第一章

隧道通风方式

第一节　隧道通风方式的发展史

隧道内保持良好的空气状态是行车安全的必要条件，通风的目的是为了把隧道内的有害气体或污染物质的浓度降至一个允许浓度以下，以保证汽车行驶的安全性和舒适性，这是公路隧道服务水准的一个重要标志。同时，在隧道内保持一定的卫生标准，也有利于隧道内维修，养护人员进行洞内作业时的身体健康。

公路隧道发展初期一般都较短，多是依靠自然通风或交通风进行通风的，这是最早形成的纵向式通风系统,这也是由当时的社会经济、技术条件所决定的,因而,隧道长度就受到了一定的限制。当隧道超过一定长度后，仅仅依靠自然通风或交通风进行通风已不能满足卫生标准的需要，从而演变出利用机械设备进行各种方式的机械通风，以稀释汽车排出的废气。

19 世纪 20 年代初，福特汽车廉价批量生产迎来了汽车时代，在此之前，英国的罗瑟利瑟(Rotheriteh)公路隧道虽然已长达 1913m ，但因通过汽车数量较少，因而无需设置正规通风。在建造通过纽约市赫德逊河底的荷兰隧道（长 2 610m)时,正值汽车化时代,预计通过隧道的汽车数量将增多，并认为采用矿山等常用的空气沿车道纵向流动的纵向式通风方式已不能提供隧道内所需的通风量。恰在此时，当美国匹兹堡市的自由(Liberty)隧道(长 1 800m)于 1924 年发生交通堵塞,CO 中毒导致乘客神志昏迷事故后，在荷兰隧道的通风方式上产生了一种排除有害气体的新方法。

荷兰隧道采用盾构法施工，断面为圆形。试图把行车道下部弓形空间作为送风道，上部加设吊顶板，其弓形空间作为排风道，据此设计了将气流从下部空间流经隧道后送入上部的排风道的通风方式，即所谓的全横向通风方式，并获得了成功。由于此种通风方式具有高度的可靠性，使得大交通量的长大公路隧道的建设成为可能，并应用于许多长大公路隧道中，如日本的关门隧道(长 3 461m)，惠那山一线隧道(长 8 489m)，芨子隧道(长 4 417m)均采用了全横向式通风。

由于全横向式通风需在设计断面以外提供两条额外的送、排风道，这对于圆形断面以外断面型式的隧道将大大增加工程投资，因而出现了采用一条风道和隧道相组合的折衷通风方式，即所谓的半横向式通风。1934 年,英国的默尔西隧道(长 3 226m)首先采用了半横向式通风，

随后在许多不太长的公路隧道中相继采用了此种通风方式；日本的天王山隧道（长 1 435m)也采用了半横向通风方式。

19 世纪 60 年代中期出现了石油危机，在公路隧道长度不断增长、交通量也日益增多的情况下，对于设备规模大、投资较高、耗能较多的全横向通风方式与半横向通风方式也提出了要重新进行评价的要求，长大公路隧道能否采用节能效果较好的纵向式通风（包括分段纵向式通风）?日本的关越一线隧道(长 1 0885m)、惠那山二线隧道(长 8 625m)在这方面进行了有益的探索。这两座隧道均采用竖井吹吸式通风，将隧道分成几个通风区段，每个区段内均为纵向式通风，这样可以充分利用汽车交通风的活塞作用以节约耗能；为了降低烟尘指标过高而给耗能带来的不利影响，在隧道适当部位设置了电器集尘室以降低烟尘浓度。这种有益的探索。迅速得到发展，并成为当今长大公路隧道通风型式的发展趋势。

第二节　常用的隧道通风方式

一、自然通风

（一）概述

隧道内的自然通风，就是不用风机设备、完全靠汽车交通风的活塞作用及其剩余能量与自然风的共同作用，把有害气体和烟尘从隧道内排出洞外。当隧道内的自然风向与汽车行驶方向相同时，自然风是助力作用，排除有害气体的时间则较快；若自然风向与汽车行驶方向相反时,自然风起阻力作用,排除有害气体的时间则较慢,需时较长。

对于没有其他通路(如竖井、斜井等)的单一隧道,自然风也基本上是已知的稳定值,可能是助力作用，也可能是阻力作用，有时随着季节的变化而变化，这些状况均可反映到设计计算中去。不稳定的自然风对单向交通的隧道影响较小，一般均可根据掌握的气象资料，通过计算分析评价自然通风的效果；但对双向交通的隧道则较为复杂，自然风对部分行驶的汽车是助力作用，而对另一部分汽车则起阻力作用，两部分汽车的比例也很难确定，加以自然风的不稳定性更加深了自然通风问题的复杂化，故对双向交通的隧道除长度很短、或确知自然风较为固定(风向、风速)且风速较大时,一般不考虑自然通风的作用。

对于有其他通路的隧道，人们似乎有一种概念，认为竖井可以起到烟囱的作用，能加速排除隧道内的有害气体，对于中等长度的隧道往往企图用增设竖井的办法以代替机械通风。实则不然，除非竖井很深，而且竖井中的空气温度比隧道外的气温大得很多时，才能有烟囱那样稳定的向井外排烟的作用。实际上，一般隧道的竖井深度都不太深，竖井内气温与隧道外气温相差也不太大，而且随着季节的变化，竖井内气温有时比隧道外的气温高，有时比隧道外的气温低,加上局部气压梯度的变化,致使竖井内的风向、风速是多变的。竖井内的风流状况,和隧道一样也是由大气的气象状况和行驶汽车交通风的活塞作用所决定，也就是说与汽车行驶所在位置有关，而且汽车的活塞作用一般都比自然风作用大，故汽车在隧道内行驶时，竖井内的风流状况(风向、风速)主要由行驶汽车的活塞作用所控制。当汽车行驶在竖井前方时,汽车的活塞压力(正压)驱使洞内有害气体从竖井向井外排出,而当汽车驶过竖井后,汽车的活塞压力

在汽车尾部形成负压，又使竖井内向外排烟的流向倒流，竖井与隧道内的风流状况将是十分复杂的，甚至可能会出现有害气体停滞区。因此，认为用竖井可以代替机械通风的想法是不现实的。

