

欧洲铁路的供电体系

吴成三

提要 欧洲铁路干线采用不同的输电体系,其起源与当时的牵引技术有关系,对高速运输也用不同体系,其中在接触线与机车车辆之间的输电经常是重要因素,有的情况下成为决定因素。本文论述输电技术的发展,使现今的列车速度可超出 300km/h。

关键词 欧洲 铁路 供电

1. 速度和供电关系

最近 10 年铁路干线速度已显著提高。在有计划的运营中利用乘客的感受也利用运营试验来衡量轮轨体系的运输效能。德、法和西班牙列车速度约在 300km/h,德国的 ICE 列车于 1988 年曾达 407km/h;法国的 TGV 列车于 1990 年达 375km/h,与 30 年前相比提高速度约 50/100。

1964 年日本修建东京到大阪新干线是第一条新而运能大的高速铁路。1981 年在欧洲接着修建巴黎到里昂、1988 年又修建夫娄伦茨到罗马,1989 年修建巴黎到雷曼,1991 年汉诺威到维尔茨堡和曼海姆到斯加特以及巴黎到塞尔维拉高速铁路。所有这些新线都用电力牵引。因为高速铁路除了需要良好的线路和适用的机车车辆外,还需有高效能的供电体系。特别是当列车时速 300km 的情况下,对机车车辆输电 10MW 是很困难的。这是因为此种情况已达到物理极限,许多技术人员认为近于 400km/h 或者说 500km/h 通过现用的接触线供电不可能办到,对此问题理论研究和大量试验指出一条途径,即研制新而改善的接触线体系和受电弓。

新形接触线体系产生符合速度和当时的供电体系,在电化开始时对 50Hz 的交流电没有足够效能的转数调节电动机,因而在干线上也用 1.5kV 和 3kV 的直流电在中欧产生 15kV/16 $\frac{3}{3}$ Hz 体系,新的电化计划只能在改善的牵引技术基础上采用工业频率 50Hz,多数采用 25kV 电压。

对高速线路不宜用直流体系,这是因为高效能的传动功率须由相应的电流所产生,而电流还需要合理的输电体系来保证。以传动功率为 10MW,其相应的电流在 3kV 时约 3500A,15kV 时约 700A,而在 25kV 时仅约 400A。对高速铁路多用交流体系。仅意大利在夫娄伦茨到罗马的新线保存 3kV 的直流体系,但对未来的新线考虑到过渡为 25kV/50Hz 对即有线的设备也经常研究过渡到 50Hz 的工业频率,不只造价高,也不能节省运营费,特别也不能减少亏损。因此,在法国和荷兰的传统线上,其运能已达极限(1.5kV 的直流体系)此种转变迄今仍不

能实现。除了上述的夫娄伦茨到罗马线路外所有新建高速铁路均用交流体系进行运营。

- 日本 $2 \times 25\text{kV}/60\text{Hz}$,
- 法国 1 或 $2 \times 25\text{kV}/50\text{Hz}$,
- 德国 $15\text{kV}/16 \frac{2}{3}\text{Hz}$,
- 西班牙 $1 \times 25\text{kV}/50\text{Hz}$ 。

2. 对接触线——受电弓体系的要求

接触线——受电弓体系必须满足高速要求(表 1)。德法的接触网采用 $15\text{kV}/16 \frac{2}{3}\text{Hz}$, 考虑到永久荷载上述要求几乎等于 $25\text{kV}/50\text{Hz}$ 。 $15\text{kV}/16 \frac{2}{3}\text{Hz}$ 体系的短路荷载明显较大, 珙形悬挂没有区别, 而绝缘必须按 $25\text{kV}/50\text{Hz}$ 设置。对此种体系的个别区段必须根据线路荷载由不同步的三相电网供电, 这是接触线体系的分隔点 Trennetellen 所需要的。在高速情况下输电到机车车辆必须特别可靠。要符合一切气候条件和不同的线路前提无论区间和隧道都是如此。如德国的 ICE 法国的 TGV 或日本的新干线可能同时设置更多的受电弓, 德国 ICE 设置两个; 法国 TGV 每单元设置一个、两个单元, 经常重联; 日本新干线用到 8 个受电弓, 其中电流不准中断, 如出现中断电源, 必须保持暂短时间, 勿使干扰电力制动机。

对接触线——受电弓输电体系的要求:

输电体系必须与供电体系相适应;

列车速度和受电弓数目是设计的基本参数;

必须保证受电弓离线的安全;

要求尽可能达到运营中不出现电弧;

必须使接触线与滑板之间的磨耗最少;

对接触线必须做到无养护或少维修的程度;

对简单链形悬挂结构尽可能做到大跨度;

