

第一章 绪 论

隧道是人类利用地下空间的一种形式。在土地资源减少和人口增长的双重压力下，大力开发和利用地下空间成为人类发展的必然选择和重要出路。

隧道按用途可分为交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道和特殊用途隧道等。水工隧道包括引水、给水和排水隧道（洞），水电站特别是类似三峡工程和黄河小浪底工程这类大型水电枢纽工程有大量水工隧道 我国“南水北调”有“穿越黄河”等高难度水工隧道需要建设。市政类隧道包括市政给水、排水、引水以及铺设地下电缆、通信管道等隧道，上海市“合流污水”工程建造了几十公里的大直径排水隧道。矿山隧道包括采矿需要的运输、通风、行人隧（巷）道，我国仅煤矿每年要掘进巷道上千公里。特殊用途隧道包括军工隧道、人防地下工程和各种地下储库等。

交通隧道是隧道的主要类型，包括铁路、公路和地下铁道。欧洲早在 19 世纪末 20 世纪初就修建了穿越阿尔卑斯山脉的辛普朗（Simplon）隧道，它由两条各长 19.8km 的单线铁路隧道组成，位于瑞士伯尔尼到意大利米兰的铁路线上，工程宏伟艰巨。20 世纪 60 年代日本开始修建连接本洲和北海道的青函（Seikan）隧道，长 53.85km，是世界上最长的交通隧道到 1988 年 3 月才竣工通车，历时 24 年。1994 年 5 月 6 日，连接英法两国的海峡隧道正式通车，这条长 51km 的隧道仅用了 6 年时间就修通了，充分体现了隧道施工技术的现代水平。

我国是个多山的国家，山地、丘陵和高原等山区面积约占全国面积的 2/3。“逢山开道，遇水架桥”在铁路、公路建设中，需要建造大量隧道，以克服平面或高程的障碍，提高线路标准，增强运输能力，降低运营成本。

目前，我国有铁路隧道约 7000 座，总长度近 4000km；现有公路隧道近 2000 座，总长度约 700km，我国已成为世界上隧道和地下工程最多、最复杂、发展最快的国家。回顾我国铁路隧道建设历史，可见我国隧道技术的快速发展和进步，也对未来隧道建设的前景有更清楚的认识。

一、我国铁路隧道工程建设的发展

从 1888 年我国台湾省修建第一条狮球岭铁路隧道至今，我国的隧道建设已有 120 多年的历史。20 世纪 50 年代初，为了避免修建长隧道，常常尽可能地采用迂回展线来克服地形障碍。宝成铁路翻越秦岭的一段线路就是采用短小隧道群迂回展线的一个实例，在这段线路路上有 34 座隧道，最长的秦岭隧道长度仅 2363m。但是，以当时的技术水平修建这样一座长度在 2km 以上的隧道也并非易事，由于在施工中首次使用了风动凿岩机和轨行式矿车，使得宝成铁路秦岭隧道的修建成为从“人力开挖”过渡到“机械开挖”的标志。

20 世纪 60 年代中期修建的成都昆明铁路是铁路隧道工程技术发展的“代表作”，成昆铁路全长 1085km 隧道占 31%，其中关村坝隧道和沙马拉打隧道长度均在 6km 以上，施工中采用了轻型机具、分部开挖的“小型机械化”施工，修建速度达到了“百米成洞”（平均

每月单口成洞 100m 的水平。

我国修建长度 10km 以上的铁路隧道是从 14.295km 长的双线隧道——大瑶山隧道开始的，施工中采用凿岩台车、衬砌模板台车和高效能的装运工具等机具配套作业，实现全断面开挖。这是我国山岭隧道采用重型机具综合机械化施工的开端，将隧道工程的修建技术和修建长大隧道的能力提高到一个新的阶段，缩短了同国际隧道施工先进水平的差距。

20 世纪 90 年代末在西安(安康)铁路上 18.456km 长的秦岭隧道的修建中则使用了包括全断面掘进机在内的现代隧道施工机械。西康铁路秦岭隧道由 I 号线和 II 号线两条单线隧道组成。其中 II 号线隧道是用钻爆法开挖的，采用轨行门架三臂钻孔台车、挖掘装载机、大容积梭式矿车等重型机具先开挖断面为 26~30m² 的导坑，平均月进尺达 264m。秦岭 I 号线隧道用直径为 8.8m 的全断面掘进机开挖。西康铁路秦岭隧道的建成标志着我国已掌握现代隧道修建技术。

据不完全统计，目前我国铁路隧道 5km 以上的已有 20 多座，3km 以上的达 150 多座。

综合机械化施工和相关技术的发展大大提高了修建长隧道的能力。这也引起了铁路线路设计思想的变化。摒弃迂回曲折的展线模式，采用长大越岭隧道，使线路顺直，优化了运营条件。

二、近 10 年来主要铁路隧道工程

(一) 南昆铁路隧道

南昆铁路东起南宁西至昆明北接红果全长 898.7km，为国家一级干线电气化铁路，南昆铁路是沟通我国西南与东南沿海最便捷的通道。南昆铁路是我国继成昆铁路之后，在艰险山区修建的又一条长大干线，高瓦斯煤层、高地应力、巨流涌水、大滑坡体、溶洞、膨胀岩、软土、地震断裂带等严重地质病害密布于线路穿越的 90% 以上区域。南昆铁路共有隧道 263 座，总长 195.363km 占线路全长的 21.7%。南昆线隧道修建技术，包括瓦斯、软岩、岩溶、高烈度地震区的隧道灾害防治、隧道快速施工与机械设备配套，以及长隧道消防技术，都达到了新的高度，为山区大能力铁路建设提供了条件。

(二) 西康铁路隧道

西康铁路是国家“八五”和“九五”重点工程。为一级单线电气化铁路并预留双线条件，正线全长 267.8km。该线地形、地质复杂，工程艰巨，全线共有隧道 98 座，包括我国目前最长的秦岭特长隧道，站位困难，有 16 个车站分布在桥上、隧道内。全线大量采用新技术、新工艺、新材料、新结构。

(三) 西安南京铁路隧道

西安南京铁路一期工程西起西安市新丰镇编组站，途经陕西省渭南、商洛，河南省南阳、信阳，湖北省随州，安徽省六安等四省八地市，东至合肥东编组站，全长 955km。全线线路通过秦岭山区、伏牛山区、桐柏山区、大别山区等，共有隧道 80 座，其中东秦岭双线隧道长达 12.26km，桥隧延长 176km，占线路总长的 17.1%。