（二）自然风压

1. 隧道内自然风的形成

隧道内形成自然风流的原因有三 隧道内外的温度差(热位差)、隧道两端洞口的水平气压差(大气气压梯度)和隧道外大气自然风的作用。

当隧道两洞口有高程差时，两洞口间的大气压力不同。但是，若隧道内外空气密度一致，且洞口间没有水平气压梯度与大气风时，则此单纯由高程差所形成的气压差，并不能使空气流动，因为高洞口的大气压力加位能恰好与低洞口相等。

(1)热位差

当隧道内外温度不同时，隧道内外的空气容重就不同，从而产生空气的流动，用压差来表示称为热位差。

热位差压头的计算式为

$$\Delta p_t = (\gamma_a - \gamma_n) Z \tag{1-1}$$

式中 γ_n——隧道内的空气容重(kg/m^3)；

γ_a——隧道外的空气容重(kg/m^3)；

Z——隧道两洞口间的高差(m)。

(2)大气气压梯度

大范围的大气中，由于空气温度、湿度等的差别，同一水平面上的大气压力也有差别，这种气压的差异，气象上以气压梯度表示。所谓气压梯度，就是垂直于等压线的一个向量，取子午线 1°或 111.1km 为一个单位距离，在每一个单位距离内气压变异的大小叫作一个气压梯度值。气压梯度的数值，可从气象资料查得。

此外，隧道两端洞口外温度、湿度等的差别，也会产生空气容重的差别而产生洞口间的水平压差(也可以说是隧道位置的局部气压梯度)。

(3)隧道外大气自然风

隧道外吹向隧道洞口的大气风，碰到山坡后，其动压头的一部分可转变为静压力。此部分动压头的计算方法，有的资料根据隧道外大气自然风的风向与风速按下式计算：

$$\Delta p_v = \frac{\gamma_a}{2g}(V_a \cos\alpha)^2 \tag{1-2}$$

式中 V_a—— 隧道外大气自然风速(m/s)；

α —— 自然风向与隧道中线的夹角(度)。

有的资料介绍按下式计算：

$$\Delta p_v = \delta \frac{\gamma_a}{2g} V_a^2 \tag{1-3}$$

系数 δ 由风向、山坡倾斜度与表面形状、附近地形以及洞口形状、尺寸等而定。

2. 自然风压差与隧道内自然风速

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

上述三项形成隧道内自然风的压差之和即为隧道内自然风压差 p_n,作用在隧道两洞口之间,计算时可以一端洞口为基准,作用在另一端洞口的相对压力(静压与位压之和),如图 1-1 所示。若以洞口 A 为基准,则 BA 方向的自然风压差 p_{nBA}(也可简写成 p_{BA})为

$$
\begin{aligned}
p_{nBA} &= \Delta p_v + P_B + \gamma_n \Delta Z - P_A \\
&= \Delta p_v + P_B + \gamma_n \Delta Z - (P'_A + \gamma_n \Delta Z) \\
&= \Delta p_v + (P_B - P'_A) + (\gamma_n - \gamma_a)\Delta Z
\end{aligned}
\tag{1-4}
$$

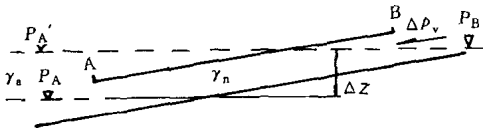

图 1-1

式中右边第一项表示隧道外大气风动压；第二项表示气压梯度；第三项表示热位差。P_A、P_B 为洞口 A、B 外面的绝对大气压,P_A' 为洞口 A 外面与洞口 B 同高程处的绝对大气压。

当隧道为等截面直线隧道时,由 p_n 产生的隧道内自然风速 V_n,可按下式计算：

$$
p_n = \left(1.5 + \frac{\lambda L_T}{d}\right)\frac{\gamma_n}{2g}V_n^2 = \xi_n \frac{\gamma_n}{2g}V_n^2 \tag{1-5}
$$

式中 $\xi_n = 1.5 + \frac{\lambda L_T}{d}$——全隧道总阻力系数。

当隧道断面 F、摩擦系数 λ 等有变化时,F、d、λ 等值均可按平均值计,V_n 为平均自然风速。

有竖井或斜井的隧道,井口 C 对洞口 A 的自然风压差 p_{nCA} 与隧道两洞口间的自然风压差 p_{nBA} 将不相同,井口 C 与洞口 B 间也有相对压差,此时,隧道与竖井中自然风的风向、风速,将随竖井、隧道的阻力状况而异，比较复杂。

从自然气象而言，一年四季中变化多端，昼夜早晚也不一样，自然风对隧道通风有时有利，有时不利，通风设计中要考虑不利的情况。

如果有足够的气象资料预期一年中自然风压差 p_n 的数值及其频率，就可以按一定的保证率确定相应的 p_n 值进行通风设计。但到目前为止，切合隧道通风设计所需气象资料的收集、分析、研究工作,尚未进行,对于具体的隧道,其局部地区气象资料更为缺乏,欲由气象资料求算自然风压差,颇难下手。

因此，目前通风设计中，较一致的习惯是按对通风不利的隧道内自然反风 V_n 计算,也即两隧道洞口间自然风压差为 $p_n = \zeta \frac{\gamma}{2g}V_n^2$。

我国铁路隧道运营通风计算中，推荐采用 $V_n = 1.5$ m/s;日本道路公团设计要领中,对于公路隧道营运通风计算中,推荐采用 $V_n = 2.5$m/s。

二、机械通风

(一)概 述

自然通风不能满足隧道内通风排烟的要求时，要使用风机予以排除者称为机械通风，有时也称人工通风。

隧道通风方式的选择，应根据隧道通风条件和隧道内允许的卫生标准经过技术经验比较而确定。在无可靠资料时，一般双向行驶的隧道可按下列界限值确定通风方式：

当 $LN \geqslant 600$ 时,采用机械通风；

$LN<600$ 时,采用自然通风。

式中 L——隧道长度(km);

N——通过隧道的车辆高峰小时交通量（辆/h），应按照隧道的实际通行能力或实测的高峰交通量计算 。

公路隧道长度达到一定长度以上时，需要采用机械通风来排除隧道内的有害气体与污染物，而采用机械通风所需的费用几乎与隧道长度成平方比例，为此，在长大公路隧道的建设中，既要确保隧道内具有一定的服务水平，又要进行经济的通风，这就是顺利进行高速公路建设事业中人们所关心的重大课题之一。

