

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.02.011

# 曳引电梯轿架立柱结构力学行为建模与分析

宋丹龙<sup>1,2</sup>, 白洋洋<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 张向阳<sup>1</sup>, 卢晓民<sup>2</sup>, 崔亚辉<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 日立电梯(中国)有限公司, 广东 广州 511430)

**摘要:** 轿架是曳引电梯的主要承力结构,其力学性能直接影响着电梯的安全性和可靠性。但是,在轿架设计过程中的力学分析粗糙、设计计算简单且保守等问题造成轿架重量和成本较高。针对以上问题,本文采用理论建模与有限元模拟方法研究了曳引电梯轿架结构的力学行为,重点建立了立柱的强度计算方法。首先,结合典型的曳引电梯轿架结构,分析了轿架的力学传递路线,建立了简化的力学模型;然后,针对均载、前后偏载和左右偏载3种工况,重点对立柱进行了受力分析和力学建模,求解危险截面的最大应力;最后,对轿架进行有限元模拟和力学试验,验证了该理论模型的合理性,为电梯轿架结构设计提供了有效的力学分析和强度计算方法。

**关键词:** 曳引电梯; 轿架; 受力分析; 解析建模; 有限元分析

**中图分类号:** TH123

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)02-0214-07

## Modeling and analysis of mechanical behavior of traction elevator frame column structures

SONG Danlong<sup>1,2</sup>, BAI Yangyang<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Xiangyang<sup>1</sup>, LU Xiaomin<sup>2</sup>, CUI Yahui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Hitachi Elevator(China)Co., Ltd., Guangzhou 511430, China)

**Abstract:** The car frame is the main load-carrying structure of the traction elevator. The mechanical property of the car frame affects the safety and reliability. However, the traditional mechanical analysis and design calculation are too simple and conservative in causing high weight and cost. To solve the problems above, the analytical modeling and finite element analysis (FEA) are conducted to study the mechanical behaviors of the car frame and strength calculation method for the columns. Firstly, based on the typical structures of traction elevator frame, the force route in the car frame is analyzed with a simplified mechanical model established. Secondly, the mechanical analysis and modeling of the columns are conducted respectively for uniform, right loading and rear loading conditions. The maximum stress of the dangerous section is obtained. Finally, FEA and mechanical experiment on elevator frame are conducted. It indicates that the analytical results are accurate, and that an effective method for mechanical analysis and strength calculation is provided.

**Key words:** traction elevator; car frame; mechanical analysis; analytical modeling; finite element analysis

随着城市现代化的高速发展,高层建筑越来越多,曳引电梯的应用也越来越广泛,其作为特种设备对安全性能的要求也越来越高。电梯轿架是电梯轿厢结构的骨架,是轿厢的主要承力结构,其直接影响着电梯的安全性和可靠性<sup>[1]</sup>,国家标准 GB 7588-2003 中规定轿架必须具有足够的机械强度和刚度,以承受电梯在运行时的各种载荷<sup>[2]</sup>。为保证电梯轿厢在

各种工况条件下能够安全运行,要求轿架结构各部位的最大应力小于材料许用应力,因此必须对电梯轿架的力学性能进行可靠分析。同时,能源紧张和可持续发展理念对电梯能耗提出了更高的要求,在满足安全性能和承载能力的基础上,降低电梯轿厢轿架系统的自重,是降低电梯运行能耗、实现节能环保目标<sup>[3]</sup>的重要措施。因此,对轿架结构力学行为

收稿日期: 2019-09-29; 网络出版日期: 2020-05-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200518.0959.006.html>

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2018M643815XB); 陕西省自然科学基金资助项目(2018JQ5025)

第一作者: 宋丹龙,男,博士,讲师,研究方向为机械系统力学分析与优化。E-mail: songdanlong@xaut.edu.cn

进行分析和优化,在保证轿架结构安全性的前提下降低结构重量和生产成本是非常必要的。

目前,电梯企业在轿架结构设计阶段,主要采用经验公式对均载工况进行简单计算<sup>[4]</sup>,然后对局部零件进行有限元分析<sup>[5-13]</sup>,最后进行试验验证<sup>[14, 15]</sup>。传统的经验公式需进行大量假设与简化,且只适用于均载工况,计算精度较低,需要较大的安全系数,导致轿架自重大、成本高,不利于节能降本需求<sup>[3]</sup>;有限元分析和力学试验主要用于轿架设计完成之后的强度校核和评估<sup>[5-11]</sup>,有限元接触算法和设置以及优化方法非常复杂<sup>[12, 13]</sup>,因此在尚未形成标准之前,在企业中难以应用和推广;同时,力学试验成本较高,耗时费力,不适用于设计过程<sup>[14, 15]</sup>。因此,需要从理论角度,对电梯轿架进行深入的力学分析,建立多工况力学模型,实现轿架精准的强度计算,对于提高轿架安全性,降低轿架重量和成本,实现轿架轻量化设计目标,具有重要研究价值及工程意义。