(四) 渝怀铁路隧道

渝怀铁路西起重庆 东至怀化 途经重庆、贵州、湖南三省市 全长 625km 为 I 级单线铁路 预留复线条件 一次建成电气化。渝怀铁路全线修建桥隧 562 座，其中隧道长 241km。

三、铁路隧道的进一步发展

隧道工程是一门古老的学科，几千年前人类就掌握了开挖隧道的技术；同时，隧道工程又是一门快速发展中的年轻学科，因为近几十年来随着长大隧道和困难地区隧道的增多、综合机械化施工技术的采用和相关学科的发展，现代隧道设计和施工方法已经发生重大变化，例如，以可靠性理论为基础的概率极限状态设计法引入隧道结构计算，特长和复杂条件下隧道工程的修建促进隧道施工机具和技术的不断进步。

未来我国隧道建设的任务仍十分繁重，“十五”期间国家铁路和中央与地方合资铁路建设规模为新线 6000km 既有线复线约 3000km 地方铁路建设规模为 1000km 左右。沿海通道、沿江通道、南北通道等干线铁路需要建设大量隧道，例如，2003 年 3 月兰新铁路兰州至武威二线开工建设长 20.05km 的乌鞘岭隧道 正在筹建的汶（长）江铁路万（县）宜（昌）线设计有 3 座超过 10km 的隧道。

隧道工程的进一步发展还要考虑环保问题，要考虑隧道施工对周围水环境的影响，施工中弃渣对环境的影响，隧道洞门及其他构造物与环境的协调等，尽量适应地形和地质条件，避免高填深挖。在复杂的山区地形、地貌条件下，修建隧道不仅是线路设计的需要，而且要从保护自然和生态环境的角度考虑。以隧道周围水环境为例，以往主张在防排水中以排为主，以堵为辅，但地下水的大量流失容易造成地表沉降，而要转为以堵为主又会大大增加工程的造价，尤其在西部岩溶地区，只能采取堵的措施。因此，今后要针对实际地质条件，经济合理地制定以堵为主，以有限度地排放为辅的技术方案。

隧道工程还要进一步做好地质勘测和发展地质超前预报技术。由于隧道工程地质有许多不可预见的因素，其建筑风险比地面工程大，因此，地质勘测对隧道的投资预算、线路方案比选极为重要。地质勘测资金超前投入是为了减少地下工程建设阶段的资金投入以及施工中的风险。地质雷达和 TSP 等物探技术应用于隧道地质超前预报已取得良好的工程效果。

隧道工程动态信息化施工技术应进一步加强，需研制简便易操作的量测仪器，以利实现信息化施工。

我国还有若干宏大的隧道工程正处于论证和前期规划设计阶段，隧道穿越长江，穿越琼州海峡和台湾海峡，这些梦想也必将逐渐变成现实。未来的隧道工程师们任重道远。

第二章 隧道的线路位置设计及其构造组成

第一节 隧道方案的确定

铁路隧道是山区线路穿行山岭时，用来克服高程障碍的一种建筑物（此外还有穿越江河的水底隧道，另作讨论），是整条线路的组成部分，比之迂回绕线的方法，往往可以缩短线路，改善线路的平纵断面以及日后的运营条件，但它相对路基本建筑物而言，造价比较高，施工难度较大，进度也比较慢。

山区铁路通常沿河行进，如果一直上溯到河流源头，就要穿过分水岭，进入另一水系，称为越岭。图 2-1 为西安—南京铁路靠西安端穿越秦岭的线路大致走向。

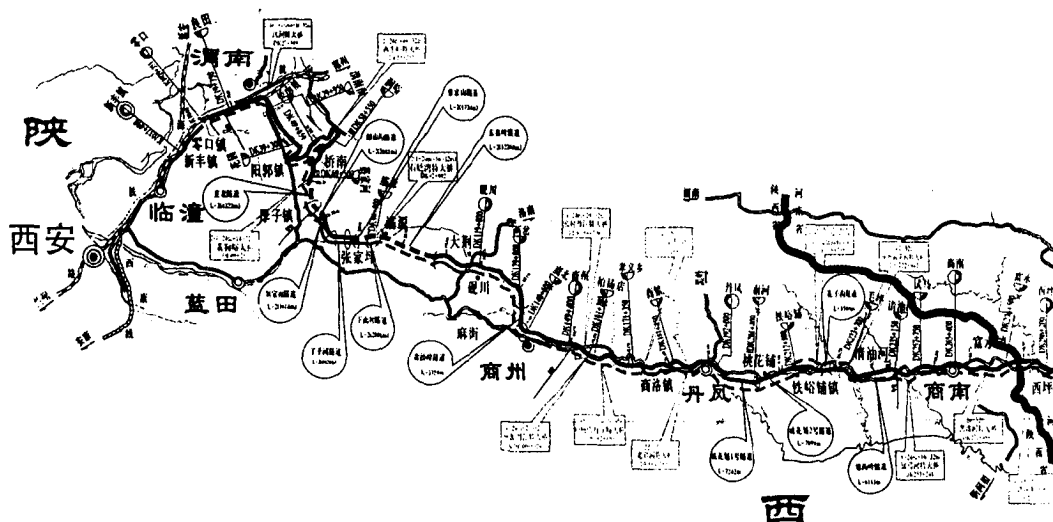


图 2-1 西安—南京铁路穿越秦岭的线路平面

它从西安附近出岔后，沿着渭河（属渭河黄河水系）爬坡过秦岭，再沿丹江（属汉水、长江水系）下落，进入陕豫交界的商州、丹凤境内。

可以看出，当线路蜿蜒于河谷及越岭时，有两处可能出现隧道建筑物的部位，分别称为河谷段及越岭段隧道。所谓方案确定，即指在这种地段，决策要否使用隧道这种工程形式；在哪个位置、设计大致多长的隧道。

越岭及河谷地段隧道方案的选用原则有不同特点，下面分别叙述。

一、越岭隧道的方案比较

图 2-2 为简化的越岭线路平面。两侧的控制点是确定的，极言之，可有三种走法，其一，A 线以航空直线相连，这样线路最短，修筑的隧道很长；其二，大致沿着等高线，绕开主峰，即 B 线，展线很长，但可不修隧道或只修相当短的隧道；其三，中间状态 C 线，有一段绕行

线，修的隧道相应短些。可知隧道线路的平面位置不同，不仅将有不同的长度和相应工程规模，而且直接影响前后线路的走向及总长，实际上成为很长一段线设计方案的决定因素，是一段乃至一条线路总体设计需要首先决策的问题。

