

绪 论

【知识目标】

1. 隧道在高速铁路中的地位与分类。
2. 铁路隧道基本施工方法。

0.1 概 述

隧道通常是指修建在地层中的地下通道。它被广泛地应用于铁路、公路、矿山、水利、市政和国防等方面，因此，单纯理解为“地下通道”的隧道概念，也可扩大到地下空间利用的各个方面。即也可以把各种用途的地下通道和洞室都称之为隧道。

1970年，OECD（国际经合组织）将隧道定义为，以某种用途在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面面积大于 2 m^2 的洞室。

铁路隧道是指专供铁路运输使用的地下建筑结构物；公路隧道则是指专供公路运输使用的地下工程结构物。随着我国经济的高速发展，隧道将势必在铁路、公路等交通运输，以及城市地下空间利用两个大的方面获得长足的发展，并将发挥越来越重要的作用。为此，它也是岩土工程的重要研究内容。

0.2 隧道在铁路上的应用和分类

在铁路路上，隧道常用来穿越山岭和水流障碍，以及作为解决城市中繁忙的交通运输问题

的一种手段。按照穿越障碍或作用的不同，位于铁路线上的隧道，可分为山岭隧道、水底隧道及地下铁道三种。

穿越山岭的隧道称为山岭隧道。在山区进行铁路建设，修建山岭隧道有明显的优点，它可以克服平面和高程障碍，改善线路条件，缩短里程，节省运费，提高运输能力，使铁路平缓顺直，从而能更好地满足现代化高速行车的要求，并取得理想的经济效果。对于高速铁路隧道的应用更为突出，采取最小曲线半径 4 000 ~ 8 000 m，同时采用低位置线路通过，能有效降低坡度。例如，衡广复线工程中，在坪石与乐昌之间，由于修建了长度为 14.3 km 的大瑶山隧道，使铁路长度较既有线路缩短约 15 km，这一数字几乎为坪石至乐昌间既有铁路长度的 1/3。大瑶山隧道的长度目前在我国的双线铁路隧道中居于首位。

世界上已建成的水底隧道（包括铁路和公路），其数量已超过百座。日本青函海底隧道穿越津轻海峡，长度达 53.85 km，是当前世界上最长的铁路水底隧道，它把日本的本州与海道两大岛联结在一起。1993 年完工的英吉利海峡隧道全长 49.2 km（多佛—加莱），由两条直径各为 7.3 m 的铁路隧道与一条直径 4.5 m 的后勤隧道组成。其中 37.5 km 在海底，11.2 km 在两端的陆地下面。它将孤悬的英国与欧洲大陆紧密地联系在一起，对欧盟的发展，欧洲单一市场的形成和国际经济、文化合作交流，都有重大促进作用。

地下铁道的应用也很广泛，它是解决大城市中繁忙的地面交通运输问题的重要手段之一。目前世界上已经有 40 多个国家和地区的 127 座城市建造了地铁，东京、巴黎、伦敦等城市轨道交通发展十分迅速，在巴黎，轨道交通承载 70% 的交通运输量，在日本，轨道交通承载 80% 以上的交通运输量。2013 年年末，我国累计有 19 座城市建成投运城市轨道交通线路 87 条，

运营里程 2 539 km。结合当前各地城市轨道交通建设现状，预计到 2022 年，全国以地铁为主的轨道交通运营里程将达到 6 000 km。

为了设计、施工及养护管理上的方便，《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005) 按隧道长度，把铁路隧道分为四种，即：

短隧道——全长 500 m 及以下；

中隧道——全长 500 m 以上至 3 000 m；

长隧道——全长 3 000 m 以上至 10 000 m；

特长隧道——全长 10 000 m 以上。

隧道的长度是指进出洞门端墙墙面之间的距离，以端墙面或斜切式洞门的斜切面与设计内轨顶面的交线同线路中线的交点计算。从交通安全出发，长度大于 100 m，隧道内应设置照明设施；长度 500 m 以下铁路隧道，一般采用自然通风；大于 500 m 应当布置通风设备，设置交通管理和监控设施。此外，根据隧道所在地址的地形、地貌等，将隧道分为傍山隧道、越岭隧道、水底隧道等。按照隧道施工方法，将隧道分为矿山法隧道、盾构法隧道、沉管法隧道等。按照隧道洞身结构形式，又可将隧道分为单拱隧道、连拱隧道、小间距隧道等。关于铁路隧道的分类，为了反映其不同方面的特点，还可以有其他的分类方法。

