

# 地铁塞拉门驱动臂组件故障分析和设计优化

韩晓辉

法中轨道交通运输设备(上海)有限公司 上海 201906

**摘要:** 针对地铁塞拉门的驱动臂组件故障进行分析, 详细阐述故障并提出解决故障的方法, 同时结合实际情况提出改进方案, 为地铁塞拉门的驱动臂的设计应用提供借鉴。

**关键词:** 塞拉门; 驱动臂; 断裂; 疲劳; 应力

地铁塞拉门是乘客上下车的通道, 而且塞拉门门板外表面和车体平齐, 外观美观, 密封性好, 更加符合空气动力学, 因此在国内外的地铁线路上被广泛的应用; 塞拉门的电机通过驱动臂为门页的运动提供传递的动力, 驱动臂组件为塞拉门系统关键零部件, 因此驱动臂也被公认为塞拉门驱动机构上最主要的安全部件之一, 针对驱动臂组件的结构存在的问题, 以某地铁车辆客室塞拉门为研究对象, 从结构装配设计和零件受力分析的角度优化驱动臂组件结构, 确定驱动臂零件本身及相关结构部件的关系, 在满足整体设计功能的前提下, 通过优化装配关系来改善零

件应力集中问题, 通过改变材料本身提高零件的机械强度, 最终达到提供塞拉门系统的使用寿命。

## 1 驱动臂及相关的组成

塞拉门的机构和驱动臂如图1所示, 上下驱动臂的一端连接到机构的皮带(驱动丝杆)上面, 另一端分别连接到上下滑轨; 一旦电机为机构提供了动力, 会带动皮带(驱动丝杆)的运动, 然后通过驱动臂传递动力给上下滑轨, 最后上下滑轨带动左右门页的左右运动; 同时由于在上驱动臂安装的滚轮的原因, 滚轮须沿斜形的塞拉轨道运行, 从而驱动臂带动门页产生了塞拉和向两侧滑行的动作<sup>[1]</sup>。

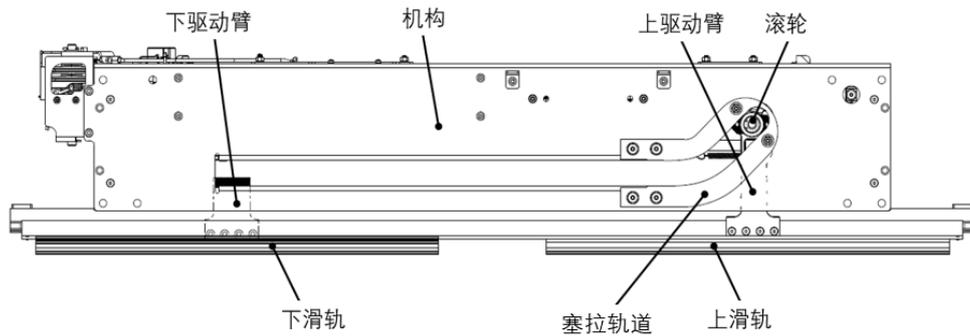


图1 驱动臂及相关组件

## 2 故障现象

塞拉门的驱动臂原始设计和使用状态如下图, 驱动臂和上滑轨通过四颗M5不锈钢沉头螺钉安装固定, 驱动臂和皮带夹通过两颗M5的螺钉连接固定, 驱动臂和滚轮

同样采用螺钉安装和连接的方式, 皮带(或丝杆)的运动会同带动滚轮沿机构上的塞拉轨道的滚动以及上滑轨的向两边的滑动, 形成塞拉门的运动。

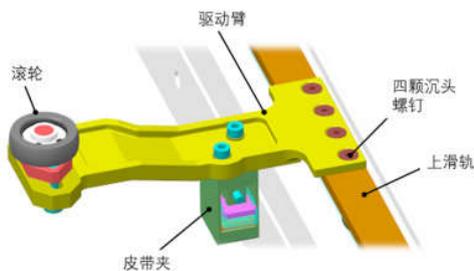


图2 驱动臂

在项目实施过程中，塞拉门样机的耐久寿命测试是重要的一环，需要全程进行数据的记录，根据次数记录仪的显示，当塞拉门系统进行到110万次循环后，塞拉门系统发出故障报警，经检查判别，发现安装驱动臂的四颗沉头螺钉中有三颗螺钉先后发生了断裂，从而造成驱动臂的功能失效，塞拉门停止工作运行，导致项目的试验失败。如图2所示驱动臂。