本文基于理论力学和材料力学相关理论,从C型立柱截面惯性矩出发,依次建立均载、左右偏载和前后偏载等工况的电梯轿架力学模型,求解立柱的最大应力,并采用ANSYS对轿架进行力学模拟和力学试验,验证模型的准确性,为轿架设计提供了较高精度的计算方法。

## 1 电梯轿架结构分析

轿架是固定轿厢的承重框架,是电梯系统的主要承载构件,其支撑电梯各构件和负载(人员和货物)的重量,同时承受和传递电梯运行过程中的振动和冲击等载荷,因此,轿架结构设计的合理性直接关系到电梯系统的安全性。轿架一般由上横梁、立柱、斜拉杆以及轿底架组成。电梯通过反绳轮和钢丝绳吊挂到曳引主机上,而反绳轮与上横梁连接,如图1所示。

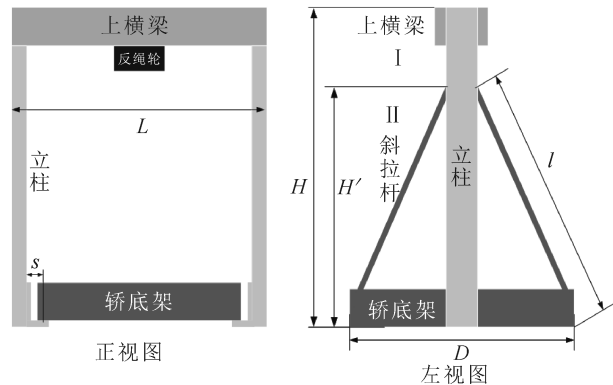


图1 曳引电梯轿架结构示意图

Fig.1 Diagram of the traction elevator frame structures

### 1.1 轿架力学传递路线分析

当外部载荷(人员或货物)加载到电梯轿底之

后,电梯在外载重力与反绳轮拉力作用下达到受力平衡,其力在轿架结构中的传递路线如图2所示。其中上横梁和轿底主要受力产生弯曲挠度变形,而立柱受力较为复杂,既有拉伸变形,又有弯曲变形。因此,本文主要针对立柱进行力学建模和计算。

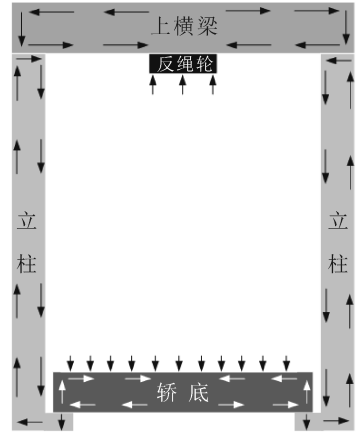


图2 轿架力学传递路线分析

Fig.2 Mechanics transmission route of elevator frame

### 1.2 C型立柱惯性矩建模

根据电梯轿架受力分析,由于轿架立柱既受拉伸,又受弯矩作用,因此立柱一般采用C型截面结构,其截面结构与尺寸如图3所示。而且为了方便安装和连接,其开口一般向外。在计算立柱的拉应力和弯曲应力时,需要求得C型截面的面积和惯性矩。

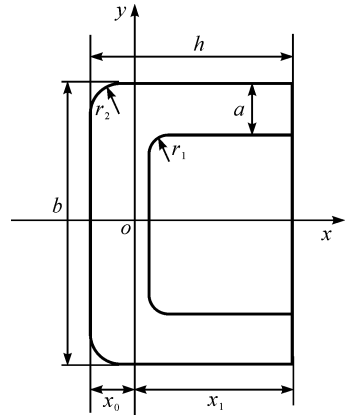


图3 立柱C型截面示意图

Fig.3 Diagram of the upright section of C-type

根据C型截面的对称性,其形心位置必定在x轴上,且

$$x_0 = \begin{cases} \frac{2ah + 2a^2 - ab + 0.215(r_2^2 - r_1^2)}{2 + 2a}, & x_0 > a \\ \frac{2ah - 2a^2 + ab + 0.215(r_2^2 + r_1^2)}{2b}, & x_0 < a \end{cases} \quad (1)$$

