

## 自动扶梯为啥发生事故？

时间:2012-12-26

点击率:28157

## 自动扶梯为啥发生事故？

陈光南 吴臣武

2011年，某品牌自动扶梯发生了导致人员伤亡的严重事故。人们都在询问：为啥会发生事故？如何才能避免这类事故的再次发生？

相关人员对事故扶梯进行了事后勘查，经过细致的查找与分析，发现了该事故起因于其自动扶梯驱动主机与前座板的一枚联接螺栓(即①号螺栓)的疲劳断裂<sup>注</sup>(见图1和图2)。这一断裂引发了随其后的一连串破坏：首先受影响的是联接主机与同一座板的另一枚螺栓(即②号螺栓)，它因为与座板螺孔啮合部分的螺纹被切断而拔出；紧接着是驱动主机，由于与底座失去联系，在主驱动链负载的拉动下，驱动主机向后倾斜并扭转、移位；随之主驱动链从驱动主机小链轮上脱离，失去驱动和制动力的扶梯链条系统在乘客载荷的作用下逆转下滑；最终酿成人员伤亡的灾难性后果。

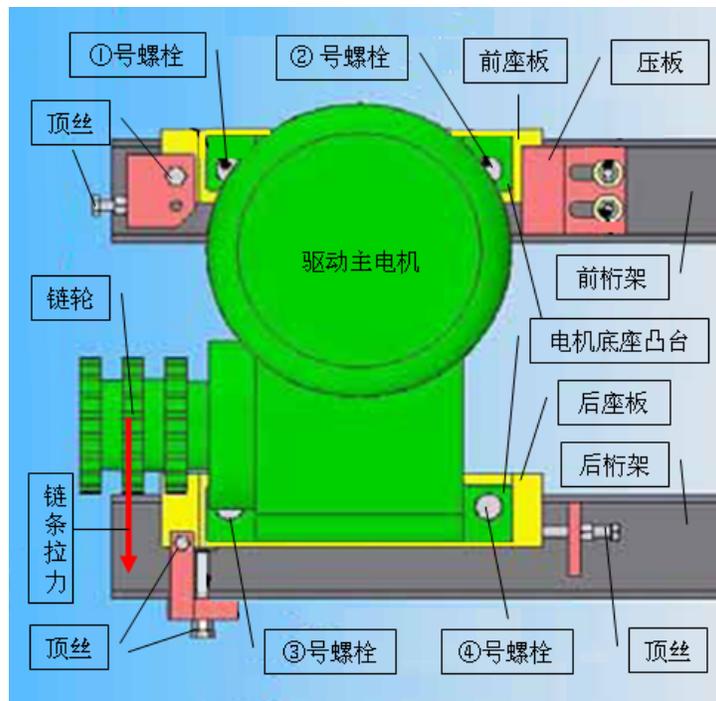


图1 自动扶梯驱动主机及其支撑系统示意  
(引自国家电梯质量监督检验中心检测报告)

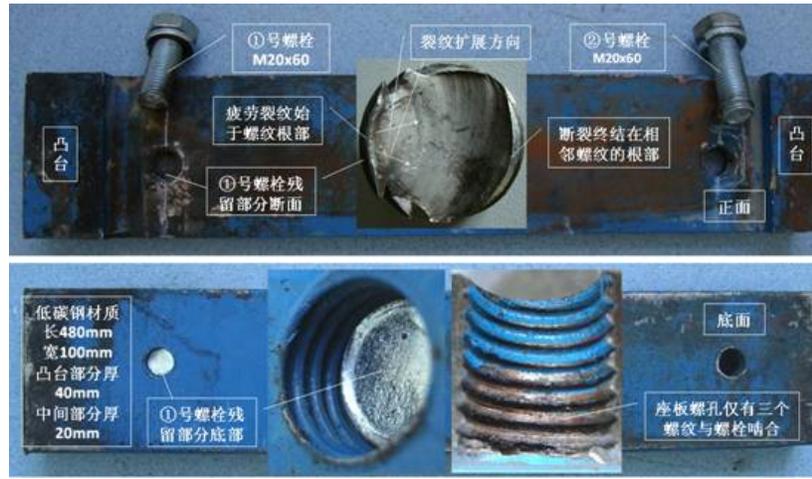


图2 事故扶梯驱动主机的前座板及联接螺栓破坏后的实物照片  
(引自国家钢铁材料检测中心检验报告)

首先，让我们来讨论①号螺栓断裂原因。根据前期的事故分析报告，导致①号螺栓断裂的可能原因主要有两个：一个是联接驱动主机与座板的四个螺栓的长度问题，另一个是驱动主机的底座凸台面是斜面的问题。下面我们来讨论，这两个问题是不是导致①号螺栓断裂的真正原因，或者说谁才是导致①号螺栓断裂的真正原因。

