

自动扶梯桁架结构的有限元轻量化分析*

张红兵^{1,2}, 万长东², 尚广庆², 杜建红²

(1. 苏州市职业大学 电子信息工程系, 江苏 苏州 215104;

2. 苏州市数字化设计与制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215104)

摘要: 针对自动扶梯式电梯在安全性能和轻量化设计上的矛盾, 首先, 运用有限元方法计算了原设计中自动扶梯的结构强度和刚度性能, 分析了原设计中存在的不足; 然后, 结合结构参数对性能影响的灵敏度分析, 提出了结构改进设计的主要对象; 最后, 在改善结构强度和刚度性能的基础上, 应用优化设计技术对电梯桁架结构的板材厚度进行了优化分析。研究表明, 重新设计后的电梯桁架结构的强度提高了21.1%, 刚度提高了24.6%, 极大地改善了结构性能; 同时, 结构质量减轻了7.2%, 取得了轻量化的效果。

关键词: 自动扶梯桁架; 有限元方法; 轻量化分析; 优化设计

中图分类号: TU857; TH236; TH122; O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1139-04

Lightweight analysis of automatic escalator truss structure with FEM

ZHANG Hong-bing^{1,2}, WAN Chang-dong², SHANG Guang-qing², DU Jian-hong²

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China;

2. Suzhou Key Laboratory of Advanced Manufacturing, Suzhou 215104, China)

Abstract: Aiming at the contradictions of the escalator elevator safety performance and lightweight design, escalator structural intensity and stiffness characteristics were firstly analyzed and validated by the finite element method. The problems in the original design were found. Then, combined with the sensitivity analysis on the performance of structural parameters, the main objects to improve the structure were put forward. Finally, on the basis of improved structure performance, the optimization technology was applied to improve the structure strength and stiffness properties. The thickness of elevator truss plate was optimized. The results indicate that the structure strength of elevator truss is increased by 21.1%, the stiffness is increased by 24.6%, the structure performance has been ameliorated obviously. And structure's weight is reduced by 7.2%.

Key words: automatic escalator truss; finite element method(FEM); lightweight analysis; optimal design

0 引 言

随着基础设施建设的快速发展, 整个社会对电梯产品的需求量也迅猛增长, 如何降低持续运转的自动扶梯功耗和减少金属结构的钢材使用量, 是亟需解决的问题。同时, 自动扶梯式电梯作为一种广为应用的公共输送工具, 其结构强刚度可靠性不足造成的危害是非常严重的, 基于此, 对电梯产品的安全性及可靠性要求越来越高, 这对于设计人员在设计阶段进行电梯各种性能的准确预测提出了很大挑战^[1]。

运用优化设计方法, 在保证或改善结构强刚度性

能的前提下降低结构质量、减少资源损耗, 是产品轻量化设计的有效途径^[2]。目前, 轻量化优化设计技术在汽车等领域已得到广泛应用^[3-6], 在电梯产品的设计中也开始采用^[7], 并越来越受到重视。

作为一种高效快捷的数值仿真技术, 研究者通过利用有限元方法可以在自动扶梯式电梯三维设计阶段对其桁架的强度、刚度和动态特性进行准确的分析和预测, 其仿真结果可以达到较高的计算精度^[8-9]。在有限元强刚度分析的基础上, 研究者通过对结构参数进行灵敏度分析, 筛选出对结构强刚度贡献较大的变量, 可以大幅度提高产品优化设计的效率和准确性^[10-11]。

收稿日期: 2012-05-07

基金项目: 苏州市科技基础设施建设计划资助项目(SZS201009)

作者简介: 张红兵(1968-), 男, 江苏如皋人, 副教授, 高级工程师, 主要从事机械CAD/CAE/CAM方面的研究. E-mail: zhb@jssvc.edu.cn