C型立柱截面面积为:

$$A_1 = bh - (b - 2a)(h - a) + \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)(r_1^2 - r_2^2) \quad (2)$$

其中  $r_2 = r_1 + a$ 。

根据惯性矩的概念,可以分别求得该 C 型截面对  $x$  轴和  $y$  轴的惯性矩分量:

$$I_x = \int_{-\frac{b}{2}}^{a-\frac{b}{2}} hy^2 dy + \int_{\frac{b}{2}-a}^{\frac{b}{2}-a} ay^2 dy - \int_{\frac{b}{2}-r_2}^{\frac{b}{2}} 2(r_2 - \sqrt{r_2^2 - (y - \frac{b}{2} + r_2)^2})y^2 dy + \int_{\frac{b}{2}-a}^{\frac{b}{2}} hy^2 dy + \int_{\frac{b}{2}-a-r_1}^{\frac{b}{2}-a} 2(r_1 - \sqrt{r_1^2 - (y - \frac{b}{2} + a + r_1)^2})y^2 dy \quad (3)$$

$$I_y = \int_{-x_0}^{a-x_0} bx^2 dx + \int_{a-x_0}^0 2ax^2 dx - \int_{-x_0}^{r_2-x_0} 2(r_2 - \sqrt{r_2^2 - (r_2 - x_0 - x)^2})x^2 dx + \int_0^{h-x_0} 2ax^2 dx + \int_{a-x_0}^{a+r_1-x_0} 2(r_1 - \sqrt{r_1^2 - (a - x_0 + r_1 - x)^2})x^2 dx \quad (4)$$

## 2 轿架力学行为建模

为了降低导轨受力,保证轿架重心与其几何中心重合,电梯结构重量一般为前后和左右对称。同时,由于乘客乘坐电梯时,站立的位置是随机的,实际上存在不同载重的均载以及前后和左右偏载等工况,因此,选取最为恶劣的具有代表性的 3 种工况:100% 额定载重均匀分布,50% 左右偏载和 50% 前后偏载,对立柱等轿架主要结构的力学行为进行综合评价。

### 2.1 均载工况

均载工况是电梯在正常载荷下工作,轿厢和轿底等自重  $G$  和外部载荷  $Q$  均匀加载到轿底上,如图 4 所示。其中,轿架左右宽度为  $L$ ,高度为  $H$ ,均布载荷为  $q = (G + Q)/L$ 。在轿底不变形假设的前提下,求得两侧立柱的拉力  $F_A = F_B = (G + Q)/2$ , $A$ 、 $B$  端所受弯矩为立柱对轿底架支撑偏距  $s$  导致的力矩, $M_A = M_B = (G + Q)s/2$ 。因此,在立柱截面内侧表面发生最大弯曲拉应力为  $\sigma_{\max} = M_{B,x_0}/I_y$ 。

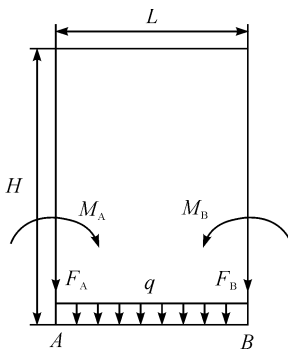


图 4 均载工况的轿架受力分析

Fig. 4 Mechanical analysis of elevator frame in uniform condition

由于斜拉杆的作用,立柱与斜拉杆组成超静定结构,需要根据变形协调关系确定立柱和斜拉杆载荷分配比例。将轿架立柱分为上下两段 I 和 II,如图 1 所示。

**立柱 I 段:**均载工况立柱 I 段截面处最大应力为拉力  $F_B$  对立柱的拉应力与弯曲应力之和:

$$\sigma_{I \max} = F_B/A_1 + \sigma_{\max} \quad (5)$$

**立柱 II 段:**轿架下半部分可简化为受立柱拉力  $F_0$  以及两个斜拉杆拉力  $F_1 = F_2$  和轿底作用力  $F_B$  作用的超静定结构,如图 5 所示。假设轿底刚度较大,忽略轿底变形,按照变形协调关系,立柱和斜拉杆的竖直方向变形相等:

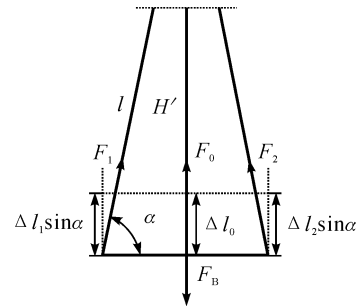


图 5 立柱和斜拉杆载荷分配示意图

Fig. 5 Load distribution in the upright and pull rods

$$\Delta l_1 \sin \alpha = \Delta l_2 \sin \alpha = \Delta l_0 \quad (6)$$

根据材料力学应力-应变关系公式得:

$$\frac{F_0 H'}{EA_1} = \frac{F_1 l}{EA_2} \sin \alpha \quad (7)$$

式中: $A_1$  和  $A_2$  分别为立柱 C 型截面和拉杆圆形截面的面积; $E$  为材料的弹性模量。

又根据力的平衡关系得:

$$F_0 + 2F_1 \sin \alpha = F_B \quad (8)$$

联立式(7)和(8),可以求得立柱拉力为:

$$F_0 = \frac{A_1 l (G + Q)}{2A_1 l + 4A_2 H'} \quad (9)$$

因此,均载工况立柱 II 段截面最大拉应力为拉力  $F_0$  对立柱的拉应力与弯曲应力之和:

$$\sigma_{II \max} = F_0/A_1 + \sigma_{\max} \quad (10)$$

### 2.2 左右偏载工况

左右偏载工况是电梯额定载荷的一半均匀加载

到轿底左边或右边一半面积上的情况,现以右偏载为例进行研究,如图 6 所示。 $q_1 = G/L$  为左侧轿厢和轿底等自重引起的均布载荷, $q_2 = (G + 2Q)/L$  为右侧自重和外部偏载引起的均布载荷。同样,在轿底不变形假设前提下,求得两侧立柱的作用力分别为  $F_A = G/2, F_B = (G + 2Q)/2$ , A、B 两点的弯矩分别为  $M_A = Gs/2, M_B = (G + 2Q)s/2$ 。因此,与均载工况相似,在立柱截面内侧边缘发生最大弯曲拉应力为  $\sigma_{tmax} = M_B x_0 / I_y$ 。

**立柱 I 段:**与均载工况相同,右偏载工况立柱 I 段截面处最大拉应力为拉力  $F_B$  对立柱的拉应力和弯曲应力之和,如式(5)所示。

**立柱 II 段,**按式(7)和(8)可求得右偏载工况的立柱拉力为:

$$F_0 = \frac{A_1 l (G + 2Q)}{2A_1 l + 4A_2 H'} \quad (11)$$

与均载工况相同,右偏载工况立柱 II 段截面最大拉应力为拉力  $F_0$  对立柱的拉应力与弯曲应力之和,如式(10)所示。

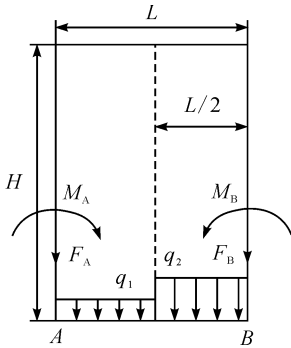


图 6 右偏载工况的轿架受力分析  
Fig. 6 Mechanical analysis of elevator frame in right loading condition

### 2.3 前后偏载工况

前后偏载工况是电梯额定载荷的一半均匀加载到轿底前侧或后侧一半面积上的情况,现以后偏载为例进行研究,如图 7 所示。 $q_3 = (G + Q)/L$  为自重和外部偏载引起的左右方向均布载荷, $q_4 = G/D$  为轿架前侧自重引起的前后方向均布载荷, $q_5 = (G + Q)/D$  为轿架后侧自重和外部后偏载引起的前后方向均布载荷。

同样,在轿底不变形的假设前提下,求得两侧立柱的作用力,  $F_A = F_B = (G + Q)/2$ , A、B 端的弯矩,  $M_A = M_B = (G + Q)s/2$ 。因此,在  $x$  方向,立柱截面内侧边缘发生的最大弯曲拉应力为  $\sigma_{tmax} = M_B x_0 / I_y$ 。

