

电梯制动器失效模式分析与安全冗余设计

姚鹏

苏州江南嘉捷电梯有限公司杭州分公司，浙江杭州，310000；

摘要：电梯制动器是保障乘客安全运行的核心部件，其性能直接关系到整机的制动力和事故防控水平。随着高层建筑密度与电梯使用频率的持续上升，制动器在长周期高负荷工况下的失效问题逐渐显现。本文以电梯制动器为研究对象，系统分析其常见的机械、电气与控制失效模式，并在此基础上提出多维度的安全冗余设计策略，包括双制动系统、智能故障监测机制与机械—电气耦合型失效自保方案。研究表明，通过精确识别失效路径并构建主动防控与被动容错的双重机制，能够显著提高电梯系统的整体安全性与可靠性，为高密度城市环境中的电梯设计与改造提供理论依据与实践参考。

关键词：电梯制动器；失效模式；安全冗余；机械设计；智能监测；系统可靠性

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.031

引言

随着城市化进程不断加快推进，电梯已然成为高层建筑里不可或缺的垂直运输设备，其安全性问题更是受到监管部门、制造商以及用户的普遍关注。在各式各样的电梯安全装置当中，制动器属于最为关键的控制终端之一，肩负着制动、保持以及应急保护这三重职责，特别是在断电、失速、超速等极端工作状况下，它堪称是最后一道防线。本文会围绕制动器的关键失效路径、安全隐患识别以及冗余控制策略来展开细致深入的研究，致力于为构建面向未来的电梯安全防护系统给予理论层面的基础以及技术方面的支撑。

1 电梯制动器常见失效模式分析

1.1 机械结构失效路径

电梯制动器出现机械失效的情况，其主要原因在于长期保持高频次的运行，这使得其产生了物理疲劳，而且还出现了磨损不断积累的状况。常见的一些问题有制动弹簧失去效用、摩擦片发生脱落现象、闸瓦出现错位情况以及制动臂产生断裂等情况。在诸多的机械元件里面，摩擦片属于那种会最直接对制动轮起到作用的部分，它的材料所具备的耐热性、所具有的硬度以及热膨胀系数，这些方面都会对制动力的稳定性以及其衰减速度产生直接的影响。要是处在频繁制动的状态下，并且长时间处于高温且高压的环境当中，那么摩擦片就极其容易出现硬化的情况，甚至会产生龟裂，更有可能发生剥落的现象。

部分旧式电梯所采用的单边制动结构，在偏载工况下会出现受力不均的情况。这种受力不均，使得支撑销轴更容易出现偏磨现象，或者致使铰链发生失灵问题，进而造成制动力分布不均衡，存在一侧抱闸而另一侧松

闸的隐患。回顾近年来多起制动失效事故的案例能发现，其中大多数问题并非是突然出现的，而是因为长期存在的磨损情况没有被及时察觉并加以处理才导致的。这一情况表明，传统的周期性维护机制已经没办法满足在现代运行强度之下的安全方面的要求了。所以，优化机械结构的耐久性、材料的稳定性以及应力分布设计，并且结合实时监测的手段去动态捕捉机械疲劳的迹象，这已然成为当前制动器进行安全设计时的首要任务。

1.2 电气控制系统异常引发的制动失灵

除了机械方面的因素之外，电气系统出现控制方面的异常情况，同样也构成了电梯制动器失效的一个重要源头。在那种典型的电磁弹簧制动构造当中，制动线圈肩负着在释放状态以及保持状态之间进行切换的功能。要是电流供应方面不够稳定、控制逻辑存在错误或者受到信号干扰的话，就极有可能引发制动动作出现迟滞的情况、断电的时候不抱闸或者抱闸出现滞后等一系列现象。特别是在高层建筑当中，供电网络往往比较复杂，而且电磁干扰也十分频繁，在这样的环境之下，制动器所依靠的PLC控制指令、接触器反馈信号以及断电保护链是非常容易被信号抖动给扰乱的，进而就会产生误动作。除此之外，像接触器粘连、继电器的使用寿命不断衰减、电磁线圈出现匝间短路等等这些电气部件老化方面的问题，同样也会致使系统没办法按照设定好的逻辑去做出响应，进一步就会导致控制方面失去效力。更为隐蔽的一点在于，当电气系统并没有配置足够完善的自检功能的时候，这类潜在的问题通常在早期阶段是很难被发现的，一旦出现极端的载荷情况或者供电方面出现异常，那么就很容易引发严重的安全事故。所以说，提升电控系统抵抗干扰的能力、进行冗余配置并且增强故障自诊断的能力，这几个方面是保障制动器能够可靠运