接触线和受电弓都必须满足高速运输的要求。

可靠的输电自然也需要有机械作业足够安全的受电弓, 强风的作用能降低安全度, 滑板断裂和受电弓上的损伤对高速行车都意味着大的危险, 许多接触线出现的故障经常是由受电弓的缺陷所引起。

不准供电引起环境所不能承受的干扰, 这是因为接触线与滑板之间可能产生电弧, 电弧对附近居民区的光学和无线电技术产生干扰, 同时也加大接触线与滑板之间的磨耗, 根据经验对受电弓滑板和接触线的磨耗是随着列车速度和受电弓的滑板与接触线之间的挤压力(接触力)而增加, 另一方面较大的挤压力可减少电弧的形成。何去何从, 要进行优化, 对现代接触线在所有情况下通过 200 万弓次后必须更换。这是由于对接触线的维修和养护对运营受到限制, 损失大量费用, 这种维修和养护工作范围和次数必须减少到最低限度。

防腐材料的应用必须考虑上述要求。接触线的费用很高, 对接触线体系和形状应尽量选用造价低的。当然必须满足要求。

接触线和受电弓共同形成输电体系,其效能仅能按照其共同作用情况进行评定,为了取得满意的运营结果,这两个要素都要满足高速运营要求。不良的接触线即便利用合格的受电弓也不能取得满意结果,相反来说也是如此,此种情况已在模拟和运营中反复证明。

3. 接触线体系的基本结构和特性

在法国干线开始电化和其他国家在本世纪初期修建不同形式和特性的接触线体系。从实际运营经验和理论探讨以及时速超出 300km,在高速运输方面产生各种输电体系。

最简单的链形接触线结构仅由接触线和承力索以及其中间的吊弦所组成。此种结构的弹性特征由接触线和承力索的跨距和其中的张力所决定,用一条接触线和传统的张力值其跨中弹性为 0.5 到 1.5mm/N,链形悬挂的悬挂点到跨中其弹性值大不相同。悬挂点处的弹性仅达到跨中的 30—50%,法铁在时速 100km 以内采用此种形式,称为 Reloo。当时速达 120km 时清楚地表明此种形式的限值。在这种速度时已出现的接触力超出可承受的范围。法铁(SNCF)在太平洋高速运输中的 TGV 还用此种形式。

链形悬挂在悬挂点范围内采用 Y—辅助索。安装简易,接触线和承力索的跨距和张力也决定其弹性,当跨中弹性值为 0.5~1.2mm/N 时,对 Y—辅助索的长度与张力可以优化,使悬挂点处的弹性约达跨中的 80%,这对高速运输必须致力争取的。德铁对高速列车(ICE)于 1988 年 5 月时速峰值达 407km,给人印象深刻,此种接触线的形式也用于最高速度。

应用双接触线在跨距 65m 时促使弹性继续降低到 0.4mm/N。此种接触线类型在直流线路也普遍适用,这是因为在那种情况需要较大的导线截面。

新建铁路夫娄伦茨到罗马就是采用这个原则,德铁对此类型也在试验中进行检查,其动力行为比仅用一条导线和 Y—辅助索者较坏。

也用过结合工程法即在接触线和承力之间设置辅助承力索其弹性大量减少,在 65m 跨距时,跨中弹性可达 0.25—0.4mm/N,悬挂点处弹性达中跨的 90%。此种接触线类型由于其弹性小而且均匀,显得明显突出。这要看溯到 1912 年的西门子结构形式,此种接触线结构在试验中得出的结构最佳。但其质量提高需要大量花费,特别表现在锚段的搭接范围和交叉段。因此,德铁未采用此种类型,可是日本的高速铁路倒是照此装备了。

4. 搭接部分

接触线一般分为 1200 到 1500m 的段落,并在具两段设锚定装置,为了使受电弓从一个链形悬挂平稳过渡到下一个对导线必须搭接。如处理欠佳可能在接触线和受电弓之间出现力的峰值,电弧和在接触线上产生大量磨耗。在此范围内要对接触线行为进行优化,务使在这里的困难问题保持到最低限度。

传统的接触线在锚段部位搭接长度为 3 个支柱距离,在此种体系中一条接触线到下一条在中跨完成过渡受电弓在两条接触线运行的长度约为中跨的 1/3。这种链形悬挂的接触线在悬挂点处约升高 0.5m,当搭接长度为四跨时,两条平行的链形悬挂通过悬挂点时,出现力的峰值,同时产生大量磨耗,这是应当避免的,采用五跨搭接时考虑到了这个问题,德铁在新建高速铁路中采用了这种形式,所谓 Re. 250,在运营中行之有效。在时速 300km 时也未出现不正常

性。

5. 高速铁路的接触线

德铁新建铁路的接触线:

高速列车通过新线目前时速为 250km, 计可达 280km, 并考虑到继续提高列车速度。在每台动车组的头部动车设置一个受电弓。列车从接触线截流高达 1000A。新线设计为高速客车和货车混合运营。为此, 采用限坡为 12.5‰, 汉诺威到维尔茨堡新线通过中部山区须建隧道 76 座, 最长的 10km。

因为铜接触线配合电炭滑板(Schleirleisten aus Eleksokohle)使用中证明行之有效。在新线上也规定采用这种体系, 德铁预计此种接触线使用寿命为 30 年, 亦即通过 200 万弓次必须更换。

在这个前提下并遵守一般要求, 同时考虑到接触力尽量减小和在正常情况下升高值为 100mm, 对接解线进行了优化, 其目标是在时速 300km 时使接触力的平均值达 120N, 其容许偏差为 24N。

采用 Y 辅助索的简单链形悬挂可达到上述目标, 与传统式相比最大跨长由 80m 减少到 65m, 铜接触线截面增到 120mm² 和青铜承力索的截面加大到 70mm², 同时接触线和承力索的张力均提高到 15kN, 银铜合金接触线耐温强度高, 可提高张拉应力到 160N/mm²。

对 Y 辅助线在悬挂点处的重要性进行了深入研究, 其弹性平均分配十分明显, 没有辅助索的运营质量受到弹性限制, 仅用少量花费, 采用起决定性作用的辅助索是值得的。为了进行比较, 在新线的个别区段未用辅助索对接触力进行核查, 结果证明了用辅助索的明显地改善了接触线性能。

对容许恒定电流来说, 环境条件和许可的导线温度成为控制因素, 在锚段设施的工作部位限为 70℃, 当环境温度为 40℃ 和风速为 1m/s 时, 此时许可的恒定电流为 670A。链形悬挂在 15kV 时可输电 10MW。对 ICE 运营来说 6 分钟可通过 1000A, 是足够了。

德铁在新线上采用 Re250 并成功地研制出高效能的接触线, 这种接触线的输电功能以接触力的变化和链形悬挂中的动力限制是完全合理的。在受电弓的滑动中几乎不出现电弧, 这在 ICE 运营中随时都能看到。

马德里到塞尔维拉的接触线:

1924 年 4 月, 欧洲的马德里到塞尔维拉长约 480km 的新线开通。规定的列车时速 300km, 采用动车组运营(AVE)。目前的列车时速 300km, 同时有根据地提出其必要性。

辅助索长度和张力分别用 1.8m 和 2.8kN 进行过优化, 采用此值跨中弹性为 0.6mm/N 达到了目的。接触线挂在线路以上同样高度, 不存在跨中与悬挂点之间垂度问题, 试验结果表明: 预留垂度对高速行车是不利的。

提高接触线的张力不只对减小弹性有一定意义, 而且也决定高速列车对导线的应用范围。由于横向冲击沿导线产生传播速度, 波的传播速度在这里表示一个特性参数, 用 Re250 的数据对导线产生波速 426km/h, 一条导线可用此速度的 70% 进行运营约在 300km/h 对导线来说是允许的。在隧道中结构高度必须减小到 1.10m, 其最大跨距允许到 50m, 为了考虑施工方

法选用 44m, 这样可同许多试验结果所证明: 隧道和区间的运营特性相同。其电化制式为 25kV/50Hz, 由国家电网供电, 其中设 12 个牵引变电站, 供电线路约 40km, 因为变电站对不同的三相电网的导线连接, 电力供应段之间须设置分隔点, 所用的接触线与德铁新线上所用者相同, 其绝缘部分也无区别。这是因为 Re250 已经过充分优化而决定。

在运营中列车时速高达 345km, 18 个月中间无故障, 再次说明 4 种接触线 Re250 的高质量。

法国的动车组 TGV 的接触线:

1981 年巴黎——里昂的第一段开通。设计时速为 270km, 采用 25kV/50Hz, 从国家电网供电动车组的每个单元采用一个受电弓, 其中两个单元经常重连在一起。这样两个受电弓与接触线贴紧。受电弓的组成与德铁者不同, 法铁采用钢滑板, 其重量大需要的压力较高, 所用链形悬挂的组成, 由一条铜接触断面为 120mm^2 和一条青铜承力索以及在悬挂点处的 Y—辅助索可同 Re250 结构。在跨中曾预留垂度, 但锚段关节采用 4 跨已出现前面提到的缺点。

本接触线未考虑尽可能减小挤压力和升高值而进行优化, 而是必须用高压以避免有钢滑板处出现电弧, 结果并不满意。虽然接触线压力高还连续出现电弧, 在后面运行的受电弓还经常出现火焰。接触力大, 由于车辆带来的风力而更为加大, 同时, 由于不许可的升高值促使重量大的接触线经常发生故障。

