

城市轨道交通车辆内装扶手原材料强度安全性分析研究

赵友朝

南京康尼机电股份有限公司 江苏 南京 210046

[摘要] 本文通过识别城市轨道交通车辆内装典型扶手的造型, 分析出扶手长度(或固定安装点长度)尺寸; 通过分析乘客抓握扶手的状态, 确定扶手载荷; 为了保障乘客抓握扶手过程中的安全性, 对扶手典型材质不同规格原材料进行强度计算, 并最终给出扶手原材料建议选用的材质和规格。

[关键词] 扶手; 载荷; 安全性; 有限元分析

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.11.1149

1. 引言

城市轨道交通车辆在运行过程中, 乘客需要抓握扶手来保持自身平衡, 扶手原材料的强度关系到乘客乘车安全性。同时要叠加考虑到产品本身的成本, 以及车辆运营能耗成本, 扶手原材料在选用时要充分考虑轻量化, 减少材料选用的过度设计。

2. 扶手的种类

布置在整个车长方向中间位置的扶手为中部扶手, 其中竖直安装的为立柱扶手, 水平安装的为水平横扶手; 布置在纵向座椅上方的扶手为顶部侧扶手; 布置在座椅两端的扶手为屏风扶手; 布置在车门两边立柱罩板上的扶手为门边扶手; 具体布置如图1。其他扶手应用范围极小, 不在本文的讨论范围以内。

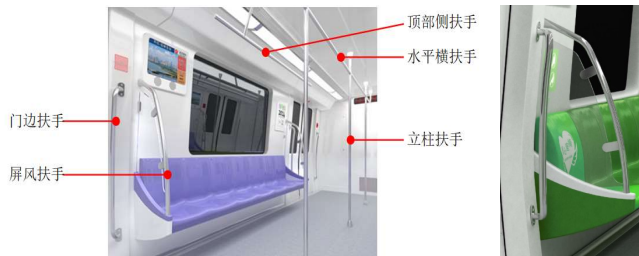


图1 扶手种类

图5 半高屏风与门边扶手

3. 扶手造型设计

立柱扶手主要为竖直杆造型, 部分项目也为多叉造型, 水平横扶手一般为水平直杆造型, 如图2。顶部侧扶手主要为



图2 中部扶手

独立安装结构, 部分项目为与屏风集成安装结构, 少量项目会将窗区两侧顶部侧扶手集成安装为圆形或矩形环状结构, 如图3。屏风主要分为全高屏风和半高屏风, 扶手上部安装点分别布置在车顶或侧墙, 如图4、图5。门边扶手一般随同门立柱罩轮廓, 如图5。

4. 扶手原材料强度安全性分析

立姿乘客在车辆运行过程中为了保持身体平衡, 会抓握扶手并施加一定的作用力, 因此扶手原材料需要强度可靠, 才可以保证乘客的安全性。

4.1 扶手长度(或固定安装点长度)尺寸初步分析

立柱扶手高度尺寸与车厢净高尺寸相关, 车厢净高为2100~2150mm^[1], 因此立柱扶手高度不超过2150mm, 固定安装点布置在扶手上下两端。门区中心位置, 一般均设有立柱扶手, 当前承担城市轨道交通主要运量的A、B型地铁车门间距分别为4560mm、4880mm^[2], 窗区通常布置的2件立柱扶手将门区间距进行等距分割, 立柱扶手间距通常为4560/3=1520mm、4880/3=1626.67mm, 因此水平横扶手长度一般不超过1650mm, 固定安装点布置在扶手左右两端。顶部侧扶手固定安装点通常与立柱扶手间距一致, 一般不超过1650mm。全高屏风较半高屏风要高; 全高屏风扶手上、下固定安装点分别在车顶、座椅面高度位置, 车顶高度按2150mm, 座椅面高度按450mm^[3], 因此屏风扶手长度一般不超过2150-450=1700mm。门边扶手上部低于车门高度($\geq 1800\text{mm}$)^[4], 下部高于地板布面, 因此长度不超过1800mm。