在讨论螺栓的长度问题之前，需要先弄清与它有密切关系的座板的来历。这两块座板是因为驱动主机的底座尺寸小于设计要求而设置的，是自动扶梯制造商设计变更的产物。由于插入了座板，主机与支撑桁架的直接联接方式，也不得不改变为主机联接座板、座板再与桁架联接的间接固定方式(见图2和图3)，由此便增加了联接主机和座板的四枚螺栓。这种间接联接方式显然会降低系统的刚度和抗振能力。此外，实物勘查还发现，这四个螺栓与座板的联接采用的是“螺栓—螺孔”组合而不是“螺栓—螺帽”组合，这又进一步降低了结构的承载能力。更要命的是，负责传递主机振动载荷的这四枚联接螺栓的长度比设计要求短了5mm。这一问题的直接后果是，使螺栓与座板啮合部分的螺纹数由5个减少到3个(见图2的下图)，该部分所承受的应力因此增长了2/3，其发生断裂的风险也因此大幅增加。至于发生断裂的为什么是螺栓而不是座板？这可以从两个方面加以解释：一是该螺栓的受力情况较底座板更为恶劣，二是低碳钢底座板更易于通过变形吸收能量来阻止或延缓裂纹的形成与扩展。上述分析说明联接螺栓，特别是其与座板的啮合部分易于发生断裂，但不能解释其疲劳断裂的原因。

现在来讨论驱动主机的底座凸台面倾斜的问题。主机底座凸台的倾斜度测量结果是：内高外低，斜度约 $2^\circ$ 。在这种斜面上预紧螺栓，的确有可能在螺栓中产生弯曲应力。但由此断言是这一弯曲应力导致①号螺栓疲劳断裂，需要进一步斟酌。首先，这一弯曲应力即使存在，也应该是静力，它不可能导致疲劳破坏。其次，该弯曲力在螺栓中产生的应力应该是左侧为压应力，右侧为拉应力，这就是说，该螺栓的疲劳裂纹源应该在其右侧而不是左侧，这与该螺栓实际断口(见图2上图中部的照片)的观察结果正好相反。而且，根据事故扶梯设计方提供的计算依据，该螺栓的强度满足使用要求。材料检测结果也表明，该螺栓的材质和性能符合设计要求。上述分析说明：即使存在因主电机底座凸台倾斜在联接螺栓内产生的弯曲应力，这力也不会导致该螺栓断裂，更不会其疲劳断裂。

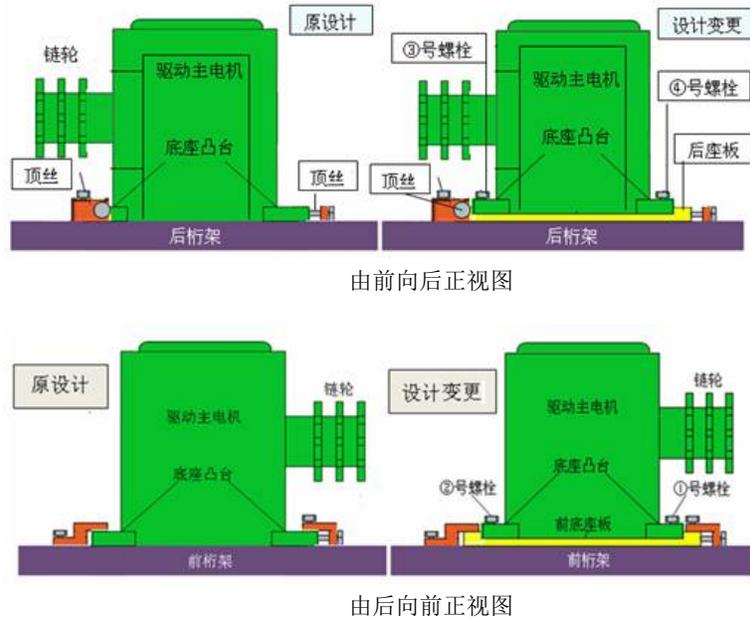


图3 设计变更前后电机与前底座板以及前桁架连接方式变化示意

我们知道，疲劳破坏一定是相当强度动载荷的作用结果，而上述两个问题都不能解释①号螺栓的疲劳破坏，这就说明在事故扶梯的使用过程中，一定由于某种原因产生了异常动载荷。现在我们来分析这异常动载荷的形成原因：