《铁路隧道设计规范》对越岭隧道位置方案的比选规定如下：“越岭线路的长隧道和特长隧道，应进行大面积的方案研究，对可能穿越的垭口，拟定不同的越岭高程及其相应的展线方案，通过区域工程地质调查、测绘，结合线路条件以及施工、运营条件等，进行全面技术经济比选确定。”

垭口是两峰间的低洼处，线路总在这平面位置的下方通过，一个区域内，垭口有多处，因处首先要在线路航空直线方向两侧较大范围内，选择几个地形、地质条件较好的垭口。接着对不同垭口，分别设计不同的穿越高程。高程愈高，所修的隧道会短些，但两端的展线会较长反之亦然 如图 2-3 所示。最后作综合的技术经济比较，决定取舍。

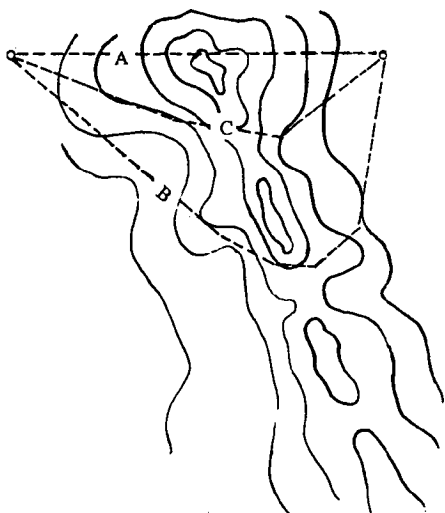


图 2-2 线路越岭示意

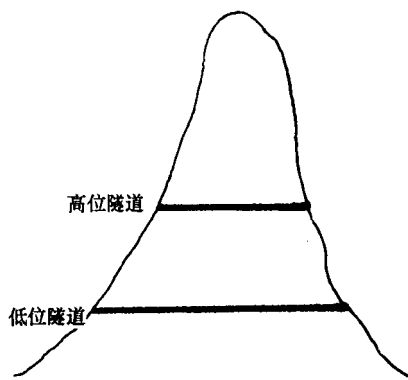


图 2-3 越岭高程对隧道长度的影响

我国山区铁路建设中，当要通过大分水岭时，都把确定越岭位置作为方案的关键之一。如建国初期修筑的从北面进川的铁路，过秦岭的位置曾选择过多个可能通过的垭口，前后端线路走向包括和陇海线相交点都不相同，最后采用的是较短的隧道方案，从而有了目前的从宝鸡分岔的宝成线。

图 2-4 所示实例是近年建成的西安—安康铁路上穿越秦岭的隧道，全长 18.456km 是我国至今已建最长的铁路隧道。

西安—安康铁路在 20 世纪 60 和 70 年代就曾作过勘测设计，但始终没有施工。当时确定的越岭方案，隧道较短，展线很长，平纵断面标准低。到 20 世纪 80 年代再次提上建设日程，在该区域重作大面积勘测调查，经过筛选，认为线路可能通过的有如图 2-4 所示的石砭峪、太峪、大峪、小峪四个垭口 其中石砭峪垭口又设计了三个越岭高程 经过反复比选 最终审定采用石砭峪垭口的 II CK 方案 相应隧道长度为 18.456km 其主要优点是：

(1) 该垭口处山体较薄，且两侧展线地域也比较开阔，在越岭高程相当的情况下，隧道长度可较其他垭口短些；而所用 II CK 方案，越岭高程较低，从而减轻了在坡陡谷深的秦岭北坡大段展线的难度。

秦岭越岭地段线路方案示意图

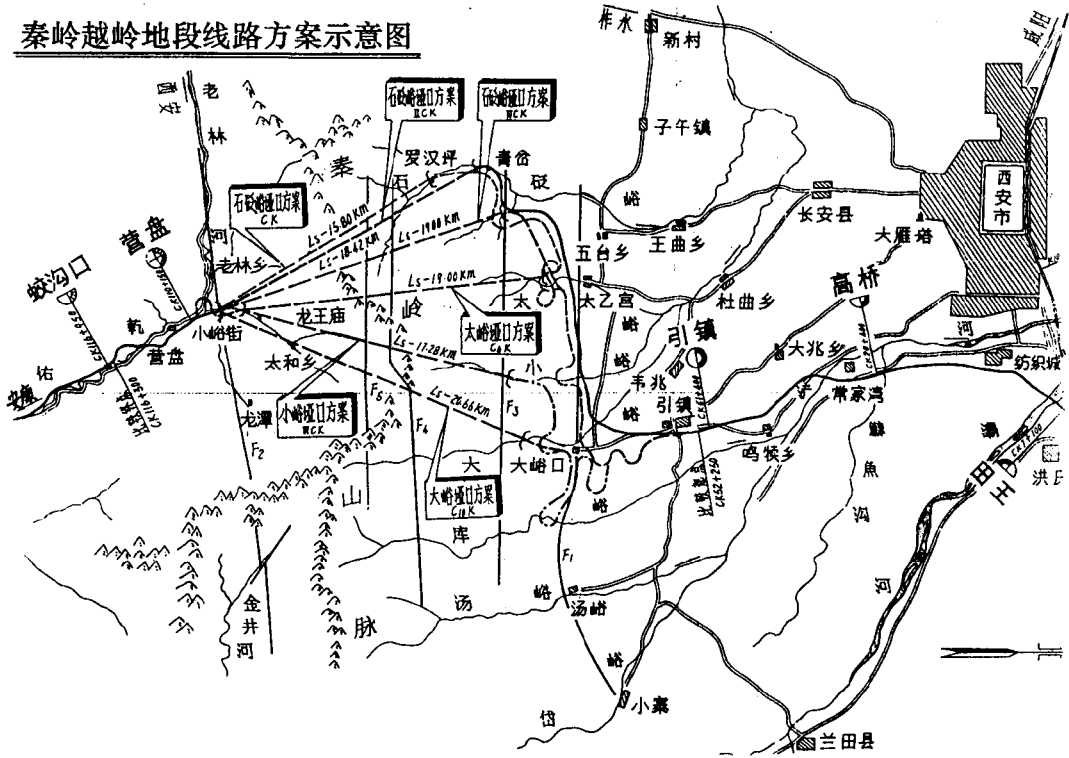


图 2-4 秦岭越岭地段线路方案示意图

(2) 可使隧道避开 F_3 大断层，而且通过强富水带的线段也较短。

二、河谷段隧道的方案比较

《铁路隧道设计规范》有如下规定：

“河谷线沿河傍山地段，当线路以隧道通过时，线路宜向山侧内移，避免隧道洞壁过薄，河流冲刷和不良地质对其稳定的影响。”