公路隧道内空气中的有害物，主要是汽车行驶时排出的多种有害气体，研究资料表明：以CO为代表对人体最为有害，这些有毒气体会刺激人们的眼睛和呼吸道器官，严重者还会导致中毒,同时,汽车行驶时排放的烟气或带起路面上的粉尘,也会在隧道内造成空气污染,降低能见度，从而影响行车安全。无论是有害气体或是烟尘，在通风计算中都是以冲淡理论为基础的,这对于横向式(或半横向式)通风或是双向行驶的隧道都是适宜的 而对于单向行驶的纵向式通风，由于汽车交通风的活塞作用起着挤压的作用，隧道内有害物浓度呈三角形分布。在挤压作用的同时，由于风流的紊乱，新鲜空气与有害物之间也存在有冲淡的作用，这就是纵向式通风与横向式通风区别的根本所在，也是纵向式通风所以节能的根本原因。

此外，机械通风设计中所选择的通风对象，也是至关重要的课题。如前所述，公路隧道通风的主要对象为 CO 与烟尘，但在特定条件下如何选择，日本关门隧道的探索不失为一个较好的典范。首先是在设计思路上不墨守成规,按惯用的设计方法,以 CO和烟尘为通风对象分别计算出其所需通风量，选择其中之大者，这样的设计势必大大增加通风工程的投资。关门隧道的通风设计，结合日本汽车以排放烟气为主的特点，引入了行之有效的电器集尘装置，分段将烟气浓度降下来,最终使 CO与烟尘二者所需通风量相近，并据以设计，将庞大的通风系统简化至最低限度的需要，从而大大降低了工程投资。

（二）通风方式分类

机械通风按通风风流的流动方向基本上可分为三大类。

1. 纵向式　新鲜空气从隧道一端引入，有害气体与烟尘从另一端排出。在通风过程中，隧道内的有害气体与烟尘沿纵向流经全隧道。

根据采用的通风设备，又可分为洞口风道式通风与射流风机通风；洞口风道式通风多采用轴流风机，射流风机通风则多将射流风机分散悬挂于隧道拱顶部位，也有集中设置于洞口者。

若隧道很长纵向式通风不能满足规范要求时，可采用竖井、斜井、平行导洞等辅助通道将隧道长度分成几个通风区段，称为分段纵向式通风。按风机供风方向又可分为吹入式、吸出式、吹吸两用式与吹吸联合式。

2. 横向式　用通风孔将隧道分成若干区段，新鲜空气从隧道一侧的通风孔横向流经隧道断面空间，将隧道内的有害气体与烟尘稀释后从另一侧通风孔进入风渠排出洞外，各通风区段的风流基本上不流至相邻的通风区段，故又称全横向式通风。

3. 半横向式　半横向式通风是介于纵向式与横向式之间的一种通风方式，新鲜空气从隧道一端或两端引入，有害气体与烟尘则经由隧道断面以外的风渠排出隧道；反之，由风渠向隧道内送入新鲜空气亦然。

第二章

成渝高速公路长隧道通风方式的选择

第一节　工程概况

成渝高速公路有两座长隧道，在青杠至上桥间，本线横穿缙云山脉与中梁山脉均以隧道通过。新建成渝高速公路重庆段全长 114km 较原有成渝公路缩短路线里程约 53km，其中青杠至上桥间由于原有成渝公路要绕道璧山、青木关、陈家桥而翻越中梁山，路线全长约 65km，而新建成渝高速公路仅有 22km 缩短路线里程 43km，由此可见两座长隧道的作用十分显著，中梁山隧道与缙云山隧道的平面位置见图 2-1。

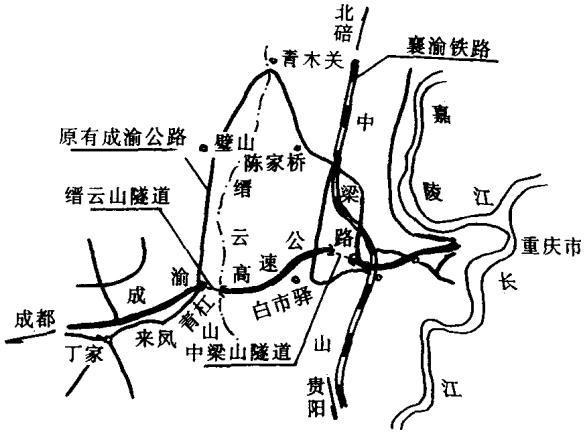

图 2-1　隧道平面位置

成渝高速公路为单向行驶的 4 车道，左右线各由 2 车道组成，左线车辆由重庆驶往成都，右线车辆由成都驶向重庆；一般地段为整体式路基，隧道所在地段为分修式路基，隧道则为双洞。中梁山隧道与缙云山隧道洞口海拔高程均在 400m 以下，隧道简况见表 2-1。

按照《公路隧道设计规范》JTJ026-90（以下简称《隧规》）关于公路隧道分类的规定，中梁山隧道属特长隧道，缙云山隧道属长隧道，两座隧道也是目前国内最长的公路隧道。中梁山隧道大部位于直线上，左右线平行，两线间距为 50m，仅西端左右线洞口段位于半径为 2 000m 的曲线长，左线曲线长 869m，右线 862m；东端左线洞口段位于半径为 1 500m 的曲线上，曲线长 152m。缙云山隧道则全部位于直线上，左右线平行，两线间距亦为 50m。

表 2-1　隧道简况

隧道名称	线别	隧道长度(m)	路线坡度(%)	行车方向
中梁山隧道	左线	3 160	\1.30	成都←重庆
	右线	3 103	\1.27	成都→重庆
缙云山隧道	左线	2 528	/1.30	成都←重庆
	右线	2 478	/1.18	成都→重庆

第二节　原设计通风方式的比选与设计

一、通风方式比选

成渝高速公路（重庆段）的勘测设计工作由铁道部第二勘测设计院承担，全段的设计难点在于两座长隧道，隧道通风设计也是其中难点之一。开展设计工作时，交通部尚未颁布《公路隧道设计规范》，几乎无章可循 在进行通风方式比选时，只能参照《城市道路设计规范》（送审稿）中有关隧道设计的一些规定，并借鉴报刊杂志上发表的国外一些公路隧道的通风设计资料，对中梁山隧道与缙云山隧道的通风方式进行了研究与比选。同时，也对国内已建成或在建的公路隧道与水底隧道进行了调研和考察，如上海打浦路黄浦江水底隧道（全长 2 761m）、深圳梧桐山隧道(全长 2 314m)均采用的是全横向式通风 珠海板樟山隧道(全长 1 210m)，采用的是半横向式通风。

