

城市轨道交通车门间隙踏板装置设计

周红懿 何志恒 侯智文 郭峻宇

上海工程技术大学城市 城市轨道交通学院 上海 201620

摘要: 基于工程实际,应用ANSYS有限元分析技术对自动化轨道踏板装置进行载荷分析,并对其关键受力螺栓进行静力分析,进行螺栓强度校验研究。通过SolidWorks进行模型设计,并对模型进行应力分析,确保机体正常运作的前提下,找寻最优质且便宜的材料。同时开展电机的设计和电路中的数据分,找寻最优电机组成和最小扭矩。并在最后阶段进行实机测试,得出本装置在日常的城市轨道交通安全保护方面具有实际应用价值。

关键词: 城市轨道交通; 车门间隙; 有限元分析; 结构设计

1 引言

随着城市轨道交通发展,地铁成为重要公共交通工具,但站台与列车车门间隙带来乘客安全隐患,曲线站台或客流高峰期间隙超180毫米,导致多起乘客踩空、跌倒等事故,影响运营秩序。

现有防踏空胶条、蓝光灯带等防护措施存在局限。防踏空胶条难以适应不同站台间隙变化,在曲线站台效果不佳;警示措施无法消除隐患。日本东京地铁采用自动伸缩踏板系统,国内也有基于机器视觉的检测技术等探索。

本文设计地铁车厢门间隙自动踏板装置,融合机电一体化与智能检测系统。装置借传感器监测间隙,列车停靠时踏板展开填隙,离站时收回,还集成障碍物检测

功能。相比现有技术,该设计适应性强、可靠性高、成本可控。

研究通过ANSYS有限元分析、SolidWorks模型设计与应力分析,开展电机设计、电路数据分析,并进行实机测试,旨在为解决间隙安全隐患提供创新方案,推动装置实际应用,提升乘客安全与运营效率,为无人驾驶地铁智能化安全防护奠基。

2 模型设计及应力分析

2.1 模型设计

根据现场实际测量尺寸数据,如图a、b、c所示,站台与车门间隙约为70mm,高度差约为30mm,基于此设计如下自动伸缩踏板结构。



图a

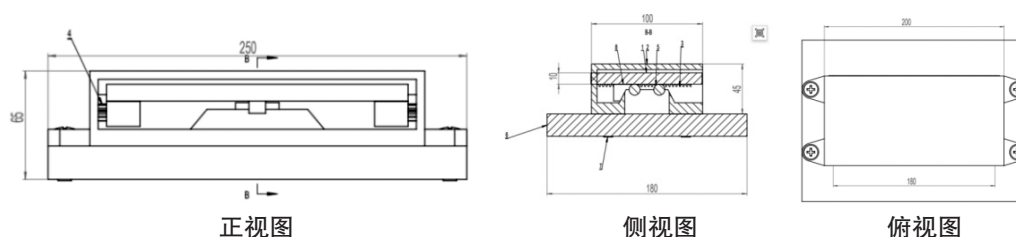
图b

图c

三维零件图:



二维零件图:



正视图

侧视图

俯视图

上述装置中零件1——防掉落踏板，通过伸缩将地铁车辆与站台之间的缝隙进行填补；零件2——装置外壳，通过对装置进行全方位包裹，对装置起到保护作用；零件3——齿条，通过电机控制，将其与齿轮连接，将踏板送出装置内部；零件4——齿轮，通过电机控制，将其与齿条连接，将踏板送出装置内部；零件5——支撑轮，通过放置支撑轮在内板下，对内板起到支撑作用；零件6——踏板底座，通过螺栓将其与站台相连接；零件7——螺栓，起到固定外壳和整个机械结构与站台的固定工作。

2.2 应力分析

在研究螺栓的受力过程中，发现螺栓主要受到竖直方向的压力和水平方向的剪切力，确保两者都能承受运行时的压力即可使设备安全运行。

切力计算公式为： $F = \tau \times A$

其中： F 是螺栓的抗剪切力（单位：N）， τ 是螺栓材料的允许剪切应力（单位：MPa或N/mm²），通常由材料的剪切强度或屈服强度来估算，对于钢材的剪切强度大约为屈服强度的0.6至0.75。 A 是螺栓的剪切截面积（单位：mm²）