因此,基于有限元灵敏度分析的优化设计是电梯桁架结构轻量化设计的关键技术,对改善结构强刚度性能、减轻重量具有十分重要的意义。

本研究运用有限元方法计算原设计中自动扶梯的结构强度和刚度性能,分析原设计中存在的不足;结合结构参数对性能影响的灵敏度分析,提出结构改进设计的主要对象;在改善结构强度和刚度性能的基础上,应用优化设计技术对电梯桁架结构的板材厚度进行轻量化优化分析。

1 扶梯桁架有限元计算

1.1 有限元模型建立

扶梯桁架结构的薄壁板材采用壳体单元进行结构构建,螺栓联接采用实体单元模拟,螺栓载荷采用文献[12]描述的温度法施加,即对节点施加负的温度值,使其收缩产生螺栓拉紧力。整个模型节点数 178 626,单元数 177 931,电梯桁架结构材料为 Q235A。国家标准 GB16899-97 规定,自动扶梯金属结构计算的乘客载荷是以梯级水平投影面积为基准的载荷,国标规定的乘客载荷为 5 000 N/m²。为了便于有限元模型中加载,本研究将乘客、扶手带、栏杆、梯级及外装饰重量等面载荷转换成线载荷加载到电梯桁架上,实际线载荷分布如表 1 所示。集中载荷主要有驱动张紧机构、控制柜、扶手带驱动机、主机等的重量,根据实际位置加载到相应的节点上。按照载荷的施加,电梯桁架的计算工况分为 3 种:工况 1 包含集中载荷、分布载荷、扶梯自重;工况 2 只考虑乘客的载荷;工况 3 的载荷包含工况 1 和工况 2 的载荷。

表 1 扶梯桁架线载荷分布(单位:N/mm)

载荷类型	下水平部	中间倾斜部	上水平部
扶手+栏杆重量	1.05	1.05	1.05
梯级+导轨重量	1.75	1.75	1.75
乘客重量	5.62	5.43	5.62
其它重量	0.38	0.38	0.38

1.2 计算结果分析

本研究根据上述进行模型前处理后,计算得到结果,桁架位移及应力分布如图 1、图 2 所示。3 种工况下的位移分布及应力分布基本相同,只是数值上存在区别,计算结果汇总如表 2 所示。

表 2 各工况下的计算结果

工况	X向最大位移/mm	Z向最大位移/mm	最大合成位移/mm	桁架最大应力/MPa
1	2.5	-11.5	11.5	95
2	2.8	-11.8	11.8	98
3	5.8	-23.5	25.2	190

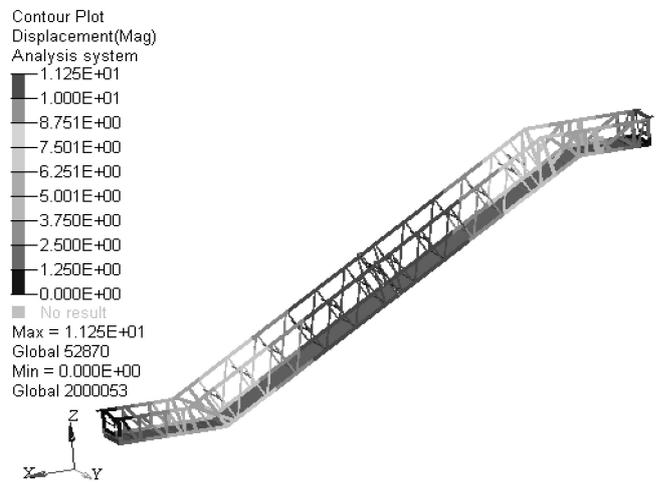


图 1 桁架位移分布

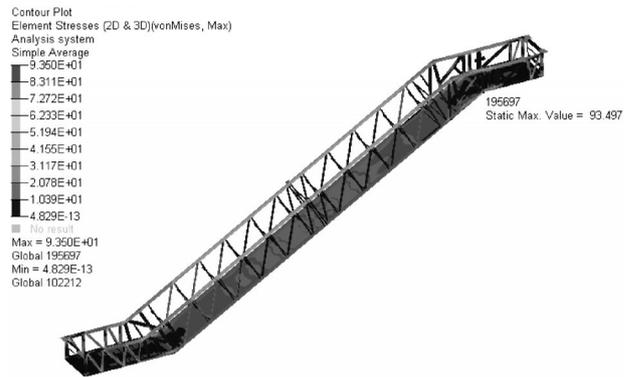


图 2 桁架应力分布

本研究计算得出扶梯工况 2 下的最大应力为 98 MPa,扶梯材料 Q235A 的屈服极限为 235 MPa,抗拉强度极限 σ_{lim} 为 398 MPa,所以理论上不会产生塑性变形,达不到破坏极限。