0.3 铁路隧道建筑物的组成

隧道能充分利用岩土地层的固有性质，达到最有效修建隧道的目的，从而获得良好的社会效益和经济效益。隧道建筑物可分为主体建筑物和附属建筑物两大部分。

主体建筑物为洞身衬砌（简称“衬砌”）和洞门。衬砌是一种永久性的支护结构，用它来加固隧道洞身，防止洞身周围地层发生风化剥落或坍塌，洞门则用来加固隧道的出入口。两者共同组成隧道主体建筑物来保证列车在隧道中的运行。

隧道的附属建筑物主要包括大、小避车洞及防排水设施；在隧道较长通风不良时，还要修建通风建筑物。此外，在隧道内还可能由于铁路电气化或通信信号等方面的需要而修建相应的附属建筑物（如电缆槽、无人增音站洞及绝缘避车洞等各种洞室）。

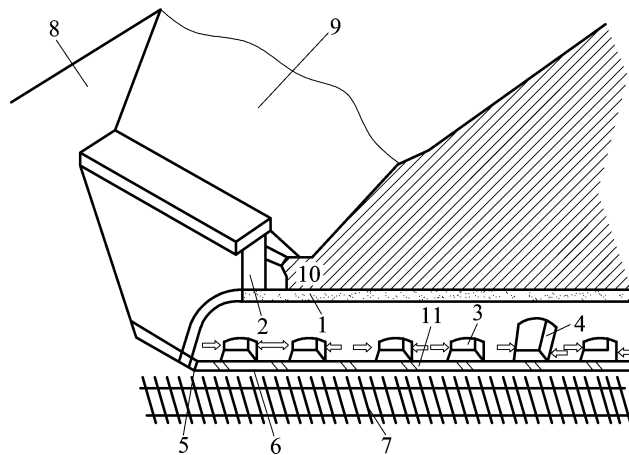


图 0-1 隧道建筑物组成

- 1—衬砌；2—洞门；3—小避车洞；4—大避车洞；5—洞内排水沟；
- 6—水沟盖板；7—洞内线路；8—洞口路堑边坡；9—洞口仰坡；
- 10—洞门墙顶排水沟；11—避车洞标志

0.4 隧道施工方法简介

隧道施工方法有传统矿山法、新奥法、掘进机法、盾构法、沉管法等。

矿山法是用一般的地下开挖方法来进行隧道施工的。当隧道穿经岩石地层时，通常均用钻眼爆破法进行开挖；在进行必要的临时支护及清除开挖出来的石渣之后再修建永久性支护结构——衬砌。隧道的横断面视具体条件可分几部分挖成，亦可一次挖成。这种施工方法由

于与矿山地下巷道的施工方法相类似，故常称之为传统矿山法。

新奥法 (New Austrian Tunnelling Method)，是以控制爆破或机械开挖为主要掘进手段，以锚杆、喷混凝土为主要支护方法，理论、量测和经验相结合的一种施工方法。其核心是保护和爱护岩体，那就是保护围岩，调动和发挥围岩的自承能力。从这样一个原则出发，可以根据隧道工程具体条件灵活地选择开挖方法、爆破技术、支护形式、支护施作时机和辅助工法。至于对围岩变形的控制，根据不同情况，有时应强调释放，有时应强调限制。其目的都是“保护围岩，调动和发挥围岩的自承能力”。新奥法是目前国内隧道设计、施工的主流方法。从我国隧道发展的趋势来看，在今后很长一段时期内，仍以新奥法为主。

岩石隧道掘进机法是利用岩石隧道掘进机在岩石地层中暗挖隧道的一种施工方法。英文名称是 Tunnel Boring Machine，简称 TBM。它利用刀具一次便将隧道整个断面切削成型，掘进同时，还兼有出渣及自动推进的功能。1999 年建成的 18.457 km 长秦岭隧道的 1 号线隧道则是用直径为 8.8 m 的全断面掘进机开挖，实现了隧道施工机械化。岩石隧道掘进机的断面外径大可达十米多，小则仅 1.8 m，并且岩石掘进机和辅助施工技术日臻完善以及现代高科技成果的应用 (液压新技术、电子技术和材料科学技术等) 大大提高了岩石掘进机对各种困难条件的适应性。