对线路巴黎——雷曼——吐尔斯拟改善上述缺点采用无 Y 索的简单链形悬挂, 并用 150mm^2 的铜接触线, 其张力为 20kN, 利用这个体系加大许可升高值 1990 年在高速运行时升高值高达 350mm, 自然也产生链形悬挂的最大动力, 结果明显地没有达到目的, 接触质量未能改善, 这种现象可立刻从不断出现电弧看得一清二楚。英国铁路利用模拟对欧洲高速铁路输电系进行的比较也证明了这个结果。

日本高速铁路的接触线:

做为第一条新高速铁路为东海道线, 即东京到大阪于 1964 年开始运营。本线采用 25kV/60Hz 和自耦变压器, 每单元设一个受电弓, 同时有 8 个受电弓与接触线接触。这样受力非同寻常。第一个受电弓在接触线上滑行, 下一个受电弓接着而来, 这时接触线尚在摆动中, 在这种情况下进行输电非常不利。

为了在这种条件还能保证顺利输电, 采用一条很重的结合接触线, 它由 170mm^2 铜制成, 其张力为 15kN, 另一条 150mm^2 铜制辅助承载索其张力 15kN 和一条 180mm^2 钢承力索其张力为 25kN。弹性减小到 0.3mm/N。

受电弓采用钢滑板一方面要求高接触力, 另一方面与电炭滑板相比促使磨损较大, 在此种滑板与接触线不利的匹配情况下, 以及列车的密度大致使许多导线用到 4—5 年必须更换, 因而日铁对此种体系很不满意, 正研究进行改善。

高速铁路夫娄伦茨到罗马的接触线:

意大利国铁于 1991 年对高速铁路以时速 250km 在罗马到夫娄伦茨之间开始运营, 可同其他意铁线路采用 3KV 直流体系在运营中用低电压截取高电流, 不采用 Y 辅助索的简单链形悬挂而用两条接触线, 每条各为 120mm^2 铜线张力为 15KN 和 160mm^2 承力索为铜合金, 其张力为 27KN, 区间跨距为 60m, 断面为 160mm^2 。本线将通行高速列车 250km/h。由于电流

大需用两个受电弓并装备铜滑板,意铁对受电弓时速 250km 时表示满意,当速度提高到 300km/h 就不十分成功,在后面滑行的受电弓中断,接触次不断增加,高速行车用直流电压进行输电,是一个未解决的问题。

6. 综合随想

对时速 250km 的高速铁路进行输电在技术上是一个不易满足的问题。由于理论研究和实践的不断发展和其相互作用,并在近十年修建和运营经验的基础上,工程公司和西门子在慕尼黑科技中心的领导下研制出一种高速铁路接触线,并能满足运营中的一切要求。特别考虑到对环境不许可的干扰问题,同时具有相当长的使用寿命。把降低接触力作为研制中的指导原则,这样产生的结构自然也考虑到其他已存在的形式,试运转及其理论研究还指出继续提高列车速度的可选择的途径。

外文中介绍德、日、西、法、意五个国家七条高速铁路的接触线使用情况,其中德铁所用的接触线 Re250 最为突出:具体表现在不出现电弧又能延长使用寿命达 30 年,即以此两点而论,其经济技术经济意义可想而知,西班牙利用德铁的接触线结构,列车时速高达 345km,运营 18 年来接触线也未出现故障,足以证明德铁的 Re250 结构形式和质量是经得起考验的。

德铁接触线体系的主要特点是采用 Y 辅助索使其弹性均匀,又采用电炭滑板和五跨锚段可减小接触力,降低磨损,更重要的是不产生电弧防止对附近所用光学和无线电设备的干扰。其他三个国家所用的接触线均存在着严重缺点,特别是日本新干线,其接触线使用寿命只有 4—5 年,就得更更换。法国的两条新线的接触线采用钢滑机,目的在于避免电弧,实际上恰恰相反,电弧不断出现,意大利新线采用直流体系存在着许多技术上未解决的问题。

总之,修建高速电化铁路是经济发展的需要,其中接触线与受电弓之间的输电体系是电化工程中一个重要因素,在某种情况下成为决定性因素。我国即将修建高速电化铁路,应及时深入研究各国的经验教训,选择最合理的接触线结构形式。切勿临渴掘井,仓促上马,遗患无穷!

(参考资料略)

吴成三编译自:ALBRECHT BRODKORB:“Strom — Versorgungssysteme in Europa, Energieerzeugung auf die Fahrzeuge”《Der Eisenbahningenieur》1994. 2.