选择通风方式时，要对各种方式的通风效果、技术条件、经济效益、维护管理等进行综合研究，经过分析比较后来确定，同时也要考虑隧道所在地的道路、交通、人文、气象等条件，不能单纯由隧道长度来决定；但是隧道长度对通风方式的选择，往往起着关键的作用。如《日本道路公团设计要领》中对各种通风方式所能适应的隧道长度，在一般情况下建议采用的隧道长度如下：

纵向式通风(无竖井)　　0.5～2km；
纵向式通风(竖井送排风)　　2km 以上；
半横向式　　1.5～3km；
全横向式　　2km 以上。

1990 年交通部颁布的《隧规》在“条文说明”中也认为纵向式通风一般适用于单向行驶、长度为 1500m 以下的隧道；半横向式通风一般适用于长度为 1 000～3 000m 的隧道。

因此，中梁山隧道和缙云山隧道的通风方式均采用了半横向式通风，通过初步设计的鉴定和世界银行专家的咨询审查后，完成了隧道通风的施工图设计。

二、半横向式通风施工设计

半横向式通风的基本特征是在隧道外设有一条风渠，新鲜风流经由风渠底版上的送风口

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

等量均匀地向隧道内送风，新鲜风流进入隧道后即沿隧道纵向流动由洞口排出洞外。半横向式通风示意简图见图2-2。

设计中利用隧道断面限界以外的上部空间作为风渠，在风渠底部设置钢筋砼吊顶板与行车道分隔开来，吊顶板上沿纵向成对地以一定间隔布设送风口。风渠中部设有横隔板将风渠分成两部分，洞口两端均设有端挡板，将全隧道分成两个独立的通风系统，两端洞口各设有风机房，正常情况下采用吹入式通风，即主风机将新鲜空气经由风道送入风渠，并通过送风口而进入隧道，将洞内的有害气体与烟尘分别由两端洞口排出洞外；为提高隧道的通风效果，设计中采用了沿风渠等量送风的理论，并计算了各送风口的开度。

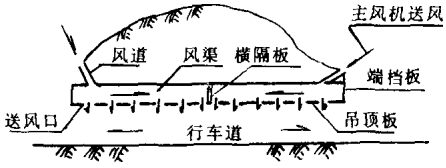

图 2-2 半横向式通风示意图

当隧道内发生火灾的特殊情况下，风机房内的主风机反转改为吸出式通风，洞内火灾点附近的送风口将调节板全部打开，其余送风口则全部关闭，这样便可使隧道内火灾燃烧生成的有害气体均进入打开的送风口沿风渠排出洞外，而不致在洞内蔓延。

(一)技术标准

1. 隧道内卫生标准

(1) CO允许浓度

正常营运时，$\delta_{CO}=150ppm$* ；

交通阻塞时，短时间(15min)以内，$\delta_{CO}=250ppm$。

(2)烟尘允许浓度

正常营运时，$k=0.007\ 5m^{-1}$；

交通阻塞时，$k=0.009\ 0m^{-1}$。

2. 隧道内纵向风速 $V_e\leqslant 8m/s$。

3. 设计交通量　双洞昼夜交通量为 20022 辆/d，左右线单洞各为 10011 辆/d；设计小时交通量(第 30 位小时交通量)按日交通量的 10%计，即为 1 001 辆/h。

4. 设计行车速度

正常营运时，$V_T=60km/h$；

交通阻塞时，$V_T=10km/h$；

5. 交通组成

小型车　18%，大型车　82%；

汽油车　83%，柴油车　17%；

满载车　75%，空车　25%。

(二) 隧道内所需通风量

隧道内所需通风量，应根据稀释隧道内空气中的有害物浓度达到允许浓度时所需的新鲜

* ppm 表示微量物质的浓度，一般用 10^{-6}表示(下同)

空气量确定。

1. 稀释 CO 所需的新鲜空气量 Q_{CO}

$$Q_{CO}=K\cdot f_v\cdot f_i\cdot f_h\cdot\frac{q_{CO}\cdot N\cdot G\cdot L_T}{\delta_{CO}}\times 10^6(m^3/h) \tag{2-1}$$

式中 q_{CO}——汽车每吨公里 CO 产生量($m^3/(t\cdot km)$)；

$$q_{CO}=\frac{0.315f-0.019}{G}$$

f ——燃料消耗率(l/km)；

G ——车重(t)；

N ——隧道内计算小时交通量(辆／h)。一般通风设计中，均考虑两个方向的不均衡行车,采用不均衡系数 1.2 ,即交通量大的方向占 60%,小的方向占 40%。采用射流风机纵向通风时，由于风机可逆转，双向行史的隧道内每个车道可各按 50%计。

L_T——隧道长度(km)；

δ_{CO}——CO 允许浓度(ppm)；

f_v ——速度修正系数；

f_i ——坡度修正系数；

f_h ——海拔高度修正系数；

K ——风量附加系数,正常营运时,采用 $K=1.1\sim1.2$。

2. 稀释烟尘所需的新鲜空气 Q_F

$$Q_F=K\cdot f_i\cdot f_h\cdot\frac{q_r\cdot G\cdot D\cdot L_T}{k}(m^3/h) \tag{2-2}$$

式中 D ——柴油车密度(辆／km)；

$$D=\frac{M}{V_T}$$

M—— 柴油车所占百分比折算出的柴油车交通量(辆／h)；

V_T——通风计算车速(km/h)；

G ——柴油车车重(t/辆)；

q_r——柴油车产烟量($m^3/(h\cdot t)$)；

k ——烟尘允许浓度(m^{-1})；

其余与 CO 者相同。

3. 计算结果

中梁山隧道(左线)全隧道需要的新鲜空气量 $Q=546m^3/s$。西端通风区段风量 $Q_1=2\times137m^3/s$,风压 1 850Pa ,风机轴功率 2×296kW 东端通风区段风量 $Q_2=2\times137m^3/s$,风压 1 850Pa ,风机轴功率 2×296kW。

(三)工程设计

中梁山隧道与缙云山隧道均为双洞双车道单向行驶的长隧道，营运通风均采用了半横向式,工程结构的布置与设计也基本相似，此处只以中梁山隧道左线西洞口为代表，说明半横向式营运通风的工程设计。

半横向式通风采用拱部风渠等量送风，车道排风纵向流出洞外；在风渠中部设中隔板将全

隧道拱部风渠分成两个独立的通风区段，每个通风区段的吊顶板上每隔 5m 设一对送风口，并在每端设风机房一座，风机经外风道与风渠相连，其纵断面示意见图 2-2。洞口平面布置见图 2-3。

