

电梯对重框架结构的有限元分析

刘芳宁

奥的斯电梯(中国)有限公司 天津 300300

【摘要】随着世界各地摩天大楼的日益增多,电梯成为其中非常重要的内部通行和必不可少的转移设备,而对重系统作为电梯八大功能系统之一,其结构性能的好坏非常重要,直接关系到人们的生命财产安全。本文基于 Workbench 软件,采用有限单元分析方法(FEM)针对电梯对重框架展开静力结构分析与模态分析。通过静力结构分析,得到了对重框架在正常运行与安全装置动作(冲击缓冲器)两种工况下的位移分布和应力分布情况,验证了该电梯对重框架结构的合理性与有效性。通过模态分析得出对重框架结构的固有频率与振型,对电梯对重框架的振动特性评估和结构动力特性的优化设计具有一定的参考价值。

【关键词】电梯;对重框架;有限元分析;Workbench

【Abstract】 With the increasing number of skyscrapers around the world, elevators have become a very important internal passage and indispensable transfer equipment. As one of the eight functional systems of elevators, the counterweight system is very important for its structural performance. Related to people's life and property safety. Based on Workbench software, this paper uses finite element analysis method (FEM) to carry out static structural analysis and modal analysis for the counterweight frame of elevator. Through static structure analysis, the displacement distribution and stress distribution of the counterweight frame under normal operation and safety device action (impact buffer) were obtained, which verified the rationality and effectiveness of the elevator counterweight frame structure. The natural frequency and vibration mode of counterweight frame structure are obtained through modal analysis, which has certain reference value for the evaluation of vibration characteristics of elevator counterweight frame and the optimization design of structural dynamic characteristics.

【Keywords】 elevator; counterweight frame; finite element analysis; Workbench

在激烈的市场竞争中,只有不断推出符合市场需求的新产品、改善产品质量、降低产品成本才能够更好生存,而产品技术的进步离不开设计手段的进步。如今科学技术飞速发展,计算机技术广泛应用,结合计算机技术和工程分析技术的新兴技术——计算机辅助分析技术(CAE)应运而生并得到广泛应用^[1]。CAE 软件的主体是有限元分析(FEA)软件,核心思想是有限单元法(FEM),即结构的离散化,将连续介质看作由有限个节点连接起来的有限个单元组成,然后对每个单元通过确定的插值函数将其内部每一个节点的位移用单元节点的位移表示,随后根据连续介质整体的协调关系建立包括所有节点未知量的联立方程,最后使用计算机求解该方程组,获得需要的解。目前常用的分析软件

有:ANSYS、ABAQUS、ADAMS、NASTRAN、COMSOL 等;其中 ANSYS 软件作为一款经典的 CAE 产品能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,如 Creo、NX、Solid works、AutoCAD 等,是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,其功能强大,操作简单方便,现已成为国际最流行的有限元分析软件。

电梯是当前超高层建筑必不可少的设备,其主要作用是在垂直高度运送乘客和货物,运行速度和运行安全性是电梯的两大重要性能指标。根据 GB/T7204-2008《电梯、自动扶梯、自动人行道术语》中的规定:电梯(Lift Elevator)——服务于建筑物内若干特定的楼层,其轿厢运行在至少两列垂直于水平面或与铅垂线倾斜角小于 15° 的刚性导轨运动的永久运输设备^[2]。电梯从空间上可以划分为四大部分,如图 1 所示。而从功能上又可以划分为八大系统,如图 2 所示。对重系统作为电梯八大功能系统之一,是决定电梯曳引能力的一个重要部件,它的作用是用来平衡轿厢自重和额定载重量,从而实现电梯节能的效果。对重系统位于井道内,通过曳引钢丝绳(钢带)经曳引轮与轿厢连接。在电梯运行过程中,对重装置通过导靴在对重导轨上滑行;同时,可通过重量补偿装置来弥补由曳引钢丝绳(钢带)引起的对重侧与轿厢侧之间重量差值,从而确保电梯平稳正常运行。对重装置主要由对重框架、对重块、导靴等部分组成,如图 3 所示,为了使对重装置能够对轿厢起到最佳的平衡作用,必须正确计算对重装置的总质量,一般取值为:

$$W = P + \varphi \times Q$$

W——对重装置总质量(kg)

P——轿厢本身净质量(kg)

φ ——平衡系数(通常 0.4 ~ 0.5)