4.2 扶手抓握状态分析

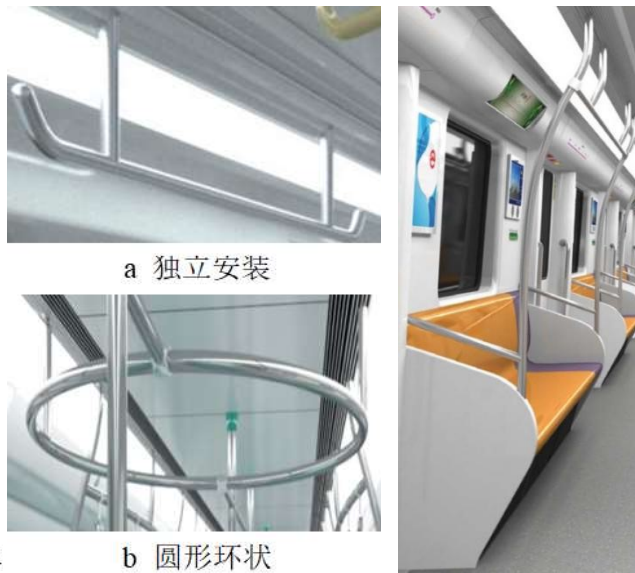


图3 顶部侧扶手

图4 全高屏风与顶部侧扶手

表1 扶手载荷状态

分类	安装点间距 (mm)	人数	车长方向		车宽方向		车高方向	
			加速度 (g)	受力 (N)	加速度 (g)	受力 (N)	加速度 (g)	受力 (N)
立柱扶手	2150	6	3	1589	1	530	1.5	0
水平横扶手	1650	3	3	0	1	650	1.5	1577
顶部侧扶手	1650	3	3	0	1	650	1.5	1577
屏风扶手	1700	3	3	795	1	265	1.5	0
门边扶手	1800	2	3	530	1	177	1.5	0

文献[5]对扶手可抓握人数进行了分析,如图6a-d,以扶手固定安装点间距范围为限,立柱扶手可抓握6人,水平横扶手、顶部侧扶手、屏风扶手可抓握3人。门边扶手布置在相互垂直的屏风与车门之间,选取成年男性上臂长 $P_{50}+$ 前臂长 $P_{50}=313^{[6]}+237^{[6]}=550\text{mm}$ 、最大肩宽 $P_{50}=431\text{mm}^{[6]}$ 作为参考依据,进行尺寸模拟,如图6e,门边扶手可抓握2人。

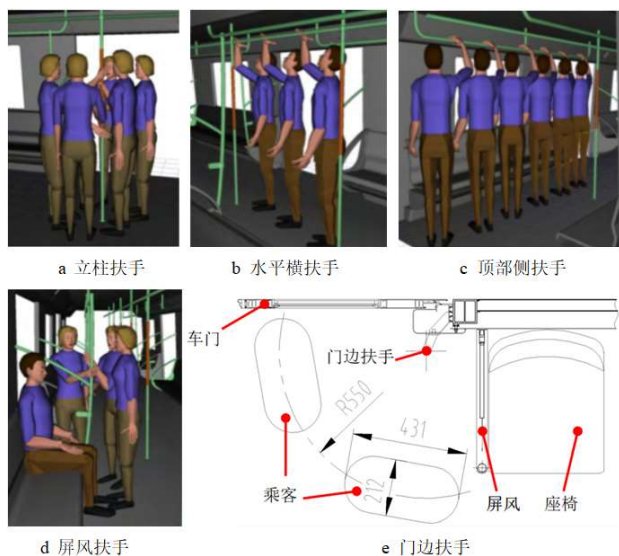


图6 扶手抓握工况模拟

4.3 扶手载荷分析

人体在立姿且手臂伸直的状态下,手臂与身体不同角度位置上的推力分布如图7^[7];选取成年男性体重 $P_{50}=59\text{kg}^{[6]}$ 为基础,再适当考虑衣物等重量,单人体重按照60kg为计算依据;乘客在抓握立柱扶手、屏风扶手、门边扶手时,手臂总体水平,因此扶手受最大推力约为体重15%,受力方向为车长、车宽方向;立姿乘客在抓握水平横扶手、顶部侧扶手时,选取成年男性肩高 $P_{50}=1367\text{mm}^{[6]}$ 、臂长 $P_{50}=550\text{mm}^{[6]}$,选取功能修正量25mm^[7],选取水平横扶手或顶部侧扶手安装高度尺寸1860mm^[8],进行尺寸模拟,如图8,手臂与竖直方向角度约为31.7°,因此扶手受最大推力约为体重70%,该推力可分解到车宽、车高方向。为了计算车辆运行过程中车速变化对扶手受力的影响,车长、车宽、车高方向分别考虑加速度3g、1g、1.5g ($g=9.81\text{m/s}^2$)^[9]。根据上述分析对各种扶手两安装点间的载荷进行计算并汇总如表1。

