

高速铁路接触网悬挂参数设计与性能分析

李默然

中铁二院工程集团有限责任公司 四川成都 610031

DOI:10.32629/ems.v8i6.20597

[摘要] 随着我国高速铁路网络化和高速化的发展,高速铁路列车的时速不断提高,牵引供电系统的稳定可靠是保证高速铁路运营安全的重要前提。接触网是一种开放式、无备用的重要供电装置,通过与弓网的动力接触实现电能的传输,其悬挂参数的合理与否将直接影响到弓网耦合特性和列车的受流品质。基于此,本文梳理系统结构分类与核心组成,阐述关键参数的设计理论,深入分析悬挂参数对受流稳定性、系统动态响应及运行可靠性的影响机制,通过动力学仿真开展参数优化与性能验证,结合工程实践提出施工与运维质量控制措施。以为行业内相关人员提供参考。

[关键词] 高速铁路; 接触网; 悬挂参数; 弓网受流; 动态性能

引言

我国高铁已经在 350 km/h 或更高速下实现了规模化运行,这对牵引和供电装备的适应性提出了更高的要求。接触网悬挂系统是弓网系统的核心部件,其参数的确定直接关系到弓网动力耦合效应,是保证列车平稳运行和供电连续性的重要因素。如果悬架参数设计不当,极有可能引起接触压力不平衡、离线电弧、接触线偏磨等现象,甚至危及行车安全,增加运营成本。基于高速铁路安全运营需求,本文聚焦接触网悬挂参数设计与性能影响规律,探究最优参数匹配方案,完善高速接触网设计技术体系,助力高速铁路工程高质量建设与安全运维。

1 高速铁路接触网悬挂系统概述

1.1 接触网悬挂系统分类

高铁接触网悬挂体系可分为单悬吊和链式悬吊两种,其结构特点和应用场合均有显著差别。简单悬架由导线、支撑和定位机构构成,结构简单,成本较低,但其弹性均匀性差,动态波动大,只适合 160 km/h 的低速轨道,不能满足高速列车的流动要求。采用链式悬挂方式,在接触线之上增加承力绳,使承载绳和接触线之间具有灵活的连接,显著提高了系统的弹性均匀度和动力稳定性,是目前高铁悬架的主要型式。我国高铁干线广泛使用的是柔性链式悬架,在此基础上,通过增加柔性吊索,可进一步优化其在 350 km/h 及以上的高速列车运行需求,并在隧道、站场等特殊地段,根据不同的工况和区段,使悬挂型式保持一致,并加强零部件的防腐、防风设计。

1.2 悬挂系统核心组成部件

由承力索、接触线、吊弦、弹性吊索、定位装置和锚节

接头等组成的接触网悬架体系的主要组成部分,它们相互协作,共同完成对电网的稳定供电。承力索主要承受导线的重量,要求其强度高,耐疲劳,耐腐蚀,一般选用铜合金绞线;接触导线与受电弓的摩擦接触,需要具有良好的导电性、较小的摩擦系数和较高的机械强度。悬索可分为一般悬索和弹性悬索,其作用是传递载荷,保证悬索的纵向平直度,是调整悬索弹性的重要组成部分;弹性吊索作为柔性链式悬索的核心部件,其主要功能是降低定位点和跨距的弹性差异,提高整个跨度的水流均匀性;该定位机构负责对触点导线的侧向位置进行固定,并控制牵引量,保证弓网和接触线的精确接触;锚节接头可使邻近接触网锚段平稳过渡,避免接触硬点,保证弓网顺利通行。

2 高速铁路接触网悬挂参数设计理论

2.1 接触线高度与弛度设计

接触线高(导高)是接触网基准设计参数,是指接触线下表面到轨道表面的垂向距离,是根据弓网工作范围、线路限界和运营维护要求而进行的。目前,我国高铁接触网的标准接点高程 5300 毫米,允许施工误差 ≤ 30 毫米,警告误差 ≤ 60 毫米,限值偏差 ≤ 100 毫米,特殊地段如站场、隧道等可根据实际情况进行调整,确保全线导高平稳过渡。接触线松弛是表征承力索在自重和拉力共同作用下的承力索下坠量的关键指标,在设计中需要对承力索与承力索之间的张力配比进行力学计算,以避免松弛过大引起的接触线动力波动过大,而松弛过小则增加部件张力,加剧疲劳损失,保证在整个温度区间内弛度满足运营标准。