Q——电梯额定载重(kg)

对重框架作为对重装置的主要承载部件,一般用槽钢作为主体结构,高度不宜超出轿厢高度,其强度刚度是否满足实际工况要求决定了电梯能否可靠、稳定的

运行。目前，在电梯对重框架的开发设计过程中，由于没有相关的文献作为设计的参考，设计人员一般根据以往经验以及理论计算来评估其强度刚度性能，而这些方法均不能准确反映对重框架在复杂工况下的变形及应力

分布，从而不能更加合理地设计该结构^[3]。针对上述问题，本文利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件，对电梯对重框架进行了实际工况下的受力仿真分析，可以为设计人员提供一定的参考。

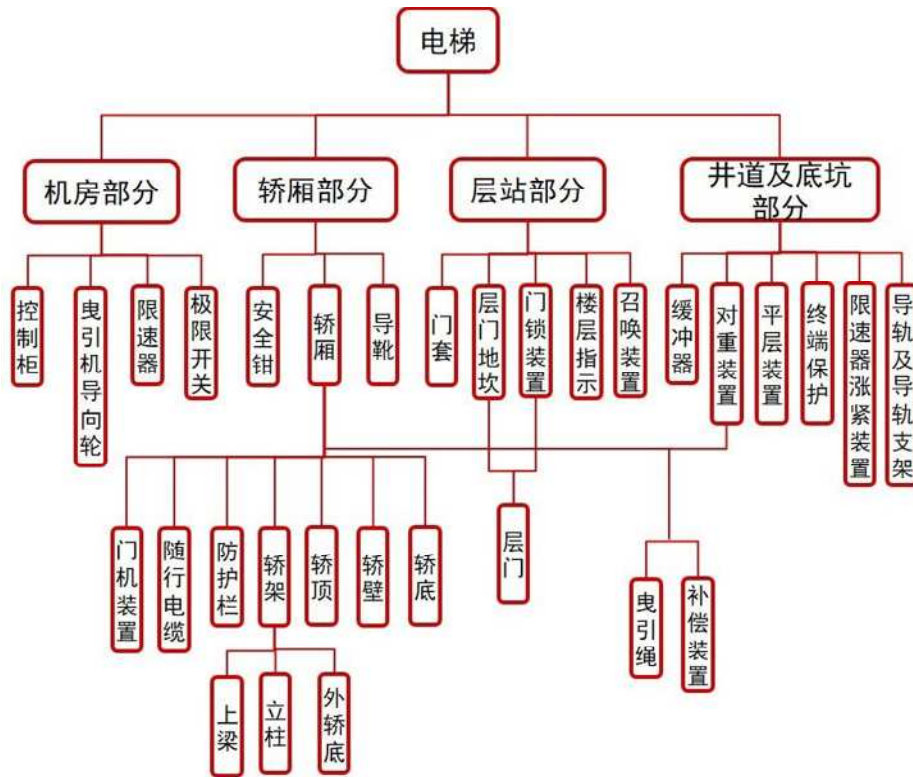


图 1

	名称	功能	主要构件与装置
机械部分	曳引系统	输出与传递动力，驱动电梯运行	曳引机、导向轮、返绳轮、钢丝绳等
	导向系统	限制轿厢和对重的活动自由度，使轿厢和对重只能沿着导轨作上、下运动，并承受安全钳工作时的制动力	轿厢（对重）导轨、导靴及导轨支架等
	轿厢系统	用以装运并保护乘客或货物的组件，是电梯的工作部分	轿架和轿厢体
	门系统	供乘客或货物进出轿厢时用，运行时必须关闭，保护乘客和货物的安全	轿厢门、层门、开关门系统及门附属零部件
	重量平衡系统	平衡轿厢的重量，降低驱动功率，保证曳引力的产生；补偿电梯因曳引绳和电缆长度变化带来的重量转移	对重装置、补偿装置
电气部分	电力拖动系统	提供动力，对电梯运行速度实行控制	曳引电动机、供电系统、速度反馈装置、电动机调速装置等
	电气控制系统	对电梯的运行实行操纵和控制	操纵箱、召唤箱、位置显示装置、控制柜、平层装置、限位装置等
	安全保护系统	保证电梯安全使用，防止危及人身和设备安全的事故发生	机械保护系统：限速器、安全钳、缓冲器、端站保护装置等；电气保护系统：超速保护装置、供电系统断相错相保护装置、超越上下极限工作位置的保护装置、层门锁与轿门电气联锁装置等；