“采用短隧道群应与长隧道方案比选，并应优先选用长隧道。”

山区河流多弯，这种地段，线路走向大体可有两种选择（图 2-5）其一是靠河侧 并尽可能沿等高线走 则工程简单 只出现较短的隧道 投资小 施工进度快 但线路平面不良 曲线多，半径小，而且可能出现众多支挡建筑，对长期运营不利。其二为靠山侧，把线路适当拉直，方案的优缺点正相反。这里要强调，我国建国初期修建的山区铁路如宝成线、鹰厦线都采用第一种选线方案，据几十年运营实践，某些地段出现的短而频繁的隧道群，而洞间路堑往往边坡高，使得病害不断，后患很大，估计由于坍方落石病害危及行车造成的损失以及反复整治的费用，早已超过了所节省的投资。规范中的相应规定是我国铁路建设经验教训的总结。当然，当时使用这样的技术决策是有其历史条件的，它对在技术经济水平相当低的情况下，快速修通这些急需的铁路，确实起过重要的作用。

20 世纪 80 年代修建的衡（阳）—广州复线上大瑶山隧道（全长 14.295km）是河谷地段采用长隧道方案的一个范例（图 2-6）。

衡广线经过的广东省北部，有一条武水，发源于南岭，注入北江再汇珠江入海，在这儿的

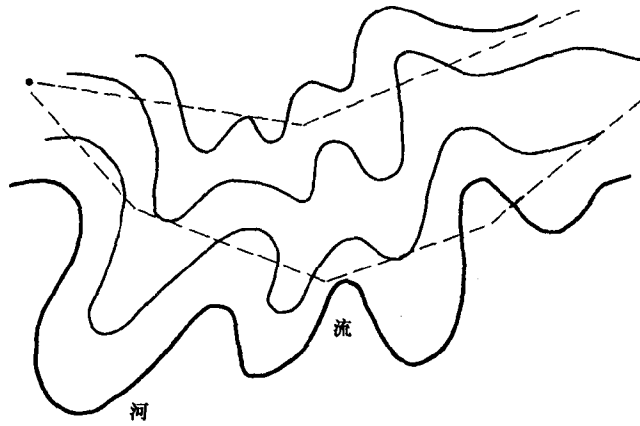


图 2-5 河谷线路的走向比选

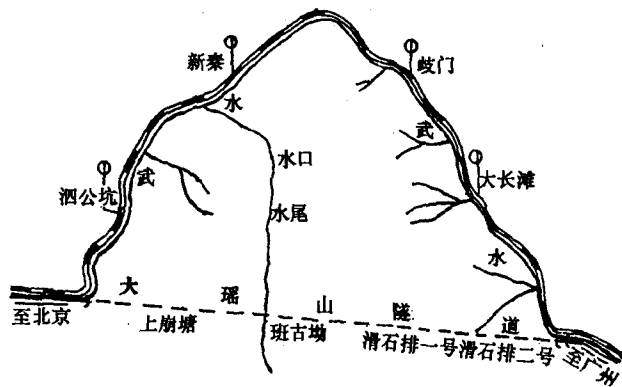


图 2-6 大瑶山隧道平面

丛山峻岭中绕了个大弯，河谷弯多水急，两岸山峰陡立，全长 30 余公里。解放前就建成的京广线，在这里紧靠江的左侧，是一段典型的靠河线路，标准极低，弯道很多，最小曲线半径只有 250m，上支下挡，雨季病害不断，一直是制约京广线运输能力的咽喉区。

20 世纪 70 年代，国家实行改革开放，急需拓宽这南北要道，决定修衡广复线。如何改扩建这一段低标准线段的问题，成为决策的首要关键。当时铁道部第四设计院提出三个方案，各方案主要指标如表 2-1 所示。

表 2-1 衡广复线沿武水段线路方案比较

比较项目 \ 方案	长隧道方案	四跨武水方案	两跨武水方案
线路总长(km)	33.908	45.834	45.497
造价估算(万元)	27.284	21.308	22.841

实际上，设计方案可归结为两类，两跨及四跨武水的方案都属于靠河侧一类，长隧道方案则是深靠山侧的一类，各方案的优缺点都是明显的。这两种方案的取舍在国家有关部门

曾引起激烈争论，争论的焦点是我国是否具备修建这样地质复杂（要穿越多条大断层）特长隧道的技术水平和经济实力，还要长期保持良好的运营状态（当时我国建成最长的铁路隧道为京原线的驿马岭隧道，长 7.023km），最后国务院决定，采用截弯取直的大瑶山隧道方案，历时数年，建成了我国第一条 10km 以上的双线隧道。修建中，全面引进了勘测、施工新技术，使我国铁路隧道修建水平历史性地上了一个台阶。但也应指出，当时认为技术上没有把握的人们所提出的长隧道涌水、通风等问题并非杞人忧天，确实都曾对施工和运营造成严重威胁，相应付出过重大代价，有些难题至今仍未解决。

三、采用较多、较长的隧道是今后山区铁路发展的趋势

不管是越岭还是河谷段隧道方案的比选，单从地形因素的角度，都可归结到是修长一点的隧道，还是修较长线段（即展线）的路基（包括边坡较高的路堑）以换取缩短隧道。前者整段线路缩短，平纵断面标准较高，运营条件较好，但投资大，施工技术要求高，进度较慢；后者则相反。再进一步，比选的实质是对一个国家经济实力和技术的检验和度量。

据我国建国以来半个世纪的建设实践，随着国力大大增强及认识的深化，原来那种力求避开长隧道的观念逐渐淡出；而由于线路标准低，病害不断，制约运输能力提高等弊端日益凸现，在方案决策的指导思想上已有所变化，即山区铁路克服高程障碍优先考虑修隧道，包括长隧道，设计规范的几次修改，反映了这一变化。

从我国各个时期所修建的山区铁路状况也可看出这一变化的轨迹。20 世纪 50 年代，山区铁路的代表为宝成线，隧道很多，均很短，最长的越岭隧道也只有 2km 多；60 年代修建著名的成昆铁路，隧道有 440 座，总延长为线路总长的 31.6%，最长的沙木拉达隧道为 6.383km；70 年代修建的襄渝线，隧道长度占线路延长的比例达 34.3%；80 年代建成了大瑶山隧道；20 世纪 90 年代首次用掘进机修筑西安—安康线上的，长 18.456km 的秦岭隧道。

