

# 公路隧道

中国公路学会隧道工程学会  
交通部重庆公路科学研究所

1994年11月5日  
第四期

---

## 公路隧道通风译文集

U-4  
zh686



## 前 言

随着我国高等级公路的发展,公路隧道建设规模日益扩大。近年来,国内已修建了二十余座长大公路隧道。对这些长大公路隧道,采用过全横向通风、半横向通风和射流风机纵向通风,但其使用效果并不很理想。因此,可以说通风问题是制约长大公路隧道发展的重要问题之一。

通风设计需考虑的主要问题是:空气中有害物质的容许浓度;新风量的确定方法;判断自然风的能力;机械通风方式的讨论;通风设备的选择;以及经济性等。就机械通风的全横向通风、半横向通风和纵向通风而论,这三种通风方式各有所长。至今,我们在选用通风方式时,对各种通风型的认识多来源于国外信息资料,而没有从理论、实验研究或工程实践中找到一套系统的方法,因而对通风型式和通风型式下的空气运动规律了解并不很清楚。

为使从事通风研究和设计的专业技术人员进一步了解公路隧道通风和通风的空气动力学理论,我们从1991年11月27日—29日在英国布赖顿举行的“第7届国际车用隧道通风和空气动力学会议”论文集(Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels)中的公路隧道环境;公路隧道安全;公路隧道设计系统—理论和实践;公路隧道设计系统—风机研究四部分中,选择14篇论文汇编成译文集,定名为“公路隧道通风译文集”。

译文集中的论文,从论理方面看,其深度、广度和难度不一,因此,在翻译和审校上难免有不尽人意之处和存在一些缺点错误,诚恳地请读者指正。

参加本译文集编辑工作的有何志勇,熊有言。



0205641

编 者

1994年10月

610834

## 目 录

公路隧道的空气和环境.....	( 1 )
海底隧道坡道上柴油机重车的排烟量计算.....	( 8 )
汽车专用隧道中光照度和烟雾浓度的关系.....	( 19 )
对城市公路隧道通风竖井排出气体在大气中扩散的研究.....	( 28 )
吊顶式静电吸尘器系统的研究.....	( 36 )
一种用于公路隧道通风控制系统的新型能见度仪和用电子显微镜 观察隧道内空气中微粒的外部特征.....	( 50 )
下坡隧道火灾烟雾沿顶扩散的数值模拟.....	( 65 )
火灾通风控制.....	( 73 )
横向通风隧道发生危急情况时控制纵向风速的可能性.....	( 76 )
复杂公路隧道的数值模拟.....	( 84 )
隧道通风的气象影响——三种新的现场试验.....	( 94 )
纵向通风系统的送排风管特性.....	(108)
双洞长大隧道通风的新观点.....	(119)
用于隧道通风射流风机的研究.....	(126)



# 公路隧道的空气和环境

Alex Hearter(瑞士)

**摘要:** 当公路隧道空气中的车辆废气浓度高于环保法规允许的极限值时,应考虑隧道空气对洞外环境的影响。已经查明氮氧化物是与较低二氧化氮环境限值相关的危险排放物。当隧道空气借助山凹或侧墙保持在路轴上时,洞门排出气体将沿纵向扩散,横向上的废气浓度会快速下降。选择适当的通风系统可使流出洞门的气体减少,或设置通风竖井完全消除洞门的空气排放。设置通风竖井将隧道废气排放到高处扩散,使隧道空气的污染降至周围环境水平。这种稀释废气的方法不足以有效时,应考虑净化隧道空气。然而,迄今为止大量净化、稀释隧道排放气体的试验尚未成功,但正在进行研究,可望拿出一种可以接受的技术解决办法。另一种方案就是等待制定有效的车辆排放法规,这已成为多数国家的趋向。

## 1 前言

对隧道通风工程师来说,唯一关心的是寻求经济可行的方法来稀释隧道内排出气体并在火灾发生时处理烟雾。

现在公众关心的是完全改变隧道空气在洞外的扩散。与此相反,在讨论新的隧道方案时,问题集中在空气污染上。除非能令人信服地证明有合适的通风系统解决空气污染问题,否则,该方案将被否决。

对于工程技术人员,这些新限制条件可能导致非惯例的隧道通风设计。需要确定稀释隧道排出气体的定量方法,这就得考虑重要的气体动力学模型和足尺试验。

因此,从工程观点看,环境要求给系统设计赋予了新的活力和任务,至少这使顾问工程师们感到高兴。

## 2 关于内燃机排放物

发动机污染物的影响

汽油和柴油在车辆发动机中燃烧会产生数百种化学物质。根据其总量或浓度,一些物质对人或自然界可能具有相反的作用。

隧道内的一氧化碳(CO)浓度高会直接危害人体健康,必须仔细监控。

总的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)量对地球大气层变暖有长期影响。

碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是形成烟雾和高臭氧浓度的主要原因,臭氧具有很强的侵蚀作用。

对许多其它燃烧生成物,在浓度过高、长时间接触时会有害健康或具有刺激性。然而,这些物质通常只在医学检测浓度中发现,但在论证方案时仍是有用的。

为了合理地评价隧道空气污染的影响,选择一种燃烧产物作为有代表性的主要气体是方

便的，但选哪一种气体呢？

在隧道中可用CO浓度评价毒性影响，用能见度和柴油烟产生的臭味评价舒适性。

在隧道外，根据所有其它排出成分的扩散强度、一般环境水准和特殊物质的极限值来选择主要排放气体。

### 汽车排放物

表1示出在具有代表性城市交通条件下，未安装催化转换器的小客车和柴油车的不同排放物典型值。所有车辆均为1985年西德生产。

表 1 德国小客车排放物 (g/km), 参照1985年车辆

	畅行交通平均 60km/h		拥挤交通平均 20km/h		拥挤交通平均 5km/h	
	小客车	卡车	小客车	卡车	小客车	卡车
一氧化碳 CO	6	4	16	12	42	38
碳氢化合物 HC	1	3	2.5	8	5.5	28
氮氧化物 NO <sub>x</sub>	2	14	1.5	15	1.5	21
二氧化硫 SO <sub>2</sub>	0.02	1.5	0.04	2	0.1	3
铅 Pb	0.01		0.02		0.03	
烟灰 C		0.2		0.4		1