剪切截面积 A 对于一个普通的圆柱形螺栓，其剪切截面积通常取螺栓的有效直径 d 来计算：

其中： d 是螺栓的直径（单位：mm）。

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

结合上述公式： $F = \tau \times \pi \frac{d^2}{4}$

每个人的重量 W 是由其质量和重力加速度 g 决定的：
 $W = m \times g$

其中： m_1 和 m_2 是两个人的质量，（ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ）是重力加速度

则第一个人施加的力： $W = m_1 \times g$

则第二个人施加的力： $W = m_2 \times g$

2.3 压力分布

踏板上的压力 p 可以通过下列公式计算： $p = \frac{F}{A}$

其中： F 是作用力（人施加的重力）， A 是力的作用面积。且对于每个人的压力，假设两个人站在不同位置，不同位置可能会导致不同的压力分布，所以假设每个人站立位置的面积是均匀分布的，脚的接触面积 A_1 和 A_2 ，则：

第一个人施加的压力： $p = \frac{F}{A_1}$

第二个人施加的压力： $p = \frac{F}{A_2}$

踏板受到的总压力是两个个体重量的总和： $W = W_1 + W_2 = (m_1 + m_2) \times g$

钢板的承载力计算公式通常基于其几何尺寸（如厚度、宽度和长度）和材料的屈服强度，抗拉强度或强度极限的计算公式： $\sigma = \frac{F_b}{S_0}$

其中， σ 是应力（单位：N/MPa）， F_b 是在材料屈服后拉伸时承受的最大力（单位：N）， S_0 是试样的原始横截面积（单位：m²）

假设：两个行人同时踩在踏板上，其中一人质量 $m_1 = 70 \text{ kg}$ ，另一人质量为 $m_2 = 80 \text{ kg}$ ，钢板的尺寸为 $1.8 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ ，采用的钢板屈服强度 $\rho = 250 \text{ MPa} = 250 \text{ N/mm}^2$ ，重力加速度使用 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

则总重力为： $F = (70 + 80) \times 9.81 = 1500.2 \text{ N}$

钢板上的总压力： $p = \frac{F}{S} = \frac{1500.2}{0.18} = 8334.5 \text{ Pa} = 8.3345 \text{ kPa}$

由于采用的钢板屈服强度 $\rho = 250 \text{ MPa} = 250 \text{ N/mm}^2$ 远大于 p 的值，所以可以确定钢板可以承受两个人的站立负荷。

由建模设计可看出，此模型由四周的四个国标M12螺母进行固定，且踏板为矩形，假设其受力均匀，可将总重量分成四个支撑点。

支撑点受力： $F = \frac{F_{\text{总}}}{4} = \frac{1500.2}{4} = 375.05 \text{ N}$

国标螺母的接触面积（使用M12螺母）： $A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \times \left(\frac{0.012}{2} \right)^2 = 1.131 \times 10^{-4}$

M12国标螺母垂直受力： $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{375.05}{1.131 \times 10^{-4}} = 3.32 \times 10^7 \text{ Pa}$

3 仿真模拟及数据分析

3.1 仿真模拟图

利用solidworks软件建立有限元分析模型，首先将solidworks建立的三维模型导入ansys中，然后在ansys中完成模型建立，施加上述分析中约束力受力情况，并进行仿真分析。

3.1.1 踏板强度校核

踏板模型尺寸为1mm，在静态结构中分析踏板。

装置结构材料为结构钢，网格结构选择踏板和两个支撑轮，方法为多区域，三个几何体的尺寸为一毫米。

施加固定支撑，将站台底面设为固定面。

对榻板正面施加竖直向下的作用力2500N。

作者简介：周红懿（2004-），男，汉族，贵州省遵义市人，本科在读，主要研究方向：城市轨道交通车辆。

按上述分析总变形如图1所示,单位mm,最大变形量为 4.635×10^{-2} ,最小变形量为 5.1501×10^{-3} 。等效力如图2所示,单位MPa,最大等效应力为 3.361×10^2 ,最小等效应力为 3.7344×10