20 世纪 90 年代后期陆续建设的西安—南京铁路、内江—昆明铁路、重庆—怀化铁路等，都是隧道比例高，单座长度也长；最近开工的兰新线兰州—武威段改线，将出现超过 20km 的乌峭岭隧道。据称，对 20km 左右的特长隧道，我国在技术上已有修建的把握，而且工期可控制在 4 年以内。

国外也是这样。日本是个多山的国家，自从 20 世纪 60 年代以来，为提高行车速度，通过改建、新建，构筑高标准的新干线铁路网，使线路上出现大量隧道工程。例如，上越新干线（大宫—新泻）线路总长为 270km，而隧道延长达 106km，占 39%。有趣的是，其中有一座清水隧道，于 1931 年建成，但以后为改善线路平纵断面，以达到新干线标准，先后在这地段两次降低线路越岭标高，隧道也相应两次重修加长。具体数据如表 2-2 所示。

表 2-2 日本清水隧道的演变

隧道名称	修建年份	越岭高程(m)	隧长(km)
清水隧道	1931	677	9.702
新清水隧道	1963	628	13.500
大清水隧道	1981	538	22.200

大清水隧道是 21 世纪前所建成的世界最长的铁路山岭隧道。

近年，欧洲各国构筑高速铁路网，也出现了许多特长隧道，例如正在修建的瑞士穿过阿尔卑斯山脉的圣哥达隧道（长 57km 及列奇堡隧道长 36km 等）。

四、地层地质状况对隧道线路位置的影响

以上所述都是讨论地形条件对隧道设置方位的影响，撇开了地质因素；其实，地质状态极为重要，它决定了工程修建的难易，甚至影响到建成后运营条件的优劣，这种影响，将在本教材下面的章节中详细介绍。

如何按地质条件来确定隧道位置，总的原则是“趋利避害”，即隧道位置要选在稳定的地层中，不宜穿越工程地质、水文地质十分复杂和严重不良的地段。但由于地质现象往往分布于很广范围，而铁路工程又是一条绵延数百公里的带状建筑，其平面转向及坡率都有严格限制，因此，要完全避免不良乃至恶劣的地质条件是不可能的。大致可按其不良程度，采取不同的原则措施。

(1) 对可能造成大灾害的地层，如有放射性污染的地区，由于施工十分困难，若对施工及运营环境设保护措施，将使投资急剧增加，而效果未必保证，故原则上应该绕避。

(2) 对存在严重危及施工安全的地质现象的区段，如大断层、大涌水、大滑坡、瓦斯严重突出等等，要尽量避让或缩短影响区段；同时仔细勘查，切实把握资料，做好应对准备。例如大瑶山隧道勘测时，发现在其中部将穿过一道 9 号富水大断层。为此，专门设计了一深达 400 余米的竖井，以求先期到达，摸清真相，为正洞通过作准备，谁知对该断层的富水程度还是估计不足，一触及断层，大水立即涌出，竖井变成“水井”，施工十分困难。这种涌水在通车后仍继续存在，不仅需巨额投资整治，而且破坏了该地区的地下水系，给生态环境造成严重不良后果。

(3) 一般性的不良地质现象，主要是指那些不太稳定或含水的地层。通常不宜为此对隧道位置作大变动，但要有预见，如煤系地层可能有瓦斯，石灰岩地区注意岩溶，线路穿过折皱核部，则大多岩体破碎、含水等，在结构设计及施工方案上都要有对应措施。

五、隧道洞口位置的确定

洞口是隧道的重要部位，一方面它是环境较差的洞身和地表的连接处，施工、运营、养护人员及设施都从这里进入，要求保持安全畅通；另一方面，它处于岩体浅表，受风化等影响，稳定性较差，易出病害。因此，当隧道走向方案确定后，两端洞口仍可在左右前后稍作移动，以求得到最佳位置。

线路穿越山体进洞前，总有一段明堑。如图 2-7 当洞口位置前后移动时，这段明堑可能增长或缩短，亦即隧道长度相应缩短或增长。在建国初期，我国为竭力避免修建较长隧道，指导思想力求把洞口位置内移，当时还有一个确定方法，即把修建每米路堑的造价（随边坡高度的增大而增加）和每米隧道造价相等处，称为等价点，作洞口位置。这样做的结果，隧道是缩短了，而洞口的边坡、仰坡都很高，施工运营过程中出现坍方落石，不少隧道最后不得不把洞口外移，接一段明洞，重作洞门结构，有的甚至接长几次。又如宣城、杭州、钱白鹤岭车站附近，一座仅百余米的短隧道，20 世纪 70 年代设计时，把一端洞口路堑挖得很深，结果触发了一个潜在的大滑坡，迫使线路局部绕道，最后又花巨资治理。

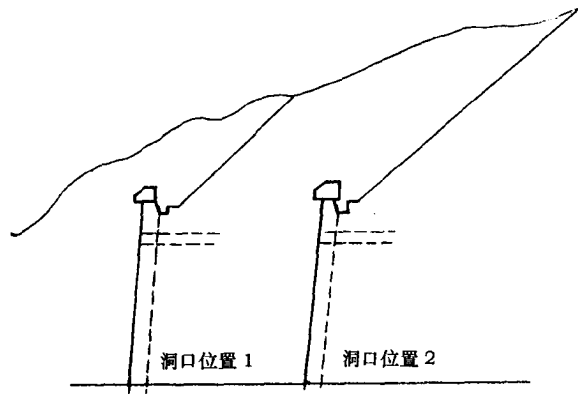


图 2-7 隧道洞口位置移动

基于这些经验教训，在 20 世纪 70 年代修改规范时就提出确定隧道位置宜早进洞、晚出洞。宁可让洞子稍长些，不要开挖边坡很高的路堑。这从保护自然环境来说，也是十分必要的。当然“早进晚出”的原则，并不意味着要刻意拉长隧道，因为这毕竟是造价高、施工复杂的建筑物。

根据我国实践经验，在不同地形、地质条件下，确定洞口位置要注意如下一些问题：

(1) 要避免不良地质地段 如滑坡、崩塌、岩堆、危岩落石、泥石流等处。

(2) 隧道出口在沟谷内时，洞口要选在沟的一侧，不要置沟底，因为这里往往是地质构造的薄弱环节，而且是天然的过水通道。

(3) 洞口出现在悬崖陡壁下，如果岩体不稳定，要避免；如果基本稳定，则设计和施工中要保护这种平衡状态，尽量不切削岩体，贴壁进洞或修筑一段明洞，也可设计特殊型式的洞门。

(4) 如果洞口地形为一段平缓的漫坡，那前后移动范围较大，从保护自然平衡和线路排水通畅的角度，一般不宜拉很长的路堑，适当延长隧道为好。有时也要考虑洞前一段路基填挖用土的平衡。

