

自动扶梯防坠落装置设计及有限元分析

封高歌¹,张延斌¹,甘斌¹,梁晓¹,施鸿均¹,张立强²

(1. 上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200026;

2. 上海工程技术大学,上海 201600)

摘要:为解决自动扶梯的坠落问题,通过分析人因工程和材料力学,设计一种防坠落装置,建立装置的三维设计模型。通过对防坠落装置及桁架的力学有限元分析,得出桁架的有限元分析应力和挠度位移形变结果,按照桁架的安全设计规范及其材料特性进行比较和验证,确定方案的安全性和有效性,进而验证自动扶梯防坠落装置的实用可靠性。

关键词:自动扶梯;防坠落装置;机构设计;有限元分析

中图分类号:TH236 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0085-03

Finite Element Analysis and Design of the Anti-falling Device for Escalator

FENG Gaoge¹, ZHANG Yanbin¹, GAN Bin¹, LIANG Xiao¹, SHI Hongjun¹, ZHANG Liqiang²

(1. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection & Technical Research, Shanghai 200026, China;

2. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: In order to solve escalator falling, an anti-falling device is designed by analyzing human factor engineering and material mechanics, and a three-dimensional design model of the device was built. The mechanical finite element of the device and its truss is analyzed to obtain the finite element analysis stress and deflection displacement deformation results of the truss. The safety and effectiveness of the scheme are determined by comparing and verifying the safety design specification of the truss and its material characteristics, and the practical reliability of the escalator falling prevention device is verified.

Keywords: escalator; anti-falling device; mechanism design; finite element analysis

0 引言

自动扶梯扶手的主要作用是人们在乘坐自动扶梯时手扶的一种装置,在自动扶梯突然急停等情况下可以让乘客抓住扶手避免摔倒。自动扶梯扶手带高度标准规定为0.9~1.1 m(美标 ASMS 的高度为0.9~1.0 m)。这一高度并不能完全有效防止人员的坠落,特别是在抱小孩乘坐扶梯时该风险非常大。近年来,国内外类似的自动扶梯高处坠落事故时有发生。当乘客乘坐自动扶梯时如没有遵守自动扶梯乘坐要求,一些突发、不规范的行为可能导致人员坠落事故的发生^[1]。从风险评价的角度分析这些典型事故,有必要对自动扶梯增加一些安全防护措施来提高自动扶梯的使用安全。除了设计、生产者有义务客观地告知设备需方这一风险,使用管理人根据使用场合应做好宣传标识、相应的防护措施之外,设备的经营者给自动扶梯装设永久型防坠落保护装置很有必要^[2]。这可以一劳永逸地解决自动扶梯坠落问题。

1 自动扶梯防坠落的基本结构

防坠落措施有多种方式,常用、有效的防坠落措施设

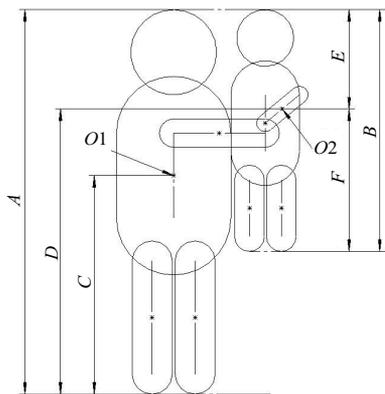
置有以下三种形式:防止人员高处坠落的防护挡板、防护栏杆和拦截网、拦截架^[1]。其中防护栏杆虽然有质量轻对原扶梯和建筑结构影响小及材料成本低等特点,但当人的肢体摆动时有插入、卡进的风险,所以没有达到彻底解决坠落的目的要求。拦截网、拦截架是对坠落发生之后进行的有效减少伤害的装置,其不能起到防患于未然的效果。防护挡板可以完全有效对坠落进行防护,可以确保乘坐人员质心倾斜时不坠落。设计防护挡板式扶梯防坠落装置,着重从挡板的高度范围和有效安装两方面进行研究。