根据表1可知,立柱扶手、屏风扶手、门边扶手在车长方向上受力最大,水平横扶手、顶部侧扶手在车高方向受力最大,后续仅需对扶手最大受力方向上进行强度计算,就可以评估原材料强度安全性。

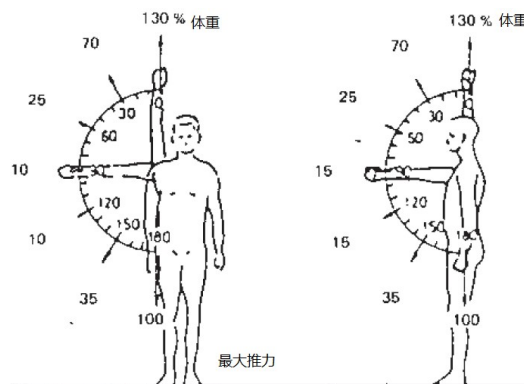


图7 立姿直臂推力分布

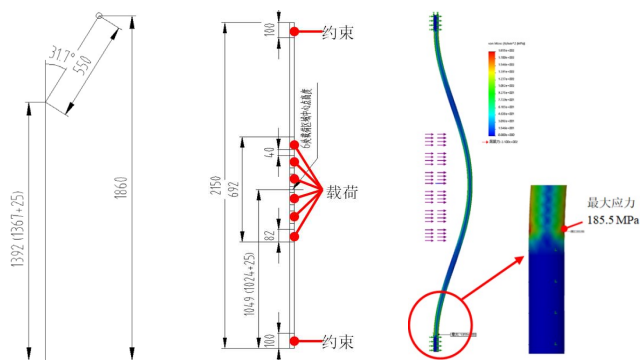


图8 受力角度模拟 图9 立柱扶手载荷及约束 图10 立柱扶手应力云图

4.4 扶手原材料强度有限元分析

扶手主体部分为管材,两端为连接固定结构;本章节主要讨论的范围为主体管材,因此认为两端的连接固定结构强度可靠。

当前扶手的材质主要为不锈钢,少量为碳钢、铝合金;文献[5]对部分中国地铁扶手的外径进行过调研,外径集中在 $\phi 32\text{mm}$ 至 $\phi 38\text{mm}$,本文对扶手外径会进一步扩展,研究的范围为 $\phi 30\text{mm}$ 至 $\phi 40\text{mm}$;根据材质及外径,参考国家标准^[10-11],筛选壁厚2mm以上规格,结合表1内容,采用SolidWorks软件,针对扶手管材部分,进行三维建模、定义材料属性、添加约束和载荷,采用基于曲率网格划分,网格密度等级良好,进行有限元分析,将材料最大应力与许用应力进行对比,最终评估不同材质不同规格原材料是否可以满足强度要求。扶手典型材质不锈钢06Cr19Ni10、碳钢Q355B、铝合金6082 T6许用应力分别为 $210^{[12]}/1.15^{[9]}=182.6\text{MPa}$ 、 $355^{[13]}/1.15^{[9]}=308.7\text{MPa}$ 、 $290^{[14]}/1.15^{[9]}=193.3\text{MPa}$ 。

以立柱扶手车长方向受力为例,材质06Cr19Ni10,规格 $\phi 32 \times 3(\text{mm})$,6处载荷及2处约束位置如图9,计算最大应

表2 典型原材料最小规格满足许用应力要求的有限元分析数据及米重信息汇总表

分类	不锈钢 (06Cr19Ni10)			碳钢 (Q355B)			铝合金 (6082 T6)		
	规格 mm	最大应力 MPa	米重 kg/m	规格 mm	最大应力 MPa	米重 kg/m	规格 mm	最大应力 MPa	米重 kg/m
立柱扶手	φ 30×4	163.3	2.591	φ 30×2.5	256.7	1.685	φ 30×3.5	188.5	0.790
	φ 32×3.5	159.0	2.485	φ 32×2	273.7	1.47	φ 32×3	187.9	0.741
	φ 35×2.5	178.7	2.024	/	/	/	φ 35×2.5	181.2	0.692
	φ 40×2	174.6	1.893	/	/	/	φ 40×2	176.9	0.647
水平横扶手 顶部侧扶手	φ 30×2	177.9	1.395	φ 30×2	177.3	1.372	φ 30×2	180.3	0.477
屏风扶手	φ 30×2	141.5	1.395	φ 30×2	141.0	1.372	φ 30×2	143.3	0.477
门边扶手	φ 30×2	96.3	1.395	φ 30×2	95.9	1.372	φ 30×2	97.6	0.477