行的极为关键的环节。

1.3 控制逻辑和软件系统潜在失效因素

伴随智能化控制系统被引入进来，现代电梯越发依靠PLC、变频器以及嵌入式软件来做逻辑方面的决策以及信号的处理工作。虽说控制逻辑的添加使得响应精度得以提高，也具备了能效调节方面的能力，不过与此同时也引来了新的失效风险情况。像是存在控制逻辑有误、程序更新出现冲突、参数设定存在误差等这类问题的话，那是会直接对制动器执行机制产生影响的，在部分控制模式进行切换的过程当中，甚至还会出现指令丢失、输出延迟等状况，如此一来闸瓦就没办法按照预先期望的时间去动作了。

软件系统有可能因为版本兼容性方面存在的问题，又或者是系统升级时出现错误，从而致使制动状态的识别出现偏差，进一步还会诱发系统对轿厢位置或者运行状态做出错误判断。尤其是在群控系统当中，多台电梯之间状态反馈的交互十分频繁，这样就更容易引发控制逻辑方面的冲突了。所以呢，在开发以及部署的阶段，要针对控制软件展开充分的安全测试，并且要让其进行模拟运行，同时引入硬件级别的“失效保险”机制，防止过度地依赖单一的逻辑判断，以此来提高系统整体抵御故障的能力。

2 安全冗余设计路径与实现机制

2.1 双制动系统设计与同步控制策略

为了防止单一制动器由于机械方面或者电气方面出现失效情况从而引发极为严重的安全事故，有越来越多的电梯制造厂家在新型的电梯系统里面引入了双制动器这样的结构。所说的“双制动系统”，就是在曳引机的端部装上两套制动装置，这两套装置在功能上是相互独立的。当其中一套系统出现功能不正常或者性能有所下降的状况时，另外一套系统马上就能够介入进来去执行制动方面的任务，以此来达到在功能层面上有冗余保障的效果。这种结构不但能够在高层建筑或者高速电梯的场景当中适用，而且还可以在那些对安全性有着极高要求的医用电梯、消防电梯等有着特殊用途的场合广泛地应用起来。在具体开展设计工作的过程当中，有两个关键的技术问题是必须要去解决的：其一是要做好双制动器相互之间的同步控制工作，其二是要把制动优先级以及故障判别逻辑构建起来。为了确保制动性能不会遭到削弱，在系统的软件控制平台当中应当设置实时检测模块，借助传感器来采集制动电流、位移以及时间差等相关的参数，并且依据自学习算法来分析两个制动器在状态上的一致性。

与此同时，当某一侧的制动器出现动作超时的情况，又或者是力矩呈现出异常状态，再或者反馈信号丢失之时，控制系统便会即刻发出‘主闸故障切换’的相关指令，进而转由备用制动器去独自完成制动方面的任务，以此来保证轿厢能够一直处在可被控制的状态当中。从实际情况来看，双制动这样的结构在很大程度上提升了系统所具备的安全冗余能力，它在欧洲的EN81以及我国的GB7588等一系列安全标准里面，都已经被列为推荐选用的选项了，而且预计在未来开展电梯产品设计工作的时候，它将会得到更为广泛的应用。

2.2 机械与电气冗余融合控制架构

除了双制动结构之外，把机械冗余和电气冗余有机地融合起来，这可是提升系统整体安全性的一条重要路子。传统的制动器冗余设计，大多被限制在机械或者控制系统层面上。而在实际运行的时候呀，很多失效情况常常是电气和机械共同起作用所引发的耦合失效现象呢。就好比电磁线圈电流中断了，闸瓦就没办法释放出来，与此同时呢，机械卡滞还会造成二次抱闸失效这类情况。所以，在构建冗余系统的过程当中，得采用‘跨层保护、分布判断’这样的设计理念，要保证机械和电气子系统在不同的工况之下，都能够独立地承担起安全控制方面的任务。

比如，可以在制动器里面嵌入机械限位保护弹簧，当电气系统全部失效的时候，制动器依旧能够靠着机械惯性去完成紧急抱闸的操作。并且在控制系统当中设置好多通道供电、双重传感器路径以及断线自判逻辑，以此来防止电路出现单点失效从而引发制动盲区的问题。另外，还能够把机械状态识别器和电气反馈系统联合起来一块儿用，对摩擦片的开启或者闭合位置进行物理以及电信号这两方面的双重确认，以此来保证系统识别的准确性以及响应的即时性。这种融合型的冗余设计呀，不但提高了系统的容错能力，而且还明显地缩短了故障反应时间，为达成‘失效可控、故障自恢复’的目标筑牢了坚实的基础呢。

2.3 制动失效模拟平台与验证试验机制

冗余设计能发挥出有效性，这可不单单取决于理论模型以及参数设定方面，还得依靠系统化的仿真还有实车试验，以此来对它在各种各样工况之下的稳定性以及响应速度加以验证才行。所以说，去构建一个有着高仿真度的制动失效模拟平台，这已然变成了推动冗余机制能够实现工程化实施的极为关键的技术方面的支撑要素。当下主流的模拟平台是以机电一体化测试架构作为基础的，它把工业级PLC控制模块、伺服驱动系统、加速度传感器还有高精度数据采集卡相互结合起来，能够

