

基于经典接触模型的筹码票发售装置优化设计

孟祥智,徐骏善,王冠

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:以筹码票运动稳定时长及弹跳轨迹为评判依据,分析筹码式地铁单程票发售装置的轨道宽度、长度、角度等因素对筹码票处理效率的影响,利用 ADAMS 软件经典接触模型对单程票运动轨迹进行动力学仿真分析。结果表明:随着轨道长度、轨道宽度或轨道倾角的增加,筹码票处理效率均呈现先增加后减小的规律。当轨道长度为 55 mm、轨道宽度为 40 mm、轨道倾角为 45° 时筹码票运行稳定时长最短,并能有效解决卡票、漏票等问题。该设计可为售票机的设计与研发提供参考。

关键词:地铁;筹码票;ADAMS;经典接触模型

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0111-04

Optimal Design of Token Ticket Vending Machine Based on Classic Contact Model

MENG Xiangzhi, XU Junshan, WANG Guan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the stable movement time and the bounce track of the token ticket, this paper analyzes the influence of track width, length, angle and other factors of the counter subway one-way ticket selling device on the processing efficiency of the token ticket. The classical contact model of ADAMS software is used to conduct dynamic simulation analysis on the movement track of the single ticket. The results show that with the increase of track length or track width or track inclination, the processing efficiency of the token ticket increases first and then decreases. When the track length is 55 mm with 40 mm track width and 45° track inclination, the stable running time of the token ticket is the shortest and can effectively solve the problems of stuck tickets, missing tickets etc., which provide reference for the design and development of ticket machines.

Keywords: subway; token ticket; ADAMS; classical contact model

0 引言

随着城市经济的发展和区域一体化进程的加快,城市人口与城区面积都出现了快速扩张^[1],城市轨道交通系统在缓解交通压力、改善城市面貌等方面起着举足轻重的作用。在实际运维过程中发现地铁售票机会出现卡票、漏票等问题,严重影响地铁运行效率及乘客的乘车体验。

近年来各学者针对自动售票机的结构进行了大量的结构优化设计研究,东南大学张文谦^[2]运用归纳法、案例分析等方法,统筹调研数据,以用户实际需求为导向,针对性地对地铁售票机的硬件设备以及操作界面进行优化设计,极大地简化了购票刷卡流程,节省了不必要的操作时间。鲁亚明等^[3]对地铁售票机票卡传送机构以及进出钞机构进行优化设计,进一步节约装备制造成本。焦科杰^[4]对筹码式单程票发售机进行研究,对清空回收票箱和废票箱通道延长并进行拆分设计,方便后续地铁票回收箱与补票箱的互换,设计了售票控制系统的电路和软件部分,并做了大量的实验验证系统的可行性和可靠性。以上各学者的研究成果都极大地提升了售票系统服务性能,但针对筹码票运行轨道结构的研究较少,而售票装置是制约系统运行效率及可靠度的重要因素,因此对售票装置的轨道结构进行优化设计具有重要意义。

1 动力学理论分析

1.1 经典接触模型

碰撞接触过程的描述在 ADAMS 中有两种模型,即经典接触模型和接触碰撞模型,前者描述的是刚性碰撞,即碰撞前后结构的位置和形态都不发生变化,碰撞体间的相对运动关系为分离-碰撞-接触;而后者描述的是碰撞过程中力和接触变形之间的本构关系,其碰撞体间的运动关系可以归结为自由运动-接触变形^[5-6];考虑到筹码票和挡板的材料属性,可定义二者为刚性碰撞。因此本文选用经典接触模型进行仿真分析。如图 1 所示,光滑物体 1 与物体 2 即将发生刚性接触, P_1 与 P_2 分别为两物体上的点且两者之间距离最短,故存在如下关系式。