图 2

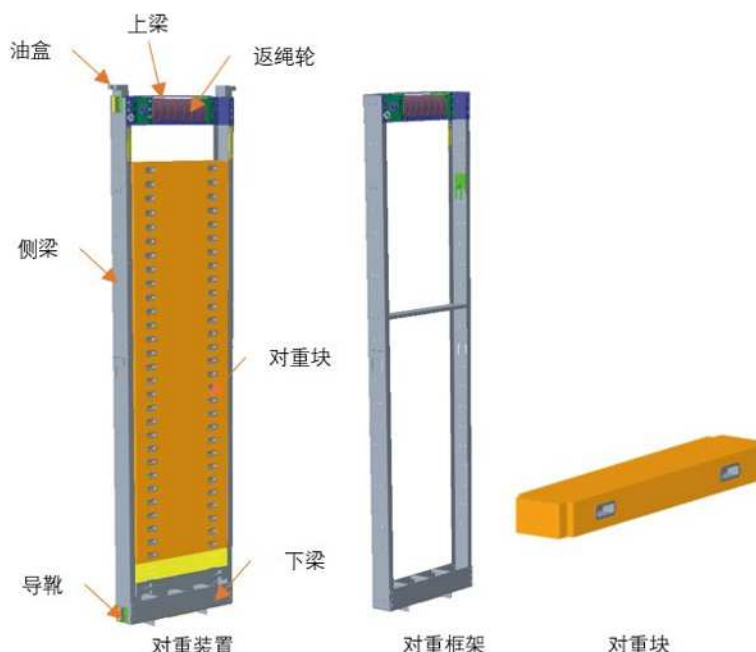


图 3

1 对重框架结构的有限元模型与边界条件

本文主要进行对重框架结构的静力学分析与模态分析，需要用到 ANSYS Workbench 软件的 Static Structural 与 Modal 两个模块。在 Creo 中建立电梯对重框架的三维模型，并对其进行简化处理，如将螺栓、油盒等非关键部件去除，部分倒角、圆角进行优化等；另外，由于对重块在结构中只起到配重作用，故为减少计算量，将其重量等效为下梁面上的作用力。通过关联接口或第三方格式，将模型导入 Workbench，并作进一步处理，如为划分网格方便，对模型进行切割处理等。

对重框架模型的材料与界面处理如下：对重框架一般用槽钢作为主体结构，弹性模量为 $E=210\text{GPa}$ ，密度为 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ ，泊松比为 $\nu=0.3$ 。屈服强度 $\sigma_s=235\text{MPa}$ 、抗拉强度为 $\sigma_b=375\text{MPa}$ 。

对重框架模型的网格处理如下：三维模型一般网格划分为四面体或六面体网格，对于较复杂结构而言，一般采用四面体网格进行控制，插入 Method, Geomtry 中选择全部，Method 中选择 Tetrahedrons（正四面体网格）；然后插 Sizing，选择体或者面，设置网格大小，网格越小，结果越准，但计算量越大；因此，可添加多个 Sizing 使得关注部位网格足够细，且总体网格量适中；对于对重框架结构而言，重点关注的是上梁和下梁的结构强度，因此对该区域进行网格细化，而对于侧梁等部件可以设置较大的单元，网格划分结果如图 4 所示，单元数为 165459 个单元，节点数为 327539 个节点。