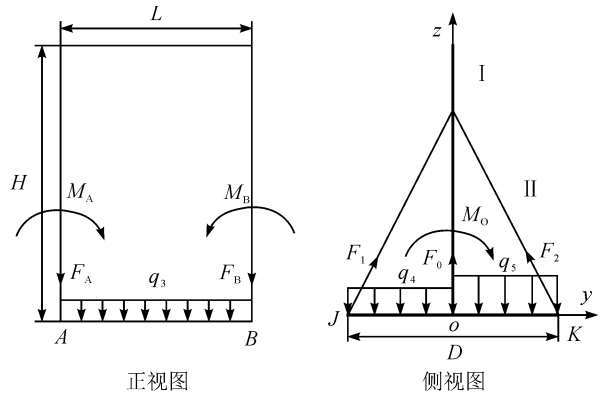


图 7 后偏载工况的轿架受力分析  
Fig. 7 Mechanical analysis of elevator frame in rear loading condition

**立柱 I 段:**在  $y$  方向,根据力矩平衡可得:

$$M_o = (q_4 - q_3) \frac{L}{2} \frac{D}{4} \quad (12)$$

立柱截面内侧后角发生最大弯曲拉应力为:

$$\sigma_{I tymax} = \frac{M_o b}{2I_x} \quad (13)$$

因此,后偏载工况立柱 I 段截面处最大拉应力为  $F_B$  对立柱产生的拉应力和两个弯曲应力之和:

$$\sigma_{I max} = F_B / A_1 + \sigma_{t, rmax} + \sigma_{I tymax} \quad (14)$$

**立柱 II 段:**轿架下半部分可简化为受立柱拉力  $F_0$  以及两个斜拉杆拉力  $F_1, F_2$  和轿底作用力  $F_B$  作用的超静定结构,但是,由于偏载的作用,其力学特性与均载工况不同,根据力和力矩平衡以及变形协调条件列出方程:

$$\begin{cases} F_1 \sin\alpha + F_2 \sin\alpha + F_0 - F_B = 0 \\ \frac{GD}{4} + \frac{3DQ}{8} - M_o - DF_2 \sin\alpha - \frac{F_0 D}{2} = 0 \\ \frac{GD}{4} + \frac{DQ}{8} + M_o - DF_1 \sin\alpha - \frac{F_0 D}{2} = 0 \\ M_o = (q_4 - q_3) \frac{L}{2} \frac{D}{4} + \frac{(F_1 - F_2) D \sin\alpha}{2} \\ \frac{F_1 l \sin\alpha}{EA_2} + \frac{F_2 l \sin\alpha}{EA_2} = \frac{2F_0 H'}{EA_1} \end{cases} \quad (15)$$

求解式(15),可得立柱拉力  $F_0$ 、斜拉杆拉力  $F_1$  和  $F_2$  以及力矩  $M_o$ :

$$\begin{cases} F_0 = \frac{A_1 l (G + Q)}{2A_1 l + 4A_2 H'} \\ F_1 = \frac{4(F_B - F_0) - Q}{8 \sin\alpha} \\ F_2 = \frac{4(F_B - F_0) + Q}{8 \sin\alpha} \\ M_o = \frac{DQ}{16} + \frac{(F_1 - F_2) D \sin\alpha}{4H'} \end{cases} \quad (16)$$

将力矩  $M_0$  代入式(13)即可求得  $y$  方向的弯曲拉应力  $\sigma_{\parallel ty\max}$ ,  $x$  方向的弯曲拉应力与 I 段相同,因此,后偏载工况立柱 II 段最大拉应力为  $F_0$  对立柱产生的拉应力和两个弯曲应力之和:

$$\sigma_{\parallel \max} = F_0/A_1 + \sigma_{tz\max} + \sigma_{\parallel ty\max} \quad (17)$$

### 2.4 实例计算

某型号电梯的实际结构尺寸参数如表 1 所示,轿架自身重量  $G=935$  kg,轿厢重量为 345 kg,额定载重为 2 000 kg,在计算时,载重  $Q$  为轿厢重量与外载之和。然后,将轿架数据代入 2.1~2.3 节中的计算公式,可得到均载、左右偏载和前后偏载等三种工况下立柱的最大应力,如表 2 所示。

