentricities stair climbing device

4 结论

(1) 结合自动扶梯原理, 设计出一套运行速度 $v = 0.43\text{ m/s}$ 的爬楼梯装置。从理论上分析了偏心距 e 对装置的运行稳定性影响, 即 e 值若增大, 稳定性会变差。通过 SolidWorks 软件仿真功能分析了偏心距 e 分别为 6 mm 、 10 mm 和 15 mm 时装置的运行稳定性, 仿真结果与理论分析吻合。

(2) 通过爬楼梯装置样机试验, 验证了偏心距对其运行稳定性的影响, 其与仿真结果相似。因此, 设计此类装置时, 在满足使用要求的前提下, 应选用较小 e 值。以上研究可以为设计同类装置提供参考。

参 考 文 献

- [1] GE X J, SUN Y, WANG Z H, et al. A single source switched-capacitor multilevel inverter for magnetic coupling wireless power transfer systems[J]. Electrical Engineering, 2019, 101(4): 1083-1094.
- [2] HAMAI S, OKAZAKI K, SHIMOTO T, et al. Continuous sagittal radiological evaluation of stair-climbing in cruciate-retaining and posterior-stabilized total knee arthroplasties using image-matching techniques[J]. The Journal of Arthroplasty, 2014, 30(5): 864-869.
- [3] RYAN J, LYON K, WEBB O J, et al. Promoting physical activity in a low socioeconomic area: results from an intervention targeting an intervention targeting stair-climbing[J]. Preventive Medicine, 2011, 52(5): 352-354.
- [4] KOSTER G, LEHMBERG D, KGERTA A. Walking on stairs: experiment and model[J]. Physical review, 2019, 100(2-1): 191-199.
- [5] 郭化超. 电动爬楼梯轮椅优化设计与稳定性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2014: 13-45.
- Guo Huachao. Optimal design and stability research of electric stair-climbing wheelchair[D]. Changchun: Changchun Industrial University, 2014: 13-45.
- [6] 王占礼, 郭化超, 陈延伟, 等. 爬楼梯轮椅翻转爬升传动系统设计与仿真分析[J]. 机械传动, 2014(2): 78-82.
- WANG Zhanli, GUO Huachao, CHEN Yanwei, et al. Design and simulation of wheelchair turnover climbing transmission system for climbing stairs[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014(2): 78-82.
- [7] 王光建, 蒋汉军, 褚志刚. 新型双曲柄式可调侧隙精密行星传动装置参数设计与仿真[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 11-18.
- WANG Guangjian, JIANG Hanjun, CHU Zhigang. Parameter design and simulation of new double crank precision planetary transmission with adjustable side clearance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 11-18.
- [8] 于苏洋, 王挺, 李小凡, 等. 一种新型轮椅机器人爬越楼梯过程倾翻稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2740-2745.
- YU Suyang, WANG Ting, LI Xiaofan, et al. Stability analysis of a new wheelchair robot during climbing stairs[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(22): 2740-2745.
- [9] 史信芳, 蒋庆东, 李春雷. 自动扶梯[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014(5): 10-57.
- SHI Xinfang, JIANG Qingdong, LI Chunlei. Escalator[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014(5): 10-57.
- [10] 梁敏健, 戚政武, 杨明祥. 一种自动扶梯运行参数快速精确检测方法的设计与实现[J]. 中国特种设备安全, 2016, 32(4): 29-32.
- LIANG Minjian, QI Zhengwu, YANG Mingxiang. The design and implementation of a fast and accurate detection method for escalator operating parameters[J]. China Special Equipment Safety, 2016, 32(4): 29-32.
- [11] 杨洋. 基于 PLC 的自动扶梯节能化设计[J]. 应用能源技术, 2017(1): 43-46.
- YANG Yang. Energy saving design of escalator based on PLC[J]. Applied Energy Technology, 2017(1): 43-46.
- [12] 赵俊天, 刘德旭, 刘雨, 等. 含间隙滚子输送链传动振动特性分析与仿真[J]. 应用力学学报, 2017, 34(6): 1166-1169.
- ZHAO Juntian, LIU Dexu, LIU Yu, et al. Analysis and simulation of vibration characteristics of roller conveying chain drive with gap[J]. Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(6): 1166-1169.
- [13] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范: GB50016—2014(2018版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 5-39.
- Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of China. Code for fire protection design of buildings: GB50016—2014(2018 version)[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018: 5-39.
- [14] 范进泉. 自动扶梯梯路导轨系统的设计与研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017: 10-20.