盾构法主要应用于软土、流砂、淤泥等特殊地层。盾构法隧道的基本原理是用一件有形的钢质组件沿隧道设计轴线开挖土体而向前推进。这个钢质组件在初步或最终隧道衬砌建成前，主要起防护开挖出的土体作用，以及保证作业人员和机械设备安全的作用，这个钢质组件被简称为盾构。盾构的另一个作用是能够承受来自地层的压力，防止地下水或流砂的侵入。

盾构施工不仅不受地面交通、河道、潮汐、气候条件的影响，而且盾构的推进、出土、衬砌拼装等可实行自动化、智能化和施工远程控制信息化，掘进速度较快，施工劳动强度较低；并具有显著的环保功能。

沉管法是将预制好的隧道管段拖航浮运到隧址，沉入基槽并进行水下连接，从而形成隧道。珠江和甬江这两座水下隧道的成功修建标志着我国已具备了用管段沉放法修建水下隧道的能力并掌握了相关技术。

沉管隧道主要有两种基本类型：钢壳管段隧道和混凝土管段隧道。钢壳管段沉管隧道是钢壳与混凝土的组合结构。钢壳可作为防水层并在结构上有明显作用。混凝土主要承受压力和作为镇载物，并且也有助于结构上的需要。钢壳由于具有弹性特点，因此，完工的钢壳管段沉管隧道成为一个具有柔性的整体结构。混凝土管段沉管隧道的主要特点是隧道的管段由钢筋混凝土制成，钢筋混凝土用于结构构造和作为镇载物。大多数完工的混凝土管段由多个节段组成，管节长 20~25 m，用柔性接缝将其连在一起。因为每一管节是一个整体结构，更易控制混凝土的灌注和限制管节内的结构力。沉管隧道的发展趋势：一是管节越来越长，管节的车道数越来越多；二是从单一用途向多用途发展；三是沉管隧道地基适应性越来越广。

正在规划研究的水底隧道工程还有：连接辽东半岛和胶东半岛的渤海海底隧道，长约 57 km；连接上海和南通的长江水底隧道，长度约 7 km；上海至宁波的杭州湾水底隧道，最长的隧道长约 52 km，隧道建成后沪甬两地的运输距离较经杭州钱塘江大桥缩短约 250 km；另外还有其它穿越长江的水底隧道。台湾海峡隧道目前由清华大学进行可行性研究。

学习项目一 铁路隧道构造认识

【知识目标】

1. 铁路隧道限界与净空的关系。
2. 隧道衬砌断面设计。
3. 隧道洞身支护结构。
4. 洞门结构及明洞结构等结构方面的内容。
5. 高速铁路隧道的技术特征。

铁路隧道工程按照各部分功能不同，分为两大部分；一是洞室结构，是铁路隧道的主体部分；二是附属结构，是保证隧道安全运营部分，主要包括铁路隧道的机电设备与维护部分。

- 铁路隧道洞室结构主体建筑

铁路隧道主体构造物是为了保持岩体的稳定和行车安全而修建的人工永久建筑物，通常指洞身衬砌和洞门构造物（图 1-1）。洞身衬砌的平、纵、横断面的形状由铁路隧道的几何设计确定，衬砌断面的轴线形状和厚度由衬砌计算确定。在山体坡面有崩坍和落石的可能时，往往需要接长洞身或修建明洞。洞门的构造形式由多方面的因素决定，如岩体的稳定性、通风方式、照明状况、地形地貌以及环境条件等。铁路隧道主体构造物包括洞身、洞门、明洞等。