畅行交通条件下每公里排放物最少的是小客车，柴油发动机卡车的CO排放量低，但产生的NO<sub>x</sub>比小客车高一个数量级。烟灰排放物仅在柴油车上发现。硫和铅排放物与燃料成分有关。

在小客车上安催化转换器有助于降低现有的CO、HC、NO<sub>x</sub>排放值，而大多数国家的柴油车排放法规一般不太严格。

### 极限值

只有建立污染限制时才能对隧道空气和环境中的排放气体浓度进行定量检测。

表2示出了现有值范围。允许短时接触浓度高于长期接触浓度，对工人来说每天8h接触的废气浓度比环境极限值高得多。将环境界限峰值、工作环境极限值同隧道空气中一般污染浓度相比较，可以看出隧道空气的污染浓度介于二者之间，但总是高于年或日平均值。最终

表 2 典型污染浓度

	城市环境水平		环境极限值				工业区限值		公路隧道空气 (一般范围)
	年平均		年平均		98%的值		每天8 小时 平均值	短时接触 (15分钟)	
	郊区	市区	欧共体	其它国家	欧共体	其它国家			
CO mg/m <sup>3</sup>	0.5-1	1-5	—	8-10	—	15-40	33	66-100	20-100
NO μg/m <sup>3</sup>	20-40	40-60	—	—	—	—	—	—	2000-6000
NO <sub>2</sub> μg/m <sup>3</sup>	30-50	50-100	50	30-100	(135)-200	200	6,000	12,000	200-1000
SO <sub>2</sub> μg/m <sup>3</sup>	15-30	30-60	80	25-140	—	70-400	5,000	10,000	—
Pb μg/m <sup>3</sup>	0.2	0.3	—	1	—	—	100	—	1-5

一致认为必须建立适合的隧道空气污染标准。

### 环境水准

隧道空气污染的意思是局部污染浓度增加，超过了由地区类型和局部交通规定的环境水平。因此，评价隧道空气的特种主要气体还要根据限定值和环境值之间的有效气体浓度确定。

环境水平是所有特种排放物形成的结果。在欧洲城市地区的总排放气体中，车辆排出的CO、HC约占4/5，NO<sub>x</sub>约占2/3，CO<sub>2</sub>约占1/2。必须检查环境的年平均值和短时峰值浓度。所幸的是这些比率对两种情况大致相同。因此，以年平均污染水准为基础评价环境状况更为实用。

然而，这些排放的气体成分不会积聚在空气中，因为它们要与其它物质发生化学或物理反应，这样就会不断地从大气中除去。

### 隧道空气污染的有关物质

考虑所有这些因素，确定二氧化氮NO<sub>2</sub>为有代表性的排放成分，以它来评价车辆排放气体污染环境的情况。

## 3 空气污染控制

为避免隧道较高污染空气浓度对环境的影响，其可能性为：

隧道空气一旦离开洞口，改善其稀释方法；

采用适当的通风系统，可能条件下结合使用隧道通风竖井，减少洞口空气排放；

清除隧道空气中的危害污染

物。

解决方法愈完善，其通风系统的建设和营运营费用就愈高。为避免以后发生意外，必须进行细致的评价。

隧道空气在洞口附近的扩散

最经济的解决方法是在洞口周围控制隧道空气的扩散，在隧道空气到达居民区前将其充分稀释。

这意味着必须对隧道的排放气体、车辆行驶方向、周围地形和局部风场(风向、风速和旋流)间的相互作用有充分的了解。

由于车辆在隧道中行驶，从洞口出来的隧道空气象一股带有较强旋流的自由喷气流。车辆牵引隧道空气离开洞口，甚至逆风驶出。侧面风作用随洞口周围地形改变：在开阔地带，外风使整