左线西洞口通风道平面布置见图 2-4，纵断面布置见图 2-5。

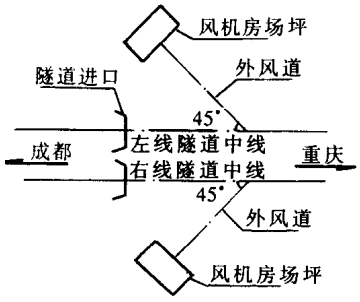

图 2-3　中梁山隧道西口平面图

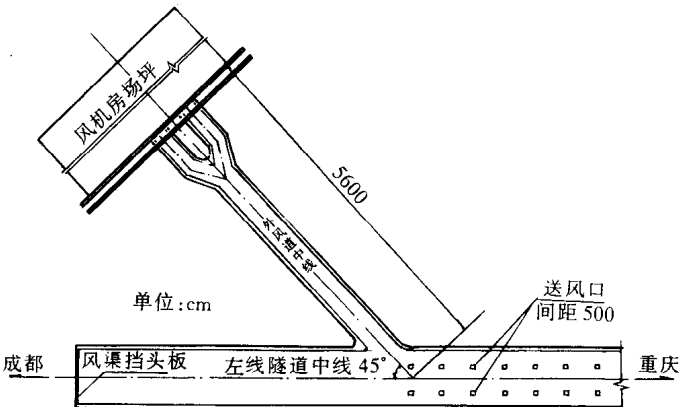

图 2-4　中梁山隧道（左线）西洞口通风道平面布置图

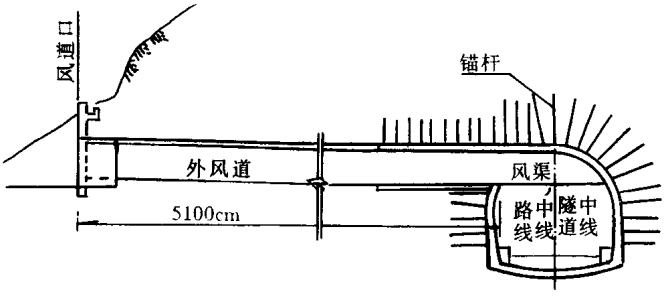

图 2-5　中梁山隧道（左线）西洞口通风道纵断面布置图

三、半横向式通风的优缺点

（一）优点

1. 此种通风方式最大的优点是隧道内一旦发生火灾时，送风机改为逆转而成为吸出式，同时火灾点附近的送风口闸门全部打开，其他的送风口闸门则关闭；这样，风流只能从火灾点附近的送风口进入风渠，从而防止了火灾蔓延。

2. 由于只有一个专门的通风渠，其工程投资，设备费与营运管理费均较横向式低。

3. 送风渠道和车道之间保持一定的压差，以抵销车辆活塞风和自然风的影响，从而保证了均匀送风，使得沿车道长度有害气体的浓度均匀分布。

（二）缺点

1. 由于半横向式通风系统是将全隧道分成两个独立的通风区段，送入新鲜空气分别从两端洞口排出，单向行驶的汽车不能有效地利用交通活塞风的作用，从而增大了设备费与营运管理费。

2. 送风系统需要额外的风渠,致使隧道断面增大,也增大了土建工程数量,增加了土建工程费。

3. 半横向式通风系统是以中隔板为界，向两端洞口分别送风，从理论上讲在隧道中心位置处存在有一个中性面。在此断面上其纵向风速为零，两侧的风向则相反，沿车道纵向排风速度与距离中性面的纵向距离成正比。然而在实际运行中的交通状态是不断变化的，致使中性面的位置也经常发生偏移，甚至可能在隧道中部形成一个中性带，而这一带的通风效果要比别处差的多。

4. 外风道、风渠以及送风口形成一个整体，一旦局部损坏，整个通风系统将受影响，甚至破坏。而且吊顶板上的送风口是按等量送风布置的，送风口是按一定开度布设的，而在火灾时又需要全开或全关，也就是说送风口开度要用可移动的滑板来控制，这种滑板的维修保养工作量很大，而且不一定能在火灾时运用自如。

5. 火灾时，形成风渠的吊顶板极易被烧毁，一旦烧毁则通风系统被破坏，救援及恢复营运都比较困难，日本的坂隧道就是明显的一例。

6. 从理论上讲，火灾时半横向式通风较易控制火灾的蔓延。实则不然，半横向式通风控制火灾蔓延的主要手段是使送风机反转改变为排风机，同时火灾点附近的送风口滑板全部打开，其余送风口处则全部关闭，这一运转过程需要较长时间，同时风流从正向流动达到反向流动也需要一定的时间,一般可达 3～5min ,在此期间火灾已经蔓延,甚至将吊顶板烧损。

7. 通风土建工程结构复杂，施工难度大，工期增长。据测算，仅风渠的吊顶板一项，可能要延长工期半年以上。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第三章

通风方式的变更与决策

第一节　变更原因

1989年8月31日成渝高速公路第一期国际招标工程开标，所有参加隧道工程投标的开标价，均大大超过了业已批准的初步设计的概算价和标底；若重新组织招标，因本工程项目系世行贷款项目，要进行公开的国际招标，招标结果亦需得到世界银行的认可，工期可能要推迟一年以后，这样，对成渝高速公路的建设是十分不利的。因此，作为招标的组织者，曾试图在公开、平等的前提下，试图降低工程的投标价，在其后的问题澄清会谈中，作为业主方的重庆市重点公路建设指挥部多次向投标者提出能否采用新技术、新工艺以降低其投标报价，例如隧道开挖中的允许超挖值，根据围岩类别的不同设计者提出了允许超挖15cm或10cm，能否降低到5cm或3cm又如喷射混凝土的回弹量，设计者给出60%的允许值，能否降低到20%或30%，等等。经过多次交谈，几乎所有投标者均认为设计者提出的允许值已是平均先进水平，实际上已很难达到，无法再予降低；而且经过测算，即使投标者同意降低，所能降低的工程造价也不多，仍将大大超过概算价。正当业主方为此问题一筹莫展之际，适逢重庆市交通局组织“隧道考察团”赴日考察，考察目的十分明确，就是要吸收日本在公路长隧道设计与施工方面的先进技术与经验，寻求能降低重庆段即将施工的隧道工程造价的途径。在参观日本第二新神户隧道($L=7\ 175$m)时，看到他们设计的隧道断面较小，有利于降低工程造价，深受启发，究其原因是在通风设计中采用了纵向式通风方式。在随后的技术座谈会上，又听取了日本工程技术人员的介绍，了解到近年来由于射流风机技术的应用与自动监控技术的发展，为了降低隧道的工程造价，减少设备投资与节约能源，国际上的公路隧道通风有向竖井分段纵向式发展的趋势。山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村。考察团全体成员为此发现而深受鼓舞，随即在《日本公路隧道及公路建设考察报告》中提出“采用半横向式通风，隧道断面比纵向式通风大20%以上，通风设备及配套房屋建筑费用也较大。若采用纵向式通风，不仅土建工程、机电设备的投资可以减少，施工程序可以简化，施工进度可以加快，而且今后的营运耗电量也可以降低”（附录一）。并建议将中梁山隧道与缙云山隧道原设计的半横向式通风方式变更为纵向式通风。重庆市重点公路建设指挥部采纳了考察团的建议，并于1989年12月邀请了国内知名的隧道专家来渝进行技术咨询，达成共识后，随即委托原设计单位进行隧道通风的变更设计。