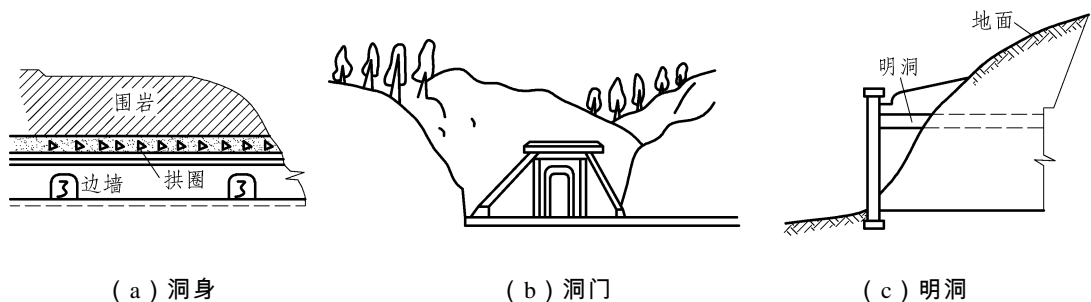


图 1-1 隧道主体构造物组成

- 铁路隧道附属结构

铁路隧道附属结构物是主体构造物以外的其他构筑物，是为了运营管理、维修保养、给水排水、供蓄发电、通风照明、通信、安全等而修建的构造物，包括人行道（或避车洞）、防水和排水、通风和照明、消防和救援、通信和监控设施，以及在电气化铁路上根据情况而设置的有关附属设施等。

1.1 铁路隧道限界与净空

1.1.1 隧道净空与限界

铁路隧道净空是指隧道衬砌内轮廓线所包围的空间。隧道净空是根据“隧道建筑限界”确定的。隧道建筑限界是为了保证隧道内各种交通的正常运行与安全而规定的在一定宽度和高度范围内不得有任何障碍物的空间范围。总的来说，隧道建筑限界是指衬砌内缘不能侵入的轮廓线。

我国对全国铁路线上正在运行的各种型号机车和车辆，均作了全面的调查和统计，把它需要保证的横断面规定为“机车车辆限界”，它能满足各种型号的机车和车辆在横断面尺寸的最大需要。同时，还考虑了列车装载货物的不同情况，令全国的列车装载货物，包括规章所

容许的扩大货物，装载后都不容许超过车辆限界范围以外。

针对铁路上的各种建筑物，规定了“铁路建筑接近限界”。这个限界是指全国铁路线上有的建筑物都不容许侵入的净空范围，以保证列车往来行驶绝无刮碰并安全通过。

隧道是铁路线上的永久性建筑物，一旦建成，就不便改动。如果某一部位或是某些附属设施不慎侵入了限界，就可能发生刮碰事故。因此，在一般的“建筑接近限界”的基础上，再适当地放大一点，留出少许空间，用以安装一些如照明、通信和信号等设备。因此，我国国家标准局 1983 年 11 月 7 日颁布了以国标 GB146.2-83 为序号的“标准轨距铁路隧道建筑限界”作为设计隧道支护结构的依据。其中虚线是机车车辆或超限货物车辆的接近限界。此外，又考虑到：列车在运行中会发生左右的摇摆；隧道施工时，会有尺寸上的误差；衬砌建成后会有稍稍的固结变形；测量时，总会有在容许范围内的误差；线路敷设时会有偏离中心线的误差，等等。为了预留这些可能因素的位置，在施工设计时，实际净空又比规定的“隧道建筑限界”稍稍放宽一些。

对于新建或改建，行驶蒸汽机车或内燃机车的单线和双线隧道，分别采用隧道建筑限界“隧限 1-甲”和“隧限 1-乙”。对于新建或改建行驶电力机车的单线和双线铁路隧道，分别采用隧道建筑限界“隧限 2-甲”和“隧限 2-乙”。它们各自的形状和尺寸如图 1-2 (a) 及图 1-2 (b) 所示。

