

铁路工程物探技术的发展

中国铁路工程总公司物探中心 刘玉乾

工程物探已成了勘探地球物理中的一个重要的独立的有特色的大有前途的分支,它的工作内容主要是研究与工程有直接关系的各种物理勘探和物理测试方法。包括有水文物探、工程物探和环境物探,所以也有称之为“水、工、环物探”。

铁路工程物探始于1954年,苏联专家在兰州举办了电探技术培训班,并在宝成线首先开展了铁路工程物探工作,至七十年代末期,铁路工程物探在找水和桥隧等工程勘察中发挥了一定作用。但是,由于方法单一,数据采集系统落后,数据处理限于手工操作,成果资料偏重于定性,再加之五十年代物探专业延袭了苏联东欧教学体制,所学专业分工过细,知识面窄,应用范围受到极大限制。与地质、土木工程等专业之间相互渗透也不够。在二十多年的应用中时起时落,发展步子并不快,作用不十分突出,地位不高,处于可有可无的配角境地。

改革开放政策给铁路工程带来了新的活力,在激烈的技术竞争中铁路工程物探得到了发展。至九十年代的十年中,铁路工程物探在技术结构体制上有了较大改变。在技术人员素质上有较大提高,在仪器装备上有较大更新,在服务观念上树立了直接为工程需要服务的思想。技术进步促进和推动了铁路工程物探的发展,扩大了铁路工程物探的应用范围,在总体勘察中起到了提高勘察质量,降低勘察成本,缩短勘察周期的积极作用。

下面仅就铁路工程物探在各个领域的应用成功事例,展示剖析一下铁路工程物探在技术进步中发展的现状。

一、工程物探方面

它是铁路工程物探应用最多、发展最快的一个重要方面,物探工作贯穿了从初测、定测、施工到运营的各阶段当中。

1. 隧道物探:主要提供构造格局、岩土界线、地下水和洞体围岩的物理力学性质。例如对深埋千米以上的秦岭隧道在初测子阶段勘察中,在一百平方公里的范围内大量的投入了物探工作,与遥感信息、地面信息紧密结合。用较短的时间、较少投资,解决了方案比选中的重大问题。其方法是首先对区域航磁、重力资料进行二次开发,在异常地区布置大地电磁测深、地面磁法、天然放射性(γ 卡法)法、甚低频等无源的轻便的物探方法,重点地区再布电法和地震折射、反射法有源的较重型的物探方法。通过物探资料分析,发现东经109度线是测区的一条重要地质分界线,西部花岗岩基底较高,构造相对简单,东部构造复杂,而109度线是一条构造变形带,断裂发育。还出现了花岗岩隆起的热穹隆区和数条断裂带及富水带,为选线决策宏观上提供了战略依据。

又如在大秦线定测中天马山隧道应用物探方法,对全测线进行了贯通。该隧道长3公里,

最大埋深 300 米,主要岩性是古老变质岩类。与日本地质计测公司合作,对隧道进行了弹性波速度测试,在洞口风化层较厚地段开展了高密度电法,钻孔内作了地震测井和电法常规测井。通过物探资料不仅查明了岩性和断层的分布规律。而且利用弹性波速度为洞体围岩分类提供了分类的数据,经施工验证,资料精度满足施工要求;又如大秦线军都山隧道在施工过程中突然出现“地下泥石流”,造成停工。要求物探用最短的时间最可靠的成熟方法在不影响洞内安全的情况下工作。该隧道是 8 公里长,最大埋深 600 米,岩性为多期喷发火山岩,断层节理发育。定测时定分水岭部位为五类岩石。施工时要预防岩爆。施工是从进出口同时开挖,至最后一公里,即分水岭部位,突然出现“地下泥石流”。物探在地形十分复杂的山顶进行了高密度电法、地震折射和反射法。准确的确定了“地下泥石流”是由断层破碎产生,断层宽度在 20 至 25 米之间,修正了原勘测围岩分类级别。同时还提出了在未施工的一公里范围,仍有一条断层存在,但规模较小,发生“地下泥石流”的可能性不大。物探为整治地质突出灾害和继续施工提供了依据,后经施工验证,资料准确无误。该工程外业仅用七天时间,内业三天就提出了初步资料。