工况 2 下的安全系数 S 为:

$$S = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{max}} = \frac{398}{98} = 4.06 < 5 \quad (1)$$

基于桁架结构安全系数小于 5 的要求,有待于研究者进一步提高其安全系数。

在 GB16899-97 中规定,对公区交通型自动扶梯,以乘客重量为基础(工况 2)的计算或测得的最大挠度不超过两支点距离的 1/1 000,此时桁架的最大允许挠度为 18 500×1/1 000=18.5 mm。工况 2 下计算挠度为 11.8 mm,桁架结构的变形低于允许值,基本满足变形要求。

该桁架结构的强度和刚度性能基本满足要求,不会发生破坏现象,但其可靠性还略有不足,有待于研究者进一步加强结构强度和刚度。

2 结构参数灵敏度分析

在结构设计和优化中,常常有许多设计参数可供

调整,为了确定设计和优化方案,分析各个设计参数或变量对结构特性变化的灵敏度是十分必要的。研究者通过进行灵敏度分析可以避免结构修改中的盲目性、提高设计效率和减少设计成本。

在电梯结构分析中的灵敏度分析是分析结构参数 u_x 的变化对电梯结构性能参数变化 u_j 的敏感度。敏感度 Sen 定义为:

$$Sen(u_j/u_x) = \frac{\partial u_j}{\partial u_x} \quad (2)$$

灵敏度分析计算时,本研究依次设计变量变动较小值,然后重新求解,从而计算出变量在变动之后的目标函数值。该电梯结构各部件壁厚对结构强度刚度灵敏度计算结果如表3所示。

灵敏度绝对值越大,设计参数对结构性能的影响就越大。由表3可以看出,1号、8号、10号、12号部件的厚度对于结构强度刚度影响比较大,在优化的过程中可作为重要对象进行分析。

3 电梯桁架结构优化

3.1 优化方案

优化设计以数学规划为理论基础,将设计问题的物理模型转化为数学模型,运用最优化数学理论,以计算机和应用软件为工具,在充分考虑多种设计约束的前提下寻求满足预定目标的最佳设计。有限元法被广泛应用于结构分析中,当研究者采用这种方法时,任意复杂问题都可以通过它们的结构响应进行研究。

优化设计有3要素,即:设计变量、目标函数、约束条件。设计变量是在优化过程中发生改变从而提高

性能的一组参数。目标函数要求的最优化性能,是关于设计变量的函数。约束条件是对设计的限制,是对设计变量和其他性能的要求。

对于电梯桁架的优化,本研究主要采用尺寸优化的方法,在不改变原型结构的基础上,将16个管材壁厚作为设计变量,将结构的最大位移变形和最大应力作为设计约束,将结构体积最小化作为设计目标(实际上也就是重量最小化),对电梯结构进行强度和刚度性能改善,同时进行结构轻量化优化。

该电梯尺寸优化的数学描述如下:

优化函数表达:

$$\text{目标函数: Min } f_i(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_{16}) \quad (3)$$

$$\text{约束函数: Lim } g_j(x) - H_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

式中: $f_i(x)$ —目标函数,即电梯桁架结构体积最小; x_1, x_2, \dots, x_{16} —自变量,即16个部件的壁厚; $g_1(x)$ —工况1位移响应函数,此时, $H_1 = 12 \text{ mm}$; $g_2(x)$ —工况1应力响应函数,此时, $H_2 = 80 \text{ MPa}$; $g_3(x)$ —工况2位移响应函数,此时, $H_3 = 12 \text{ mm}$; $g_4(x)$ —工况2应力响应函数,此时, $H_4 = 80 \text{ MPa}$; $g_5(x)$ —工况3位移响应函数,此时, $H_5 = 20 \text{ mm}$; $g_6(x)$ —工况3应力响应函数,此时, $H_6 = 180 \text{ MPa}$ 。