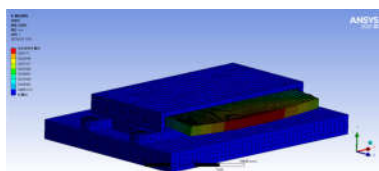


图1 踏板变形图

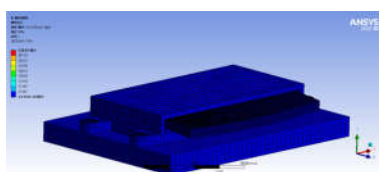


图2 踏板等效应力图

3.1.2 螺栓强度校核

四个螺栓的尺寸为M8,在装置模型比例1:10,摩擦系数0.15的条件下进行静态结构分析,得到螺栓的等效应力图和变形图。

M8螺栓的标准尺寸如下:

公称直径	8mm	大径	8mm
螺距	1.25mm	中径	7.188mm
小径	6.647mm		

在连接接触页面中将摩擦系数设为0.15,接触面为站台上表面,目标面为外壳底面,接触类型为调整接触。

在网格中插入划分方法,选择外壳、站台和四个螺栓为应用结构,划分方法改为多区域网格划分,再将四个螺栓的尺寸改为2mm,在全局网格控制中把分辨率改为5,然后生成网格。

施加固定支撑,将站台底面设为固定面。

在环境-结构-载荷中插入四个螺栓预紧力,分别作用于四个螺栓,每个预紧力设为1000N,如图3所示。

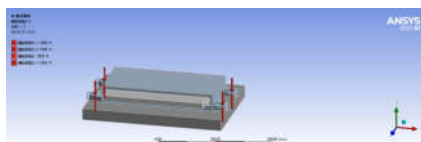


图3 螺栓预紧力的施加

求解后总变形如图4所示,单位mm,最大变形量为 3.3064×10^{-3} ,最小变形量为 3.6738×10^{-4}

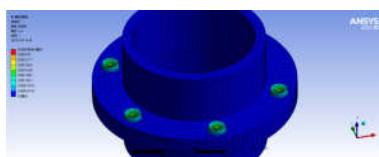


图4 螺栓分析总变形图

等效应力如图5所示,单位MPa,最大等效应力为 9.3871×10 ,最小等效应力为 4.0086×10^{-3}

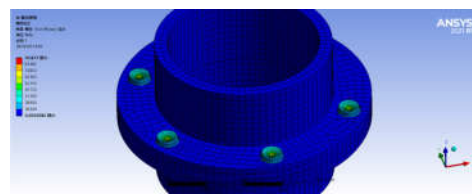


图5 螺栓分析等效应力图

3.2 仿真数据分析

通过SolidWorks和ANSYS软件对装置的关键部件进行了仿真模拟和强度校核,主要包括踏板和螺栓的静态结构分析。

3.2.1 踏板强度校核

踏板模型尺寸为1mm,材料为结构钢。通过多区域网格划分方法对踏板和支撑轮进行网格划分,尺寸设置为1mm。在踏板正面施加2500N的竖直向下作用力后,分析结果显示:最大变形量为 4.635×10^{-2} mm,最小变形量为 5.1501×10^{-3} mm;最大等效应力为 3.361×10^2 MPa,最小等效应力为 3.7344×10 MPa。变形和应力分布表明踏板在受力情况下满足强度要求。

3.2.2 螺栓强度校核

四个M8螺栓在1:10比例的模型中进行静态分析,摩擦系数设为0.15。通过多区域网格划分,螺栓尺寸设置为2mm,预紧力为每个1000N。分析结果显示:最大变形量为 3.3064×10^{-3} mm,最小变形量为 3.6738×10^{-4} mm;最大等效应力为 9.3871×10 MPa,最小等效应力为 4.0086×10^{-3} MPa。螺栓的变形和应力均在允许范围内,表明其连接可靠性。