2. 桥地物探:主要提供构造格局、土石介线和松散地层的详细分层。例如大秦线滦河特大桥,物探应用电法和地震探测基岩埋深和第四系分层,要求达到定测标准。物探后改原计划每墩台一个钻孔为隔两墩台一个钻孔。该工程外业共用 15 天时间,物探资料较准确的提供了土石介线、粘砂土和卵石土介线,风化片麻岩与完整片麻岩介线,并提出了桥址无构造存在。基岩起伏不大和风化层较厚的结论。经钻探验证,3 号墩台物探提供基岩埋深 14 米,钻探 13.9 米,28 号墩台物探提供 16.5 米,钻探 18 米。该桥长 1342 米,原计划钻 48 个孔,实钻 16 个孔,节省钻孔 32 个。又如兖石线沂沭河特大桥横穿著名的郯庐大断裂主干断裂带沂沭大断裂,在方案比选中大量的投入电法、磁法和地震法工作量,用半年时间查清了大断裂的构造格局,在稳定方案中发挥了重要作用,并荣获国家级优秀工程勘察金奖。

3. 岩溶物探:浅层岩溶的存在对路基、桥基的安全有极大影响。因此岩溶物探工作在铁路工程物探中十分重要,近年来也投入了大量工作方法和工作量,但效果不完全满意,对浅埋和岩溶带效果较好,对单个岩溶圈定尚有难处。使用的物探方法多以常规电法为主,但频率测深法、地质雷达法和瑞利波法在实际工作中显示了较好的效果。例如在大秦线双重山隧道施工中发现基础有岩溶,物探在洞内用地质雷达和频率测深法配结工作,确定出有三处宽 8 至 12 米的岩溶发育带,后经钻孔验证均打到了岩溶。另外在大秦线下庄特大桥也取得了良好的效果。用瑞利波探测岩溶在沈大线瓦房店取得了良好的效果,在南方浅埋岩溶取得效果更好,是一种有希望的方法。

4. 水上物探:主要提供水底地形、覆盖层厚度、风化层厚度、断层存在和构造格局。例如在长江穿江隧道物探中利用电法、频率测深法、地震折射法、地震反射法和浅层剖面地震反射法成功的查清了长江水深 50 米以下覆盖层厚度基岩的岩性、产状和弹性波速度,同时也查清了江北岸新构造运动引起的第四系地层层位错动形态,为穿江隧道设计提供了有用资料。又如黄河风陵渡特大桥水上勘察大量使用了物探方法,测线长 1450 米,分黄河一级台地、河漫滩、浅水区和主河床四个单元,用地震反射法贯通全剖面,辅之以地震折射、电法和综合测井。地震仪使用美 ES-2415 型信号增强地震仪和 911 型九轨磁带机,电缆用 HDL-24 型水上等浮电缆、震源用 2 万焦耳的电火花震源,室内岩体测试用美 5217A 声波仪,测井仪用日 oyo

产 3000 系列综合测井仪,测量定位用瑞士 DM-502 光电测距仪,地震工作量在河漫滩和阶地部分作 9200 米剖面,主河底部分作 4600 米剖面。通过资料分析作出了地质剖面,0 至 25.8—28 米是 Q_4 粉细砂是液化层,至 35~48 米是 Q_3 亚粘土,50 米以下纵波速度可达 1100~15m/s,是属 Q_2 的中密粘砂土,50 米以上同相轴连续性不好,有细粒透晶体存在,50 米以下同相轴连续性好,但在 0+210 和 0+230 两处互相位错动属第四系新构造运动形成的断裂带,断层落距约 10 米,同时还依据室内试验与弹性波速的相关关系,提供了土壤分层的承载力;水域物探还在大连浅海、厦门浅海、嘉陵江、梅江上做过工作都取得了较好效果。