众所周知，自动扶梯的运行是通过驱动主机旋转将电能转变成机械能来实现的。在这个过程中，或多或少总有一部分能量会转变成电机及其支撑系统的振动能。换言之，在自动扶梯运行时，驱动主机及其支撑系统实际上始终处于振动状态。不过，一般情况下，这种振动都被控制在很微弱的范围，不至于影响电机系统的正常工作，除非系统经受了超出设计允许的动态外载荷，或因某种缘故改变了系统的固有频率。对于本案例，调查结果表明，事故发生当时的载荷并未超过该自动扶梯的允许载客流量。这就是说，这场事故很可能是由于该自动扶梯制造商采取的设计变更措施，改变了电机系统的固有频率，并由此导致系统发生异常振动形成的。如下分析证实了这一判断：将电机系统简化为单自由度弹簧振子系统，并建立有限元模型，通过数值计算求解其振幅的频响函数和系统的刚度与质量以及激励频率之间的关系（有关分析计算的细节，读者可参阅陈光南等撰写论文的“自动扶梯事故典型案例分析”，刊载于《力学实践》2012年第34卷第6期）。计算结果表明：在系统的质量和激励频率给定的情况下，刚度愈大，振幅愈小，系统运行愈安全；反之，刚度愈小，其振幅也愈大，系统愈容易趋近共振，运行愈危险。因为事故扶梯的设计变更大幅降低了系统的刚度，即大幅降低了系统的固有频率（前三阶分别下降了45%、49%和53%），这不仅大幅提升了该系统的最大振幅，还使最大振幅所在区域（图4中红色区域）由后桁架转移到了前后两座板的左侧，其中包括①号螺栓与前座板联接的部位。由于扶梯主驱动电机是依靠螺栓与座板联接的，这振幅实际上就是作用在联接螺栓上的动态载荷，系统刚度愈低，其振幅愈大，联接螺栓承受的拉伸载荷也就愈大，直至系统破坏。

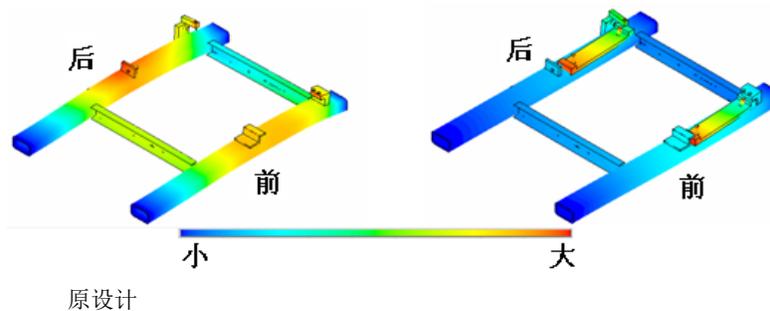


图4电机系统在一阶振型下的相对位移分布云图

不难看出：对于原设计结构，振动幅度最大的区域是后桁架的电机右下底座所在部位。因为，在电机的四个底座中，右下角底座区域受到的铅垂方向约束最弱(参见图1和图3的下图)。设计变更后，因为增加了垫板，电机与桁架不再直接联接，系统的大位移区域转移到刚度最低的两块垫板、特别是垫板的右端，即②号和④号螺栓所在的部位。至于座板两端的振动幅度为什么会不一样？或者说，②号和④号螺栓所在部位的振幅为什么明显高于①号和③号螺栓所在的部位？结合图1、图3和图4，就不难理解，其原因也是座板的①号和③号螺栓所在部位铅垂方向(由顶丝抵压)的约束强于另一端。事实上，如果再考虑由链轮传递的拉紧力作用(参见图1、图3)，由该力对电机系统产生的力矩主要通过①号和③号螺栓的内力构成的反力矩来予以平衡。换句话说，由链条拉力形成的力矩，将在①号螺栓中产生拉应力，而在③号螺栓中产生压应力，即在联接电机与座板的四个螺栓中，①号螺栓所承受的拉应力是最大的。这也从另一个角度说明，为什么疲劳断裂的是①号螺栓而不是其它螺栓。

这就是我们对于2011年某自动扶梯事故原因的分析。



注：一般而言，关于材料或结构的断裂是否疲劳断裂，在材料和工程领域的直接依据就是断口特征。因为疲劳断裂载荷明显低于材料的屈服强度，因此交变拉伸疲劳断口不会有明显的宏观颈缩。而疲劳源往往形成于材料或结构中存在冶金缺陷(如夹杂物和偏析等)、加工工艺缺陷(如机加工、焊接或切割等)和设计缺陷(如几何突变等)并易于导致应力集中的地方，疲劳裂纹的扩展方向通常垂直于最大主应力方向。在交变载荷作用下，裂纹尖端的应力以及裂纹前端的塑性变形程度和扩展速度都会呈现交变状态，于是就会在断口上留下有如树木年轮样的痕迹。诸如上述道理，人们就有可能通过材料或者工件的断口判断出造成断裂的原因，经验丰富的工程技术人员，甚至可以据此分析出断裂前材料或工件经历的载荷状态及其变化过程。这种判断，有如植物学家或气象学家，依据树木的年轮，便可分析该树木生长时期和所处地理位置的气候与环境。

