

自动扶梯主机机架的有限元仿真分析

代清文 林国斌

中山蒂升扶梯有限公司 广东中山 528403

摘要: GB16899对自动扶梯的支撑结构的强度、刚度做出了具体要求,作为桁架的组成部分的主机机架很难在桁架的总体计算中体现其恶劣的力学环境,考虑到主机机架的重要性,对其结构进行单独的受力分析显得尤为重要。本文从一个实际案例出发,结合GB50017的要求,通过NX的有限元仿真计算,模拟主机机架的特殊受力条件,得出机架构成部件的强度和刚度响应,并根据计算结果云图提出改进意见,指导工程实际。

关键词: 自动扶梯; 主机机架; 有限元; 应力; 变形

扶梯的主机是扶梯运行的心脏,承担着向整个扶梯提供动力的功能。而扶梯主机的正常运行,主机机架发挥着不可或缺的作用。主机机架连接着主机和支撑系统,是主机输出动力的直接承受者,其应力和应变的状态直接影响着整个扶梯系统的有效运行,见图1。国标GB16899《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》5.2.5条对支撑结构的设计要求为“设计的支撑结构应能够支撑自动扶梯或自动人行道的自重加上5000 N/m²的结构额定载荷。应根据GB 50017—2017钢结构设计标准进行计算。”但是这一规定很难直接应用到主机机架的设计上。一方面规范中的5000 N/m²并没有直接作用于主机机架,另一方面,主机机架的受力环境比较严酷,局部应力可能导致整体的失效。笔者试图通过一个案例的设计计算,和广大同行共同探讨自动扶梯主机机架设计问题。

主机位于自动扶梯主驱动轮的附近,减速器和主驱动链轮直接链条连接,驱动链条相对于水平机架成约45°角,每台扶梯有特定齿数比(例如齿数比为17-65)。主机通过3-4颗8.8s级高强度螺栓连接于主机机架,主机机架通过焊接与自动扶梯型钢桁架连接。

主机机架是一个焊接装配体,不同厂家会有所不同,通常由以下零件组成,见图1:

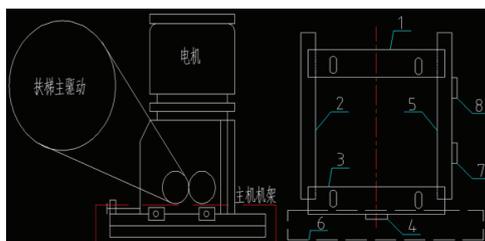


图1 主机机架的工作位置及组成

前支撑板(1)、左支撑板(2)、后支撑板(3)、前后调节板(4)、右支撑板(5)、横梁(6)、后端左右调节板(7)、前端左右调节板(8)。其中,横梁6直接焊接到桁架左右弦杆。主机机架采用碳素结构钢或低合金结构钢材料(如Q235B),符合GB700或GB1591之要求。主机底座是铸铁材料,符合GB/T9439的要求。铸铁和碳钢之间有一个摩擦系数,影响着本案例的计算。

1.有限元模型的建立

本案例中,由于电机及减速器的强大刚性和质量集中,我们将它们简化为一块钢板。如图2所示。

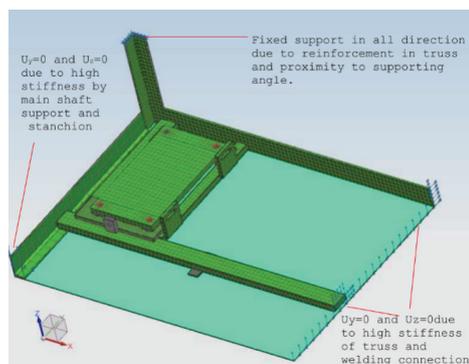


图2 模型简化、网格、约束

模型中机架和主机之间的连接仍然和实际的连接一样,考虑了螺栓的刚性、强度、大小、摩擦系数及接触。主机的输出轴和链轮采用刚性体单元RBE2进行模拟,链轮的直径和偏心按照实际主机的数据设置。主机的质量采用集中质量单元CONM2来模拟,本例中质量为435KG。

1.1 螺栓连接

螺栓用圆形截面的梁单元进行模拟。T头和螺杆予

以忽略。接触面按照实际建模。其与梁单元的连接采用无限刚度刚性单元（RBE3）进行模拟。

为了达到更为精确的数值模拟，螺栓材料材质、几何及刚度方面的参数必须正确赋予模拟梁单元。考虑到国内有限元模拟计算的规定不够具体。笔者按照德国标准 VDI 230 对螺栓模拟直径进行计算。等效半径为 7.658mm（M20）。