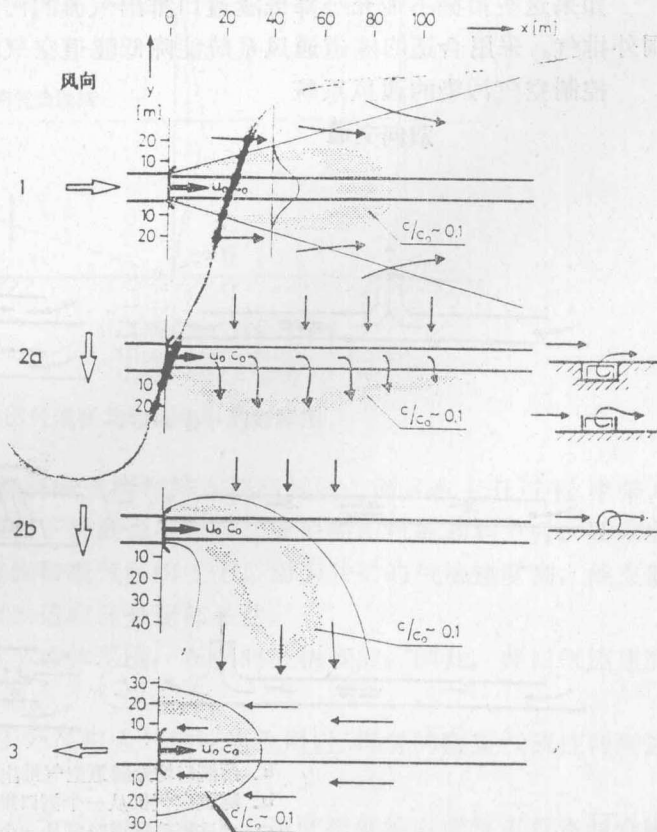


图1 受外风和局部地形影响隧道空气离开洞口时的扩散模型图

个隧道射出风流转向，然而，当从隧道口刚射出的气流不受外风影响时，只是喷出气流混合区端部侧向转向。

因此，修建隧道洞门的地方必须能在道路横方向上能很快降低排出气体的浓度。采用下述措施能够达到这个目的：

将洞外道路布置在低凹地形或墙、坝、树行之间，使隧道排放气体尽可能长地保持于路轴上(图1中的2a情况)。

沿洞外路段修建侧墙，建筑物或种树，使风场中产生旋流，垂直扩散排出气体(图2)。

当洞门设在建筑区或丘陵区，包括植树绿化区时，能在风中造成强烈旋流，有助于隧道风流的扩散。

对这种类型的隧道排气扩散，经验还很少，但有车流行驶的足尺试验和风洞试验正在进行。

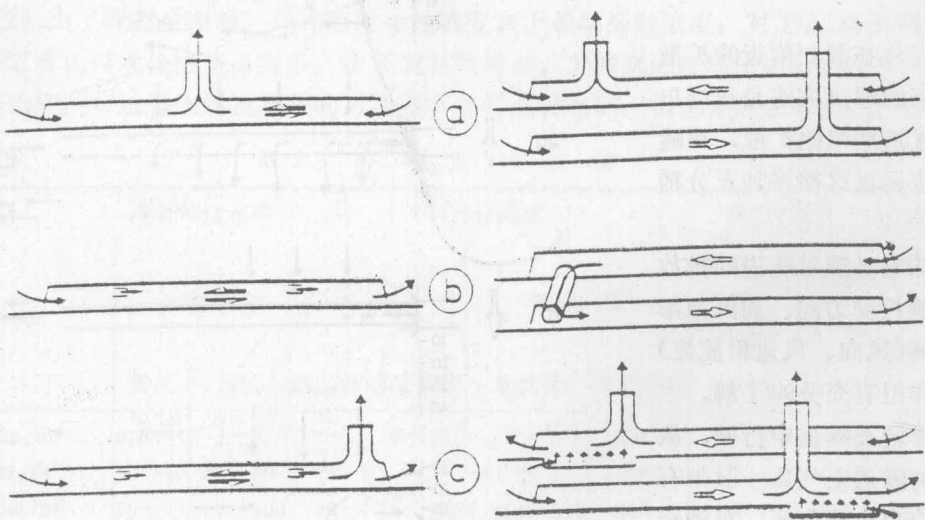
初步试验表明，NO是隧道空气中主要的NO<sub>x</sub>成分，隧道喷射气流中的NO氧化为NO<sub>2</sub>的速率比开阔路段车辆排放的NO氧化慢得多。

如果这些措施不能充分降低隧道口排出气流的污染浓度，那么，必须减少或全部停止向洞外排气。采用合适的隧道通风系统能降低隧道空气的污染浓度。

控制空气污染的通风系统

双向交通

单向交通



- a. 两洞口均无隧道空气排出；
- b. 隧道空气仅从一个洞口排出；
- c. 允许部分隧道空气从一个洞口排出。

图3 单洞或双洞隧道的通风系统



当不允许隧道空气从洞口排出时，由洞口进气的纵向通风系统是一种令人信服的通风系统(图3a)。在双向行车隧道中，利用中心排气竖井可达到这一目的；在单向行车隧道中，则紧靠出口洞门处设置排气竖井。

当只有一个洞口是关键洞口时(图3b)，反向纵向通风是解决双向行车隧道通风的一种简单办法。对单向使用的双洞隧道，可安装U型转向通风系统，因为车辆行驶的活塞效应一般能形成强大风流，这种风流能使双洞隧道的排出气体得到充分稀释。如果这个方法不能解决问题，就必须从出口洞门附近的行车范围抽出一隧洞中的气体，并将其送回分隔空气管道，再送入另一隧洞。

为了控制空气污染要移动空气，为稀释隧道中车辆排放气体也要移动空气，这两种空气移动不结合在一起时，能节省大量通风能量，因为这两种要求并不一定要同时进行。图3c中的竖井位置是一个很好的例子，这是单洞双向行车隧道。相反，在单洞单向行车隧道中，当出口洞门附近不能设置竖井时，出口断面可设置半横向通风(图3c)。图3a中的通风方案未遵循这种原则。

#### 利用竖井扩散隧道空气

利用隧道竖井可将排出的污染气体送到地面上这样的高度，使外风稀释其浓度到很低的水准(图4)。

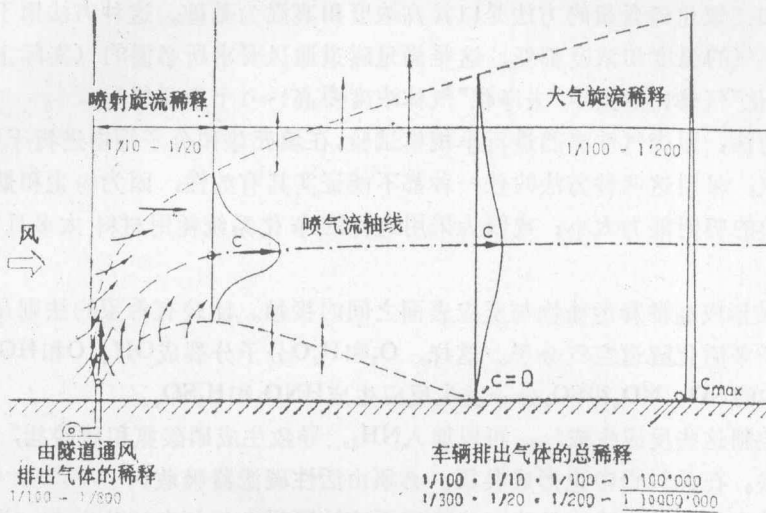


图4 竖井排出气流在均匀风场中的稀释图

a. 竖井口喷出的隧道空气流不仅能将隧道废气排入较高气层，而且在上升过程中带入周围空气，使隧道空气得到稀释，其浓度下降到百分之几。要使喷出气流顺利上升，要求竖井顶位于建筑物和树木形成的局部风旋流和吸气区的上方。因为井口的气流速度高，能克服所有不利的作用，必须调整竖井横断面以适应部分局部条件。