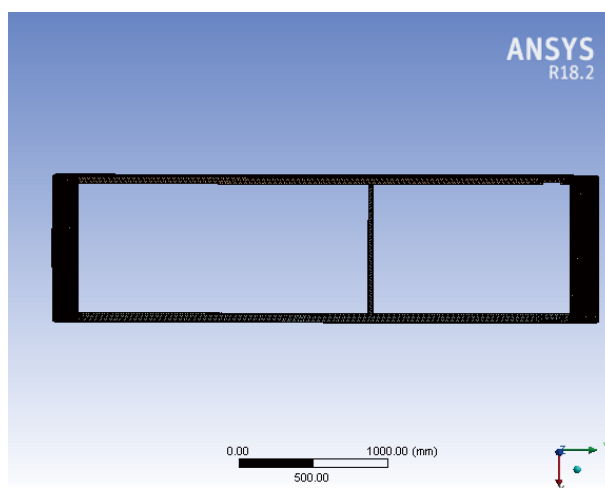


图 4

对重框架模型的约束与加载处理如下：作用于对重框架结构的载荷为对重块质量、对重框架自身重量以及曳引钢丝绳（钢带）的作用力，为了在计算时考虑动载荷影响，据 GB7588-2003《电梯制造与安装安全规范》，正常运行工况采用 1.2 倍载荷系数进行计算，对重框架冲击缓冲器工况采用 4 倍载重进行加载。在本文中，轿厢本身净质量 $P=1053\text{kg}$ ，电梯额定载重 $Q=800\text{kg}$ ，对重装置总质量 $W=1429\text{kg}$ ，对重块质量 $M=1362\text{kg}$ 。施加的惯性加速度为 9.8m/s^2 ，方向为 Y 方向；侧梁导靴安装孔处施加位移约束，在坐标系 Y 方向上为 Free，在 X 和 Z 方向位移为 0；由于对重块在模型中被简化，需要在下梁上表面的平面上施加 Force 载荷。正常运行工况下，在上梁与反绳轮连接处施加由曳

引钢丝绳（钢带）作用的作用力，并在Y方向上施加位移约束；对重框架冲击缓冲器工况下，在下梁底部施加由冲击缓冲器产生的作用力，并在Y方向上施加位移约束；对重框架模型的约束与加载结果如图5所示。

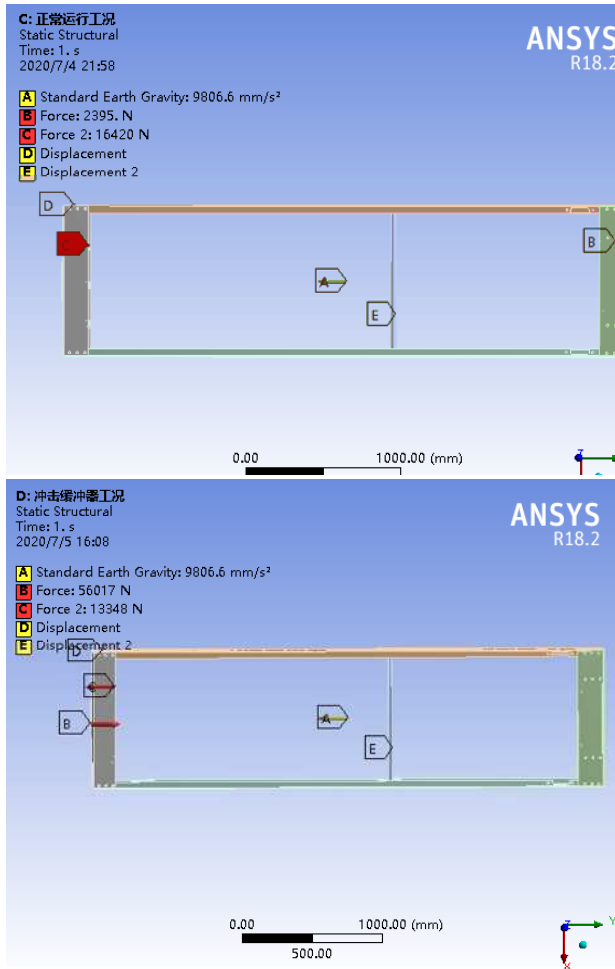
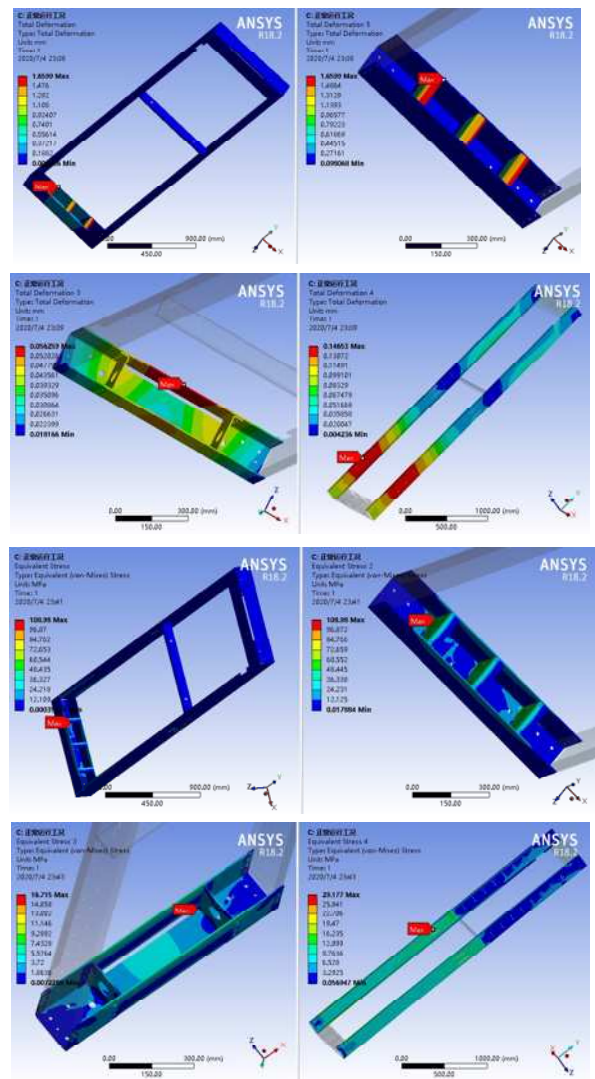