$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{t}_2 = \mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{t}_1 = 0, \mathbf{n}_1 = -\mathbf{n}_2, \mathbf{t}_1 = -\mathbf{t}_2 \quad (1)$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{r}_{OP_2} - \mathbf{r}_{OP_1} \quad (2)$$

$$\mathbf{g} \cdot \mathbf{t}_1 = \mathbf{g} \cdot \mathbf{t}_2 = 0 \quad (3)$$

式中: \mathbf{n}_1 、 \mathbf{n}_2 为单位法向矢量; \mathbf{t}_1 、 \mathbf{t}_2 为单位切向矢量; \mathbf{r}_{OP_1} 、 \mathbf{r}_{OP_2} 为接触点的位置矢量; \mathbf{g} 为相对位移矢量。

则两物体间最短的法向相对距离 g_N 为

$$g_N = \mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_1 = -\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_2 = (\mathbf{r}_{OP_2} - \mathbf{r}_{OP_1}) \cdot \mathbf{n}_1 \quad (4)$$

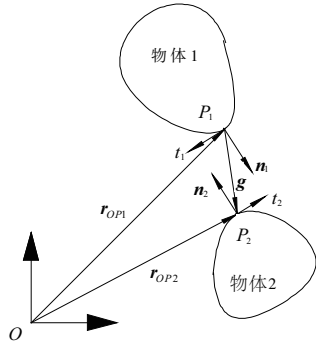


图1 刚体碰撞接触几何关系

因为单位法向矢量 n_1 的长度不变且最临近点相对位移 g 沿 n_1 方向,所以 n_1 与 \dot{n}_1 正交并且 $g \cdot \dot{n}_1 = 0$,故

$$\dot{g}_N = \dot{g} \cdot n_1 = (V_{OP_2} - V_{OP_1}) \cdot n_1 = (J_{TP_2}^T - J_{TP_1}^T) \cdot n_1 \cdot \dot{y} + (V_{P_2} - V_{P_1}) \cdot n_1 = w_N \cdot \dot{y} + \dot{\omega}_N \quad (5)$$

式中: w_N 为广义速度在法向上的投影; $\dot{\omega}_N$ 为非定常系统中相对速度在法向上的投影。

光滑物体不考虑摩擦力时,接触力沿法向方向,接触力 F_C 由公式得

$$F_C = -\lambda_N \cdot n_1 = \lambda_N \cdot n_2 \quad (6)$$

式中 λ_N 为接触力向量。

则两刚体接触碰撞时,接触力运动方程可表示为

$$M(t, y) \cdot \ddot{y} + K(t, y, \dot{y}) = q(t, y, \dot{y}) + (J_{TP_1}^T - J_{TP_2}^T) \cdot F_C$$

将式(6)代入上式可得

$$M(t, y) \cdot \ddot{y} + K(t, y, \dot{y}) = q(t, y, \dot{y}) + w_N \cdot \lambda_N \quad (7)$$

式中: M 为广义质量矩阵; K 为广义陀螺力、离心力和科氏力; q 为主动作用力。

从碰撞开始时刻 t_A 到碰撞结束时刻 t_E 对式(7)积分,当接触时间趋于零时可得

$$\lim_{t_E \rightarrow t_A} \int_{t_A}^{t_E} (M \cdot \ddot{y} + K - q - w_N \cdot \lambda_N) dt = M(\dot{y}_E - \dot{y}_A) - w_N \cdot \lim_{t_E \rightarrow t_A} \int_{t_A}^{t_E} \lambda_N dt = 0 \quad (8)$$

式中: $\Lambda_{N,AE} = \lim_{t_E \rightarrow t_A} \int_{t_A}^{t_E} \lambda_N dt$, $\Lambda_{N,AE}$ 为碰撞过程中产生的冲量。由于压缩过程(AC阶段)中存储的冲量在扩展过程(CE阶段)中只是部分的释放,所以可以将二者关系表示为

$$\Lambda_{N,CE} \geq \varepsilon_p \Lambda_{N,AC} \quad (9)$$

式中 ε_p 为恢复系数,由碰撞扩张过程的能量与压缩过程的能量比来确定:

$$\varepsilon_p = - \frac{\int_{t_C}^{t_E} \lambda_N \cdot \dot{g}_N dt}{\int_{t_A}^{t_C} \lambda_N \cdot \dot{g}_N dt} \quad (10)$$