第二节　变更通风方式的论证

一、变更设计资料的准备

（一）变更设计原则

变更设计后的隧道功能与技术标准均保持与原设计相同。

1. 隧道功能

正常营运时左右线隧道为双车道单向行驶；当一线隧道内发生意外事故、火灾或因检修而需关闭时，另一线隧道即临时改为双车道双向行驶；当隧道内发生意外事故或火灾时，应能满足救灾的需要。

2. 技术标准

与半横向式通风施工设计的技术标准相同。

（二）通风控制方式与意外事故时的对策

洞内发生火灾时，利用通风控制技术实现救灾的目的，是纵向通风方式得以发展的关键。

1. 下坡行驶的隧道

根据计算所需通风量，中梁山与缙云山的两座下坡隧道均采用全射流纵向式通风即可满足通风的需要，此通风是包括单洞临时改为双向行驶时所需的通风量。根据计算所需射流风机的台数，每一断面布设两台悬挂于拱顶上，沿纵向按一定间距布设，纵向间距一般为 80～120m 视射流风机出口喷速而定。为减少进洞电缆的压降损失，进洞电缆不宜过长，一般不宜超过 800～1 000m，故射流风机以从洞口两端向内布设为宜，若进洞电缆的压降损失较大时，则应与洞内设变电站的方案进行比较。

正常营运时，根据隧道内有害气体与烟尘浓度的监测结果，或根据交通量监测数据，按设计的要求,启动不同台数的射流风机,既可满足通风需要,又可节省运费,这也充分显示了射流通风能适应不同交通量需要的优越性。一旦洞内发生火灾时，隧道洞口外应立即显示红灯，阻止后续车辆进入隧道；火灾点前方的车辆继续前进驶出洞外，火灾点后方的车辆应根据洞内信号及广播立即停止行驶，并按工作人员的引导退出洞外或通过车行通道进入另一条临时改为双向行驶的隧道内。此时应根据火灾点的位置确定启动射流风机的区段与台数，保证洞内有一定风速(一般为 3m左右),不使火灾反向蔓延从而危及火灾点后方车辆的安全,并便于组织救援工作。

2. 上坡行驶的隧道

由于上坡隧道所需风量较多，若采用全射流纵向式通风，则其隧道内纵向风速可能超过技术标准,或所需射流风机较多,布满全隧道,需要洞内增加变电站,不一定经济 中梁山与缙云山两座上坡隧道均采用了竖井分段吸出式通风，竖井顶部设有主风机，是隧道排风的主要动力，竖井两侧的隧道内设有射流风机，用以平衡压力保证两侧隧道内所需的风量。

营运初期，交通量是逐步增加的，在达到一定交通量之前，或根据洞内有害气体与烟尘的

监测浓度，可以采用全射流通风即可满足通风的需要，此时应关闭竖井，充分利用隧道已有的射流风机，其操作与控制完全与下坡行驶的隧道相同。当超过此交通量之后，全射流通风已无法满足通风的需要，此时则启动竖井风机，竖井两侧隧道内的射流风机则按设计规定的台数与方向运转。一般情况下，风流从两端洞口流入，汇流进入竖井后从顶部排至地面，一旦洞内发生火灾，当火灾点发生在竖井进洞长端一侧时，射流风机均停止工作，用主风机开启的台数调节火灾点的风速使之达到 3m/s 左右；当火灾点发生在竖井出洞短端一侧时，此时应关闭竖井，全部射流风机均向出口端吹风，并应保持火灾点处的风速达到 3m/s 左右，若射流风机的能量不足，达不到此风速时，则应将竖井主风机反转临时改为向洞内吹风满足此风速的需要。

二、国内专家的技术咨询

由于公路长隧道采用纵向式通风在国内尚无先例，变更设计完成后，重庆市重点公路建设指挥部于 1990 年 4 月至 1991 年 9 月根据工程进展的需要，先后三次邀请国内知名的隧道专家与通风专家进行专题技术讨论，专家们一致认为，中梁山隧道与缙云山隧道由原设计的半横向式通风变更为纵向式通风，符合当前国际上公路长隧道通风发展的趋势，符合我国公路建设的实际。两座隧道的纵向式通风设计，所拟定的设计原则、技术标准与卫生标准，与原设计半横向式通风完全相同，能满足成渝高速公路的营运需要和使用功能；采用射流风机技术和自动监测与控制系统后，能有效地控制隧道内风流的方向与速度，保证隧道的营运安全。

（一）第一次技术讨论会

重庆市重点公路建设指挥部采纳了重庆市交通局赴日隧道考察团变更隧道通风方式的建议，并邀请部分隧道专家进行了技术咨询，为了便于进行确切的技术经济比较，在征得原设计单位的同意后，随即委托该单位进行隧道通风方式的变更设计。设计文件基本完成后，重庆市交通局邀请了国内知名的隧道专家和设计单位、监理单位的代表，于 1990 年 4 月 3 日至 5 日在重庆市渝州宾馆召开了“成渝公路缙云山、中梁山隧道技术讨论会”，并请中国科学院与中国工程院院士、同济大学教授孙钧担任咨询委员会主任委员，会议主要是对隧道通风方式变更设计后的可行性、合理性与经济性进行了充分的讨论与论证。会议认为：1987 年交通部对成渝公路初步设计的‘审核意见’中曾指出‘考虑缙云山、中梁山隧道地质复杂、工程艰巨、设计缺乏经验，尚遗留一些问题，技术方案有待通过试验、调查研究和吸取国外经验来完善，应该增设技术设计阶段以确保设计方案可行、措施落实、降低工程造价。’这些意见是十分中肯的。在施工前，对隧道设计进行探索、讨论、完善和优化，对工程建设是十分有益的。

