

电气化铁路技术的开发和应用

电气化工程局的设计研究院等设计单位结合设计中迫切需要解决的课题开展了不少供电、接触网方面的科研项目,取得不少成果并已获得推广,郑州、成都和北京等路局的设计、科研部门也是一支直接与电气化设计、运营有关的科研力量,在近十几年来也取得多项电气化方面的科研成果。

一、供 电

1. 接触网,

我国铁路电气化是从山区线路开始的,因而隧道内,特别是低净空隧道内的接触网悬挂成为当时急需解决的重要课题,在科研、设计等单位共同努力下,先后完成了“人”字悬挂、钢铝导线性简单悬挂和拱型支架的研究试验项目,从而使宝成、宝天和鹰厦等多隧道线路区段按期进行电化改造,节省了大量的隧道开挖工程费用。

在运营中接触网最初暴露出来的严重问题是绝缘薄弱,1975年成都火车站连续发生大面积绝缘污闪造成长时间中断供电。1982年和1983年石阳段发生大面积污闪,一次中断供电达24小时。经试验研究确认是接触网绝缘子的污闪电压过低的原因,从而进行加长爬电距离绝缘子的研制工作,先后试制出爬距920毫米和1200毫米的棒式绝缘子,改装这种绝缘子以后,大面积污闪事故被控制住了。在繁忙干线的电气化铁路上接触网维修的时间很少,清扫绝缘子很困难,因此研究比瓷绝缘子更耐污的合成材料绝缘子是势在必行的。现在已有约15000个硅橡胶绝缘子或绝缘部件在石太、成渝、宝成、贵昆、北同蒲、鹰厦、天兰、陇海等电气化线路上安全可靠地运行着,它们基本上是不需要清扫的,而且轻而牢固,并容易安装。

接触网消耗有色金属量很大,为了节省铜材,从1963年初就开始了钢铝导线和铝合金的研究。铝镁、铝镁硅、铝镁硅铁等铝合金导线因为易形成硬点、磨耗快等一些缺点而未获推广。钢铝导线的研制着眼于耐腐蚀、耐磨耗、施工方便,机械强度大,而且应避免焊头,经多年来不断研究改进,研制出十磷铜稀土钢铝导线(10PCURE(D))。1985年研制出GLCN250内包式钢铝导线,1989年完成3000米无焊头的大长度(内包钢)铝导线,现在已有3853正线公里接触网使用了钢铝导线,占接触网总长的57%。在石太、丰沙大等繁忙、大运量线路上的钢铝导线长期可靠地运行着,每万弓架次的磨耗为0.25—0.6平方毫米,铜导线也在不断改进中,其强度和导电率都已达到国外先进水平。

为了减少导线和受电弓滑板的磨耗,二者需要有合理的匹配,这方面已进行了长期试验研究,从铜导线用的碳滑板,钢铝导线用的铜基碳滑板,含油粉末冶金滑板到最近研制

的浸金属碳滑板。这种滑板已达三万公里的使用寿命。由于浸金属滑板具有抗冲击、耐磨耗、强度大等优点，是一种很有前途的滑板。

在承力索方面，为了提高接触网电性能，减少维修工作量，研究了防腐承力索，载流承力索，已制出铝覆钢绞线，铝锌合金镀层钢索，耐腐蚀指标比普通镀锌钢索高2—5倍，在零部件方面，已有型钢零件，渗铝的和铜合金的零件。上述承力索和零部件投入使用后，使接触网的运行水平有很大的提高。

为使接触网保持平滑受流所需要的良好的结构状态，需要进行接触网参数检测技术及检测车的研究试制，第一辆接触网检测车在1962年即已诞生，经过不断改进到1976年已能较精确地测量导线高度、支柱位置、拉出值和离线等参数，在低净空隧道接触网悬挂的比选测试中发挥了很大的作用，目前接触网检测车已有位移补偿，在应用了微机数据采集系统后，检测的自动化程度进一步提高了。

2. 绝缘配合：

在接触网绝缘加强以后，变电所、接触网和电力机车之间的绝缘水平需要进一步调整以求合理的匹配。三十年来在这方面已开展过许多研究工作，包括牵引网各种工况下的操作过电压测量，保护角隙的研制、牵引网过电压的电算等。近年来，由于27.5千伏氧化锌避雷器研制成功和得到推广应用，已可将操作过电压限制在2.5倍以下，使牵引供电系统的可靠性有较大的提高，绝缘配合的研究成果推广后，已使供变电设备绝缘的跳闸率从10次/（百公里·年）降到5次/（百公里·年）以下。此外还进行了绝缘子附盐密度测量和在此基础上制定污秽区划分的规定。