(5) 早进晚出的原则 具体落实在洞口边、仰坡开挖高度的控制上 图 2-8 中的 H 值 即路基面和仰坡外缘的高差，就是开挖高度，设计时大体按表 2-3 值掌握。

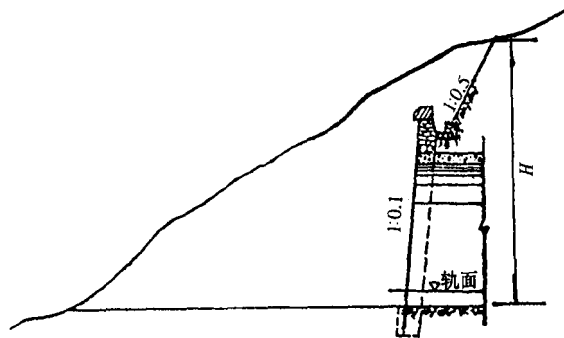


图 2-8 隧道洞口仰坡开挖高度

表 2-3

洞口边仰坡开挖高度控制

围岩级别	I—II			III		IV			V—VI	
边仰坡率	贴壁	1:0.3	1:0.5	1:0.5	1:0.75	1:0.75	1:1	1:1.25	1:1.25	1:1.5
高度(m)	<15	<20	25左右	<20	25左右	<15	<18	20左右	<15	<18

(6) 洞口的线路走向应尽量和该处地形等高线正交，这样可不造成一侧开挖面畸高，也不致衬砌承受偏压。

(7) 洞口最好有一方开阔平缓场所，用作施工基地。如果桥隧相连，洞口位置还要考虑相关工程的需要。

第二节 隧道平纵断面的设计

隧道的平纵断面，也就是隧道内线路的平纵断面，它是整条线路中的一段，主要要满足这条线路技术标准的统一要求；此外，还要满足隧道若干特殊要求。本教材限于篇幅，仅介绍这些特殊要求。

一、隧道平面的要求

规范规定：“隧道内的线路宜设计为直线，当因地形地质等条件限制必须设置为曲线时，宜采用较大的曲线半径，并设在洞口附近。隧道内不宜设置反向曲线。”

曲线是线路的薄弱环节，对隧道尤甚。这主要由于：

(1) 曲线隧道的空间狭长弯曲，空气流通更为不畅，列车通过时阻力将增大。

(2) 地下空间本来通风差，采光不良，如设有曲线，则将更加昏暗、潮湿、散发异味，甚至聚集有害气体，在这种环境中从事维修线路的劳动，不仅有损人体健康，而且工作质量难以保证。另一方面，曲线的存在，使得线路在列车通过后容易变形，恰恰需要更多、更精心的养护，形成一对不易解决的矛盾。

如果曲线半径小，接连有反向曲线，这种不利影响将更为明显，故规范作如上的规定。

应该指出，实际工程中，隧道内出现曲线还是常有的，因为线路走向要适应山区曲曲弯弯的等高线，或者避开不良地质点，到时应采用较大半径的曲线和使其尽量靠近洞口。

二、隧道纵断面的要求

(一) 坡道形式

由于隧道内不能用平道，使用的坡型只有两种，单面坡形及人字坡形（图 2-9）。

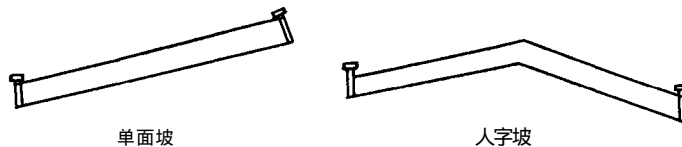


图 2-9 隧道纵断面形式

单面坡的优点是可以争取高程，在线路的紧坡地段常用之；而且由于两洞口有高差，运营期间自然通风条件好。它的缺点是采用两端相向施工时，一端将为向下开挖，地层含水及施工用水不能自动排出洞外，如集聚到掌子面前，将严重恶化作业环境；另外出碴时是重车上坡效率降低。

人字坡形的优缺点大致相反，通常在越岭隧道，地下水发育的隧道，优先采用人字坡形。

(二) 坡度值

隧道内设置的坡度有上下限值，其上限由整条线路的限制坡度所控制，下限是要保证洞内水流能自动顺畅排出。规范规定，排水坡度不宜小于 3‰。

隧道内列车运行环境比露天差，使得它容许的最大坡度，要比明线限制坡度略小，即乘上一个折减系数。这种差别表现为：

(1) 空气阻力增大。列车进洞，横向空间骤然缩小，空气阻力随之增大，且随着行车速度提高，增大更为明显。

(2) 机车粘着牵引力降低。隧道内湿度大，钢轨踏面凝成一层水膜，使得轮轨间粘着系数降低，从而也降低牵引力。

设计规范规定，隧道内使用最大坡度时，折减系数值如表 2-4 所示。

表 2-4 电力、内燃机车牵引的隧道内线路最大坡度折减系数

隧道长度(m)	电力机车牵引	内燃机车牵引
401~1000	0.95	0.90
1000~4000	0.90	0.80
>4000	0.85	0.75

在洞外半个列车长度内（通常为 400m），也要和隧道内一样折减，因为列车重心进入该段时，机车已进入洞内，上述不利影响开始出现。

当隧道有曲线时，曲线段仍要和明线一样作坡度折减，总的计算公式如式 2-1：

$$i_{允} = m i_{限} - i_{曲} \quad (2-1)$$

式中 $i_{允}$ ——隧道内坡度允许值；
 $i_{限}$ ——线路设计标准中的限制坡度；
 m ——表(2-4)中所列折减系数
 $i_{曲}$ ——曲线段本应有的折减值。

(三) 坡道长度

规范规定：“隧道内宜设计为长坡段。”这和明线处一样 是为了使列车行进时 整列车尽量处在同一坡度的线段上。

但是，当隧道长且用足限坡时，则要隔一段设置一缓坡道，避免列车长时间艰难爬坡，全挡行驶，甚至被迫停车，这是十分不安全的。

为保证列车有足够动力爬坡，要求列车在洞内坡道行驶时保持相当速度。规范规定：“内燃机车牵引的铁路应验算列车通过隧道的速度，在 1000m 及以下的隧道不应小于计算速度 在 1000m 以上的隧道不应小于 25km/h 否则应在洞外设加速缓坡。”

及相应厚度三要素。内轮廓线所围出的空间称为净空，它要保证列车在隧道内能安全、快速行驶，这是隧道建筑物最基本的功能要求；同时衬砌还是承重结构，形状要和所受的外荷载相适应；此外还应顾及施工的方便。内轮廓线的各参数是衬砌横截面设计的重点，厚度据不同的受力状况，由经验和计算而定。