1.1 人因工程学角度分析防护挡板设计范围

先分析研究防坠落装置挡板安装在扶梯扶手带平面上方的何等位置上合适。据相关统计数据表明,自动扶梯坠落事件中,当成年人抱着一名幼童乘坐扶梯时,质心位置偏高是最容易发生扶梯坠落风险的^[3]。故挡板的高度应该以幼童抱起质心位置高度为参照进行设计。计算幼童抱起质心高度时,有几个关于人体数据需要进行统计数据研究,即:人的质心位置、人的平均身高以及抱起幼童时的整体质心位置计算(图1)。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775328);上海市市场监督管理局科研项目(2019-31)

第一作者简介:封高歌(1989—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为特种设备检测、机电设备优化设计。



A—成年人身高;B—幼童身高;C—成年人质心位置;
D—幼童抱起质心位置;E—上质心高度;F—幼童质心高度;
O1—成年人质心;O2—幼童抱起质心。

图1 成年人抱幼童质心尺寸示意图

根据中国国新办2020年12月发布的《中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)》,18~44岁男性的平均身高为169.7 cm,女性为158 cm,较2015年分别增加1.2 cm和0.8 cm,还有不断增高趋势^[4]。故将现在和未来研究数值暂定男性平均身高170 cm、女性身高160 cm为本文成年男女身高研究数据。站立时,人体质心一般在身体正中面上第三骶椎上缘前方7 cm处。由于性别、年龄、体型不同,人体质心位置略有不同,一般男子质心位置的相对高度比女子高,自然站立时,男子质心高度大约是身高的56%。因为女子的骨盆带较大,女子质心大约是身高的55%。幼童的头和躯干的质量相对大一些,则身体质心相对高度比成人高些。相对成人值选择质心0.6作为幼童身高质心分界公式数据。据相关数据统计正常婴儿出生身长为50 cm左右,6个月的身高70 cm左右。传统习惯和医学建议表明婴儿在6个月时才允许抱立。对人群调查研究表明怀抱幼童姿势以6个月身高70 cm为婴儿的抱起身高来研究较为合理。

根据以上男女身体结构理论数据分析,得出相应平均值,即 $A[\text{男、女}] = [170, 160]$ cm; $B_{\text{Min}} = 70$ cm; 幼童质心身高 $F_{\text{Min}} = B_{\text{Min}} \times 0.6 = 42$ cm; 推出上质心高度 $E_{\text{Min}} = B_{\text{Min}} - F_{\text{Min}} = 28$ cm, 幼童抱起质心位置 $D = A[\text{男、女}] - E_{\text{Min}} = [142, 132]$ 。出于安全考虑,自动扶梯挡板需要覆盖最高范围质心安全,所以得出幼童抱起质心位置高度 D 的理论数值 $= A_{\text{Max}} - E_{\text{Min}} = 142$ cm,即取值 $D[142, 132]$ 最大值 $D_{\text{Max}} = 142$ cm,从而得出防坠落装置挡板安装在扶梯扶手带平面上方的142 cm以上,即挡板上表面到梯级踏面的高度最小为142 cm。考虑安全系数问题,根据《GB 16899—2011标准》规定,扶手带顶面距离梯级踏面之间的垂直距离不应 <0.9 m也不应 >1.1 m,即扶梯扶手带相对梯级踏面高度是0.9 m~1.1 m。所以结合考虑到幼童抱起质心高度将自动扶梯的安全防护高度相比原来增加52 cm。

1.2 防护挡板机构设计

自动扶梯防坠落挡板可以有效地阻挡人员乘坐质心

不稳导致的跌落危险。一方面根据人因工程学角度分析防护挡板设计高度范围,考虑多种安全因素,选择防坠落装置挡板安装在扶梯扶手带平面上方;另一方面,挡板起始端限定在安全区域出入口处,即使人员发生危险没有反应过来,发生坠落也是在安全区内^[5]。

利用虚拟样机技术,基于SolidWorks软件三维设计平台,对自动扶梯防坠落装置挡板进行三维参数化建模和虚拟自动扶梯的装配(图2),并对模型的正确性和合理性进行基本检验。