由式(5)可得,在压缩过程中:

$$\dot{g}_{NC} - \dot{g}_{NA} = w_N^T \cdot (\dot{y}_C - \dot{y}_A) \quad (11)$$

由式(8)可得:

$$\dot{y}_C - \dot{y}_A = M^{-1} \cdot w_N \cdot \Lambda_{N,AC} \quad (12)$$

结合式(11)与式(12)可得

$$\dot{g}_{NC} = w_N^T \cdot M^{-1} \cdot w_N \cdot \Lambda_{N,AC} + \dot{g}_{NA} \quad (13)$$

对于扩张过程而言,当两物体相互接触而不发生穿透的情况下,阻止物体相互穿透所需要的冲量可表示为

$$\Lambda_{N,S} = \Lambda_{N,CE} - \varepsilon_p \Lambda_{N,AC} = 0 \quad (14)$$

同样地,在扩张过程中可得:

$$\dot{g}_{NE} - \dot{g}_{NC} = w_N^T \cdot (\dot{y}_E - \dot{y}_C) \quad (15)$$

$$\dot{y}_E - \dot{y}_C = M^{-1} \cdot w_N \cdot \Lambda_{N,CE} \quad (16)$$

结合式(14)-式(16)可得碰撞后的法向相对速度为

$$\dot{g}_{NE} = w_N^T \cdot M^{-1} \cdot w_N \cdot \Lambda_{N,S} + w_N^T \cdot M^{-1} \cdot w_N \cdot \varepsilon_p \Lambda_{N,AC} + \dot{g}_{NC} \quad (17)$$

碰撞后物体的速度为

$$\dot{y}_E = M^{-1} \cdot w_N \cdot \Lambda_{N,CE} + \dot{y}_C \quad (18)$$

1.2 碰撞分析

对筹码票以一定初速度下落运动直至碰撞到挡板为模型进行算例分析,计算过程中忽略单程票转动带来的影响,仅分析其在轨道平面内的平动,以两物体接触时筹码票的中心作为坐标系原点进行分析,如图2所示。

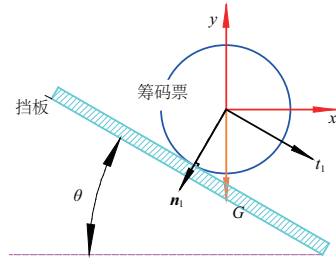


图2 筹码票与挡板碰撞示意图

由基本信息可得:

$$\text{质量矩阵 } M = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix};$$

$$\text{筹码票的位置矢量 } r_1(y, t) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix};$$

$$\text{筹码票平动雅可比矩阵 } J_{T1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\text{挡板平动雅可比矩阵 } J_{T2} = \theta;$$

$$\text{筹码票法向单位矢量 } n_1 = - \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix};$$

筹码票的广义速度在法向上的投影 $w_N =$

$$(J_{T2}^T - J_{T1}^T) \cdot n_1 = \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix}。$$

在不考虑摩擦,筹码票在自由下落过程中运动方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 = 0, x = \dot{x}_0 t + x_0 \\ \dot{y} &= \dot{y}_0 - g't, y = -\frac{1}{2} g't^2 + \dot{y}_0 t + y_0 \end{aligned} \quad (19)$$

因此当筹码票与挡板接触时的时间为

$$t_C = \frac{\dot{y}_0 + \sqrt{\dot{y}_0^2 + 2g'y_0}}{g'} \quad (20)$$

由式(5)可得两物体碰撞前的速度为

$$\dot{g}_{NA} = \dot{x}_0 \sin\theta + (\dot{y}_0 - g't) \cos\theta \quad (21)$$