隧道净空（内轮廓线）尺寸是逐次在以下几条轮廓线的基础上制定的。

1. 机车车辆限界

指国内各种机车车辆本身包括装载以后，其横截面各部位都不得越出的一条轮廓线，由国家制定。

2. 铁路基本建筑限界

和上一个限界相对应而尺寸稍大的一个限界。意指铁路上一切建筑物都不得侵入的一个范围，从而保证受机车车辆限限制的各种列车，在全国铁路线上畅行无阻。如有侵入，称为“侵限”是一种事故。

3. 隧道建筑限界

比“基本建筑限界”稍大，增大的空间用来安装洞内通信、信号、照明等设施。我国现行隧道建筑限界是国家标准局在 1983 年颁布实行的代号为 GB146—2—83 是设计支护结构的直接依据。

国标将隧道建筑限界分为两种：一种是“隧限-1A”和“隧限-1B”，分别用于新建和改建的蒸汽机车及内燃机车牵引的单线及双线隧道。另一种是“隧限-2A”和“隧限-2B”用于新建和改建的电力机车牵引的单线及双线隧道。分别示于图 2-12、图 2-13。

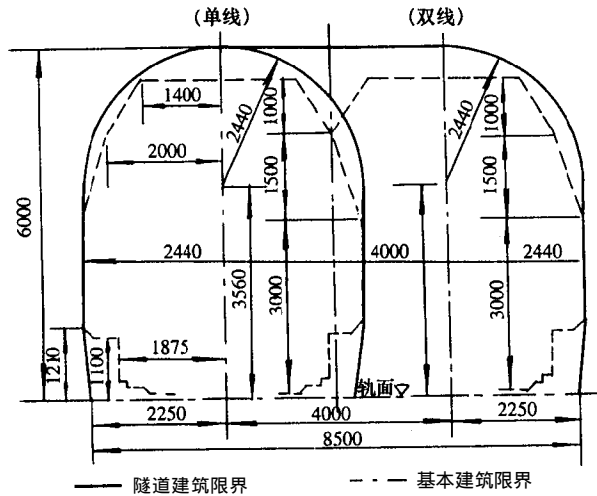


图 2-12 国标隧限-1

只从保证列车安全运行的角度来看，隧道净空直接使用隧道建筑限界的尺寸是可以的，但为了适应衬砌不同的受力状况及施工方便，需要设计另一条轮廓线，比隧限又稍大，而且对不同岩体中的隧道，该轮廓线的形状和尺寸，也有所不同。

图 2-14 为上述四条轮廓线的关系。

现行铁路隧道衬砌内轮廓线的具体尺寸是这样确定的：拱部采用三心圆，俗称尖拱，它

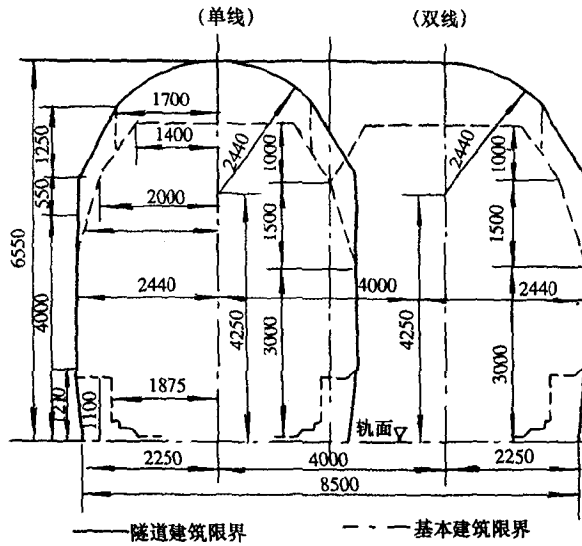


图 2-13 国标隧限-2

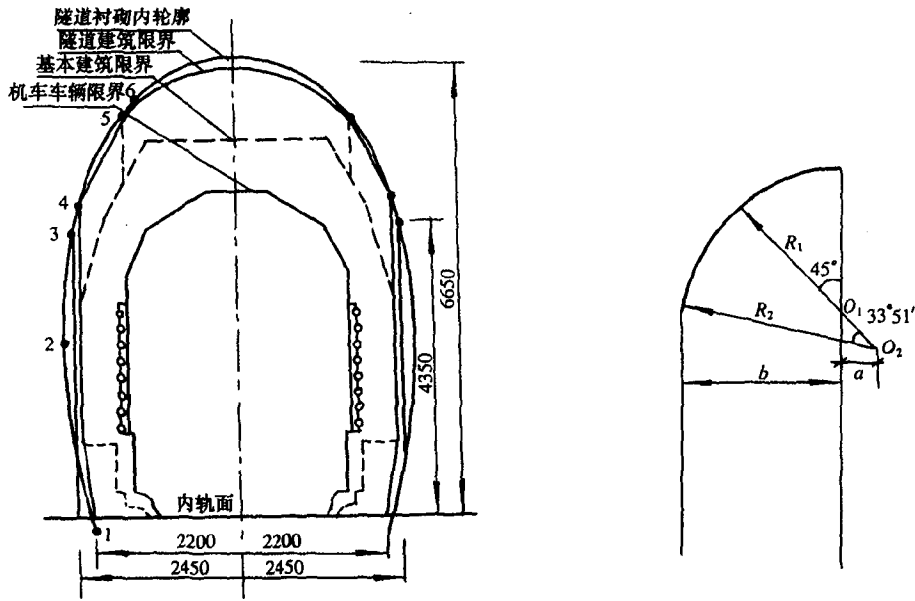


图 2-14 和铁路隧道横截面相关的四条轮廓线 图 2-15 衬砌内轮廓线基本尺寸

适用于承受以竖向力为主的外荷载，以 O_1 为圆心， R_1 为半径，在 45° 范围内（用对称截面的一半）作一弧，第二段弧是以 O_2 为圆心， R_2 为半径，幅角取 $33^\circ 51'$ （图 2-15）。图内几个参数的关系是：