3.2 优化结果与原始结构对比

本研究以各部件厚度为设计变量,体积变化低于0.001为收敛条件,经过迭代计算5步后收敛。优化前后的各部件的厚度变化如表4所示,其中个别部件加厚,多数部件减薄,总重量降低7.2%,同时,优化后的位移及应力结果也较原始结构有所改善。优化前后刚度、强度和重量对比如表5所示,工况1、2应力值均

表3 电梯各设计部件厚度值对位移和应力的灵敏度结果

部件序号	工况1 位移灵敏度	工况1 应力灵敏度	工况2 位移灵敏度	工况2 应力灵敏度	工况3 位移灵敏度	工况3 应力灵敏度
1	1.50×10^{-1}	4.30×10^{-1}	-1.44×10^1	-7.42	2.80×10^{-1}	2.80×10^{-1}
2	-2.85×10^{-2}	-2.36×10^{-2}	2.52×10^{-1}	1.34×10^{-2}	5.76×10^{-3}	5.76×10^{-3}
3	-6.98×10^{-3}	-4.48×10^{-3}	4.61×10^{-2}	8.56×10^{-5}	2.07×10^{-3}	2.07×10^{-3}
4	-1.92×10^{-3}	-1.84×10^{-3}	3.46×10^{-2}	-5.33×10^{-4}	3.56×10^{-5}	3.56×10^{-5}
5	1.35×10^{-3}	2.68×10^{-3}	-2.01×10^{-2}	-9.46×10^{-3}	1.36×10^{-3}	1.36×10^{-3}
6	-2.85×10^{-2}	-2.88×10^{-2}	1.75×10^{-1}	1.8×10^{-4}	2.88×10^{-5}	2.88×10^{-5}
7	5.80×10^{-3}	1.24×10^{-2}	-3.49×10^{-2}	-5.59×10^{-2}	7.58×10^{-3}	7.58×10^{-3}
8	3.54×10^{-1}	1.01	6.46	2.14	6.48×10^{-1}	6.48×10^{-1}
9	4.9×10^{-2}	1.32×10^{-1}	6.99×10^{-2}	3.73×10^{-3}	7.27×10^{-2}	7.27×10^{-2}
10	4.97×10^{-1}	1.15	-8.98×10^{-1}	-1.11	6.59×10^{-1}	6.59×10^{-1}
11	3.61×10^{-2}	1.72×10^{-1}	4.78×10^{-1}	6.59×10^{-3}	1.33×10^{-1}	1.33×10^{-1}
12	2.67×10^{-3}	2.61×10^{-2}	-2.58	-1.24	2.57×10^{-2}	2.57×10^{-2}
13	7.73×10^{-4}	1.69×10^{-3}	3.09×10^{-3}	7.47×10^{-4}	9.15×10^{-4}	9.15×10^{-4}
14	-1.70×10^{-3}	-8.18×10^{-4}	8.67×10^{-3}	-1.54×10^{-5}	8.34×10^{-4}	8.34×10^{-4}
15	1.61×10^{-3}	3.21×10^{-3}	-3.73×10^{-2}	-1.80×10^{-2}	1.64×10^{-3}	1.64×10^{-3}
16	6.37×10^{-2}	2.07×10^{-1}	5.14×10^{-1}	4.49×10^{-2}	1.44×10^{-1}	1.44×10^{-1}

表4 优化前后各部件厚度对比(单位:mm)

部件序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
原始厚度	6	4	8	10	2	4.8	16	3	5	6	6	6	6	6	10	4
优化厚度	8	2	5	6	2.5	2	10	2	4.5	8	3.7	7.5	3	3	5	2.5