2.2 吊弦间距与张力参数设计

悬弦距的大小直接影响着接触网的弹性均匀性,因此,

悬弦距的设定必须考虑到性能要求和工程造价。在 350 km/h 的高铁柔性链式悬索体系中,采用 8-12 米的直线段悬索间距 (8-12 m),在跨中处受到动载作用显著的情况下,将其加密到 8-10 m,并按曲率半径进行调整,以防止产生局部弹性薄弱环节。悬索张力的参量要与承力索和接触线的张力协调配合,一般的悬索拉力不能太大,以免压坏接触线而引起变形;采用弹性悬索拉力,既要兼顾弹性调整的作用,又要兼顾结构的稳定度,行业规范要求要求在 2.5-3.5 kN 之间,采用专门的拉力装置进行精确调整,以消除拉力不平衡的问题。在此基础上,对悬索长度的加工和安装进行了严格的控制,以确保接触线的纵向不出现显著的起伏,提高了弓网的接触舒适性。

2.3 跨距与锚段长度参数设计

接触网跨度是指相邻立柱之间的横向间距,其设计的关键在于如何在行车速度、荷载工况和工程造价之间取得平衡。350 km/h 的高铁线路,其直线段的跨距一般为 60-65 米,而在曲线区段,由于侧向荷载的增加,其跨距被缩短到 55-60 米,因此需要对其进行特殊的受力校核。档距太大容易造成接触网动抬升过高,增加了弓网离线的危险性;跨度太小,将增加支柱和基础的数量,增加工程造价,因此,需要对其进行技术和经济比较。考虑温度补偿、张力均匀性和失效影响区域等因素,高铁网锚长度一般为 800-1000 米,在锚段两端设置自补偿装置,以解决因温度变化引起的拉索-接触线张力自动调整,防止因张力突变而导致设备失效,并减小故障波及范围。

2.4 弹性吊索参数设计

弹性吊索是优化高速接触网弹性分布的核心部件,参数设计包括长度、张力、安装位置三项核心内容。弹性吊索通常是悬链架跨度的 $1/2 \sim 2/3$,在悬链区对称设置,两端由专用电缆卡与悬索相连接;拉力的设计要考虑到高速流动的要求,规范上的拉力应该是 3 kN,太小的话,就不能起到调整的效果,太大的话,又会失去调整的灵活性。通过精确的工艺控制,使定位点与跨中线的弹性差处于一个合理的区间内,消除接触网的弹性硬点,保证整跨弓网接触压力的均匀性,满足高速列车的动力需求。

3 接触网悬挂参数对运行性能的影响分析

3.1 对受电弓受流稳定性的影响

受流稳定性是接触网运行性能的核心评价指标,与悬架参数的匹配程度直接相关。接触线高度偏差和松弛度不均匀

会引起弓网接触压力波动,超过 80-120 N 规范值,引起弓网脱机、接触线烧毁等故障,影响列车供电。吊弦间距和弹性吊索参数的不当将导致接触网弹性分配不平衡,使定位点和跨中点的接触压力差异较大,从而加剧了接触线的局部磨损;档距太大,将增加接触线的动态抬升,提高离线率,从而影响到电力的连续性。相反,通过合理的参数设计,可以确保弓网接触压力平稳,离线率小于 0.5%,从而达到连续、平稳的受流目的。

3.2 对接触网动态响应性能的影响

在高铁运营中,接触网需要经受列车风、弓网升力和环境风等动力荷载的作用,其动力响应特征是由悬架参数所决定的。由于接触线和承力索的拉力不足,会造成接触网动力脉动频率下降,与弓网动力性能不匹配,从而触发系统谐振,加速吊弦和定位装置等构件的疲劳损伤。吊弦和弹性吊索张力不协调,将导致接触网动力刚度不均匀,在高速撞击作用下易产生局部应力集中,影响结构稳定;不合理的跨度和锚段参数将增加温度和风荷载对体系的作用,使结构的动力变形加剧。通过对悬架参数进行优化,可以提高接触网刚度均匀性、降低动力抬升和应力脉动,提高接触网承受动载荷的能力。

3.3 对系统运行可靠性与寿命的影响

接触网悬挂系统的设计是否合理,将直接关系到接触网装备的服役寿命和运营费用。接触线松弛和张力的不平衡,将加剧接触导线和弓网炭滑板之间的摩擦和磨损,从而缩短了换电周期;由于吊弦的安装偏差和定位参数的不当,会造成接触线的偏磨和扭曲,从而缩短触点的使用寿命;锚段接头和补偿装置的参数匹配不佳,容易出现卡滞、张力不平衡等故障,使设备的故障率提高。通过对悬架参数进行科学的设计,可以减少零部件的异常磨损,降低失效概率,达到提高高铁运行效率的目的。

4 基于仿真的悬挂参数优化与性能验证

4.1 仿真模型构建

采用弓网耦合动力学仿真软件,搭建时速 350 公里高速铁路接触网-受电弓仿真模型,纳入承力索、接触线、吊弦、弹性吊索等全部核心部件,将实际线路工况、环境荷载和列车运行工况进行了还原。以接触线高度、悬弦间距、悬索间距、悬索张力等为主要参数,建立多套参数的比较方案,获得弓网接触压力、离线率、接触线动态抬升等关键性能参数,为参数优化提供定量依据。