喷出气流噪音集中在气流轴周围的小锥体范围，在横向很快衰减，因此，井口气流速度在25m/s比较合适，且不会造成噪音问题。

b. 隧道排气流升到最终高度，由于外风和大气旋流的作用，已稀释的隧道气流柱得到进一步扩散。

稳定的大气条件不是一个大问题，因为此时气流的上升速度降低能由废气流垂直混合减少浓度来补偿。



隧道排出气体能渗透到大气罩层中时,仅向上扩散。气流的冲力太弱,不能克服大气罩层时,就会发生全折转,由这两个因素之一引起地面污染浓度增加。当大气罩层接触地面时,需对强倾斜地带作特殊考虑。

对日本的通风竖井作示踪气体试验已证明,这种竖井的工作效果良好。

尽管排气竖井有很好的工作性能,但一些人认为竖井仅是将车辆排出物进行再分配,而不能清除它们。以氮氧化物为例可以说明这种看法不是十分正确的。

基于臭氧反应生成一氧化碳( $\text{NO}$ )的氧化过程仅在几分钟之内,随后发生光化学氧化,几小时后与氧发生反应。 $\text{NO}_2$ 也要发生化学反应。白天, $\text{NO}_2$ 的主要化学变换是同 $\text{OH}$ 原子团发生反应,生成 $\text{HNO}_3$ (硝酸),在夜间与 $\text{O}_3$ 发生反应。 $\text{NO}_2$ 的半寿命期约为15h,因此, $\text{NO}$ 氧化为 $\text{NO}_2$ 的总比率不会超过60%。其它排出成分也会发生类似的消除过程。

#### 隧道空气的净化

对每一项重要的隧道工程都要求净化隧道空气。

从全球效应考虑(如由于 $\text{CO}_2$ 或 $\text{O}_3$ 的产生引起大气层变热),单独从隧道路段清除车辆排放物没有多大意义。适中的解决办法是对汽车、以及工业、能源和热电站实施严格的排放法规,将排放物清除在产地。

发电站技术:热电站排放的气体成分与柴油发动机和汽油发动机的大致相同。降低这种气体氮氧化物和二氧化硫含量的方法是以其高浓度和高温为基础。这种方法用于隧道不能奏效,因为隧道空气的温度和浓度都低,这是满足隧道通风要求所必需的(实际上,电站净化系统排出的“净化”气体比隧道中“未净化”气体浓度要高1—2个数量级)。

废气净化方法:用废气洗涤剂进行小规模试验,在填充垫和分子筛中进行干燥吸附试验。为净化隧道空气,采用这两种方法的任一种都不能证实其有效性,因为粉尘和烟混于隧道空气中;或填充垫的吸附能力太小;或因为采用这样的净化系统耗用材料太多且能耗费用太高。

基本问题是形成高稀释污染物与反应表面之间的接触。比较有希望的法则:

用扫描电子来活化隧道空气分子。这样, $\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 分子分裂成 $\text{OH}$ 、 $\text{O}$ 和 $\text{HO}_2$ 原子团。它们与隧道空气中的 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 分子发生反应生成 $\text{HNO}_3$ 和 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 。

为了易于控制这些反应生成物,可以加入 $\text{NH}_3$ ,导致生成硝酸氨和硫酸盐,然后通过洗涤剂可将其洗去。在此过程中也形成臭氧,必须由活性炭滤器吸收。

燃煤发电站有使用该方法的经验,该法用于清洁隧道空气还在试验之中。此项研究工作起源于日本和德国。

尘埃净化:许多日本公路隧道通行柴油卡车,由于要稀释柴油烟雾,应控制新风需求量。为节省能耗或通风管道空间,迄今为止在总长60km的12座日本隧道中采用了静电吸尘器。在一座长10km、日交通量5000辆的隧道中,每日分离出的灰尘和烟灰约为25kg。

但是,这种尘埃分离对隧道空气中的有害气体含量来说,实际上是无效的。

## 4 结论

要充分稀释隧道空气中车辆排放的一氧化碳和柴油烟雾,获得清晰的能见度并消除令人讨厌的气味,设置隧道通风系统是最可靠的。由于隧道使用者在洞中接触空气的时间较短, $\text{CO}$ 浓度高一些是可以允许的。

考虑到隧道空气对洞门附近的居住区有影响，由于隧道空气的浓度现在处于环境水准和容许临界值之间，因此必须安装设备来控制污染增加。

可以考虑采用不同的方法：

一旦隧道空气离开洞门，将其引导到凹地或坝、墙等建筑物之间，可以改善其稀释过程。利用合适的通风系统，可能条件下连同隧道排气竖井一起使用，可以减少从洞门排出的气体。这样的通风系统一直都在修建，但其设计越理想，建造和营运费用越高。

从理论上讲，隧道空气中的污染物是可以净化的，实际上至今还没有建立可行的净化系统，此方面的研究正在进行之中。

许多国家对车辆都有严格的排放法规，随着时间进展，这个问题可自行解决。

参考文献1—19(略)。

何志勇译，熊有言校

# 海底隧道坡道上柴油机重车的排烟量计算

TOSHIAKI FUJITA 等(日本)

**摘要:** 为计算外东京湾海底隧道的通风功率,用汽车底盘功率计测量柴油机排烟量。试验中让4辆重车在海底隧道4%的坡道上行驶,通过实测与计算机模拟计算并得到柴油机的排烟量,从而评价试验结果。试验前用许多发动机测量了排烟量与发动机功率的关系。根据道路荷载与车速来计算在道路上行驶车辆的发动机功率。道路荷载由车辆性能参数、车速、道路坡度所决定,所以,可以模拟任何坡度与车速情况下柴油发动机的排烟量。发动机与实际隧道的试验结果与计算机模拟结果相符合。该模拟对计算任何行驶条件下(如车速、纵坡度)柴油机车的排烟量和公路隧道通风所需功率是一种有用的方法。

## 1 前言

长达10km的外东京湾海底隧道施工已经完成。该隧道每端有4%的纵坡(1000m),这使得在该隧道中行驶的柴油车比在平坦路段排出的烟雾要多得多。安装在该隧道内的通风系统比其它隧道类似的系统也大。为了有效营运这样大的通风系统,必须获得在隧道坡道上行驶车辆排烟量的预测值。目前,用于计算隧道端口坡道上柴油车排烟量的有效方法包括:

- a. 测量类似道路坡道上柴油车运行时的实际排烟量;
- b. 测量模拟底盘功率计上产生的排烟量。

但是,为了获得有用的数据,采用上述方法需要许多测试车辆。

本文研究根据收集的柴油机数据,通过模拟预测柴油车在给定的坡度和速度时排烟量的一种方法。该法对设计隧道通风系统将是有用的。

## 2 4%坡道上柴油车的排烟量

在海底隧道±4%纵坡上,测量了4辆重车的排烟量。该隧道海底水平段长400m,每一坡长500m。样车性能参数示于表1,这些大车是日本最常用的车,其中之一安装有涡轮增压器。

表1 车辆性能参数

车 辆	A	B	C	D
总重 (kg)	19885	19955	19905	19865
载重 (kg)	10250	10550	9250	9450
发动机	L-6	V-8	V-8	V-8
最大功率 马力/转·分	270/2200	290/2200	315/2300	295/2300
供给空气	T/C	N/A	N/A	N/A

注: T/C: 涡轮增压器;

N/A: 自然吸气。



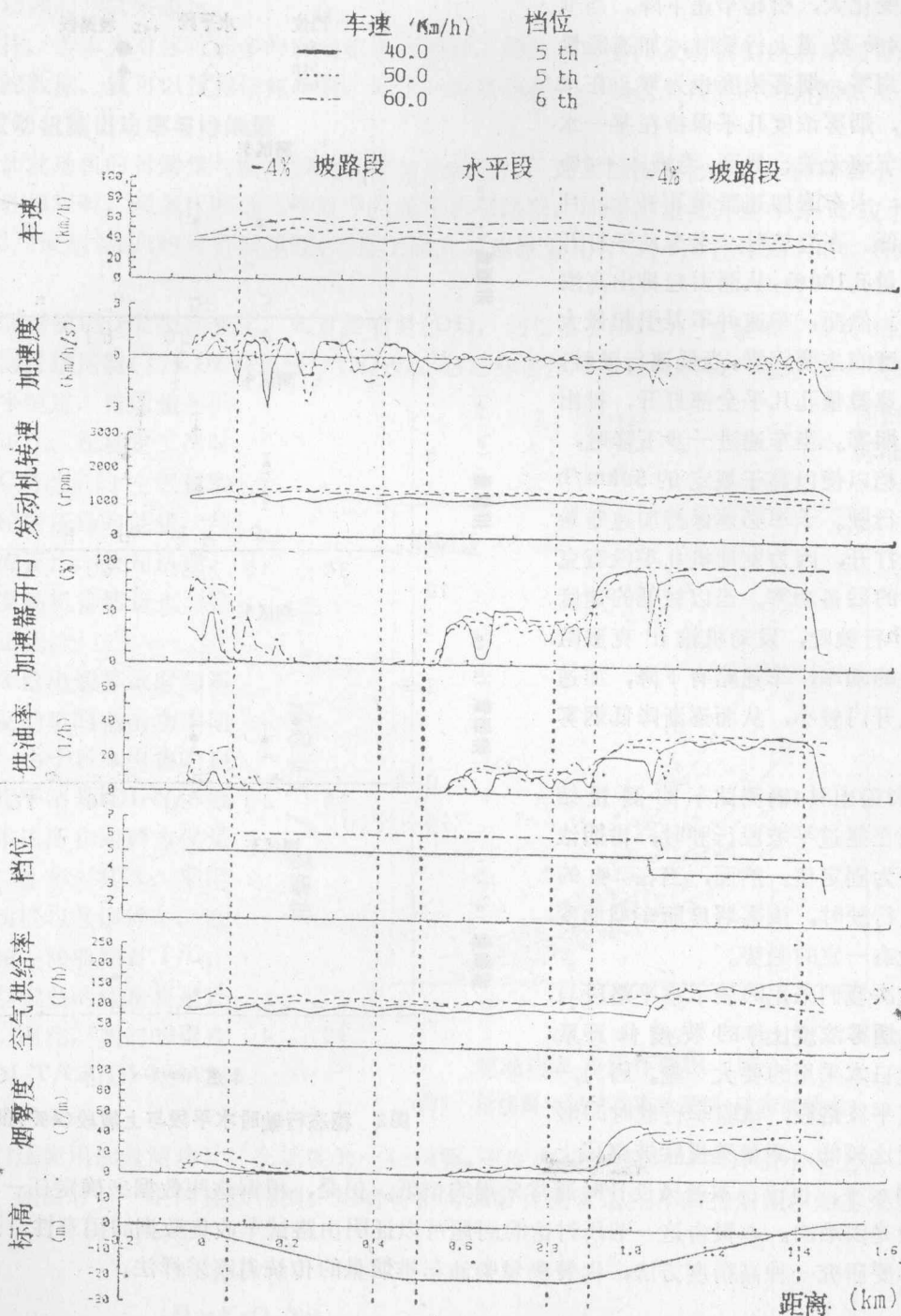


图1 实际行驶条件下的试验结果(A测试车, 满载)

在试验期间,允许测试车与其它车一起行驶,但要求通过隧道水平路段时,车辆以给定速度行驶。测量项目包括速度、发动机转速、加速器量孔、油料流率及烟雾密度。用装在每个测试车车箱底板上的哈特里奇烟度计测量排烟量,用数据记录仪记录测量数据(每辆车上都装有数据记录仪)。在隧道水平段,卡车以40~80km/h的速度行驶。