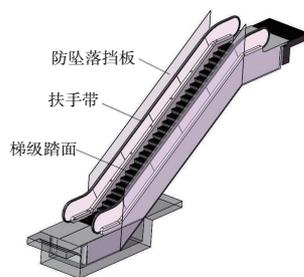


图2 自动扶梯防坠落装置建模3D视图

2 防坠落挡板的有限元分析与验证

我国现行标准规范中对电梯轿架强度校核的方法、安全系数和许用应力没有给出明确规定,现有研究论文中对电梯轿架选用的安全系数等各不相同。进行强度计算和校核仍多采用传统方法,将材料许用应力值与实际强度计算值进行对比,以计算和校核电梯轿架的安全性^[6]。同时电梯轿架结构复杂,细小零部件繁多,局部连接处可能存在应力集中。本文设计防坠落挡板安装在扶梯桁架结构上,通过支架和螺栓固定方式进行连接。桁架是自动扶梯承载系统的重要组成部分,其承载能力是扶梯结构安全的决定性因素之一。通过针对桁架的连接结构及其材料研究,对防坠落装置及桁架的力学有限元分析,得到桁架的应力和位移的变化规律,运用自动扶梯参数化有限元分析平台^[7]验证自动扶梯防坠落装置的实用安全可靠。

2.1 挡板安装对扶梯桁架的力学有限元分析

自动扶梯的金属骨架是个桁架结构,桁架是支撑扶梯整体结构的核心装置,同时也是承载自动扶梯整机质量及外加荷载的主要承力结构^[8],其性能也直接影响自动扶梯安装及运行的安全性及稳定性。自动扶梯及桁架以Q235钢为基体;其弹性模量为 2.1×10^{11} N/m²;泊松比0.3;抗拉强度 5×10^8 N/m²;屈服强度 2.35×10^8 N/m²。挡板材料选用钢化玻璃,一方面钢化玻璃可以满足刚度和强度要求,另一方面透明玻璃在密闭空间内给人以空间舒适感。自动扶梯金属结构的两端支承在建筑中不同楼层楼板的承重结构上。

在SolidWorks[®]Simulation中对桁架结构受力进行一系列的性能分析,内容包括:应力强度、位移、应变,以此用于验证挡板安装在其结构性能上的可靠性。

根据单侧玻璃的体积和密度计算出单侧挡板总质量是530 kg,载荷设计量为5194 N。按照国标GB 16899的

规定乘客载荷是自动扶梯的自身重力加上 5 kN。单边档板通过 14 个螺栓接头固定。螺母和螺栓孔的圆形边线选择 42 mm。定义螺栓材料为合金钢,力预载为 728 N,摩擦系数是 0.2,激活紧密配合方式,在装配体中挡板和桁架之间所有接触相面选择无穿透的接触条件。在桁架两端分别添加两个固定几何体的夹具,分别选择固定夹具一个加载在底端面上,另一个加载在侧端面上。每个螺栓接触曲面上应用 728 N 的力,力的方向为法向向下。在圆角区域应用网络控制单元大小为 0.929 mm,比率为 1.5。生成高品质网络且进行运行计算,得出有限元分析应力和位移形变结果如图 3-图 4、表 1 所示。