3. 供电方式：

在电气化铁路的发展中，通信干扰问题曾经被形容为“拦路虎”，说明研究这个问题的重要性和迫切性。1962年起在环行试验基地开始吸流变压器（BT）供电方式降低通信干扰效果的试验，然后在凤路段中间试验，1973年绵成段电化时正式采用了BT方式，在以后的各条线电化中被普遍推广采用。BT方式降低通信干扰效果很好，但增加了牵引网的阻抗，使供电的电压损失和能耗增加，供电距离缩短，BT处装的分段绝缘器在机车受电弓通过时产生电弧容易损伤导线，特别是重载、大电流的电化区段上，BT方式的缺点更加突出，从长远发展来看，这种方式也不适合于高速受流，因此从1978年起开始研究更新的供电方式，即自耦变压器（AT）方式和同轴电缆方式，在环行试验基地建立了这两种方式的试验系统。另一方面进行理论研究，提出数学模型用计算机计算，在这方面的研究已达到国外相同水平。AT供电方式具有供电距离长的优点，因此牵引变电所的位置选择灵活性大，110千伏输电线投资费用低。例如，京秦线与丰沙线的长度和其他条件相仿，在降低通信干扰效果相同的情况下，采用AT方式的京秦线与采用BT方式的丰沙线相比牵引变电所只有40%，所以以降低通信干扰为目的而发展起来的AT供电方式，不但它有优越的供电特性，而且还是一种技术上、经济上均优越的供电方式因而在多条电气化线路上被采用，郑武、神朔、侯月和哈大等线已根据因地制宜的原则部分或全部采用了。同轴电缆供电方式在降低通信干扰和供电特性方面均优于AT方式。在神头电厂4公里电化区段中采用了同轴电缆方式，但由于交联聚乙烯绝缘的电力同轴电缆造价高，因此在正线

电气化时比较适合于在架空馈线对通信干扰严重时或架设地上馈电线路有困难时,用同轴电缆作馈线,或者在桥隧等地段使用。

4. 功率因数补偿和降低谐波

电气化铁道对电力系统来说是三相不平衡负荷,而且功率因数较低并能产生谐波干扰影响,所以发展电气化铁路的同时需要研究降低这几方面对电力系统的影响。

早在第一个电气化区段宝凤段运行初期,电力系统容量小,而电力机车在30%地坡道上三机牵引,所以使电力系统中的负序和谐波很大,严重地影响邻近的其他用户。铁道部和电力部就已研究和采取不平衡负荷对电厂影响的防护措施,当时采用110千伏输电线迂回供电和装同步调相机补偿等措施,对当时解决负序问题是很有有效的。

但随着电化线路里程不断增长,电力部门对电气化铁路谐波影响的限制十分重视,由于缺乏合理的限制值的规定,使铁路电力两个部门难以协调。已经到了影响电气化线路开通的程度,迫切需要解决。

近十年来科研设计单位和高校开展了不平衡负荷和谐波方面的理论研究和大量测试,掌握了国产和进口电力机车的谐波、功率因数特性,研制了负序谐波预测计算的多种计算程序。在测试技术上也有很大发展,已研制出功能齐全的微机数据采集系统,不但完全代替了过去人工读仪表记录方法,而且数据处理结果以图表,曲线等形式出现,使研究水平大幅度提高。

为提高供电质量节约电能,在牵引变电所中已广泛采用并联电容补偿装置,经研究改进,采用空芯或磁屏蔽电抗,提高了滤波效果,并补装置的设计计算方法也已完善,作为技术储备,对3、5、7次滤波器,已开始研究,第一套试验性滤波器装在宝成线,相应的滤波器设计理论和电算程序也取得较大进展。

5. 供电系统自动化与远动化

三十年来,先后研制了电气化铁路专用的各类供变电设备,SF₆断路器和真空断路器等,并在专用变电所中采用了技术先进的SF₆组合高压电器。

为了保障供电设备的安全可靠运行,迅速有效的切除故障,针对电气化铁道具有强励磁涌流和高次谐波的特点,先后研制了电气化铁道专用电磁型、晶体管型、集成电路型原继电保护产品,形成了有我国特色的电气化铁路保护系列产品。

为了缩短故障处理时间,减少停电损失,先后研制了直供、BT供电方式用的电抗原理和供AT供电方式用的吸上电流比原理故障探测装置。

电气化铁道运行产生的负序电流与谐波,使电力系统的高压线路距离保护的启动元件频繁启动,从而可能造成保护的拒动或误动,为此,研制了PXH—45型高压线路保护屏,保证了电气化铁路的安全可靠供电。