3.2.3 结论

仿真结果表明,踏板和螺栓在受力条件下的变形和应力均符合设计要求,验证了装置的结构强度和稳定性。

4 电机设计及其数据分析

4.1 电机设计

正确接好供电电源,使用遥控控制马达。

点动:按住遥控A键,马达正转,松开A键,马达停止。按住遥控B键,马达反转,松开B键,马达停止。不能同时按住遥控AB按键。

互锁:按一次遥控上键,马达一直正转。按一次遥控下键,马达一直反转。

模块程序使用休眠模式,自身超低功耗,适合电池供电。待机会自动转入低功耗的休眠状态,使用时会有1秒延时。

4.1.1 输出电压 = 输入的供电电压

4.1.2 控制模块带过流保护，启动电流在400mA以内的

4.2 电机数据分析

组成零件：磁环线圈，电机，马达，电磁铁，正负极转换设备。

工作电压：DC 3V到12V（通用）

最高承载电流：1A

功耗电流：待机0.01mA，工作6mA

遥控频率：433 MHZ

输入电压 = 输入电压

负载：400mA以内（低于4瓦的设备）

磁感线圈电流大的设备，模块会自动过流保护，只能工作一秒。

模块尺寸：21mm*11mm*5mm

遥控器尺寸：62mm*30mm*12mm

遥控距离：空旷环境20米左右，可以隔墙使用

4.2.1 确定负载质量

方法采用密度公式估算

确定负载体积：1800mmx100mmx10mm 材料以下采用合金钢（密度取8000kg/m³）

可以得出

$$m = 1.8 \times 0.1 \times 0.01 \times 8000 = 14.4\text{kg}$$

4.2.2 计算摩擦力

考虑到摩擦系数（ μ ），计算齿轮与齿条之间的摩擦力。摩擦力可以通过负载质量与重力的乘积乘以摩擦系数来估计

$$f = \mu mg$$

其中 $\mu \approx 0.1$ ，g取9.8 N/kg

由此可得出 $f = 14.112\text{N}$

4.2.3 确定加速度

这个看需求假设这里是0

4.2.4 计算总力

齿轮移动所需的总力（ $F_{\text{总}}$ ）包括为了克服摩擦力和实现所需加速度所需的力： $F = f = 14.112\text{N}$

4.2.5 确定移动速度

根据应用需求，确定齿轮的移动速度（ v ）。

假设伸出时间是2.5s，匀速移动。

$$v = 0.1 \div 1 = 0.1\text{m/s}$$

4.2.6 计算功率： $P = F \cdot v$

上式中 P 为电机的最小功率： $P_{\text{min}} = 14.112 \times 0.1 = 1.4112\text{W}$

4.2.7 实际功率

考虑效率：电机和传动系统的效率也会影响最终所需的实际功率。这里效率取60%

安全系数：为保险起见，设计时一般还会考虑一定的安全系数，确保电机在各种条件下都能稳定工作。安全系数常设为1.2。

$$\text{安全系数} = \text{额定功率} / \text{实际功率}$$

$$\text{综上计算可得：} P_{\text{额}} = 1.2 \times 1.4112 \div 60\% = 2.8224\text{W}$$

电机选择：根据上述计算结果，参考电机的产品说明书，选择合适功率的电机。同时，还需要考虑电机的其他性能参数，比如最大转速、扭矩输出等，确保它们满足应用需求。

5 结束语

本文针对城市轨道交通中地铁车厢与站台间隙的安全隐患问题，设计并研究了一种自动化轨道踏板装置。通过SolidWorks建模与ANSYS有限元分析，对装置的关键部件进行了结构优化和强度校核，确保其在实际运行中能够承受乘客负载并保持稳定。同时，结合电机设计与数据分析，确定了最优电机配置，满足装置快速、平稳运行的需求。实机测试结果表明，该装置能够有效填补车厢与站台之间的间隙，显著降低乘客受伤及物品坠落的风险，具有较高的实用性和经济性，为城市轨道交通的安全运营提供了新的解决方案，具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1]杨进,潘立康,陈钢.基于视觉感知的轨道交通站台间隙障碍物检测研究[J].电工技术,2024,(09):57-58+61.
- [2]赵宁.城市轨道交通站台与电客车门槛间隙缝隙踩空事件解决措施探讨[J].人民公交,2024,(02):89-92.
- [3]何贤超,王鹏博,裴承杰,等.轨道交通工程站台边缘与车体间隙的防护措施[J].机电工程技术,2024,53(01):282-286.
- [4]付慧桥,丁先良,于德俊,等.某型飞机地板网格保型架转轴接头强度分析[J].教练机,2023,(02):32-35.
- [5]郑泽宇.基于知识图谱的机械工程应用型人才培养影响因素研究[D].浙江科技学院,2023.
- [6]刘伟铭,李冠金,汪良,等.轨道交通站台门与列车间隙异物的四目定位方法研究[J].铁道标准设计,2023,67(08):147-152+159.
- [7]钟文文.轨道交通站台伸缩踏板方案[J].技术与市场,2019,26(11):48-49+52.