图1示出部分测量结果。由图可见,由于隧道入口处附近有障碍物,路面窄,卡车加速

器量孔变化大,引起车速下降。当卡车在-4%坡道上行驶时,加速器量孔降低到零,烟雾浓度也为零。在水平路段,烟雾浓度几乎保持在某一水平而与车速无关。然而,当进入+4%坡道时,卡车的加速器量孔升大,且车速降低。在登坡时,卡车几乎打开加速器量孔100%,从而引起排出高浓度烟雾。然而,车速并不是引起最大烟雾浓度的主要因素,当低速行驶时,卡车加速器量孔几乎全部打开,排出高浓度烟雾。当车速进一步下降时,卡车换档以便以高于规定的50km/h的速度行驶。卡车必须保持加速器量孔完全打开,因为发动机几乎没有克服阻力的后备功率。当以较低的速度40km/h行驶时,发动机输出克服阻力过足的功率,车速略有下降,加速器量孔开门较小,从而逐渐降低烟雾浓度。

图2给出对4辆测试车的测量结果。当在隧道平坡段行驶时,排烟浓度几乎为固定值。然而,当在4%的坡段上行驶时,浓雾烟度随车型而变化并没有一定的趋势。

这次我们采用的表示水平路段与坡道上烟雾浓度比率的坡度修正系数,比日本采用的要大一些。因为,在隧道平坡路段,试验车行驶时的烟雾浓度比较低。测量隧道爬坡路段上的排烟水平,也比日本通风设计时通常采用的值低。但是,根据这些数据来确定任一坡度修正系数是困难的。本报告这一节所讨论的问题可以证明由路试车收集数据的困难性。这就说明有必要研究一种高精度方法,代替测量柴油车排烟量的传统道路采样法。

### 3 烟雾度预测方法

柴油机车排出的烟雾量实际上受发动机中空气/燃油混合比(A/F)所影响,供油越多,排烟越多。由于柴油机的输出功率与发动机的供油量成正比,故在发动机输出功率与排烟浓度之间一定有某种关系。已知车辆的性能参数、车速和纵坡,就可确定车辆的行驶阻力。车辆的驱动功率可表示为发动机扭矩与转速的乘积。当车速与档位确定以后,发动机扭矩可以

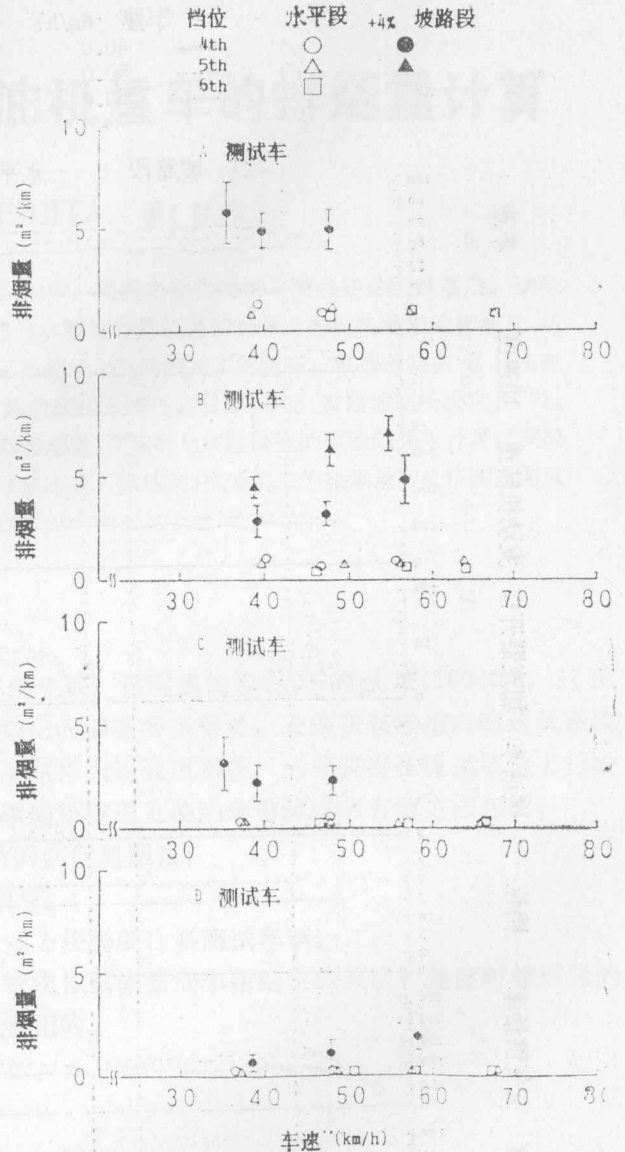


图2 稳态行驶时水平段与上坡段(4%)的烟雾度

发动机功率的形式来表示。

这样，若事先对尽可能多的发动机进行采样，得到足够多的发动机输出功率与排烟浓度间关系的数据，就可以预测任何车辆，以任一速度与在任一坡道上行驶时的排烟浓度。

### 3.1 发动机输出功率与排烟量

柴油发动机的排烟量与发动机的A/F比率成正比，且呈线性变化，在车辆荷载小于3/4的可行里程时，增量比略低（等效于行驶在水平路段，加速器量孔开度中等或较小）。在装载为3/4或超过3/4的可行里程（坡道上全开加速器量孔），当A/F比率增大时，排烟量急剧增加。

排烟量随燃烧类型而变化，如直接喷射(DI)，间接喷射(IDI)，安装或未安装辅助增压装置，涡轮增压器(T/C)或自然吸气(N/A)。这意味着N/A发动机的吸气量对每一气缸工作容积几乎恒定，排烟量与供油量成正比。在稳定工况时吸入T/C发动机的空气量取决于涡轮增压器的能量，与供油量成正比，换句话说，对T/C发动机排烟量也与供油量成正比。

图3给出烟雾浓度与不同类型发动机的输出功率间的关系。由于日本出售的轻型货车几乎都是IDI-N/A燃烧型，本次所作的调查仅是这种轻型车；其次，采用DI发动机的重型货车，这种车有20—30%配有T/C，配有T/C设备的比率将来还会增加。因此，我们的调查包括了DI-T/C和DI-N/A重型车发动机。