由式(13)及接触压缩过程的线性互补问题可得:

$$\dot{g}_{NC} = \frac{1}{m} A_{N,AC} + \dot{x}_0 \sin\theta + (\dot{y}_0 - g't) \cos\theta \geq 0,$$

$$A_{N,AC} \geq 0, \dot{g}_{NC} A_{N,AC} = 0 \quad (22)$$

其唯一解为

$$\dot{g}_{NC} = 0, A_{N,AC} = -m[\dot{x}_0 \sin\theta + (\dot{y}_0 - g't) \cos\theta] \quad (23)$$

由式(12)得压缩后的广义速度表达式为

$$\dot{y}_C = \begin{pmatrix} \dot{x}_0 - \dot{x}_0 \sin^2\theta + (g't - \dot{y}_0) \sin\theta \cos\theta \\ (\dot{y}_0 - g't) - \dot{x}_0 \sin\theta \cos\theta - (\dot{y}_0 - g't) \cos^2\theta \end{pmatrix} \quad (24)$$

同理可得碰撞后的法向速度表达式为

$$\dot{g}_{NE} = -\varepsilon_p (\dot{x}_0 \sin\theta + (\dot{y}_0 - g't) \cos\theta) \quad (25)$$

则由式(18)可得碰撞后的速度为

$$\dot{y}_E = \begin{pmatrix} \dot{x}_0 (\cos^2\theta - \varepsilon_p \sin^2\theta) + (g't_c - \dot{y}_0) (1 + \varepsilon_p) \sin\theta \cos\theta \\ -\dot{x}_0 \sin\theta \cos\theta (1 + \varepsilon_p) + (g't_c - \dot{y}_0) (\varepsilon_p \cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{pmatrix} \quad (26)$$

式中: \dot{y}_E 为碰撞完成后的速度; \dot{x}_0 为 x 方向的初速度; \dot{y}_0 为 y 方向的初速度; ε_p 为恢复系数; θ 为轨道倾角; g' 为重力加速度; \dot{y}_E 为碰撞完成后的速度; t_c 为发生碰撞时的时间。

由上式可得筹码票与挡板单次碰撞后的速度与弹射初速度、轨道长度、轨道倾角以及恢复系数有关,在弹出后轨道宽度对碰撞速度也会产生较大的影响。由式(26)可得当水平初速度 $\dot{x}_0 = 0$ 时,式 $(g't_c - \dot{y}_0) (1 + \varepsilon_p) \sin\theta \cos\theta$ 对 θ 求导后可得:在 $\theta \in (0, 90^\circ)$ 范围内函数值先增大后减小,当 $\theta = 45^\circ$ 时, x 方向的速度分量达到最大值,则 y 轴方向上的速度分量相应较小,此时速度的衰减效率最高。因此下文将利用动力学仿真软件来探索相关参数对筹码票发售过程的影响。

2 模型创建及设置

2.1 模型创建

考虑到自动售票机发售装置较为复杂,且除运动轨道、电磁铁挡板以及到位传感器等特征外其余部分对本文研究内容无影响,所以本文仅提取主要影响特征,最大限度地简化模型以便有效提高分析效率,如图3所示。

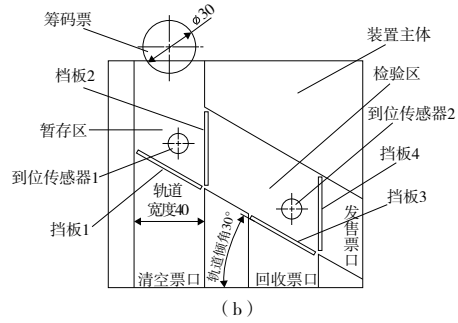
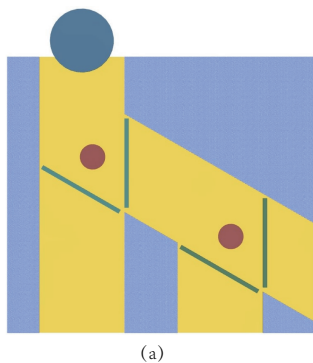