ZKH—2A型晶体管型成套保护装置具有躲重负荷能力强、保护范围大等优点,且具有一致的躲过渡电阻能力,已成为我国电气化铁道的主型保护产品。

上述产品的研制成功,使我国电气化铁道的供变电设备已赶上或达到了世界先进水平。

目前保护继电器已开始向微机化发展,微机保护通过改变软件可以灵活改变继电保护

的功能,在采用了抗干扰、滤波、自动纠错等技术后,可使可靠性大大提高。微机保护将和微机运动、自动化结合为一个综合系统,是供电系统中高科技成果的集中应用,是一个发展方向。

为提高供电系统的运行管理水平,从1963年起就开始第一代电子管运动装置的研制,而后又进行了集成电路型运动装置的研制。由于电子技术和微机技术的飞速发展,运动制式更新得更快,现在已进入多微机运动的阶段。这种运动系统的硬件易于组合,软件非常灵活,便于扩展容量,具有直观的屏幕显示,监控、自动打印记录等特点。运动装置的运行经验说明,采用运动装置并非单纯为了节省人力,实现无人操作,最重要的是它能防止误传指令和误操作,因而提高牵引供电的可靠性,保证运输安全。在有供电事故的情况下,调度人员可在调度所根据微机显示和打印记录掌握事故原因,在最短时间内排除故障,恢复送电。当“天窗”维修时,用软件代替人工操作可以缩短停、送电执行时间,经济效益很明显。

现在由高校、科研设计和工厂协作研制的电铁运动装置,已在成渝线开通使用。石太线的运动装置也在调试中,其他如大秦东段,兰武等线都将用国产的运动装置。

6. 供电设备的研制

完全由国内设计制造的十字交叉牵引变压器在大秦线上安全可靠地运行着,这标志着我国可以用自己的设备实现AT方式,供电27.5千伏户外组合式真空断路器开关柜也已研制出;路局科研单位结合电化设计、施工和运行的需要研制出不少产品,如XTK型分段绝缘器和分相绝缘器。分相绝缘自动转换装置在线路上试用已取得初步成效。

为了压缩维修、施工天窗,有的路局还开展了带电维修接触网设备和带电维修方法,取得很好的经济效益,现在正在逐步完善和推广中。明岷带电施工作业车在1982年水害恢复工程中发挥了突击的作用。

7. 防通信干扰的研究

通信干扰方面的研究工作早在1962年起就已开展,除了在供电系统中采用BT、AT、同轴电缆等供电方式的研究外,并且从通信线路方面也进行了大量研究,如采用高屏蔽电缆、明线上的中和变压器、集中加感等等,都取得很好的效果。油气管道、油库等防护的研究试验也有不少成果。干扰危险电压值由36伏改为60伏已纳入国家标准。

电气化铁路引起的无线电干扰曾是一个很难解决的问题,经过多年来由科研、高校、设计施工部门、路外有关单位长期研究、测试和理论计算,取得以下的显著的成果:

(1) 无线电导航台电磁环境中波导航台与电气化铁路最小距离由原来的2公里缩小到150米,并已纳入空军编制的国标GB364—86中。

(2) 对空情报雷达站电磁环境防护要求由原来的3公里减少到800米,并即将纳入国标。

二、电力机车

1. 从引燃管到硅整流:

1957年已开始了电力机车定型的研究,提出电力机车一些主要的技术规格,如轴式、

功率、速度、轴重等,并提出用整流器——直流牵引电动机的形式,为1958年设计第一台电力机车提供了依据。

1959年当硅整流器在国内刚出现不久,已对串联整流元件的过渡时间特性和均压、过压保护等进行了试验室内的研究。

1961年开始了大气过压在机车变压中传播的研究试验,为确定电力机车过电压保护和串联整流元件数提供了依据。

1963年开始进行了引燃管电力机车的改硅试验,首先由科研生产单位组成电力机车改硅联合工作组,在6Y2型电力机车上进行一台电机800千瓦硅机组研制,并推广到全部6Y2机车。1966年在国产电力机车上改硅取得成功,在进口机车上试验改硅也取得成功,这就为以后用硅整流的韶山1型电力机车的定型批量生产迈出了重要的一步。

2. 晶闸管的引用:

调压开关从28个触头改成20个,加装灭弧装置采用空心过渡电抗器等使调压开关工作条件得到改善,但仍是容易出故障损坏。以后又改用过渡硅机组取代过渡电抗器,使机车的调速特性大为提高,但真正使电力机车调速特性大幅度提高要从1973年在韶山1机车上试验改用晶闸管级间调压开始。改用晶闸管调压的研究持续了十几年。1985年韶山3型机车定型投入小批生产,标志着我国在电力传动方面用电力电子和电子控制技术进入新阶段,也缩短了与国外电力机车技术水平的差距。由于牵引电动机的研究改进取得很大成效,韶山3型机车已可装备带补偿绕组的小时功率为800千伏脉流串励4极牵引电动机,其额定功率和电阻制动功率比韶山1型机车分别提高14.3%和25%。韶山3机车仍带有变压器抽头和调压开关,要彻底去掉调压开关还要付出更大的科研力量,从1972年起在韶山2型电力机车上改两段半控桥开始到1988年韶山4型机车通过国家级鉴定为止,共用了16年时间,韶山4机车功率大,技术新,接近国外先进水平,投运后对提高我国铁路运输能力具有重要意义。

