

自动扶梯梯级碰撞研究与有限元分析

封高歌,王晨,刘小畅,张延斌,欧阳惠卿
(上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200026)

摘要:为研究自动扶梯梯级碰撞失效原因及由于碰撞可能引起的梯级失效模式及危害程度,对国内典型的梯级样品进行结构分析。以铝合金材料为基础,通过对梯级装配体的三维模型和梯级的力学有限元分析,计算梯级的应力和挠度位移形变,得出梯级的屈服强度最大静应力和最大位移挠度断口可能发生的位置。为制定相应的保养和安全管理规范提供理论依据。

关键词:自动扶梯;梯级碰撞;静载试验;有限元分析

中图分类号:TH236 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0137-03

Research and Finite Element Analysis of Escalator Step Collision

FENG Gaoge, WANG Chen, LIU Xiaochang, ZHANG Yanbin, OUYANG Huiqing

(Shanghai Institute of Special Equipment Inspection & Technical Research, Shanghai 200026, China)

Abstract: In order to study the causes of escalator step collision failure and the failure mode and damage degree possibly caused by the collision, structure analysis on typical domestic cascade specimen is carried out. Based on aluminum alloy material, and with the finite element analysis on the three-dimensional model of cascade assembly and cascade mechanics, the stress and deflection displacement deformation of cascade and the possible fracture locations of the maximum yield strength static stress are calculated, and maximum displacement deflection of the step is obtained, which provides theoretical basis for the formulation of corresponding maintenance and safety management specifications.

Keywords: escalators; cascade collision; static load test; finite element analysis

0 引言

1899年,美国奥的斯电梯公司在纽约州制造出第一条有水平梯级、扶手和梳齿板的电动扶梯,至今已经有一百多年的历史。电动扶梯最先进入中国是1935年,当时上海的大新百货公司安装了两台奥的斯单人电动扶梯,连接地面至二楼和二楼到三楼,开创了我国拥有自动扶梯的历史。随着自动扶梯的普及,仅上海地铁公共交通领域就拥有自动扶梯近5000台,并且随着新地铁线路的不断延伸,数量还在继续增加。据统计,这些自动扶梯乘客的输送量已超过1000万人次/天,显然扶梯已经成为城市公共交通重要的组成和城市安全运行的重要保障。2014年4月2日上海市地铁7号线静安寺站一台自动扶梯发生事故,造成10多人受伤,社会关注非常强烈,为此研究扶梯的梯级失效形式有着重要的社会安全意义,是对人民美好生活和基本物质安全的保障。梯级是自动扶梯的重要组成部分^[1-2],研究在扶梯运行过程中梯级撞坏的风险有着重要的意义:1)研究梯级碰撞的破坏机理,可为维护、保养提供可靠、针对性的措施;2)判断梯级可能出现断口的位置,比较得出梯级质量现状及质量影响因素,在后续日常保养中加强针对性的保养维护,梯级设计者可以在进行设计时进行相应的优化设计;3)对分析自动扶梯梯级

损坏的事故及处理提供科学依据,为商场和公共交通场合制定安全管理规范提供理论支撑。

1 梯级组成与整体试验方案设计

1.1 梯级组成

梯级系统是自动扶梯的重要组成部分,梯级是供乘客站立的特殊结构形式的四轮,其结构贯穿整个梯级的运载分支和返回分支,是自动扶梯实现承载输送能力的最直接机构。梯级结构系统由多个单一梯级组成,梯级通过梯级链,在梯级链驱动轮的牵引下,沿导轨运行。梯级的主轮轴与梯级链连接在一起,全部梯级按一定规律布置在导轨上,导轨的形状决定了梯级的运行轨迹。如图1所示。

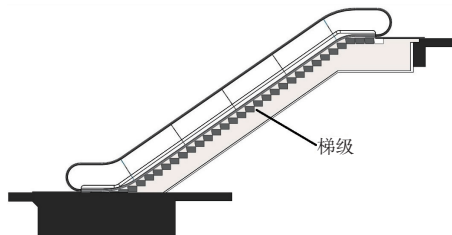


图1 自动扶梯模型图

基金项目:上海市技术标准专项(21DZ2208400)

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,fenggaoge@163.com。

单个梯级则由整体压铸铝合金梯级或不锈钢板压制成形拼接的梯级,踏板面和前踢板面有精细的齿槽,起着防滑和前后梯级导向作用^[3]。梯级滚轮是自动扶梯的重要部件之一,它分为两只主轮和两只辅轮,如图2所示。

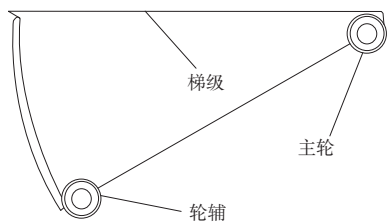


图2 自动扶梯梯级结构

1.2 整体试验方案设计

目前市场的梯级材料主要是铝合金和不锈钢两种,依据 GB 16899—2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》静载试验要求^[4-5],选用铝合金作为梯级的材料,通过软件的有限元方法进行静载弯曲模型试验,得到:1)各自相对应的最大应力结果和发生的位置;2)各自最大挠度量以及发生位置。根据有限元受力的分析结果,判断梯级可能出现断口的位置,比较判断得出梯级质量现状及质量影响因素,图3是梯级的3D模型装配体。