图3 筹码票发售装置仿真模型

2.2 参数设置

将三维模型导入 ADAMS 软件中,并对筹码票、推拉式挡板以及主体部分的材料属性、初速度以及运动副等参数进行设置,具体内容见表1。

表1 各部件参数属性

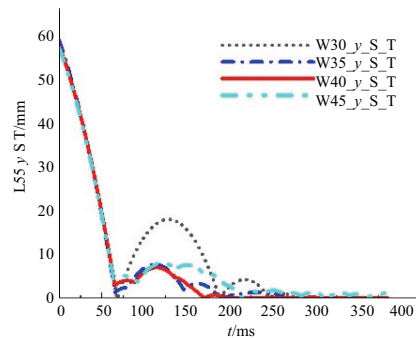
部件	材料	密度/(kg/m ³)	初速度/(m/s)	运动副
挡板	铝	2 740	0	固定副
筹码票	塑料	1 100	0.5	平面副
轨道主体	铝	2 740	0	固定副

针对碰撞恢复系数的选取,国内外学者也做了大量的理论推导与试验研究,根据 PATIL D、YIGIT A S、ASTERIOU P、TANG J H 等学者的研究成果^[7-10]以及查阅相关资料,本文将碰撞恢复系数选取为0.5。

3 仿真结果分析

3.1 轨道长度和宽度对筹码票运动轨迹的影响

首先研究筹码票从票卡弹射装置以一定初速度弹出后,沿竖直轨道的运行轨迹,以稳定时长为评判依据,探索轨道长度、宽度对票卡处理效率的影响。仿真分析结果如图4所示。



(a) 轨道长度为55 mm

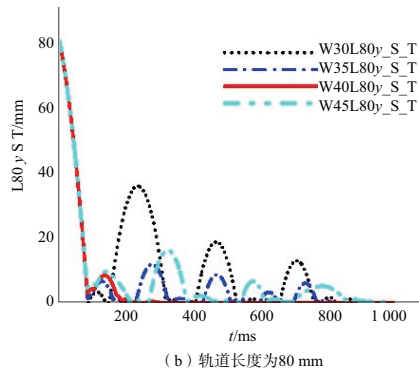


图4 不同轨道宽度对筹码票稳定时长的影响

对比图4(a)和图4(b)可得:轨道长度在一定程度上会影响筹码票的稳定时长,但并不代表越短越好,当轨道长度较短时,存在筹码票弹出轨道的风险,进而影响票卡处理效率,因此当筹码票速度为0.5 m/s时,竖直轨道长度为55 mm效果最佳;当轨道长度一定时,轨道宽度对筹码票稳定时长有较大的影响,随着宽度的增加稳定时间呈现先减小后增加的趋势,当轨道宽度为40 mm时(在目前流通的筹码票直径为30 mm前提下),筹码票接触挡板弹跳后,能量耗散效率最高,最早处于平衡状态。

3.2 轨道角度对筹码票运动轨迹的影响

结合3.1的分析内容,选取票卡速度0.5 m/s、轨道长度55 mm和轨道宽度40 mm来探索筹码票进入检验区时,轨道角度对单程票运动轨迹的影响。

如图5所示,当轨道角度为30°时(与水平方向夹角),票卡在接触挡板后会被弹出检验区,接触暂存区轨道平面之后被反弹回来,极有可能被卡在暂存区挡板上,进而影响筹码票发售的效率和可靠性;当轨道倾角为60°时,单程票在接触检验区挡板之后被反弹出去,此时由于角度过大,受力方向与水平方向的夹角也相应加大,筹码票并未按预计路线返回,而是直接弹出轨道,效果较差。经仿真发现在轨道倾角为45°时,筹码票在检验区碰撞反弹几次后,就处于稳定状态,不用担心弹出去的风险,使得发售可靠性大大提升。