表3 扶手原材料优选表

分类	典型材质	优选规格 (mm)	米重 (kg/m)	重量百分比
立柱扶手	06Cr19Ni10	φ 40×2	1.893	100%
	Q355B	φ 32×2	1.47	77.7%
	6082 T6	φ 40×2	0.647	34.2%
水平横扶手&顶部侧扶手& 屏风扶手&门边扶手	06Cr19Ni10	φ 30×2	1.395	100%
	Q355B	φ 30×2	1.372	98.4%
	6082 T6	φ 30×2	0.477	34.2%

注：重量百分比=选用原材料重量÷不锈钢原材料重量

力为185.5MPa，应力云图如图10，大于许用应力182.6 MPa，不满足强度要求。按同样方法对各种扶手、最大受力方向、典型材质不同规格原材料进行有限元分析，将最小规格满足许用应力的有限元分析结果进行整理，如表2。

4. 4扶手原材料优选方案

原材料重量是扶手成本最大的源头，对车辆长期运行造成的能耗成本更大，因此轻量化越来越受到业主的重视。根据表2内容，再叠加轻量化评估维度，针对各种扶手，建议优选的典型材质原材料规格进行整理，如表3。

5. 未来扶手原材料选择的展望

低碳生活的理念已深入人心，铝合金扶手较不锈钢或碳钢扶手，在重量方面虽然已经降低了约65%；碳纤维材料，密度较铝合金要轻30%以上^[15]，抗拉强度提升千倍以上，因此扶手在轻量化方面还有非常大的空间。

6. 结论

本文以城市轨道交通车辆内装扶手为研究对象，从原材料强度安全性、轻量化两个方面进行综合评估，以有限元分析方法为手段，对扶手典型材质不同规格原材料进行强度计算，形成如下结论：

(1) 原材料如选用不锈钢 (06Cr19Ni10) 或铝合金 (6082 T6)，立柱扶手建议选用规格为 φ 40×2 (mm)；原材料如选用碳钢 (Q355B)，立柱扶手建议选用规格为 φ 32×2 (mm)。

(2) 其他扶手原材料材质建议与立柱扶手保持一致，规格建议选用 φ 30×2 (mm)。

(3) 在满足原材料强度安全性的基础上，铝合金扶手在轻量化方面较有优势，仅占不锈钢扶手重量34.2%。

参考文献

[1] GB 50157-2013. 轨道交通车辆设计规范[S].
[2] 马喜成, 李梁, 刘家栋, 刘军良, 宋湘辉. 轨道交

通车辆客室车门间距取值分析与建议[J]. 机车电传动, 2014 (04) : 65-69.

[3] 李学朋, 赵凤启, 孔凡昌. 客室座椅结构设计和分析[J]. 科学家, 2016, 4 (05) : 70-71.

[4] GB 50157-2013. 地铁设计规范[S].

[5] 姜良奎, 向泽锐, 刘峰. 无辅助抓握件轨道交通车辆车内扶手布置设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38 (02) : 15-20.

[6] GB 10000-1988. 中国成年人人体尺寸[S].

[7] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 第4版. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.

[8] 魏峰, 徐伯初, 支锦亦, 董石羽. 地铁客室乘坐设备人机功能尺寸设计[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53 (04) : 865-872.

[9] EN 12663-2000. 铁路设备铁路车辆车体的结构要求[S].

[10] GB/T 21835-2008. 焊接钢管尺寸及单位长度重量[S].

[11] GB/T 4436-2012. 铝及铝合金管材外形尺寸及允许偏差[S].

[12] GB/T 12770-2012. 机械结构用不锈钢焊接钢管[S].

[13] GB/T 1591-2018. 低合金高强度结构钢[S].

[14] GB/T 6892-2015. 一般工业用铝及铝合金挤压型材[S].

[15] 常树民, 申永勇, 石得春. 城市轨道交通车辆轻量化设计研究[J]. 装备机械, 2020 (01) : 21-26.

作者简介: 赵友朝 出生年: 1983年10月9日 性别: 男, 民族: 汉 籍贯(省市): 江苏高邮 学历: 本科+工程硕士 职称和研究方向: 机械工程(机械设计)。