会议着重指出，长隧道通风方式由原设计的半横向通风方式改变为纵向式通风，这种改变对加快施工进度、降低工程造价的作用是十分显著的。从国外公路隧道通风方式的演变过程看，今后长大隧道总的趋势也是不断向纵向式通风发展。因此，会议认为：缙云山与中梁山两座隧道采用纵向式通风是可行的，效益也是显著的，应予肯定。对于改用纵向式通风后所出现的问题(洞内噪音、火灾救援、环保措施等等)，应予论证，并研讨对策。

技术讨论会的咨询意见详见附录二。

（二）第二次技术讨论会

成渝公路中梁山、缙云山两座隧道营运通风方式变更设计文件基本完成，并经过国内隧道

专家咨询审查后，提请世界银行予以确认。世界银行于 1990 年 7 月和 9 月先后两次派出隧道专家 C·H·阿诺德先生、通风专家 H·罗特蒙先生和机电专家 W·迪波德尔先生来渝进行审查，并于 1990 年 11 月提出了“成渝公路(东段)隧道变更设计施密斯公司咨询意见”的报告(附录七）。针对“咨询意见”中所提到的各种问题，重庆市重点公路建设指挥部邀请国内外隧道专家、学者，于 1990 年 11 月 21 日至 23 日在重庆市南坪召开技术讨论会，就公路长隧道的通风方式等重要课题进行了讨论。

会议认为，由于公路长隧道采用纵向式通风在国内的实践经验不多，建设单位对此先后组织了几次技术讨论会，大家各抒己见、集思广益，是十分有意义的，并委托同济大学孙钧教授担任咨询委员会主任委员。

会议认为，由于纵向式通风明显地具有优于横向式或半横向式通风的节能和投资效益，20 世纪 70 年代以来公路隧道采用纵向式通风的实例逐年增加。并指出，修建像中梁山和缙云山这样长的公路隧道虽属首次，但借鉴国外类似隧道的先进经验，采用纵向式通风是完全可行的，也是经济合理的。会议还就纵向式通风的效益、射流风机的噪声与防灾等问题进行了讨论。

会议对《施密斯公司咨询意见》中所提出的问题进行了热烈的讨论，并认为外国专家的“咨询意见”中，有许多中肯的意见值得设计单位研究采纳。鉴于施密斯公司曾为原设计进行咨询服务，对变更后的设计提出某些商榷意见是可以理解的。正因如此，中外专家更有必要充分交流，各抒己见，使设计变更趋于完善。与会专家认为，只要我们广征博采国外的先进经验和技术，并同我国的实际情况紧密结合，成渝公路长隧道的纵向式通风方式是一定会成功的。会议还就“咨询意见”中外国专家提出的几个具体问题表明了看法。

技术讨论会的咨询意见详见附录三。

（三）第三次技术讨论会

鉴于施密斯公司在中梁山、缙云山两座隧道通风方式变更设计文件第二次咨询审查期间，与设计人员和业主单位在竖井通风方式上的严重对立，世界银行中国部阿哈默德先生于 1991 年 7 月 25 日致函中国交通部，希望四川省交通厅、重庆市交通局和施密斯咨询公司三方能签署一份“理解性备忘录”，并于 1991 年 7 月 31 日电传给中国交通部工程管理司杨盛福司长。其后，四川省交通厅代表马明典、重庆市交通局代表郑道访、施密斯公司(WAS)代表齐格勒于 1991年 8 月 22 日签署了“关于隧道设计变更的备忘录”(附录四)。为使这一有争议的隧道竖井通风方式做到技术可靠、措施落实，重庆市交通局于 1991 年 9 月 9 日至 10 日在重庆市召开了“隧道竖井通风方式咨询审查会”，交通部代表鲍仲岳先生也参加了会议并担任技术咨询专家组组长，咨询审查意见详见附录五。

随后，中国交通部代表鲍仲岳先生和蒋航宇先生与重庆市交通局郑道访先生在重庆共同约见施密斯公司代表齐格勒先生，三方就成渝公路中梁山隧道与缙云山隧道上坡方向的竖井通风方式问题充分交换了意见，会谈纪录详见附录六。

三、国外专家的技术咨询

由于成渝公路的工程建设资金系国家安排的第三批世界银行贷款项目，故在建设过程中的主要环节(如设计、招标、施工、设备购置等)，均需得到世界银行的认可，以便于对贷款的使

用进行监督。原设计是由世界银行委托施密斯公司（得到我方业主同意）于 1988年来华进行咨询审查，并最终得到世界银行的确认。中梁山与缙云山两座隧道营运通风方式的变更属于重大方案变更，同样应得到世界银行的确认。鉴于原设计系由施密斯咨询公司进行咨询审查的,故本变更设计的咨询审查仍同意由施密斯咨询公司(亦称施韦拔公司)承担,施密斯咨询公司派出了隧道专家 C·H·阿诺德先生、通风专家 H·罗特蒙先生（机械工程师）和机电专家 W·迪波德尔先生从事此项咨询审查工作。

（一）第一次咨询审查

成渝公路中梁山与缙云山两座隧道营运通风方式变更为纵向式通风的设计文件基本完成后(为减少初期的工程投资,业主要求通风竖井列为二期工程,设计文件缓交),业主即邀请施密斯公司派员来华进行咨询审查;1990 年 7 月 12 日至 9 月 19 日，施密斯公司的三位专家先后来到四川省重庆市对隧道变更合同文件进行了审查，并于 1990年 11 月提出了“成渝公路(东段)隧道变更设计《施密斯公司咨询意见》”(附录七)。《咨询意见》中包括两部分,第一部分隧道结构设计与第二部分隧道机电设计。

《咨询意见》认为隧道通风方式的变更,改变了隧道的使用功能,即“在功能上的主要变更,使得隧道失去了双向使用的灵活性,这种新的通风方式不可能供双向行驶。”而且“由于需要维修的风机多且都在隧道顶上，故维修对营运的影响是明显的。在原有通风系统中，风机房在隧道外,维修风机不用关闭隧道,现在检修风机需设置台架而阻断交通。”