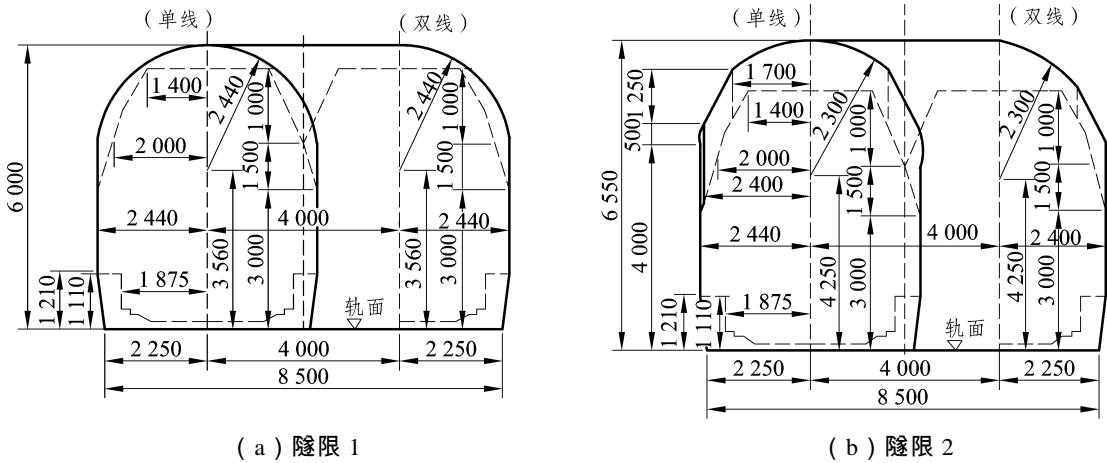


图 1-2 铁路隧道限界

1.1.2 曲线隧道的净空加宽

1. 铁路隧道

1) 加宽原因

当列车在曲线上行驶时，车体内倾和平移使得所需横断面积有所增加。为了保证列车在曲线隧道中安全通过，隧道中曲线段的净空必须加大。铁路曲线隧道的净空加宽值是由以下的需要来决定的。

(1) 车辆通过曲线时，转向架中心点沿线路运行，而车辆是刚性体，其矩形形状不会改变。这就使得车厢两端产生向曲线外侧的偏移($d_{外}$)。车厢中间部分则向曲线内侧偏移($d_{内1}$)，如图 1-3 所示。

(2) 由于曲线上存在外轨超高，车辆向曲线内侧倾斜，使车辆限界的各个控制点在水平方向上向内移动了一个距离 $d_{内}$ (图 1-4)。

因此，曲线隧道净空的加宽值由三部分组成： $d_{内1}$ ， $d_{内2}$ ， $d_{外}$ 。

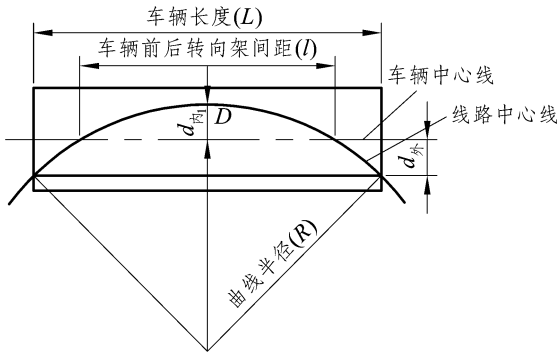


图 1-3 曲线隧道内外侧加宽

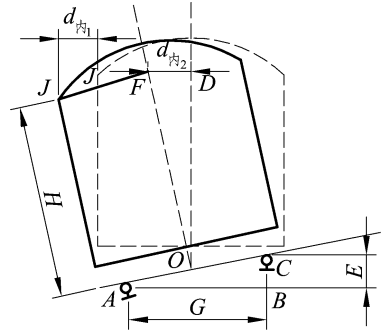


图 1-4 曲线隧道外轨超高造成加宽

2) 加宽计算

(1) 单线铁路隧道的加宽计算：

$$d_{总} = d_{内1} + d_{内2} + d_{外} = 4050/R + 2.7E + 4400/R = 8450/R + 2.7E \quad (1-1)$$

式中 R ——曲线半径 (m)。

E ——外超高值，其最大值不超过 15 cm。

$$E = 0.76 \frac{v^2}{R} \quad (\text{cm}) \quad (1-2)$$

计算中所涉及的基本参数包括：车辆转向架中心距 l ，取值 18 m；铁路远期行车速度 v ，km/h；标准车辆长度 L ，我国为 26 m。

(2) 双线铁路曲线隧道的加宽值计算：

双线铁路曲线隧道的内侧加宽值 $d_{内}$ 及外侧加宽值 $d_{外}$ 与单线曲线隧道加宽值计算相同。

内外侧线路中线间的加宽值 $d_{中}$ 按以下情况计算 (图 1-5)。

当外侧线路的外轨超高大于内侧线路的外轨超高时

$$d_{中} = \frac{8450}{R} + \frac{H}{150} \times \frac{E}{2} \quad (\text{cm}) \quad (1-3)$$