### 3 失效的原因分析

为了解决塞拉门驱动臂组件失效的问题，首先将从零件材料强度的方面对驱动臂和螺钉进行分析，根据车辆行业技术标准EN14752，<sup>[3]</sup>对门页施加单位1.2千帕的压力，并且考虑门页自身重力情况下，对整个门系统包括驱动臂及其相关零件进行FEA的计算。

驱动臂材料采用高强度钢G42CrMo4+QT1，屈服强度Re为600MPa，抗拉强度Rm为800Mpa，根据材料本身性能及安全系数

$$\sigma_{max} \leq \frac{R_m}{1,5}$$

材料允许的最大屈服强度定义为400Mpa

螺钉规格为标准螺钉，计算依据标准NF-E 25-030-1如下，其中FEmax为拉伸载荷，TEmax为横向扭矩，摩擦系数φ按照0.15。<sup>[1]</sup>

$$F_0 > F_{E\max} + \frac{T_{E\max}}{\phi}$$

$$F_{allowable} > F_{calculated}$$

根据FEA计算中螺栓各个接口处的载荷，从计算结果来看，材料本身是满足载荷强度的要求。

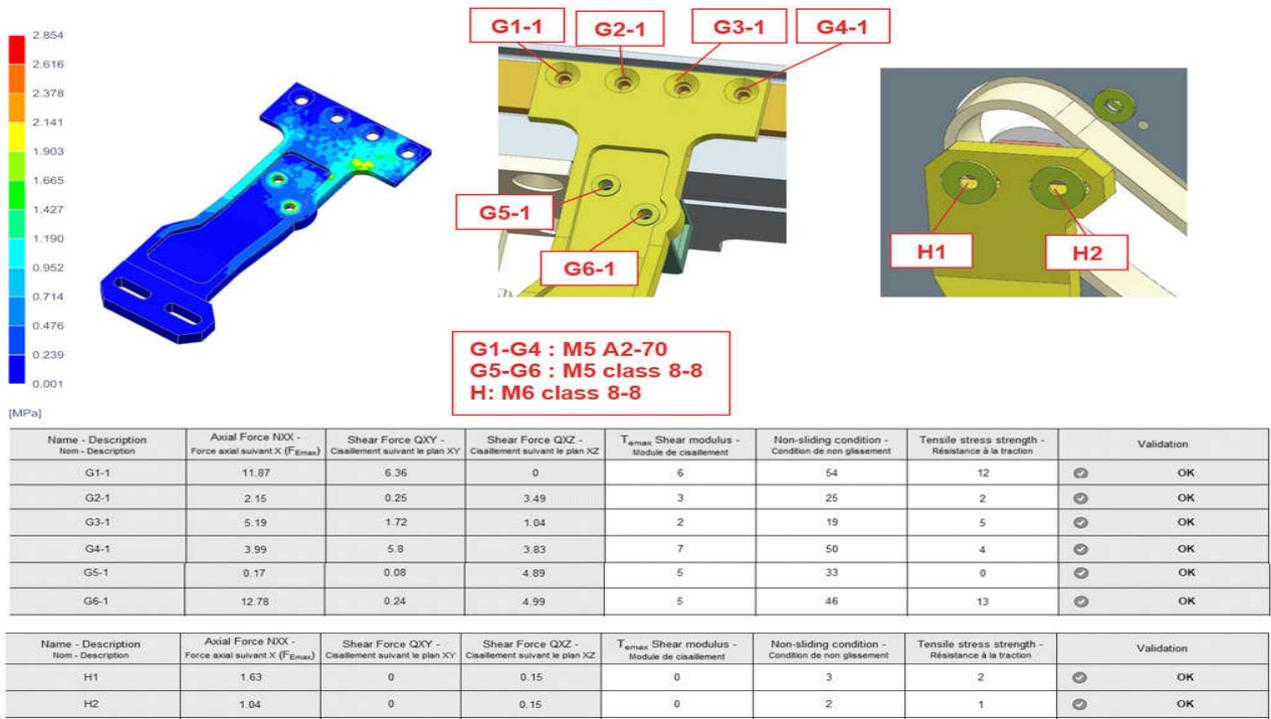


图3 有限元分析和计算

通过分析可知，零件材料虽然满足机械静态力学性能要求，但也不难看出，原本驱动臂被螺栓固定后是靠驱动臂和导轨之间的摩擦力传递动力，但实际上由于冲击和螺栓松动导致外力超过了静摩擦力后，驱动臂和导轨之间出现相对的滑移，螺栓开始接触孔壁而受剪力作用，孔壁受到压力的作用，同时由于几个螺栓的排布，当处于弹性变形阶段时，端部螺栓比中间螺栓受力要大，所以端部的螺栓最先断裂，最终全部失效。