《咨询意见》不顾中国设计人员关于隧道通风系统分期实施的解释，在报告中提出“所选择的射流风机系统,十分明显地不能满足进一步的交通量增长。”并“力主在两个上坡中梁山隧道左线和缙云山隧道右线设置中央通风竖井，这些竖井应包括排风机与在隧道内设置喷咀的送风机。”在结论中,明确地提出：“本次审查表明新设计的射流风机系统不能满足通风的需要，进一步审查后,我们认为由于新设计不能认为是完善的,因而该风机系统不能工作。”鉴于以上意见,被审查的设计不能接受,因为它达不到预想的要求。”

鉴于《施密斯公司咨询意见》所作结论的严重性，业主单位（重庆市重点公路建设指挥部）于 1990年11月28 日上报了“关于对《施密斯公司咨询意见》的几点说明”(附录八),并抄报世界银行。虽然如此,世界银行在接到《施密斯公司咨询意见》的报告后不久,即暂时停止了对中梁山与缙云山两座隧道土建工程的支付。

（二）第二次咨询审查

成渝公路中梁山与缙云山两座隧道营运通风方式变更设计文件全部完成后，业主单位邀请国内外隧道专家、学者,于 1990 年 11月 21 日至 23 日在重庆市召开了“成渝公路缙云山、中梁山隧道技术讨论会”，会议充分肯定了隧道通风方式变更的重要意义，表明了对各种有争议问题的看法（附录二）。随后，即将中梁山与缙云山两座隧道通风方式变更设计的原因和理由，以及施密斯公司第一次咨询审查的经过向交通部作了详细汇报，同时上报了有关隧道通风方式变更设计的全部图纸资料。交通部于 1990 年 11 月 25 日至 12月 2 日组织了对成渝公路设计进行了复查,并于 1991 年 4月 20 日以(91)交函工字 260 号文对中梁山、缙云山两座隧道设计情况作了如下指示：“鉴于中梁山、缙云山两座隧道施工现状,我部对隧道设计参数进行了验算，认为将半横向通风方式改为纵向通风没有降低隧道的使用功能，技术可行，同意变更设

计。”(附录九)。在此情况下,业主单位于 1991 年 5 月再次邀请施密斯公司派员来华，对中梁山与缙云山两座隧道的通风方式变更设计文件进行咨询审查。随后，施密斯公司的三位专家于 1991 年 6 月 8 日至 27 日在四川省重庆市对隧道通风方式变更设计文件进行了咨询审查。并分别提交了咨询审查意见。C·H·阿诺德专家对隧道土建工程的咨询审查意见“总结 我们的看法是，如经过适当努力的补充，已审核的土建隧道资料会使本项目的公路长隧道建成为满足现行国际标准的工程。”W·迪波德尔专家对隧道机电部分的咨询审查意见“结论 结合工程师们提出的限制条件，在会上所讨论的意见将作为标书文件的一部分，规范将能使国际投标者提出满意的报价”。以上两位专家的结论意见是明确的，所提出的具体问题也都与设计人员共同协商得到解决,而 H·罗特蒙专家在咨询工作中，意见经常反复，引起业主单位与设计人员的极大不满，也使得咨询审查工作趋于复杂化。

罗特蒙先生在咨询审查期间，率先于 1991 年 6 月 19 日提出了“第二次审查意见”(附录十)。“审查意见”认为，“修改图纸与规划考虑了在缙云山上坡隧道增设排气竖井通风系统(注 根据设计人员的计算是不需要设置通风竖井的)而代替了原来的全射流纵向通风系统,除此变更外，没发现任何别的变更。就通风系统来说，我们第一次设计审查时所提意见没有得到考虑。根据我们的设计经验，设计者的计算数据似乎是错误的，因为一些隧道空气力学特殊影响可能考虑不够。所以我自己对通风比选方案作了自己的计算以找出事实与差异。计算书复印件已交给设计人员。”

在与设计人员进行多次讨论后，罗特蒙先生又于 1991 年 6 月 26 日提出了“第三次审查评价报告”(附录十一)。“评价报告”认为“改变后的纵向通风方式，在技术上是可行的,运行上是经济的。”但却认为“所设计的吸出式通风系统是不能接受的。似乎已不可避免要对通风系统作出重新设计。根据国际规范和实践,纵向通风(吸出式)不适用于单向通隧道。”

设计单位（铁道部第二勘测设计院）将咨询审查中与罗特蒙先进计论的问题及分歧所在，于 1991 年 7 月 9 日编写成“对咨询审查意见中若干问题的意见（附录十二）。

（三）第三次咨询审查

按照世界银行中国部阿哈默德先生的要求，四川省交通厅、重庆市交通局，施密斯公司(WAS)三方代表于 1991 年 8 月 22 日签署了“关于隧道设计变更的备忘录”(附录四)。1991 年 9 月初，罗特蒙先生再次来到四川省重庆市进行咨询审查，在与设计人员交谈中，不但索取了全部通风计算公式、参数，并要求在黑板上进行详细的演算，始终纠缠在一些细节问题上。涉及到竖井吸出式通风问题时，罗特蒙先生仍坚持吸出式通风不适用于单向交通隧道的观点，并说国际上也无先例。当设计人员向其提供日本第二新神户隧道（$L=7\ 175$m)即为竖井吸出式通风的实例时,罗特蒙先生又别出心裁地提出所谓“日本方式”,即都要按第二新神户隧道通风系统布置方式进行设计。罗特蒙先生的无理纠缠与做法，理所当然地要引起参予咨询审查工作人员的反感，滕兆民先生于 1991 年 9 月 14 日写出了“关于罗特蒙先生咨询情况的备忘录”(附录十三),真实地反映了罗特蒙先生的三次咨询审查工作情况。1991 年 9 月 17 日重庆市交通局郑道访先生约见施密斯公司齐格勒先生和罗特蒙先生，概述了隧道通风变更设计咨询审查以来的工作情况，指出双方取得的共同点与分歧点，阐明了我方的观点，并提请施密斯公司注意 1991 年 9 月 13 日三方会谈中(附录六)交通部代表鲍仲岳先生提请齐格勒先生注意的问题,并形成了“备忘录”(附录十四)。业主单位(重庆市重点公路建设指挥部)于 1991 年

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com