图 5

2 计算结果与分析

2.1 对重框架正常运行工况下计算结果与分析

正常运行工况下，电梯对重框架整体及各受力部件的变形云图与等效应力云图如图6所示。由变形云图可知，对重框架的最大变形发生在下梁的对重块支撑板上，为1.66mm，其次变形较大处为侧梁下部靠近下梁处，为0.15mm，两者均小于许用变形量10mm；由等效应力云图可知，对重框架整体的最大等效应力为108.98MPa，发生在下梁与对重块支撑板的焊接处，而下梁其他部位的等效应力则远小于该值；上梁和侧梁处的最大等效应力分别为：16.72MPa和29.18MPa。由于正常运行工况是电梯频繁应用的工况，故以屈服强度来校核其强度，则对重框架的最小安全系数为2.16，满足正常运行工况下，电梯对重框架的强度要求。



2.2 对重框架冲击缓冲器工况下计算结果与分析

冲击缓冲器工况下，电梯对重框架整体及各受力部件的变形云图与等效应力云图如图7所示。由变形云图可知，对重框架的最大变形发生在下梁的对重块支撑板上，为1.69mm，其次变形较大处为侧梁下部靠近下梁处，为0.53mm，两者均小于许用变形量10mm；由等效应力云图可知，对重框架整体的最大等效应力为224.87MPa，发生在下梁与缓冲器冲击板的焊接处；上梁和侧梁处的最大等效应力分别为：6.13MPa和85.59MPa。由于对重框架冲击缓冲器工况是不经常发生的，且一旦发生就要更换新的对重框架，故以抗拉强度来校核其强度，则对重框架的安全系数为1.67，满足对重框架冲击缓冲器工况下，电梯对重框架的强度要求。