表 1 轿架结构尺寸参数

Tab.1 Parameters of the elevator frame

参数	尺寸
总高度 $H$ /mm	3 520
总宽度 $L$ /mm	2 065
总深度 $D$ /mm	1 932
斜拉杆长度 $l$ /mm	2 900
斜拉杆角度 $\alpha$ /°	80
立柱 II 段长度 $H'$ /mm	2 710
立柱对轿底架支撑偏矩 $s$ /mm	56
立柱 C 型截面 $a$ /mm	6
立柱 C 型截面 $b$ /mm	200
立柱 C 型截面 $h$ /mm	70
立柱 C 型截面 $r_1$ /mm	10
立柱 C 型截面 $r_2$ /mm	16

表 2 轿架立柱的最大应力对比分析

Tab.2 Results of finite element analysis

工况		理论计算	有限元结	试验结	偏差分
		结果/MPa	果/MPa	果/MPa	
均载	I 部分	10.54	9.24	9.42	11.89
	II 部分	9.15	7.93	8.67	5.54
右偏载	I 部分	10.54	8.98	9.21	14.44
	II 部分	9.15	7.88	8.02	14.09
后偏载	I 部分	31.18	27.58	28.45	9.60
	II 部分	19.01	17.20	17.49	8.69

## 3 有限元分析和试验验证

### 3.1 有限元分析

轿架结构较为复杂,为大量钣金零部件装配而成,全部以实体模型进行仿真分析计算量大、效率

低。因此需要对模型进行简化和提取中面处理,最终建立电梯轿架的有限元模型,如图 8 所示,零部件连接位置采用绑定接触,网格尽量采用六面体网格。轿架材料全部采用 Q235 钢材,弹性模量  $E=210$  GPa,泊松比  $\nu=0.3$ ,屈服强度为 235 MPa。上横梁中间位置下侧为反绳轮安装位置,将此处设置为固定约束,并加载  $-y$  方向的重力加速度,外载采用等重量的重块进行模拟加载,分别针对均载、左右偏载和前后偏载等 3 种不同工况,采用 ANSYS 进行分析计算。

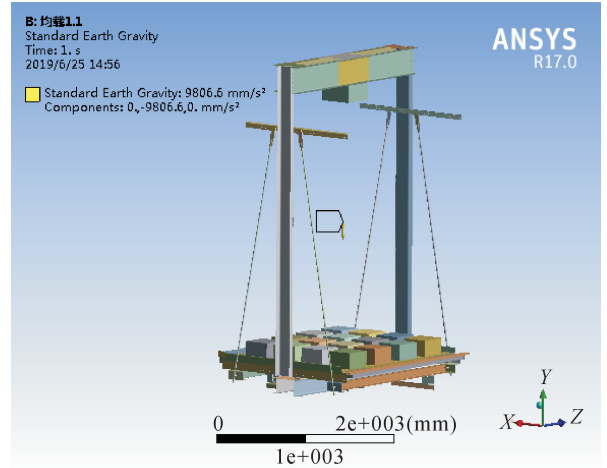


图 8 电梯轿架有限元模型

Fig.8 Finite element model of the elevator frame

经过模拟计算,均载工况下等效应力云图如图 9 所示。

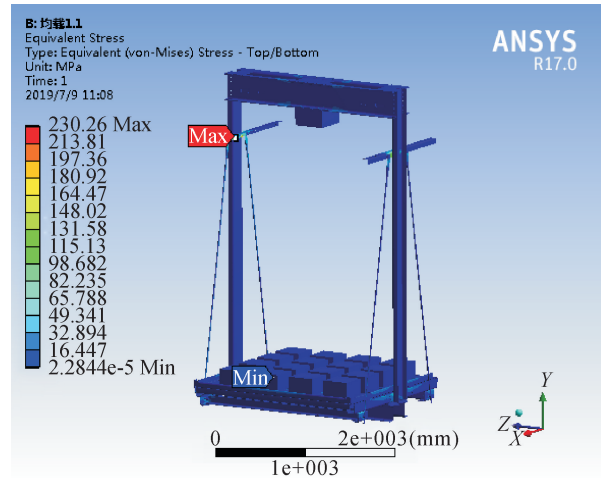


图 9 均载工况的轿架等效应力云图

Fig.9 Equivalent stress of the elevator frame in uniform condition

最大应力出现在斜拉杆安装架与立柱连接位置,由于斜拉杆的作用导致安装架产生弯曲,而安装架与立柱采用螺栓连接导致应力集中。其他工况的等效应力与之类似。

### 3.2 轿架静载力学试验

为了验证理论建模与有限元分析的准确性,采用实际的整体轿架结构进行多工况静载力学试验。采用对重块模拟均载、右偏载和后偏载等工况,利用钢丝绳将轿架吊起,通过 BE120-02AA-A(11)电阻式应变片以及 DH3816 静态应变测试系统,对轿架立柱不同位置的应变应力进行了在线测量,应变片粘贴位置如图 10 所示。