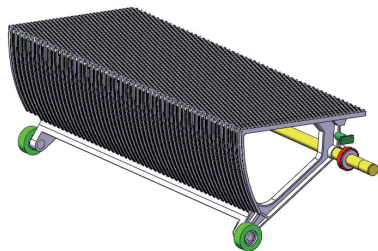


图3 梯级3D模型装配体

2 梯级的有限元分析

2.1 梯级的力学有限元分析

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,并对模型的正确性和合理性进行基本验证,SolidWorks[®]Simulation 中对梯级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,以此用于验证和分析梯级在静载试验要求下其结构性能上应力的可靠性^[6]以及所测得的挠度是否满足4mm变形量的要求。

2.2 强度与挠度分析

梯级系统是自动扶梯的重要组成部分,同时是自动扶梯载客的承载结构,其性能直接影响自动扶梯结构和运行的安全性及稳定性^[7]。依据静载试验要求在梯级踏面中央部位,通过一块钢制垫板,该垫板的面积为 $(0.2 \times 0.3) \text{ m}^2$,厚度至少为0.25m,并使其0.3m的一边与梯级前沿平行,垂直施加一个3000N的力,力的方向为法向向下。梯级以铝合金为基体:弹性模量为 $6.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$;泊松比0.33;抗

拉强度 $6.89 \times 10^8 \text{ N/m}^2$;屈服强度 $2.75 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。在圆角区域应用网络控制单元大小为0.94mm,比率为1.4,在装配体中垫板和梯级之间所有接触相面选择无穿透的接触条件。在梯级主轴和辅轮两端分别添加两个固定几何体的夹具,分别选择固定夹具加载在底端面上,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(图4)。

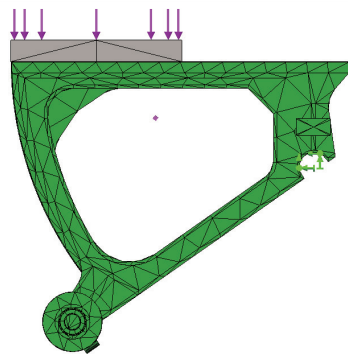


图4 梯级模型图以及加载外部条件和划分网格

2.3 强度与挠度分析

表1是经过运行计算得出的有限元分析静应力和位移形变结果。

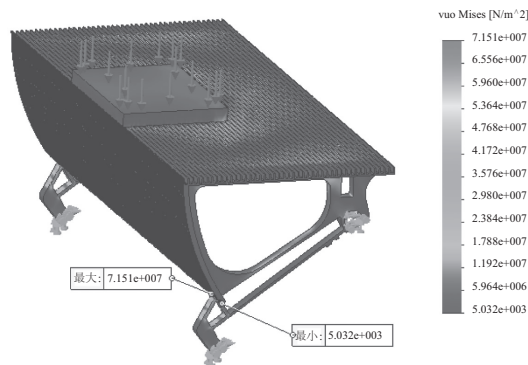
表1 有限元分析应力和挠度结果表

参数名称	应力/MPa	挠度/mm
允许极限值	275	4.000
计算最大值	72	1.440
计算最小值	5 032	0.001

结果分析:

1)梯级最大静应力是72MPa,发生在梯级短轴支撑处,铝合金的应力屈服极限是275MPa,强度满足设计安全要求。

2)参照表1和图5(b)相关最大数值,最大位移挠度为1.44mm,位置发生梯级踏板中部,并且由图5(b)可知在踏板下部中间位置也发生较大的位移挠度,但未达到G16899—2011中5.3.3.2.1静载试验:制动试验踏面表面不应产生4mm的永久变形,所以挠度也满足安全设计要求。



(a) 梯级应力图解

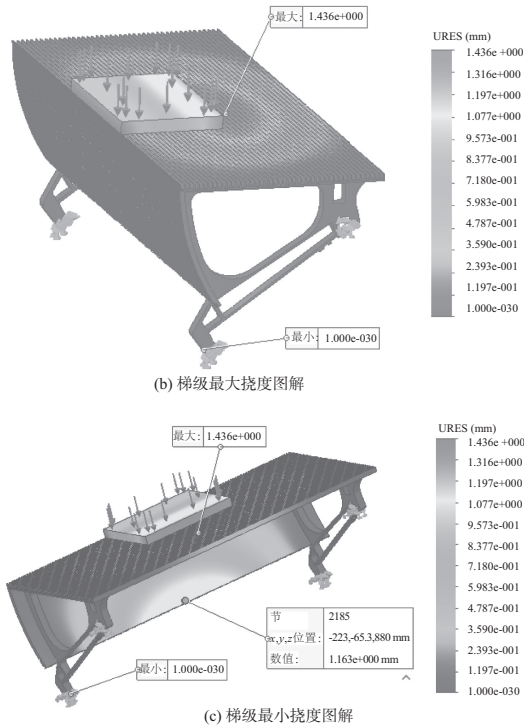


图5 梯级有限元特性分析结果

根据《扶梯安全规范》,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,此梯级模型结构的强度、刚度和受力下的挠度变形都满足标准的形式试验要求。