1.2 焊接连接

所有的焊接连接采用线到面的接触或粘接进行模拟和简化（RBE2 刚性单元和 RBE3 蛛网单元），刚性单元被认为有无限刚性。因此此处的模拟虽能有效表达荷载的大小，但无限的刚性有可能带来计算的奇点。因此，直接与无限刚性单元连接的点的应力将会被区别对待。

1.3 边界条件和接触

主机机架安装于桁架上段，计算中桁架被简化了，但桁架对机架的约束需要正确地复现。边界条件需要正确地考虑损失的刚度。本例中作者将垂直于截断面的位移设为零，边界约束条件见图 2。

在主机底座和主机机架之间，我们定义了接触。在这里相对运动是有条件允许的，由于两相互接触的材质分别为低碳钢和铁，实测摩擦系数为 $\mu=0.14$ 。两接触面通过 4 颗 M20 8.8 级螺栓连接并施加预拉力。预拉力大小为 125kN，满足 GB50017-2017 的要求。

1.4 加载

如前所述，主机的链轮及主轴简化为刚性单元，链轮的形状和半径都被精确地模拟。驱动链的张力直接作用于链轮两侧。为了考虑主机自身的重力作用，在竖直向下方向施加了 9.81m/s^2 的重力加速度。

· 施加荷载大小取决于给定提升高度下梯级、梯级链重量，张紧站张紧力及活荷载的大小，在本项目中，驱动力大小如下：

$$F_{an,stat}=46859.5N$$

$$F_{an,r,stat}=2231.4N$$

考虑安全系数 $\gamma_{Q,1}=1.5$ 后，实际仿真中所施加的力为：

$$F_{an,stat}=1.5 \cdot 46859.5N=70289N$$

$$F_{an,r,stat}=1.5 \cdot 2231.4N=3347N$$

对于固定螺栓，我们对 M20 的 8.8 级螺栓施加了预拉力和拧紧扭矩。同时，摩擦系数按规定取 0.14。

$$F_{VM}=86218N\text{—预拉力}$$

$$M_A=315Nm\text{—拧紧扭矩}$$

1.5 网格及单元

网格单元采用六面体 HEXA8，网格大小 5-50mm，具体取决于实物的大小及重要性。本例中桁架不是分析的重点，网格大小可以大一些。对于重要的零件，沿厚度方向至少要有 2 个单元。

2. 验证计算

2.1 强度计算

将每一个零件的等效应力（v. Mises）与该零件的屈服应力进行比较，以检验设计的符合性。在本案例中，主机机架和桁架本身都采用 Q235B 材质，因此材料的屈服强度为 235Mpa。在仿真结果的云图显示中，我们将超过 235Mpa 的区域显示为深红色。T

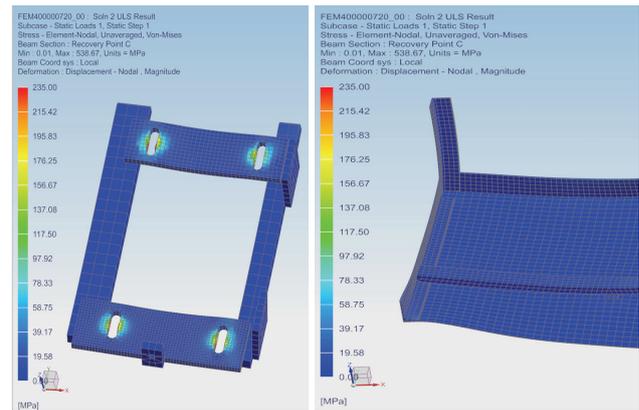


图3 主机机架（左边）和桁架（右边）的等效应力（von Mises）

图 3 显示了静载下 1.5 倍的安全系数时的等效应力分布，总的来说，主机机架内的应力都低于 235Mpa。但是，在螺栓夹持的位置发生了应力集中现象。这是由于在该位置网格单元与无限刚性单元 RBE3 直接接触，这在设计生产中是不会发生的，因此，该处应力集中可以忽略。

在桁架和主机机架托梁 2 之间的相交转角处同样发现了应力集中现象，最大应力超过了 235Mpa。对于这个位置，通过仔细的分析和模拟，我们发现主要原因是桁架立柱上的固定约束使得立柱的刚性非常大，以至于在桁架和主机机架托梁之间产生了应力集中，实际环境中该处的强大的刚性不存在，因此，我们也选择无视该处的局部应力。