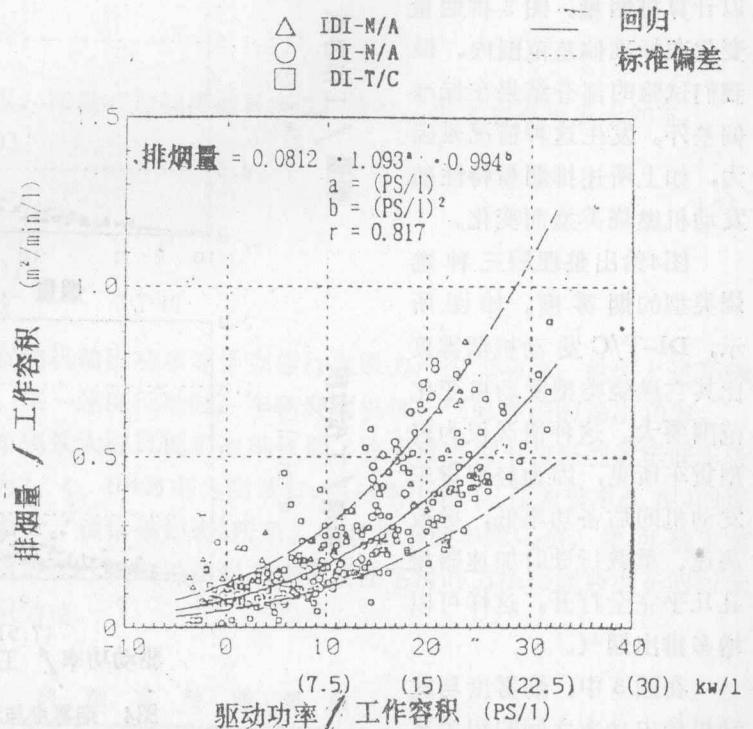


图3 排烟量与驱动功率的关系(所有试验车)

我们还使用底盘测功计，在坡度为-4~8%，速度为40~120km/h的9辆卡车上做了一系列试验，试验时有一定的控制范围。用哈特里奇烟雾计测量这些车的排烟量，烟雾浓度计算如下：

$$S = K \cdot V_e \quad (1)$$

$$D = K \cdot Q_a / 60 \quad (2)$$

$$V_e = Q_a / V \quad (3)$$

式中，S：排烟量(m<sup>2</sup>/km)；

D：烟雾浓度(m<sup>2</sup>/min)；

V<sub>e</sub>：排气量(m<sup>3</sup>/km)；

V：车速(km/h)；

Q<sub>a</sub> = 吸气(m<sup>3</sup>/h)；



K: 吸入系数(1/m).

$$K = -(1/L) \cdot \log_{10}(1 - HSU/100) \quad (4)$$

式(4)中,

L: 哈特里奇烟度计光波长(m);

HSU: 哈特里奇烟度计指示值(%).

由图3得到的发动机功率与排烟量的回归关系就可以计算排烟量。图3排烟量变化在标准偏差范围内,但我们试验的部分结果在标准偏差外。发生这种情况是因为,如上所述排烟量特性随发动机燃烧类型而变化。

图4给出整理后三种燃烧类型的烟雾度。如图所示,DI-T/C发动机烟雾度比其它燃烧类型发动机变化范围要大。这种情况仅为轻型货车所见,因为轻型货车发动机的后备功率低,导致高速、重载行驶时加速器量孔几乎完全打开。这样可以增多排出烟气。

在图3中,烟雾度与发动机输出功率之间的相关系数

数为0.817,然而图4中不同燃烧类型的相关系数为:IDI-N/A, 0.882; DI-N/A, 0.919; DI-T/C, 0.812,因此,DI-T/C发动机与烟浓度相关性最弱。DI-T/C发动机的输出功率比其它燃烧类型发动机几乎大50%。

### 3.2 行驶阻力与驱动功率

总行驶阻力表示如下:

$$R = R_r + R_l + R_s + R_a \quad (5)$$

式中,  $R$ : 总行驶阻力, (N);

$R_r$ : 滚动阻力(= $U_r \cdot W$ ), (N);

$R_l$ : 空气阻力(= $U_l \cdot A \cdot V^2$ ), (N);

$R_s$ : 爬坡阻力(= $W \cdot i/100$ ), (N);