3 结语

本文研究的主要目的是分析梯级碰撞失效原因,通过对梯级装配体的三维模型的分析,依据静载试验要求,通过对梯级模型进行力学有限元分析,得出梯级的屈服强度最大静应力发生在短轴支撑处,最大位移挠度断口位置可能在梯级踏板中部的结论,为自动扶梯维修保养单位制定及修改保养手册提供依据,可为提高在用自动扶梯使用安全性和相关标准及技术规范的制定提供理论参考。

参考文献:

- [1] 王小琴. 城市轨道交通自动扶梯与楼梯优化布置探讨[J]. 交通科技, 2015(3): 148-150.
- [2] 张利春, 姜文谦, 俞诚, 等. 高速电梯轿厢气压变化调节技术[J]. 轻工机械, 2020, 38(6): 77-81.
- [3] 毛怀新. 电梯与自动扶梯技术检验[M]. 北京: 学苑出版社, 1991.
- [4] GB 16899—2011 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范[S].
- [5] TSG T7005—2012 电梯监督检验和定期检验规则—自动扶梯与自动人行道[S].
- [6] 江叶峰, 朱建新, 柏治国. 基于薄板理论的梳齿板异物保护装置有限元分析及试验验证[J]. 机械与电子, 2018, 36(7): 7-10.
- [7] 张峰, 李灌辉. 地铁用自动扶梯梯级的有限元分析[J]. 特种设备安全技术, 2021(3): 30-32.

收稿日期: 2022-01-10

(上接第 104 页)

表3 不同实验结果对比

评价指标	BPNN	CNN	LSTM
M_{AE}	0.819 5	1.303 6	0.224 6
R_{MSE}	1.093 6	1.904 4	0.287 5

3 结语

本文提出了基于 LSTM 网络的刀具磨损预测模型。通过实验证明, LSTM 模型实现了将多维度、多长度的传感器信号作为模型输入,并最终对刀具的多个切削刃进行磨损预测,避免了人工提取特征出现的信息丢失,充分把握了时间序列数据的长时依赖性和多维度、多长度特征。同时, LSTM 模型评估结果 M_{AE} 为 0.224 6, R_{MSE} 为 0.287 5, 与 BPNN、CNN 相比有了 72.6% 和 82.77% 的幅度下降,实现了对刀具磨损量的精确预测。

不过目前只针对单一的球头铣刀加工过程进行了实验论证,后续还需要对例如车削刀具、混合用刀的情况进行研究,以贴合多样生产场景,满足更高管理需求。刀具磨损的准确预测是刀具监测的重要一环,准确地预测能大大提高刀具生命周期管理水平,改善刀具生产销售生态,催生新的制造业商业模式,使刀具供应商提高质量意识与改善的动力,实现供应链的双赢。

参考文献:

- [1] 胡红军, 黄伟九. 基于 Archard 磨损模型的超细晶陶瓷刀具切

削淬硬钢的寿命预测[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 204-209.

- [2] 孙志娟. 基于扩展隐马尔可夫模型的刀具磨损识别与寿命预测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [3] 张锴锋. 基于多传感器信息融合的刀具磨损状态监测方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [4] 王国锋, 李启铭, 秦旭达, 等. 支持向量机在刀具磨损多状态监测中的应用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(1): 35-39.
- [5] 冯晓亮. 基于条件随机场的铣削刀具磨损状态监测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [6] 孙志军, 薛磊, 许阳明, 等. 深度学习研究综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2806-2810.
- [7] 刘学为, 蔡旭林. 基于模糊小波极限学习机的刀具磨损状态识别[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(5): 12-15.
- [8] 聂鹏, 贾彤, 张锴锋, 等. 基于 HPSO 优化 BP 神经网络的刀具磨损状态识别[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 152-155.
- [9] 李孟虔, 苗鸿宾, 王婷, 等. 基于模糊神经网络的深孔加工刀具磨损率预测[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(1): 134-137, 148.
- [10] 安华, 王国锋, 王喆, 等. 基于深度学习理论的刀具状态监测及剩余寿命预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 64-70.
- [11] 朱翔, 谢峰, 李楠. 基于长短期记忆神经网络的刀具磨损状态监测[J]. 制造技术与机床, 2019(10): 112-117.
- [12] 厉大维, 沈明瑞, 张贺清, 等. 基于长时记忆网络的深孔镗削刀具状态监测[J]. 现代制造工程, 2020(8): 92-96.

收稿日期: 2021-12-23