$$\frac{a}{\cos 45^\circ} = R_2 - R_1$$

$$a + b = R_2 \sin(45^\circ + 33^\circ 51')$$

为使净空大于限界，取 $b = 245\text{cm}$ 。通过设定及计算，目前隧道衬砌标准图使用的一组基本数据为：

$$R_1 = 222\text{cm}$$

$$R_2 = 321\text{cm}$$

$$a = 70\text{cm}$$

$$b = 245\text{cm}$$

边墙为直墙 如图 2-15 那样拉直线即成；如为曲墙，则要再画一弧段，其参数可查得。

(二) 曲线段隧道净空加宽

如果隧道内线路有曲线，该地段的净空需加宽，加宽的原因及量值计算如下：

(1) 曲线段外轨超高，行驶车辆向内倾斜。

如图 2-16 外轨超高 $BC(E)$ ，引起车辆内倾水平值 DR 标以 $W_{内1}$) 粗略计算：

$$\triangle ABC \sim \triangle OFD$$

$$\frac{FD}{OD} = \frac{BC}{AB}, \quad FD = \frac{OD \times BC}{AB}$$

$$W_{内1} = \frac{H}{150} E(\text{cm}) \quad (2-2)$$

式中 H ——从轨面算起的限界控制点高度，常取 405cm；

E ——曲线外轨超高值 按线路规范规定 计算式

$$\text{为 } E = 0.76 \frac{V^2}{R} (\text{cm}) \text{ 最大取值不超过 } 15\text{cm}.$$

我国铁路隧道标准设计中，把 $W_{内1}$ 值看作限界绕

内侧轨顶中心转动一个 $\arctan \frac{E}{150}$ 角度 近似取 $W_{内1} = 2.7E$ 与式 (2-2) 算得结果十分接近。

(2) 刚体车辆在曲线上，其中部及两端会分别向内及向外产生偏移。

车辆是借助两组转向架灵活转动而通过曲线，它在曲线上的位置及产生的偏移如图 2-17

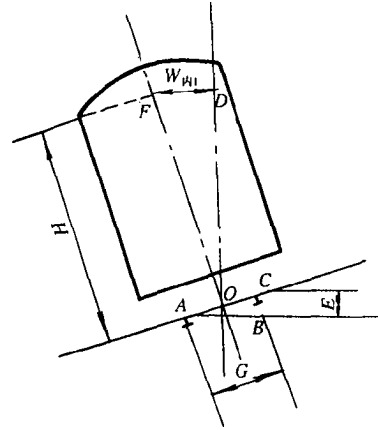


图 2-16 外轨超高引起的加宽

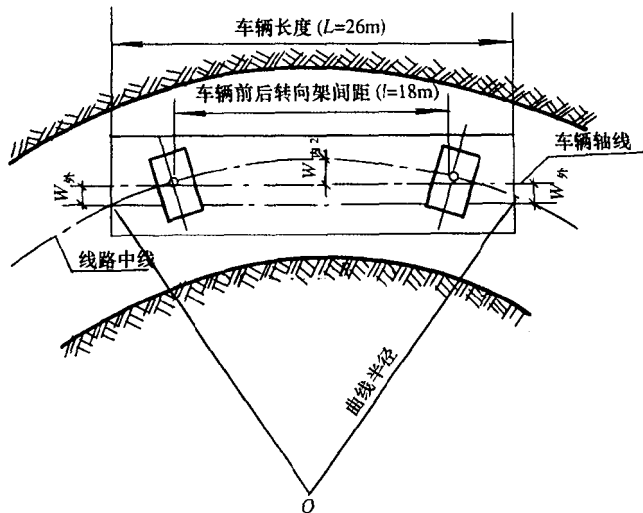


图 2-17 车辆在曲线上的位置

所示。

对图 2-17 中几个相似三角形以简单几何关系运算，可得：

$$W_{内2} = \frac{l^2}{8R} = \frac{4050}{R} \quad (\text{cm}) \quad (2-3)$$

式中 l ——车辆转向架间距离，常用标准值为 18m；

R ——曲线半径 (m)。

$$W_{外} = \frac{L^2 - l^2}{8R} = \frac{4400}{R} \quad (\text{cm}) \quad (2-4)$$

式中 L ——车辆标准长度 我国通用 26m。

$$\text{总加宽 } W = W_{内1} + W_{内2} + W_{外} \quad (2-5)$$

为施工方便 W 值以 10cm 一级取整。

由于内侧、外侧加宽值不等 从图 2-18 可知，加宽后隧道衬砌的中心线和线路的中心有一相对偏移 d ，施工时必须注意：

$$d = \frac{1}{2}(W_{内} - W_{外}) \quad (2-6)$$

曲线加宽的实现方法见图 2-19。把圆心 O_1 下移到 O'_1 位置， R_2 不变， R_1 增大，幅角也不变，同法画出两弧段，可使 b 增大到需要的宽度。这样只改动 O_1 位置及 R_1 值，相当于把对称轴相对移动一个距离，此水平距即为需要的加宽值。 O_2 位置不变 所以 a 减小 b 增大。

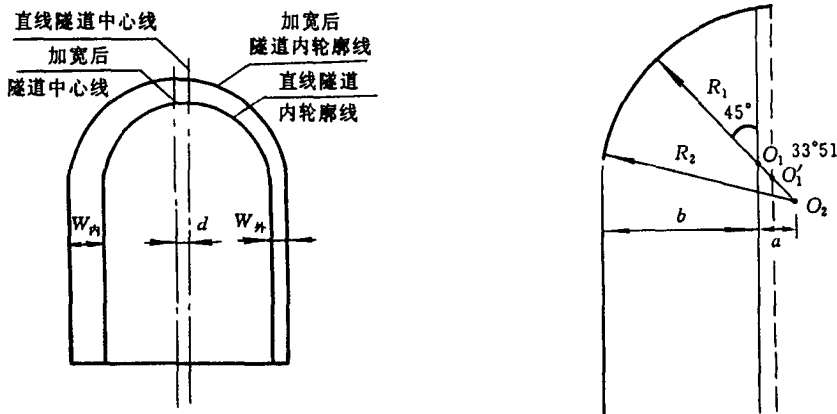


图 2-18 加宽后的衬砌中线偏移 图 2-19 加宽的实现方法

例 2-1 隧道某曲线段半径为 600m 远期行车速度为 160km/h 计算净空加宽。

解 $E = 0.76 \frac{v^2}{R} = 0.76 \times \frac{160^2}{600} = 32.4 \text{cm}$ 取 15cm

$$W_{内1} = 2.7E = 40.5 \text{cm}$$

$$W_{内2} = \frac{4050}{R} = 6.75 \text{cm}$$

$$W_{外} = \frac{4400}{R} = 7.3 \text{cm}$$

$$W = 40.5 + 6.7 + 7.3 = 54.5 \text{cm} \quad \text{取整 } 60 \text{cm}$$

$$d = \frac{1}{2}(40.5 + 6.7 - 7.3) = 20 \text{cm}$$