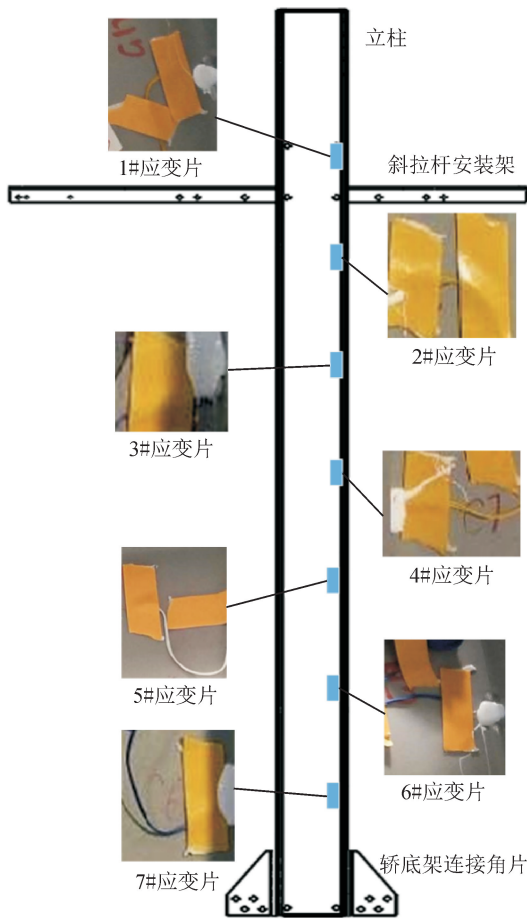


图 10 轿架立柱力学试验的应变片粘贴位置

Fig. 10 Positions of strain gauges for elevator frame mechanical experiment

### 4 结果对比分析

均载、右偏载和后偏载等三种工况下,轿架立柱拉应力的理论、有限元分析以及试验结果如图 11 所示,其中横坐标为立柱内侧后边缘上一点到最顶端的距离。图中曲线描述了不同工况下立柱全长度上拉应力的变化规律,其中 280 mm、710 mm 位置处出现最大拉应力,主要是由于上横梁和斜拉杆的集中力作用造成的。对于均载和右偏载工况,立柱 I 段和 II 段的拉应力基本保持不变,而对于后偏载工况,立柱 I 段拉应力不变,但是 II 段拉应力随着位置

下移逐渐减小,主要是由于立柱 II 段  $y$  方向的力矩  $M$ 。随着位置下移而减小造成的。另外,后偏载工况立柱 II 段拉应力的理论与有限元结果吻合较好,最大误差在 15% 以内。

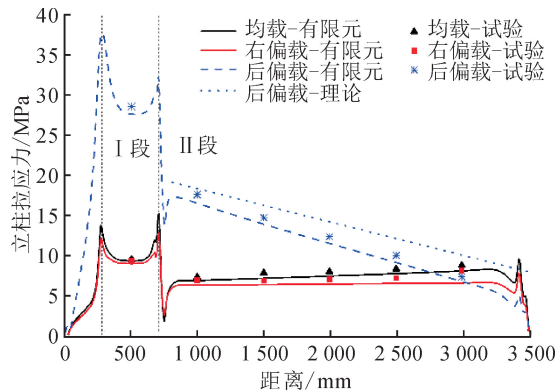


图 11 多工况立柱拉应力曲线

Fig. 11 Tensile stress curves of the upright in uniform condition

通过理论建模与力学试验对比分析,轿架立柱 I 段和 II 段的最大拉应力对比分析如表 2 所示。通过对比分析可知,该理论模型较为准确,右偏载计算误差最大为 14.44%,提高了应力计算精度,满足了电梯工程设计的需求。而理论计算值偏大,主要是由于在理论建模时,未考虑导靴的支撑作用以及实际轿架存在轻微偏心造成的。