4.2 仿真结果与参数优化

通过多组参数仿真对比分析,明确各参数与性能指标的关联规律:在直线区段跨度62米,悬弦间距10米,吊索弹性拉力为3 kN,接触线高度5300毫米,接触线拉力25 kN,承载索拉力35 kN,使整个系统达到最佳工作状态,达到100~120 N,离线率只有0.2%,接触线的动升力小于120 mm,达到高铁运行要求。当跨度增加到70米时,接触线的动力抬升达到180毫米,离线率超过1%;当悬弦距大于12米时,悬臂在跨中的弹性明显降低,且接触压强差异达50 N以上,导致其抗流性大大降低。在此基础上,对各工况下悬架参数的最佳取值范围进行了研究,并对其进行了规范化设计。

4.3 工程适配性验证

以某高铁项目为例,采用接触网检测车和弓网在线监测设备对其进行了实测,研究表明弓网接触压力、离线率、接触线磨损率等各项指标都达到了行业规范,且在高速下无明显的离线和打弓现象,系统的动态平稳性达到了要求。在此基础上,对接触网元件进行优化,使接触网元件失效率减少30%,接触导线寿命提高20%,并对所提出的优化方法进行了验证。

5 接触网悬挂参数工程应用质量控制

5.1 施工阶段精准管控

接触网施工必须严格按照优化后的参数方案进行,并利用高精度的量测装置对撑杆的位置进行定位,并对接触线的高度和拨出量进行标定,以保证施工过程中的误差不超过规范要求。对吊弦和弹性吊索的安装进行了严格的控制,采取了预制的施工技术,保证了零部件的标准化加工和精确的安装;对主要构件进行拉力试验,确保承力索、接触线和弹性吊索的拉力满足设计要求;针对隧道、高寒、大风等特殊情况,提前进行参数设计,并做好防腐、抗风加固等工作,确保工程质量达到标准。

5.2 运维阶段动态监测与调整

采用弓网监测设备和接触网综合检测车,对接触网接触网的接触线高度、松弛度、磨损量和接触压强进行实时监测,并对其进行动态监测。根据季节气温变化和列车运行损失引起的参数偏差,适时进行张力调整、吊弦更换、接触线校正等运行操作,保证悬架参数在最佳运行条件下运行。实施预防性维护,对异常参数进行预警处理,防止事故进一步扩大,确保接触网的连续性、稳定性。

5.3 特殊工况参数适配优化

根据不同的运行条件,对悬架参数进行优化:在高海拔地区,加大悬架的拉力补偿幅度,选择抗冷的元器件,避免因温度过低而引起的拉力不平衡;在强风区增加抗风定位设备,适当减小档距,并优化接触角的引伸量,减小风对接触网的冲击;为确保接触网的受力顺畅,对接触网的受力进行了合理的控制,对接触网的受力进行了合理的控制。采用差别化的参数设计,提高了接触网在特殊条件下的适应性。

6 结束语

综上所述,高铁接触网悬置参数的设计是保证弓网系统平稳运行和列车安全高速运行的关键,其关键问题是如何实现多参数的协调匹配和动态优化。本文以350 km/h的高铁接触网悬挂系统为研究对象,通过系统结构、参数设计理论、性能影响机理等方面开展研究,确定350 km/h的高铁接触网悬挂系统参数优化设计方案,并提出全过程的质量控制方法。研究表明,通过对接触网接触线高度、档距、吊弦间距、吊索张力等关键参数的科学设计,可以有效提高弓网耦合特性和系统的工作可靠性,减少设备损失和维护费用。随着我国高铁提速、智能化发展,对接触网悬架系统提出了更高的技术要求。未来,将新型复合材料与智能监测技术相结合,深入开展弓网耦合动力学研究,并对悬架参数进行优化,以提高接触网的动力学性能、抗干扰能力和智能维护能力,为我国高铁牵引供电的可持续、高质量发展提供技术支持。

[参考文献]

- [1]于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社,2003.
- [2]李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2017.
- [3]王卫东. 高速铁路接触网设计与施工技术[J]. 铁道工程学报,2020,37(05):76-81.
- [4]张欣欣. 高速弓网耦合动力学性能及参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [5]国家铁路局. TB/T 2073-2017 高速铁路接触网运行检修规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [6]国家铁路局. 高速铁路接触网系统技术及其工程应用[J]. 铁道技术监督,2017(05):1-3.

作者简介:李默然(出生年—1982),男,汉族,籍贯:成都,学历:本科,职称:高级工程师,研究方向:接触网,其他信息。