表5 优化前后刚度、强度和重量对比

结果	工况1 最大位移/mm	工况1 最大应力/MPa	工况2 最大位移/mm	工况2 最大应力/MPa	工况3 最大位移/mm	工况3 最大应力/MPa	质量 /kg
原始结果	11.5	95	11.8	98	25.2	190	3 787.8
优化结果	10.2	74.7	9.5	75.3	19	150	3 518.0
变化率/(%)	-11.3	-21.4	-19.5	-23.2	-24.6	-21.1	-7.2

低于 80 MPa,也就是说结构强度达到安全系数 5 的要求,最大变形量也低于允许值,说明优化后的结构性能得到了良好的改善。

4 结束语

以电梯桁架结构各个管材壁厚为设计变量,以刚度和强度为设计约束,基于灵敏度分析,本研究运用有限元分析优化方法对电梯桁架结构进行了再设计。计算结果表明,综合工况下,经优化设计后的电梯桁架结构强度较设计前提高了 21.1%,刚度提高了 24.6%;同时,结构质量减轻了 7.2%。该方法不仅实现了结构性能的改善,也达到了降低电梯重量的目的。

参考文献(References):

[1] 朱昌明,洪致育,张惠侨. 电梯与自动扶梯[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003:5-30.
 [2] 张胜兰,郑冬黎,郝 琪. 基于 Hyperworks 的结构优化设计技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
 [3] ASNAFI N, LANGSTEDT G. A new lightweight metal com-

posite panel for applications in the automotive and other industries[J]. **Thin-walled Structures**, 2000(4):289-310.
 [4] 张 宇,朱 平,陈关龙. 基于有限元法的轿车发动机罩板轻量化设计[J]. 上海交通大学学报,2006,40(1):177-180.
 [5] 万长东. 薄壁碰撞吸能部件的可适响应面法轻量化优化分析[J]. 机械设计与制造,2011(11):163-165.
 [6] 廖 君,王冯良,胡望岳. 电动轿车车身轻量化优化设计[J]. 机电工程,2009,26(2):76-79.
 [7] 方 晓. 自动扶梯金属结构轻量化方法研究[J]. 机械强度,2008(3):433-436.
 [8] 胡志炜. 自动扶梯桁架的有限元分析[J]. 机械设计,2011,28(10):74-77.
 [9] 杜宏亮,袁 媛,蒋家桥,等. 一种大型桁架 CAD 中的有限元分析[J]. 机械,2010,37(1):52-54.
 [10] 许 志,李 芳. 基于灵敏度分析的发动机连杆优化设计[J]. 机电工程,2011,28(9):1052-1055.
 [11] 曲令晋. 重型卡车车身灵敏度分析与拓扑优化设计[D]. 合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2009.
 [12] 张红兵. 有限元模型中螺栓载荷的施加方法研究[J]. 机械设计与制造,1996(6):32-33.

[编辑:张 翔]

(上接第 1124 页)

参考文献(References):

[1] 王永梅. 汽车试验平台液压系统设计与研究[J]. 哈尔滨轴承,2010,31(3):59-62.
 [2] 高 军. 汽车动力转向器性能测试技术与系统开发[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2005.
 [3] 常 青,阎 杰,孙 力. 电液伺服动态负载仿真系统中多余力矩的测量及抑制[J]. 机床与液压,2001,29(3):16-17.
 [4] 王若平,蒋 军,高 翔. 汽车转阀式液压动力转向器性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2006,37(11):16-19.
 [5] 袁朝辉,罗旭东,刘文风. 汽车转向缸耐久试验系统[J]. 机电一体化,2011,17(5):92-95.

[6] NAKANISHIA J, SCHAAL S. Feedback error learning and nonlinear adaptive control[J]. **Neural Networks**, 2004, 17(10):1453-1465.
 [7] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
 [8] 江桂云,王勇勤,严兴春. 液压伺服阀控缸动态特性数学建模及仿真分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(5):195-198.
 [9] 郝经佳. 电液负载仿真台综合性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2001.
 [10] 王 鑫. 电液伺服加载台的设计与实验研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院,2003.

[编辑:罗向阳]