### 5 结论

本文以曳引电梯轿架为研究对象,在总结国内外相关研究的基础上,从理论建模、有限元分析以及力学试验方面研究了多种复杂工况下的曳引电梯轿架的力学行为,重点对立柱进行了建模与分析,为电梯轿架设计提供了理论基础,进而降低了电梯的开发成本。主要结论如下:

1) 分析了电梯轿架的承载结构及其载荷传递路线,立柱、上横梁等结构既要承受拉力又要承受剪力,构成了力学传递封闭路线;

2) 分别对均载、左右偏载和前后偏载等三种工况进行力学行为分析,建立了立柱的力学模型,并求解了立柱界面的最大拉应力;

3) 对电梯的均载、左右偏载和前后偏载等三种工况进行了有限元分析和力学试验,并与理论结果进行对比分析,吻合较好。

#### 参考文献:

[1] 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.

CHEN Weiwei, WU Linlin, SHEN Jian'guo, et al.

- Present situation and prospect on standardization of strength design for elevator car frame[J]. China Standardization, 2019(15): 115-120.
- [2] 全国电梯标准化技术委员会. 电梯制造与安装安全规范:GB7588-2003[S]. 北京:全国电梯标准化技术委员会,2003.
- [3] 洪睿. 曳引驱动乘客电梯能耗测量及能效评定方法的研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.  
HONG Rui. Research on measurement and evaluation method of energy consumption of traction driven passenger elevator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [4] 喻纯泽. 电梯设计计算与实例[M]. 廊坊:中国电梯杂志社,2011.
- [5] 左亚军. 基于 ANSYS 的电梯轿架强度计算与分析[J]. 机电工程技术,2015,44(6):39-42,89.  
ZUO Yajun. The strength calculation and analysis of elevator car frame based on ANSYS [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015, 44(6):39-42, 89.
- [6] 谭健. 有限元分析在工程实际中的应用[J]. 中国电梯, 2018,29(23):13-16.  
TAN Jian. Application of finite element to practice engineering[J]. China Elevator,2018,29(23):13-16.
- [7] 许志强. 基于 Abaqus 的电梯轿架有限元分析与结构优化[J]. 机电工程技术,2018,47(11):70-73.  
XU Zhiqiang. Finite element analysis and optimal design of elevator car frame based on Abaqus[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(11): 70-73.
- [8] 徐伟通,高旭东,叶志峰. 基于有限元的自动扶梯梯级安全性能研究[J]. 机械工程与自动化,2019(2):64-65,68.  
XU Weitong, GAO Xudong, YE Zhifeng. Safety performance analysis on escalator rung based on finite element method [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(2): 64-65,68.
- [9] 蔡坚. 基于 ANSYS workbench 电梯结构力学分析与研究[D]. 苏州:苏州大学,2016.  
CAI Jian. Research and analysis of elevator structural mechanics base on ANSYS workbench [D]. Suzhou: Soochow University, 2016.
- [10] 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.  
HU Zhiwei. Finite element analysis of escalator's truss [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(10):74-77.
- [11] 高原,曹国华,秦健聪. 船用自动扶梯桁架的有限元分析及其应用[J]. 机械强度,2017,39(3):738-742.  
GAO Yuan, CAO Guohua, QIN Jiancong. Finite element analysis and application on metal truss of ship escalator [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(3):738-742.
- [12] 张青,刘立新,侯涛,等. 基于 ANSYS Workbench 的无机房观光电梯平台结构的拓扑优化[J]. 中国电梯, 2018,29(3):19-20.  
ZHANG Qing, LIU Lixin, HOU Tao, et al. Topology optimization of platform structure of machine-roomless panoramic lift based on the ANSYS workbench [J]. China Elevator, 2018, 29(3):19-20.
- [13] GIAGOPOULOS D, CHATZIPARASIDIS I, SAPI-  
DIS N S. Dynamic and structural integrity analysis of a complete elevator system through a mixed computational-experimental finite element methodology[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 473-487.
- [14] 肖永恒. 电梯轿架强度的试验研究[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(3):48-51.  
XIAO Yongheng. Experimental study on the strength of elevator car frame [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(3):48-51.
- [15] 舒凯凯. 关于电梯 125% 额定载荷制动试验及制动距离的探讨[J]. 中国电梯,2019,30(19):47-49.  
SHU Kaikai. Discussion on braking test and braking distance when the elevator car with the rated load plus 25% [J]. China Elevator, 2019, 30(19):47-49.

(责任编辑 周 蓓)