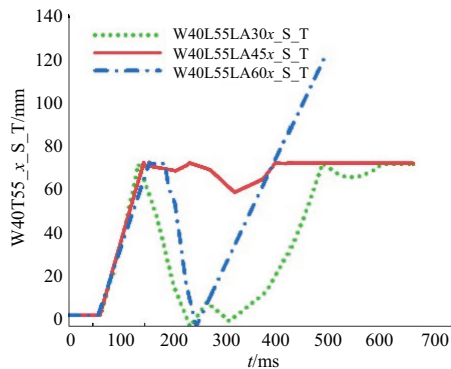


图5 轨道倾角对筹码票稳定时长的影响

4 结语

a) 基于经典接触模型,对刚体碰撞压缩过程和扩张过程的广义速度进行理论推导,得出碰撞过程中相关速度表达式;最终将筹码票与挡板碰撞模型代入相关方程进行计算,得出碰撞后筹码票的速度为

$$\dot{\mathbf{y}}_E = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0(\cos^2\theta - \varepsilon_p \sin^2\theta) + (\mathbf{g}'t_C - \dot{\mathbf{y}}_0)(1 + \varepsilon_p)\sin\theta\cos\theta \\ -\dot{\mathbf{x}}_0\sin\theta\cos\theta(1 + \varepsilon_p) + (\mathbf{g}'t_C - \dot{\mathbf{y}}_0)(\varepsilon_p\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{pmatrix} \quad (27)$$

b) 根据现有售检票装置结构,提取必要影响因素并建立仿真模型,将模型导入动力学仿真软件ADAMS中,以筹码票运动稳定时长以及弹跳轨迹为评判依据,得出如下结论:

1) 当弹票速度为0.5 m/s、轨道长度为55 mm时,随着轨道宽度的增加,筹码票在轨道内部弹跳直至稳定的时长呈现先减少后增多的规律,结果表明轨道宽度为40 mm,筹码票在弹跳过程中能量耗散效率最高,所耗费的时间最短;

2) 当弹票速度为0.5 m/s、轨道长度为55 mm,轨道宽度为40 mm时,筹码票弹跳轨迹会随着轨道倾角的增大而呈现出不同特点,当角度为45°时筹码票弹跳轨迹较短并且运行时间最短,与理论推导结果相同。

参考文献:

- [1] LIU J H, XUE R K. Study on ticket vending machine system based on DTW speech recognition algorithm [C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017: 10468-10473.
- [2] 张文谦. 地铁售票机改良设计——以南京地铁自助售票机为例[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [3] 鲁亚明, 陈爽, 李义斌, 等. 地铁自动售票机票务系统结构设计[J]. 大众科技, 2019, 21(8): 20-23.
- [4] 焦科杰. 嵌入式技术在筹码式单程票发售系统中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [5] 彼得·艾伯哈特, 胡斌. 现代接触动力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003: 5-91.
- [6] 刘晋霞, 胡仁喜, 康士廷, 等. ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] PATIL D, HIGGS C F. A coefficient of restitution model for sphere - plate elastoplastic impact with flexural vibrations[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 88(3): 1817-1832.
- [8] YIGIT A S, CHRISTOFOROU A P, MAJEED M A. A nonlinear visco - elastoplastic impact model and the coefficient of restitution[J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 66(4): 509-521.
- [9] ASTERIOU P. Effect of impact angle and rotational motion of spherical blocks on the coefficients of restitution for rockfalls[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2523-2533.
- [10] TANG J H, ZHOU X J, LIANG K, et al. Experimental study on the coefficient of restitution for the rotational sphere rockfall[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(11): 1-18.

收稿日期: 2021-08-06