在主机机架托梁（POS2）和支撑板（POS1）之间也有应力集中的倾向（见图 1），这里有两方面的可能原因，一方面是该处距离无限刚性单元太近（介于 RBE3 和固定约束之间），另一方面该处直接承受主机的驱动力及螺栓的预拉力，建议实际生产中加过渡焊缝或将支撑

板改为逐渐过渡，最终项目采用了相应的加强方案。

2.2 焊缝

通常，我们用边到面的连接来对焊缝进行建模，采用RBE2、RBE3刚性单元来模拟焊缝的作用（对一些不重要的焊缝也用粘接来模拟）。因此，在构件边缘上的每一个单元的网格节点力可以被提取出来作为作用在焊缝上的力（见图4）。图4显示沿焊缝长度上节点力的分布。

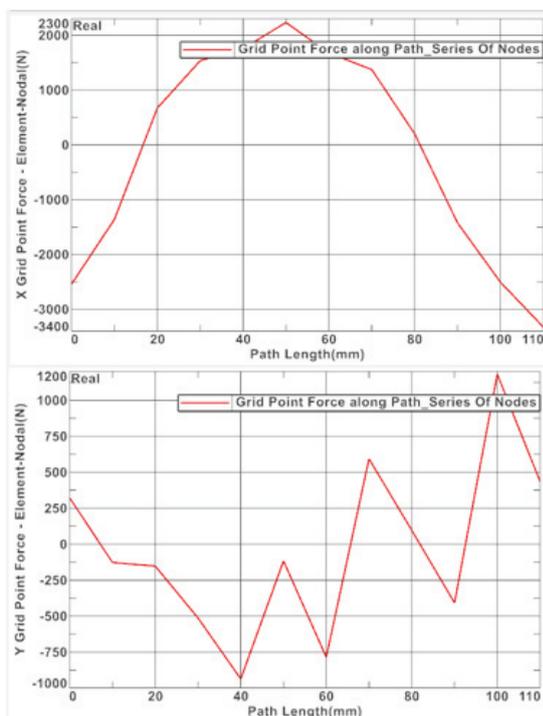


图4 关键焊缝上节点力分布（X向及Y向）

本案例中，我们只对机架支撑横梁（pos2）和机架支撑板（pos1）间的焊缝进行计算。该焊缝处于高应力区域，是关键焊缝。根据GB50017-2017，我们采用最大节点应力法来保守地计算该焊缝。

根据图4的有限元计算结果，焊缝既受到正应力作用，也受到切应力的作用，因此，采用等效应力来对焊缝强度进行校核是合适的。

主机机架支撑板厚度16mm，连接支撑横梁和支撑板的焊缝设计厚度5mm，焊缝长度每侧110mm。单元大小

6.16mm。据此。校核计算如下：

关键焊缝设计校核

根据GB50017-2017，直角角焊缝的强度设计值

$$f_{tw} = 160\text{MPa}$$

根据GB50017-2017，正面角焊缝的强度设计值增大系数

$$\beta_f = 1.22$$

由图13可以看到，垂直于焊缝方向及沿焊缝方向的受力分别为

$$N_{\sigma} = 3400\text{N} \quad N_{\tau} = 1200\text{N}$$

在本案例中，焊缝厚度及长度分别为：

$$H_e = 5\text{mm} \quad L_w = 6.16\text{mm}$$

根据GB50017-2017，该焊缝应力计算值为

$$\text{正应力:} \quad \sigma_f = \frac{N_{\sigma}}{H_e \cdot L_w} \quad \sigma_f = 1.104 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$f_{wRD} = f_{tw} \beta_f \quad f_{wRD} = 1.952 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_f \text{ 小于 } f_{wRD} \quad \text{计算满足}$$

$$\text{剪应力:} \quad \tau_f = \frac{N_{\tau}}{H_e \cdot L_w} \quad \tau_f = 3.896 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_f \text{ 小于 } f_{tw} \quad \text{计算满足}$$

$$\text{等效应力:} \quad \sigma_{eqt} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \quad \sigma_{eqt} = 9.851 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{eqt} \text{ 小于 } f_{tw} \quad \text{计算满足}$$

综上，焊缝满足设计要求

结论

通过有限元分析，主机机架各零部件的材料选择及几何尺寸满足规范及使用要求，局部地方需做避免应力集中的优化。

焊缝的计算表明，所设计的焊缝满足荷载及边界条件要求。

该主机机架可用。

参考文献

- [1] VDI 2230 part 1&2 : 2003
- [2] DIN EN 1993-1-8
- [3] GB50017-2017
- [3] GB16899-2021