3. 功率因数补偿和降低谐波:

整流器机车和晶闸管机车的功率因数较低,谐波含量高,因此从1986年起开始研究在机车上装电容补偿,类似于在变电所内的并补装置,也带有串联电抗器,能吸收谐波,首先在韶山1机车上试装,经过试验取得经验,在马角坝电力机车段进行扩大试验,共改装17台,取得较好效果。设计制造韶山5客运电力机车时,已应用了这方面科研成果,将补偿滤波器考虑进去了。

4. 引进消化吸收:

进口电力机车8K、6K在主电路和控制电路上都有一些特点值得借鉴,因此吸收消化他们的先进技术是我们赶上国外先进水平的一条有效途径。如二段桥相控加功率因数补偿,防空转防滑行,微机控制等都已经吸收到新型电力机车设计制造中去了。

5. 电力机车型式试验:

从韶山1型电力机车在环行试验基地试验开始,逐渐完善了电力机车的型式试验的型套仪器设备和地面装置,包括牵引、制动、动力学、高压、功率因数与谐波等试验项目,

试验采用了微机数据采集系统,在进口机车 8 K, 8 G, 6 K 的试验中发挥了很重要的作用,高压试验和牵引试验的微机数据采集系统已向苏联出口。

6. 交直交电传动的研究:

交直交电传动是今后机车电传动的发展方向。它的牵引、再生供电指标都很好,防通信干扰能力也很好。我国在七十年代初就已开始了这方面的研究,试验室试验的交—交变频试机组的功率100千瓦。八十年代初交一直—交传动试验机组功率也为100千瓦。目前供内燃机车用的交一直—交试验系统功率已达300千瓦,为电力机车用的交一直—交传动系统功率已达1000千瓦。“八五”和“九五”期间要求研制出4000千瓦、微机控制和采用GTO的四轴交直交电力机车。

7. 电力机车低恒速控制装置的研究取得了成果。1990年大秦线万吨牵引试验中,装有低恒速控制的韶山1型电力机车在装煤线上成功地完成了低恒速装煤试验。

8. 电力机车用的DK型电空联合制动,在大秦线万吨牵引试验中作出了贡献。

三、问题和建议

三十年来,我国电气化铁路科研工作取得的成绩是很大的,许多科研成果在电气化的设计、施工、制造和运营中得到推广应用,提高了电气化铁路的技术水平,取得明显的经济效益。有些较长远的和基础理论性质的研究项目,对今后电气化铁路的发展有较深远的意义,其重要性不容忽视。未来十年中,我们将面临一个电气化铁路向平原、沿河、大城市间繁忙干线发展和向高速运输迈进的新的艰巨的任务,在降低电气化造价,提高可靠性,降低能源消耗,减少对通信、对电力系统的干扰影响,提高供电设备的自动化、远动化和电力调度的智能化,电力机车的优化选型、系列化和标准化,交直交电力机车,高速电力机车车辆和与高速相适应的牵引供电系统、高速受流和弓网关系动力学等方面需要进行深入的、有效的研究。但是总的来说,我们的科研力量相对是薄弱的,科研机构和队伍不相适应,尤其是作为专业科研单位的铁道部科学研究院,其电气化的科研力量较弱,而且形不成拳头,对电气化建设中遇到的重大问题和基础理论问题则因研究经费、经济效益等原因而难以开展,例如高速受流问题在国内早在七十年代已提出,但并未得到开展;又例如相控机车在国外六十年代已普及使用,我国至今还未达到大批量生产;交直交机车在国外七十年代开始生产,八十年代已推广,但我国至今仍在研究阶段,这是由于多年的徘徊造成的,应很好的总结经验教训。近年来更是出现新老交替中的青黄不接现象,这种状况显然已难满足今后电气化发展的需要。

为了要走出一条适合中国国情的电气化铁路发展道路,确实应该增加对科研的投入,特别需要花大力气抓专业研究单位的设备、试验室、试验基地和科研队伍的建设,抓必要的基础理论和较长远课题的研究,使科研能更有效的发挥第一生产力的作用。要加强电气化设计、施工、运营部门的相互配合,加强电气化专业技术研究机构。

(于文根据学术会议资料整理)