从振动冲击的角度来进行分析，<sup>[4]</sup>振动冲击是一个很复杂的物理过程，与随机振动一样，是一个连续而又

瞬变的过程，不具稳态的条件；正如开关门的过程，从DCU发出开门指令，较大的电流启动电机，驱动臂带动上滑轨加速运动，产生瞬间较大的冲击载荷，然后趋于平缓，关门时候又要加大电流再次减速产生大的冲击载荷，其驱动臂及相关组件的运动状态就要发生瞬间冲击响应，此时驱动臂所承受的应力是交变的，则应力低于屈服极限时金属就会发生疲劳，因此，仅仅的静载荷下测定的屈服极限或强度极限已不能做为强度指标。而是对单个零件按照冲击载荷进行分析时，在冲击次数远大于1000次的时候，安全系数的选取按照多次冲击计算，

安全系数 $N = 2.0-10$ ，所以在极差的工况下，零件的寿命就会成倍的降低，从而严重的影响了螺钉的寿命，造成最终的断裂。具体根据不同的工况进行分析，这些相互依赖的关系相当复杂，有待进一步研究，例如材料寿命可以按照材料本身疲劳的S-N曲线做对照参考等，在此不做更深入的分析。

#### 4 整改措施和优化方案

综合上述分析及结果，螺钉断裂的形成主要在应力集中的部位和材料本身，确定结构优化方案应从提高疲劳强度应从应力集中、提高材料性能等方面入手。

4.1 为了消除或减轻应力集中，同时出于空间位置的考虑，不改变驱动臂组件轮廓尺寸的情况下，在驱动臂的安装到驱动机构上的时候，采用沟槽（类似键槽）的模式进行优化，具体如下图4.驱动臂和滑轨的沟槽。

由于驱动臂在使用过程中配合部位松动产生移位导致的异常载荷，最终螺钉断裂，因此优化驱动臂和导轨的配合方式，在导轨上进行精加工出沟槽，沟槽宽度尺寸和驱动臂宽度上名义尺寸相等，为了减少沟槽加工时定制刀具和量具的种类，有利于生产和降低成本，滑轨上沟槽宽度尺寸应优先采用基孔制，即在导轨上按照基孔制加工出深度为1.5mm的沟槽，安装后的驱动臂可以卡在沟槽之内，由于驱动臂需要多颗螺钉安装固定，定

位精度较高，采用较大H11的精度等级；沉头螺钉的安装需要考虑装配误差以及避免过定位，此处须用间隙配合，而且防止装配后左右的窜动，驱动臂和导轨之间应采用小间隙配合，驱动臂宽度采用g8的精度等级。

沟槽设计类似键槽的设计，驱动臂在受冲击载荷和剪切力的时候，由于驱动臂和沟槽之间的安装配合间隙较小，从理论的角度来讲，可以有效的减小驱动臂和导轨之间振动的产生冲击载荷和疲劳破坏；沟槽和三颗螺钉可以均布承受开关门时候的剪切力影响，大大减小了单个螺栓的受力大情况；同时为了防止三颗螺钉的松动，结合使用场合的温度影响，可采用高强度螺纹胶让螺栓的安装后效果接近于永久的固定，如图4。

4.2 降低表面的粗糙度，增大摩擦力。

如图4，为了便于驱动臂的现场安装和更换，防止沉头螺钉反复拆卸后的失效，设计上采用分体形式，两个驱动臂的分体采用2个螺栓连接，为了避免剪切力破坏和疲劳破坏，在两个零件的接触面上做齿形的加工，具体可以根据标准GB/T192-2003加工出节距为2mm的齿形，依靠齿形的交错配合，避免因螺栓滑移而遭受剪切力破坏的风险，众多的齿形交错配合保证配合的稳定性，抵消大部分的径向力，两个螺栓只是承受预紧力的作用，极大的改善了固定螺钉的受力情况。