式中 H ——车辆外侧顶角距内轨顶面的高度，取 360 cm；

E ——外侧线路的外轨超高值 (cm);

R ——曲线半径 (m)。

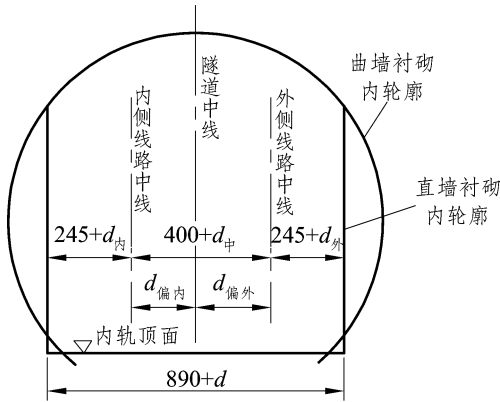


图 1-5 双线铁路曲线隧道加宽值

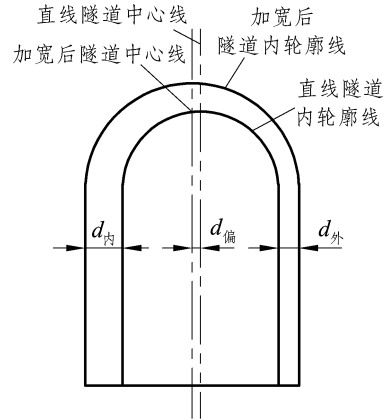


图 1-6 曲线隧道中线偏移值

(3) 曲线隧道中线与线路中线偏移距离 :

从以上计算可知 , 曲线隧道内外侧加宽值不同 (内侧大于外侧) , 断面加宽后 , 隧道中线

向曲线内侧偏移了一个距离 $d_{偏}$, 单线隧道的偏移值为 (如图 1-6) :

$$d_{偏} = \frac{d_{内} - d_{外}}{2} \quad (1-4)$$

双线隧道的偏移情况则如图 2-5 所示 , 其中内侧线路中线至隧道中线的距离为 :

$$d_{偏内} = 200 + \frac{d_{内} - d_{外} + d}{2} \quad (1-5)$$

外侧线路中线至隧道中线的距离为 :

$$d_{偏外} = 200 + \frac{d_{内} - d_{外} + d}{2} \quad (1-6)$$

3) 铁路曲线隧道加宽的平面布置

隧道曲线加宽段的范围按以下方式进行 :

位于曲线地段的隧道加宽范围，除圆曲线部分按 $d_{总}$ 加宽以外，缓和曲线部分被视为既非直线，又非圆曲线，所以把它分为两段，一段属于接近直线的性质，另一段属于接近圆曲线的性质，分别给以不同的加宽值。具体来说，自圆曲线终点至缓和曲线中点，并向直线方向延伸 13 m。这一段采用圆曲线的加宽断面，即加宽 $d_{总}$ 。缓和曲线的其余半段，并自缓和曲线终点向直线方向延伸 22 m，这一段采用圆曲线加宽值的一半，即 $1/2 d_{总}$ 。

上述规定的理由是：当列车由直线进入曲线，车辆前转向架跨进缓和曲线的起点以后，由于曲线外轨已经开始有了超高，车辆随之开始倾斜，车辆后端亦开始偏离线路中线，所以，车辆前转向架到车辆后端点的范围内，就应该予以加宽，但可取一半定值。此长度为两转向架间距 18 m 加转向架中心到车辆后端部点的距离 4 m。当车辆的一半进入缓和曲线中点时，其车辆后端偏离中线，应按前面转向架所在曲线的半径及超高值决定加宽值 $d_{总}$ 。此时，前面转向架中心已接近圆曲线，故车辆后半段，即车长的一半 $26/2 = 13$ m 的范围内，应按圆曲线的加宽值 $d_{总}$ 予以加宽，如图 1-7 所示。