5. 岩土物理力学性质测试和场地评价:这方面工作主要是通过地震纵、横测井、密度测井分别计算出动泊桑比、剪切模量和弹性模量或在地面作瑞利波测试。场地评价主要作微动测量。例如天津新客站勘察中在出站口至东货场至邮局范围内的 8 个孔深 20~40 米钻孔进行了地震纵、横测井、密度测井($r-r$ 测井),地震仪用美 8012A 地震仪,横波接收用 1201 三分量检波器,纵波接收用 OYO6 道测井电缆,放射源用 0.5 毫居里钴 60。检层资料得出,4~9 米 $V_s=140\text{m/s}$,9~16.5 米 $V_s=160\text{m/s}$,16.5~27 米 $V_s=250\text{m/s}$,27 米以下 $V_s=280\text{m/s}$,根据规范规定,27 米以下定名“中等场地土、中软 I 类”,同时还分别计算了动泊桑比、剪切模量、弹性模量等参数为工程设计提供了资料。为了解地基土振动特征,开展了地噪声表层微动测量,提供了功率谱、付里频谱、相关函数三个参量曲线,各测点卓越周期及相关情况,最终给出了结论。①该区卓越周期 0.2 秒~0.3657 秒,②站房卓越周期有左高右低规律,③由于地基土固有周期与微振的卓越周期相一致,可做预测天然地震的周期特性。地脉动的测量还在北京环铁等地进行过,对场地评价都有较实用的价值;利用瑞利波测试岩土物理力学指标是 1987 年由日本引进 GR-810 全自动地下勘探机后开展的,过去测试横波 V_s 用检层法或跨孔法都需有钻孔,瑞利波测试则是在地面进行,瑞利波集中在介质自由表面附近,属 P 波、S 波经地层多次反射的次生波,随泊桑比 μ 的增大 V_R 与 V_s 之比有趋向于 1 的相关关系,测得了 V_R 也得到了 V_s ,R 波衰减慢,远离振源仍可辨别清楚,R 波传走整个表面能源输入能量的 $\frac{2}{3}$,用较小能量可获较高信噪比的 R 波,据半波长理论, V_R 是 $\frac{1}{2}$ 波长深度处的介质平均弹性性质,随着集振频率由高变低,探测深度由浅到深。瑞利波测试用于工业与民用建筑厂房、高层建筑物、设备基础、锅炉、水塔等提供地层结构、岩土物理力学性质等效果较好。另外瑞利波测试在软土加固效果检测、洞穴岩溶探测、找古墓、旧矿井、路基塌陷段也有应用。

6. 桩基无损检测与地基土加固检测:以振动理论为基础,用频率法、反射法测试各种桩的形态变化及计算单桩垂直允许承载力已普遍应用,在铁路工程物探中已应用到混凝土桥墩检测和混凝土构件强度方面。对黄土湿陷下沉化学加固效果,土体挤密回填效果,岩土体注浆加固效果、碎石基础注浆效果等检测方面物探方法已取得了成功。

7. 地下埋藏物探测:近年来由于老城市和老车站、老码头的改建和扩建,对查清地下埋藏物,如电力电缆、通讯电缆、上下水管、煤气管道、输油管和人防工程等,任务越来越多。在这方面铁路起步于 1985 年天津站的新客站工程,天津站是百年老站,随历史的变迁,上下各种管线错综复杂,已无法查证,为保证勘察中 460 个钻孔和工程施工中的安全,进行了地下埋藏物探测,应用方法主要是地质雷达、磁法、电法和电缆探测仪,工作效果极好,确保了天津站施工安全。此外在济南枢纽、北京地铁、上海地铁、广州地铁、秦皇岛码头、塘沽码头等工程中应用均比

较成功。

二、水文物探方面:又分给水(找水)物探和治水物探两个方面

1. 给水物探:应用物探找水是铁路工程物探开展最早应用最广的也是成功率最高的项目,电法、磁法、重力、地震、测井、甚低频、音频大地电场、天然放射性和激发极化法等几乎所有物探方法在找水中都有应用,但任何一种方法均不能称直接水法,水是存于土层的空隙(裂隙)和岩层的裂隙破碎带之中,找水应当说是找可以储水的构造,或找含水层或找隔水层,在松散的第四系中,找可含水的砂层或隔水的粘性土层,在基岩中找可含水的风化层、裂隙和断层破碎带或找可隔水阻水的完整基岩、岩脉侵入体等。例如兖石线泗水给水站找水应用了音频大地电场法、联合剖面、中梯剖面、电测深、测井等。该站南部是尼山低山群,北部是泰山余脉,属泗水断陷谷地,车站位于被四条断层切割成略呈起于四周的断块上,地层出露有奥陶系的厚层灰岩和第三系细砂页岩。该区找水的重要标志特征是找细砂页岩与灰岩的界线,这个界线是断裂构造所致,地下水顺断层破碎带或灰岩裂隙、岩溶而下,至阻水层细砂页岩处受阻形成了丰富的地下水。物探成功的完成了这一任务,在山区一孔成井,较原计划节省两眼百米以上的勘探孔,又如在盘山脚下疗养院找覆盖层下班状粗粒花岗岩中的构造裂隙水,采用了磁法、电法和地震几种物探方法,通过资料分析在疗养院发现一条东西向延伸的异常带是花岗岩含水破碎带,解决了疗养院长期得不到解决的生活用水。