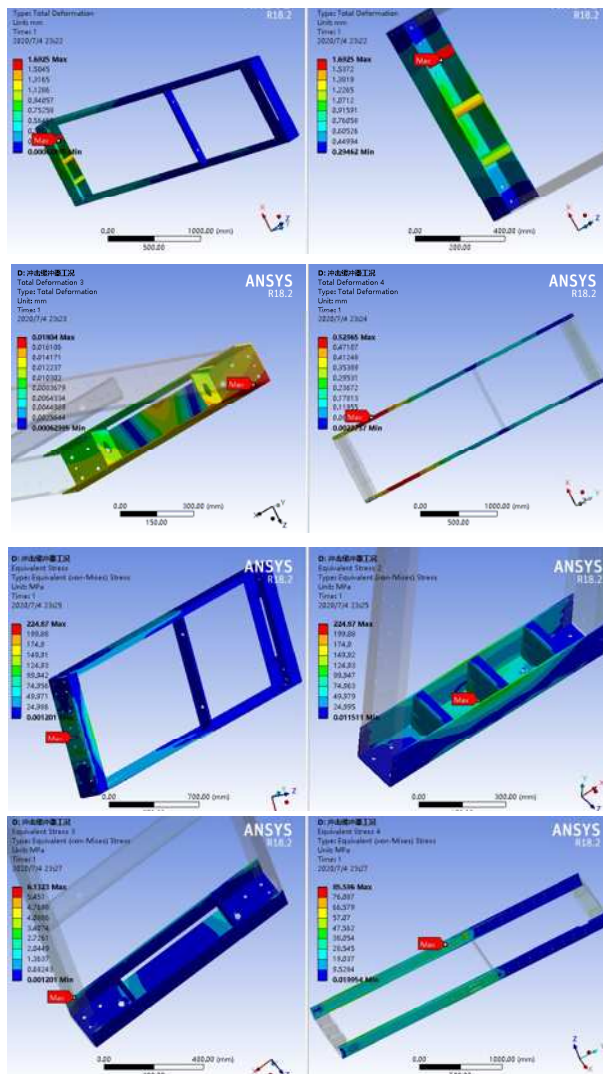


图 7

2.3 结果与分析

电梯对重框架的前 12 阶固有频率如表 1 所示, 可见其前 6 阶固有频率几乎为零, 因为该 6 阶固有频率对应的是框架自由状态下的 6 个自由度。对重框架第 7 阶至第 12 阶的振型云图如图 8 所示。由振型云图可知振型主要为侧梁的扭转与弯曲变形。

表 1

MODE	Frequency[Hz]
1	0
2	1.7771e-003
3	3.6236e-003
4	4.9989e-003
5	0.17087
6	0.56133
7	4.825
8	19.069
9	22.768
10	42.701
11	51.497
12	53.151

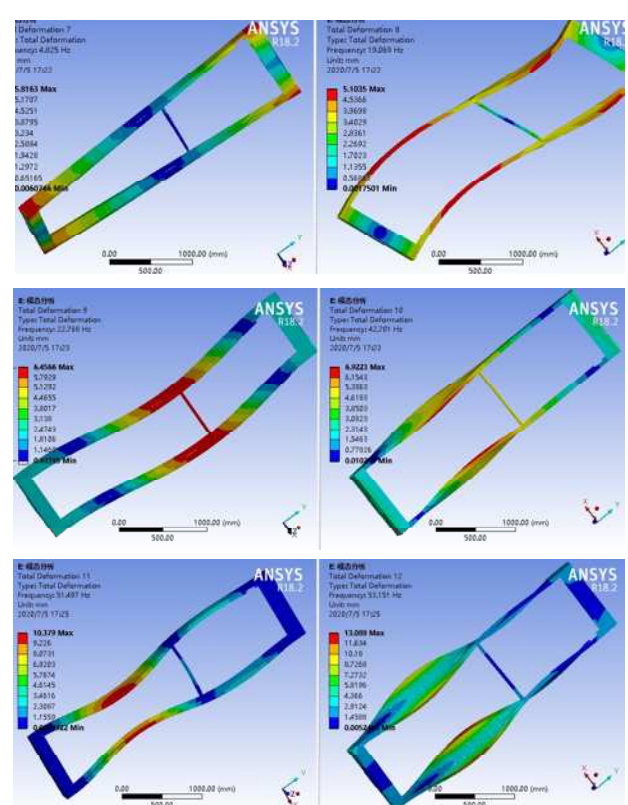


图 8

3 结论

本文利用 Workbench 有限元分析软件, 对电梯对重框架在正常运行与安全装置动作 (冲击缓冲器) 两种工况下的位移变形与应力分布情况进行了分析, 并分别校核了两种工况下的强度, 均满足强度要求; 但两种工况下最大应力均发生在下梁的对重块支撑板处, 可见此处是该对重框架结构的薄弱环节, 在后续改进设计中需加强注意。另外, 也对电梯对重框架结构的模态进行了分析, 得出了其前 12 阶固有频率及振型, 发现振型位移最大处均位于侧梁; 而强度分析结果的高应力区域为下梁可见该结构还是比较安全的。因为强度分析结果的高应力区域与某一阶模态振型位移较大区域重合的话, 高应力区域有可能就是疲劳裂纹的萌生位置^[4]。

【参考文献】

- [1] 杨朝丽. 计算机辅助工程 (CAE) 发展现状及其应用综述 [J]. 旅游研究 (2):50-54.
- [2] 邹玉静. 针对电梯结构强度的 CAE 分析 [J]. 起重运输机械, 2007,000(011):59-61.
- [3] 曹向红. 基于电梯对重框架的有限元分析 [J]. 机电工程技术, 2018,047(002):69-72,120.
- [4] 刘笑天. ANSYS Workbench 结构工程高级应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.