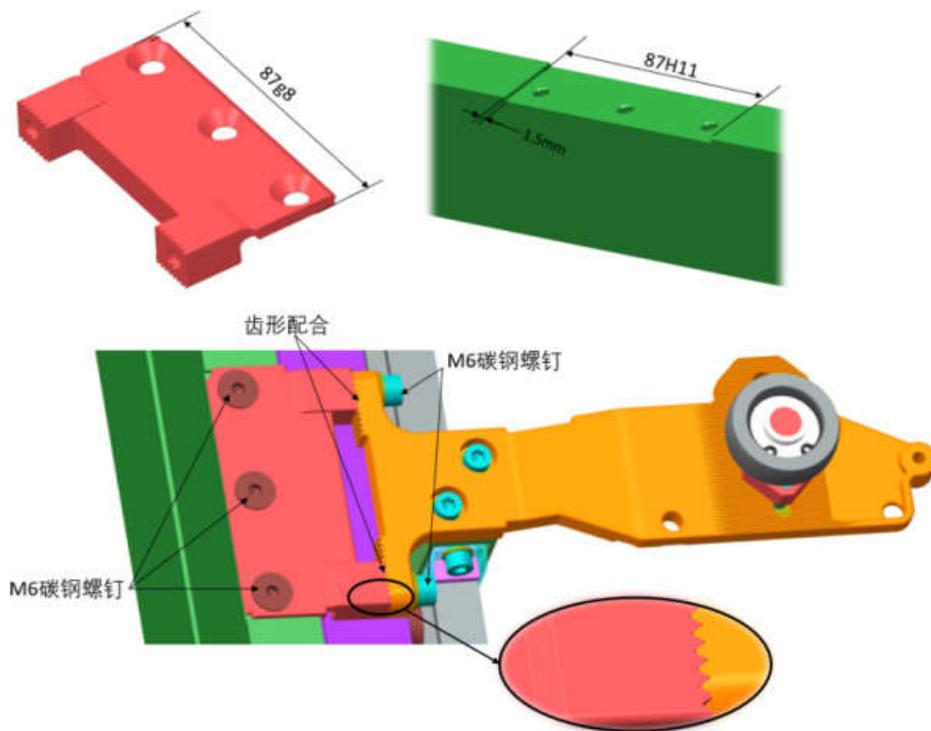


图4 驱动臂的改进

#### 4.3 材料的改进

原有螺栓采用不锈钢材料，屈服强度和抗拉强度较低，很难达到8.8级螺栓强度的要求，因此在改进后的螺栓上采用8.8级的碳钢材料，不但保证材料具有足够的强度，同时也防止脆性断裂的风险，为了保证碳钢螺栓的防腐蚀性能，对螺栓表面进行达克罗出来，中性盐雾试验可以满足500小时的要求，满足了正常项目工况的需求。

#### 5 验证

针对地铁塞拉门的在寿命测试过程中，驱动臂螺钉断裂问题，从实际工况和结构设计合理性等方面分析失效原因，并给出优化方案，对驱动臂结构和螺钉材料进行优化整改，根据方案在样机上进行了一系列型式试验的验证，包括耐久寿命的测试，在实际的测试，样机经过大于2百万次的循环后，驱动臂及其相关组件都完好无损，满足设计功能需求。

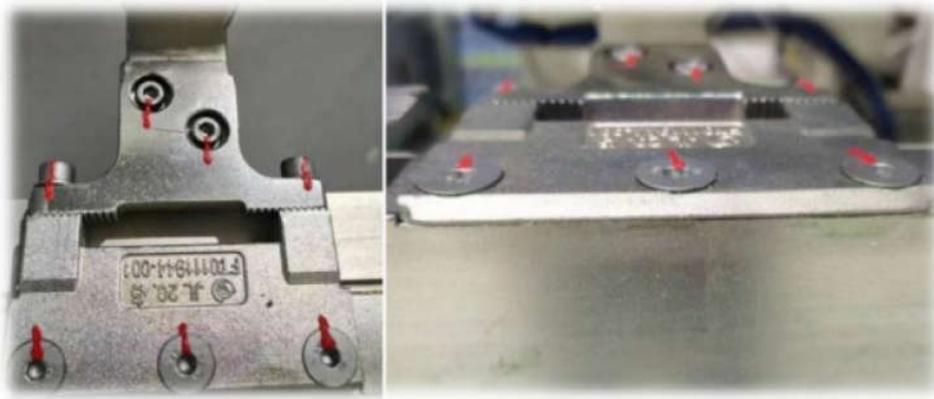


图8 驱动臂的验证

#### 结束语

对地铁塞拉门的驱动臂故障进行分析，详细阐述故障并提出解决故障的方法，同时结合实际情况提出改进方案，为地铁塞拉门的驱动臂的设计应用提供借鉴。从沟槽设计、齿形的配合和材料的选用等方面考虑，有效的改善了驱动臂结构上零件的受力强度，避免了应力集中，大大提高了塞拉门驱动机构的使用寿命。

#### 参考文献

[1]刘鸿文，林建兴；曹曼玲等.材料力学II第五版.2011.

[2]王超，肖守讷，朱涛等.地铁车辆客室塞拉门旋转立柱转臂故障分析与结构优化.技术装备.2019.

[3]EN14752.铁路应用-机车车辆的车身侧入系统.2021.

[4]吴宗泽，机械设计师手册，机械工业出版社，2004.09.

[5]法中轨道交通运输设备（上海）有限公司.塞拉门用户手册.C3版