$R_a$ : 加速阻力(= $a \cdot (w + \Delta w)/g$ ), (N)。

W: 车重 (N),

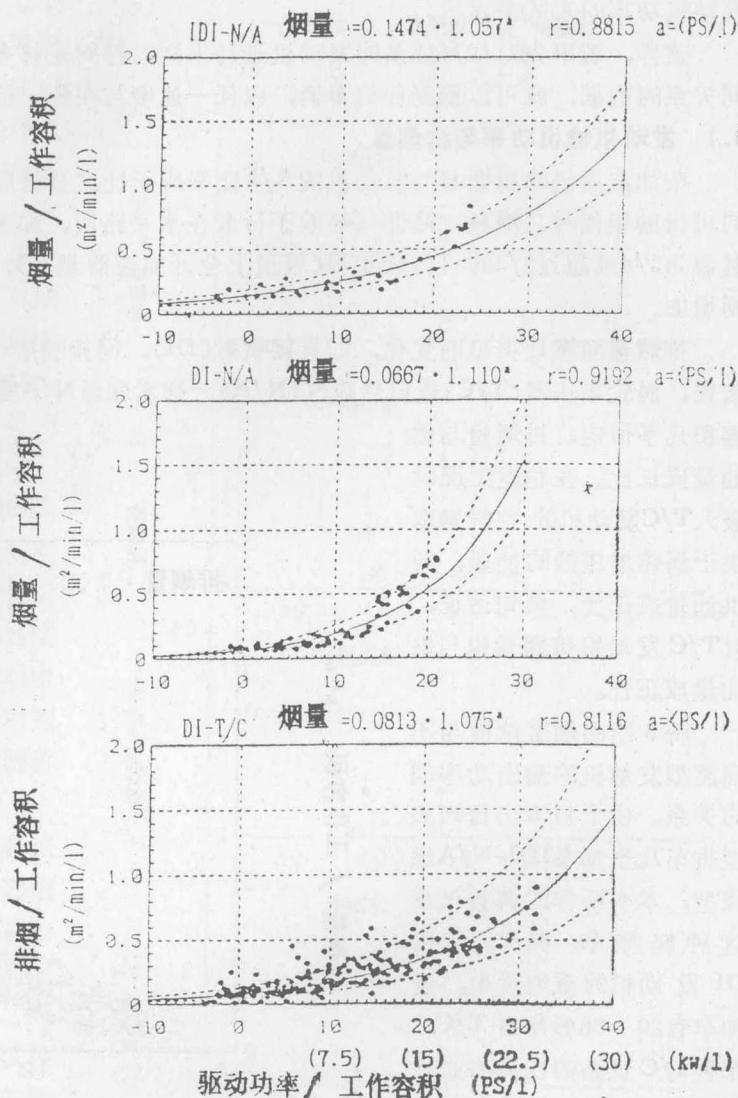


图4 烟雾度与驱动功率的关系

$\Delta w$ : 旋转部分重量 (N),

$V$ : 车速 (km/h),

$A$ : 车辆最大迎风面积 ( $m^2$ ),

$i$ : 坡度 (%),

$a$ : 加速度 ( $m/s^2$ ),

$g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ ),

$\mu_r$ : 滚动阻力系数,

$\mu_l$ : 空气阻力系数。

$$\mu_l = 1/2 \cdot \rho \cdot C_d \cdot (1/3.6^2)$$

(6)

(6)式中,

$C_d$ : 空气阻力系数;

$\rho$ : 空气密度。

本报告仅讨论稳态行驶情况, 即没有加速度或  $R_a=0$ 。这时, 驱动功率可表示如下:

$$P = 2\pi \cdot N \cdot T / (60 \cdot 1000) \quad (7)$$

或,  $P = R \cdot V / 3.6 \quad (8)$

式中,  $P$ : 驱动功率 (kW);

$T$ : 发动机扭矩 (N-m);

$N$ : 发动机转速 (转/分)。

车辆在道路上行驶所需的发动机输出功率等于克服行驶阻力产生的功率。给出上述车辆参数, 就可以得到在某一纵坡、某一速度行驶时, 车辆发动机每一气缸容积的输出功率。

为此, 首先得给出车重、车辆最大迎风面积与排气量。鉴于重型货车与轻型货车间车辆形状变化很大, 我们选择载重为2、4、10t的车为测试车, 由日本出售车(作为参考模型)的性能参数确定这些车的平均性能参数。该结果如表2所示。如获得参照车的  $C_d$  值, 就可确定典型车的行驶阻力。由于得不到该数据, 我们用类似车辆靠惯性下滑的方法得到典型车的行驶阻力。表3给出测试车的行驶阻力值。

表2 典型车性能参数

载重(t)	供气室	排量(l)	CW(kg)	GVW(kg)	A( $m^2$ )
2	IDI-N/A	3.1	2414	4580	4.30
2	DI-T/C	3.5	2414	4580	4.30
4	DI-N/A	5.6	3131	7121	5.18
4	DI-T/C	5.9	3131	7121	5.18
10	DI-N/A	5.91	7997	19585	7.42
10	DI-T/C	11.34	7997	19585	7.42

注: CW: 全装备重量(kg),

GVW: 总重(kg),

A: 最大横截面积( $m^2$ )。

表3 典型车的行驶阻力

载重(t)	R(公式)
2	$0.01237 \cdot W + 0.00268 \cdot A \cdot V^2 + i/100 \cdot W$
4	$0.00846 \cdot W + 0.00271 \cdot A \cdot V^2 + i/100 \cdot W$
10	$0.00679 \cdot W + 0.00323 \cdot A \cdot V^2 + i/100 \cdot W$

注: R: 行驶阻力(kg),  
 V: 车速 (km/h),  
 W: 车重 (kg),  
 i: 上坡坡度 (%)。

对行驶阻力有影响的其他因素是车速与纵坡。因此, 若确定了道路坡度和车速, 就能得到样车必须的输出功率。因而, 由图3或图4的回归公式就能得到车辆的烟雾浓度。

#### 4 讨论

表4和图5给出载重为 2、4、10t 车辆排烟的计算值。由图表可见, 排烟量随坡度增加而增加。这一现象DI轻型货车比IDI轻型货车明显, 而且重车比轻车特别。烟雾浓度增加量与坡度之比, 随车速增大而增大。10t车受这一影响要小, 这是因为与 A/F 比率有关的DI发动机比IDI发动机有较高的烟雾产生率。

由这些计算结果知, 车辆在4%的坡道上行驶比平坡段排烟多, 2t车约多2倍, 3t车多2—3倍, 10t车约多3倍。车辆行驶所受的限制由驱动功率与上述阻力所确定, 任何车辆在受该限制时, 都有大的烟雾增量。这一现象可归结于最大荷载时烟雾产生量的急剧增加。

在水平路段, 车速对排烟量的影响最小, 但当速度超过100km/h时, 影响增大。这是因为空气阻力使车辆的行驶阻力增大, 在水平路段当车速超过100km/h时, 加速器量孔几乎全部打开。

表4 行驶条件下预测的烟雾量 (m<sup>2</sup>/km)

载重 (t)	供气室	速度 (km/h)/坡度 (%)				
		60/0	60/2	60/4	80/0	100/0
2	IDI-N/A	0.675	0.947	1.404	0.686	0.860
2	DI-T/C	0.446	0.678	1.032	0.473	0.634
4	DI-N/A	0.585	1.067	1.946	0.640	0.902
4	DI-T/C	0.648	0.954	1.406	0.619	0.714
10	DI-N/A	1.461	2.585	4.575	1.388	1.574
10	DI-T/C	1.257	2.187	3.805	1.186	1.331

为了证实烟雾计算的可靠性, 我们用底盘测功计的实测结果进行了检验, 如图6所示。预测值与实测值符合得很好, 相关系数为0.946。

图7和图8给出不同车型半载时, 排烟量预测值和实测值与道路坡度及车速的关系。如图所示, 虽然车辆在陡坡上行驶时, 4t与10tDI-N/A型车和2tDI-T/C型车排烟计算值比测量