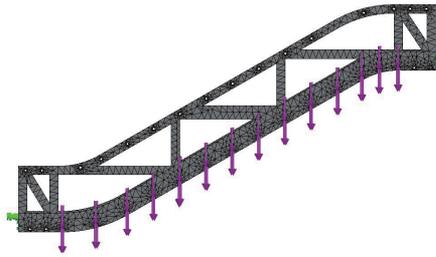


图 3 桁架模型图以及加载外部条件和划分网格

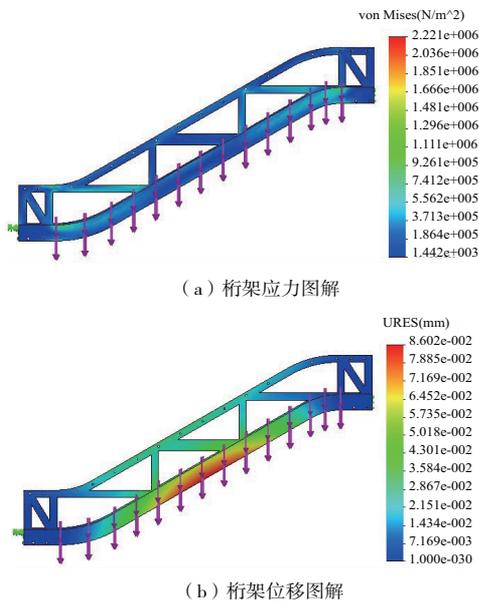


图 4 桁架有限元特性分析结果

表 1 有限元分析表

应力/MPa	数值	位移/mm	数值
屈服	235	挠度	6.900
最大值	4.36	最大值	0.169
最小值	2.83×10^{-3}	最小值	0.001

2.2 强度与挠度分析

根据《扶梯安全规范》的第 5.2.5 条款规定^[9],按 5 000 N/m²的荷载设计或实际检测的最大形变量应小于等于承力点之间长度 L 的 1/750。对于重载型自动扶梯

设计,5 000 N/m²的荷载设计或实际检测的最大形变量要小于等于承力点之间长度 $L/1\ 000$ ^[10]。经过有限元分析计算得出如下结果。

1) 扶梯桁架最大静应力是 4.36 MPa,扶梯材料为 Q235 的屈服极限是 235 MPa,从文献[11]中查得静载荷的安全系数许用值为 1.4~1.8,利用公式得出许用应力:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{[n]} = \frac{235}{1.8} = 130.6 \text{ MPa} > 4.36 \text{ MPa}。所以强度是满足设计安全要求的。$$

2) 本文桁架结构中间段的长度为 6.9 m,如为商用型普通型扶梯,其最大位移为 0.009 2 m;如为公共交通型重载扶梯,其最大位移为 0.006 9 m。查阅表 1 内相关最大数值都未达到最大位移值挠度限制,所以挠度也满足安全设计要求。

本文对自动扶梯防坠落挡板模型有限元应力特性分析结果表明:根据《扶梯安全规范》,此扶梯桁架结构强度、刚度都能达到市面上同类型自动扶梯的制造条件。

3 结语

分析自动扶梯安全现状问题,提出研究一种防坠落装置的必要性,基于人因工程学和虚拟样机技术对自动扶梯防坠落的整体结构设计,建立其整体机构三维模型。通过有限元法对自动扶梯防坠落挡板装置的分析,得出桁架的有限元分析应力和挠度位移形变结果,按照桁架的安全设计规范及其材料特性进行比较和验证,确定了方案的安全合理和有效性。

参考文献:

- [1] 赖跃阳. 自动扶梯加装防坠落措施的探讨[J]. 中国电梯, 2019, 30(20): 28-33.
- [2] 范奉和, 麦尚烽, 谭志荣. 扶梯乘员坠落的法律归责思考与对策[J]. 中国特种设备安全, 2020, 36(2): 19-24.
- [3] 欧俊, 刘爱国, 徐冰, 等. 自动扶梯相邻区域引发儿童坠落风险的防范[J]. 起重运输机械, 2018(10): 142-146.
- [4] 刘月皎. 中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(12): 2.
- [5] 李广伟, 王伟雄, 李刚, 等. 自动扶梯和自动人行道出入口防护的探讨[J]. 机电工程技术, 2015, 44(8): 10-12.
- [6] 陈玮玮, 吴琳琳, 申建国, 等. 电梯轿架强度设计标准现状与思考[J]. 中国标准化, 2019(15): 115-120.
- [7] 吴海平, 蒋杰, 江叶峰, 等. 自动扶梯桁架参数化有限元分析方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 115-117.
- [8] 毛怀新. 电梯与自动扶梯技术检验[M]. 北京: 学苑出版社, 2001.
- [9] GB 16899—2011 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范[S].
- [10] 李国栋. 基于 ANSYS 的自动扶梯桁架结构优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [11] 徐灏. 安全系数和许用应力[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

收稿日期: 2021-05-25