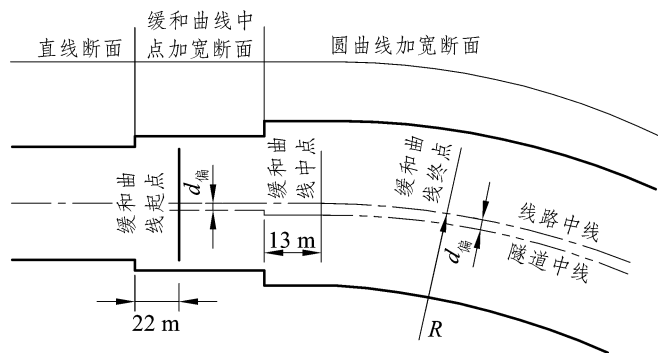


图 1-7 隧道曲线加宽段

$d_{偏}$ —圆曲线地段隧道中线偏移距离； R —圆曲线半径

在直线段上，隧道衬砌的断面是一致的，到了曲线段就要加宽，因此断面就各自不同。

在衔接处，可以用错台的方式分段变换，也可以在 1 m 范围内逐渐过渡。前者施工方便，但突变台阶增大了隧道内风流的阻力，对通风有些不利。

1.1.3 隧道衬砌断面

隧道的净空限界确定以后，就可以据此进行隧道衬砌断面的初步拟定。由于隧道衬砌是一个超静定结构，不能直接地用力学方法计算出应有的截面尺寸，而必须先拟定一种截面尺寸，按照这个截面尺寸来验算在荷载作用下的内力。如果截面强度不足，或是截面富裕太多，就得调整截面，重新计算，直至合适为止。所以，在设计隧道衬砌时，需要根据经验初步拟定一个用以计算的结构截面形状以及它的尺寸。

拟定衬砌结构尺寸时，需要考虑三个方面：第一是选定什么样的净空形状，也就是选定结构的内轮廓；第二是选定什么样的计算结构轴线，也就是抽象出来据以进行计算的几何体系；第三是选定各个截面的厚度，换句话说，就是选定用以核算强度的截面面积。

在隧道断面形状设计时需考虑的因素有以下几点：

(1) 隧道的内轮廓必须符合前述的隧道建筑净空限界，结构的任何部位都不应侵入限界以内。同时，隧道内轮廓还应考虑通风、照明、安全、监控等内部装修设施所必需的富余量。

(2) 采用的施工方法能确保断面形状及尺寸有利于隧道的稳定。

(3) 从经济观点出发，内轮廓线应尽量减少洞室的体积，即使土石开挖量与圬工砌筑量为最省。因此，内轮廓线一般紧贴限界。但其形状又不能如限界般曲折，要平顺圆滑，以使结构在受力及围岩稳定方面均处于有利条件。

(4) 结构的轴线应尽可能地符合在荷载作用下所决定的压力线。若是两线重合，结构的

各个截面都只承受单纯的压力而无拉力，当然最为理想。但事实上很难做到。一般总是结构的轴线接近于压力线，使各个截面上主要承受压力，而极少断面承受很小的拉力，从而充分地利用混凝土材料的受压性能。

总之，内轮廓线应最大限度地保证所确定的断面形式及尺寸安全、经济、合理。

从以往的理论 and 工程实践可得出，当隧道衬砌承受径向分布的静水压力时，结构轴线以圆形为最合宜。当衬砌主要承受竖向荷载和不大的水平荷载时，结构轴线上部宜采用圆弧形或尖拱形，下部可以做成直线形（即直墙式）；当衬砌在承受竖向荷载的同时，又承受较大的水平荷载时，衬砌结构的轴线上部宜采用圆弧形或平拱形，下部可采用凸向外方的圆弧形（即曲墙式）。如果还有底鼓压力，则结构底部应有凸向下方的仰拱为宜。

1.2 铁路隧道的基本构造

隧道工程的主要组成包括：洞身工程、洞口和洞门工程、附属构筑物。

1.2.1 洞身工程

隧道开挖以后，坑道周围地层原有的平衡遭到破坏，引起坑道的变形甚至崩塌。因此，除在岩体坚固完整而又不易风化的稳定岩层中，可以只开成毛洞以外，其他在所有的地层中的隧道，都需要修建支护结构，即衬砌。支护的方式有：外部支护，即从外部支撑着坑道的围岩（如模筑混凝土整体式衬砌、砖石衬砌、装配式衬砌、喷射混凝土支护等）；内部支护，即对围岩进行加固以提高其稳定性（如锚杆支护、压入浆液等）；混合支护，即内部与外部支护同时采用的衬砌（如喷锚支护）。从衬砌施工工艺方面将隧道衬砌的形式分为以下4类：