2. 治水物探:治水物探较给水物探难度大,但物探仍能发挥宏观控制作用的优势。例如衡广复线某隧道,长 14 公里,洞体最大埋深千米,隧道中发育有石灰岩断层谷、断裂和岩溶,地下水发育。竣工运营后在雨季洞内涌水量增大,并排出大量泥砂,地面塌陷,如继续发展对隧道安全造成威胁。在治水工程中,采用高密度电法、地震折射、地震反射、甚低频、电测深、电剖面、自然电位和激发极化法等物探方法,在地面进行补充勘察,察明了主要断裂、岩溶发育带、地下水在平面和剖面上的分布格局及地下水补给关系,为选择整治措施提供了依据。

三、环境物探:在这方面的起步较晚,仅在大秦线花果山隧道,为使隧道施工后,地下水位不下降,确保山上的大批经济林木,采取对断层破碎带进行地下注浆堵截方案,物探进行过查清断层分布和裂隙发育的工作,取得了效果。

“科学技术是第一生产力”,从上述应用的实例中不难看出,铁路工程物探在八十年代的十年中有了一个较大的突破,成果质量提高了,应用范围拓宽了,接受物探愿意使用物探的工程和技术人员增加了。铁路工程物探之所以在激烈的竞争中能生存并得到发展,归纳起来有以下几点:

1. 技术结构的改变、技术素质的提高,是铁路工程物探技术发展的根本:十年来各外业队在人员结构上逐步由工人主体转到以技术人员为主体,过去工人与技术人员比例大约是 7:3,现在大约是 3:7,有利于经济技术承包和新技术开发。为提高技术人员素质,加大了智力投资,技术工人多数是高中文化程度,经两年物探技术班培养出来的青工,外业操作人员多是物探中等专业毕业生,也适应铁路工程物探需要,专门在西南交大和河北地院培养了三期大本生,以上三项投资约达百万元。老一代有实践经验的技术人员知识面也在不断更新,这样一批结构合理的专业队伍是铁路工程物探的生力军。

2. 更新技术装备,提高数据采集和处理功能,是铁路工程物探技术进步的基础。十年来用于引进国内外技术装备的投资约达1900万元左右,其中从国外引进了73台套,其中包括美国ES-2415地震仪、美国ES-1210地震仪,美国BASON-8012地震仪,美国ES-2401地震仪、日本MC-1200地震仪、法国梅洛斯频率测深仪、法国索普罗夫公司R₂型激电仪、美国SIR-8和SIR-10型地质雷达、美国ULF型跨孔横波测试仪,日本5217A型岩石超声测试仪、日本3000系列综合测井仪,加拿大凤凰公司V_s大地电磁测深仪,美国德立台公司浅海剖面仪和美国哈里伯登公司MAGNuM3000地震数据处理工作站等。这批高、精、尖的装备推动了铁路工程物探的发展。

3. 研究新技术方法,提高成果质量,是铁路工程物探发展的生命。先进的技术装备是完成任务的工具和手段,侧重于掌握性能、开发使用。而对物探技术方法的研究则应是铁路工程物探的重点。十年来,山区物探方法,水上物探方法和城市物探方法基本有了规范化的初步标准。地震折射法的表层剥去法观测系统得到广泛推广使用,地震浅层反射法试验成功,瑞利波测试引进后在应用上有所创新,高密度电法是电法的改革性突破,纵、横波井下地震测试提供了工程需要的物理力学动参数,天然场方法由于无源轻便,在勘察中得到普遍重视,激发极化法在找水中仍是行之有效的方法,二次时差法在西北地区深受欢迎,声发射技术在地质灾害各种预报中可望有较好的作用。综合物探方法的程序形成,极大的克服了物探单一方法的多解性,提高了成果可信度和精度,为铁路工程物探“上高山、下江海、入隧道、进城市”和对成果资料“定量化、数字化、地质化、工程化”的要求打下了基础。

4. 扩大物探在工程各阶段的使用范围,铁路工程物探路子越走越宽。过去物探只能在初测阶段使用,这主要是物探本身精度达不到定测阶段要求之故,过去物探只能在平川而不能上山。所提成果资料定性多定量少,肯定性结论更少,十年来,物探通过所提资料的事实,争得了从初测进入到定测,施工、检测和运营各个阶段,应用面宽了路子走出来了。

四、综合物探应是综合勘探的重要组成部分,物探是体积勘探,在宏观控制和大的格局分析上是物探的优势所在,在某一点上某一个层上的精度是不能与钻探相比较的。“物探代替钻探”,或物探在勘察中地位如何重要的提法都是偏面的,物探只能说是综合勘察中的一门有发展前途的新技术,其中的一个重要成员,物探在勘察中必须与地质信息、遥感信息、钻探、触探、原位测试等紧密配合、互相渗透、互相验证、互相修正,形成一个综合勘察的总体,只有这样工程物探才有前途有发展。