如实复现制动器在启动、释放、出现故障中断、进行切换保护等等诸多不同类型的状态，而且还可以通过人为去施加像电气干扰、机械卡滞、载荷突变这类典型的异常参数，从而对系统的冗余响应链条以及容错效率做出评估。除此之外，对于新型电梯制动系统来讲，还得要在整机测试平台当中开展周期性的冗余切换试验，通过对抱闸延迟、制动距离误差、同步精度等等这些关键指标进行统计，来针对系统安全冗余性能给出量化的评分，进而形成可靠的工程参数数据库。实际情况表明，模拟验证平台不但让冗余设计的科学性以及可控性得到了提升，同时也给电梯制造商在产品设计、故障诊断以及质量溯源这些过程当中给予了很有价值的技术方面的支撑。

3 智能监测与运维系统的集成优化

3.1 状态监测集成优化

在现代电梯的制动系统领域，状态监测技术已然变成了确保设备能够持续且安全运行的关键所在。以往传统的电梯大多是依靠定期开展的人工巡检工作，以此来对制动器的健康状况加以判断。然而，伴随着使用强度不断加大以及技术条件逐步提升，这种依赖人工巡检的方式已经没办法去满足那种高频次以及高可靠性的运行方面的要求了。所以呢，去搭建起一套能够涵盖像位移、温度、电流、压力等诸多不同维度参数的制动器状态实时监测系统，这就成了制动安全得以升级的最为核心的一个环节。一般来讲，该系统往往是被集成在电梯的控制主板里面，或者是在独立的数据采集模块之中。它会凭借着多点部署好的传感器，持续不断地去获取诸如闸瓦位置、释放时间、摩擦片温度、电磁线圈电流波动等一系列的运行指标。然后再把这些指标结合时序分析以及状态识别算法，进而去判断制动器是不是存在诸如迟滞、偏载、过热等等这些故障发生之前的一些征兆。

与此同时，这个系统还应当具备报警以及自适应这样的功能。一旦所监测到的值超过了预先设定好的阈值，那么它就会自动地切换到预警模式，并且通过电梯的主控系统发出关于运行限制的指令，或者是直接就停止电梯的服务，以此来避免那些潜在的事故发生。在实际的应用当中，这类智能监测装置可不单单是能够极为显著地提升设备在故障识别方面的及时性，而且还能有效地去缩短平均故障恢复所需要的时间，从而为构建起那种以“预防为主、预警响应”为特点的运维体系给予了非常坚实的技术层面的支撑。

3.2 制动器健康评估模型以及寿命预测方法

和传统的被动维护策略不一样，健康评估和寿命预测着重于凭借对历史运行数据以及实时状态量展开分析，从而主动去察觉设备的退化趋向，并且提前做好维保计划的规划工作。这一技术应用到制动器系统当中的时候，得依靠多源数据融合且由算法来推动的分析平台，搭建起面向各个不同使用场景的健康状态评分体系。首先，可以依据传感器数据来构建运行画像，从中提取像摩擦片磨损速率、抱闸频率、释放时间偏差等这类关键指标，再把制动次数、电流峰值还有环境温度变化结合起来，以此建立一个加权评分模型，进而对设备的健康等级做出分级判定。

引入机器学习方面的算法，像支持向量机呀、决策树之类的，或者还有神经网络等，凭借历史上的维保记录以及故障案例库来训练寿命预测模型，以此达成对各个不同部件剩余使用寿命予以动态评估的目的。这种方法跟传统的寿命表法相比起来，呈现出更突出的个性化以及精细化的特点，在工况较为复杂、运行又很频繁的城市电梯群控系统当中尤其适用。从运维这个层面来讲，把健康评分的结果结合起来去制定有差异化的维保计划，这样就能把原先那种固定按照周期性来开展的检修转变成为一种由‘状态驱动’的智能维护模式，进而提高资源利用方面的效率，让制动系统整体的寿命得以延长，并且使故障率得以降低。

4 结语

在电梯产业朝着智能化以及集成化不断迈进的进程当中，未来制动器系统所具备的安全性能，其依靠的将不再仅仅只是硬件设计方面的可靠性了，而更多地会取决于系统彼此之间协同状况以及感知能力是不是能够得到提升。所以说，进一步去强化制动器系统在其全生命周期当中的管理工作，并且把人工智能还有物联网相关手段融合起来以便实现持续不断地优化，这已然成为了推动城市当中垂直交通系统朝着安全且可持续方向去发展的一个极为关键的方向。

参考文献

- [1]陈祥卓.曳引机制动器的检验探讨及案例分析[J].机电工程技术.2022, 51 (11) .
- [2]华逸晨.电梯制动器故障分析及其检验检测研究[J].机电工程技术.2024, 53 (6) .
- [3]郝凤莲.电梯制动器失效形式与检测探讨[J].现代制造技术与装备.2023, 59 (3) .
- [4]王若虹,王金奇.电梯制动器常见失效形式与检验要点研究[J].中国设备工程.2022, (21) .