

文章编号: 1002-0268 (2004) 09-0153-05

# 基于公路隧道的汽车 CO 基准排放量试验研究

王生昌, 刘浩学, 王贺武  
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 建立基于 CVS 采样和碳平衡法的汽油车 CO 排放量计算模型; 通过室内台架试验和道路试验, 研究汽油车 CO 的速度特性; 通过发动机台架模拟隧道污染环境试验, 研究发动机进气受到污染后对发动机动力性、比油耗和污染物排放量的影响, 为研究确定汽车污染物基准排放量进行有益的探讨。研究成果不仅对公路隧道通风方案设计时汽车污染物基准排放量的确定具有重要的指导意义, 同时在进行汽车排放对城市污染和公路沿线环境污染评价时可作为计算汽车污染物排放源强的依据。

**关键词:** 公路隧道; 汽车污染物; 基准排放量; 计算模型; 模拟

中图分类号: U453.5 文献标识码: A

## Experiment Study Based on Vehicle CO Criterion Emission Amount in Highway Tunnel

WANG Sheng-chang, LIU Hao-xue, WANG He-wu  
(Automobile College, Chang'an University, Shaan'xi Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on CVS and carbon balance methods, an experiment study mathematical model of gasoline vehicle CO emission is built up. Based on bench simulation test, the effects of polluted air inlet on engine's power characteristics, specific fuel consumption and emission amount are studied. The study results have important guide significance to determine the criterion emission amount of vehicle during highway tunnel design, but also can be taken as a foundation to calculate the intensity of vehicle pollution emission source while estimating vehicle emission pollution both in city and along highway.

**Key words:** Highway tunnel; Automobile emission; Criterion emission amount; Mathematical model; Simulation

### 1 问题的提出

由于汽车污染物基准排放量是公路隧道通风方案设计和相关工程以及重大决策技术分析 with 交通环境评价的基本依据, 所以世界各国及国际隧道技术委员会 (PIARC) 进行了较为深入的研究。研究结果表明, 随着汽车工业科学技术的进步和排放法规的约束, 汽车排放的污染物呈减少的趋势。

从国内外汽车排放因子研究结果来看, 我国汽车排放因子的基准排放量是国外同期水平的 8~10 倍, 反映了我国汽车在未实行欧洲 1 号标准之前, 其排放控制

技术水平与国外相比具有明显的差距。因此, 研究我国现行公路行驶汽车污染物排放因子的基准排放量及环境修正系数, 是从根本上解决我国道路汽车污染物排放强度计算和进行公路隧道通风方案设计的关键。

在公路隧道通风方案设计中, 从影响驾驶员和乘客身心健康角度来考虑, 《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)<sup>[1]</sup> 中规定 CO 浓度不应超过 200ppm。保护驾驶员和乘员身心机能不受伤害, 稀释汽车在隧道全长上 CO 排放量的需风量

$$Q_{req(CO)} = \frac{Q_{CO}}{\delta} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \times 10^6 \quad (1)$$

式中,  $Q_{req(CO)}$  为隧道全长稀释 CO 的需风量,  $m^3/s$ ;  $Q_{CO}$  为通过隧道汽车 CO 的排放量,  $m^3/s$ ;  $\delta$  为一氧化碳设计浓度;  $P_0$  为标准大气压,  $kN/m^2$ , 取  $P_0 = 101.33kN/m^2$ ;  $P$  为隧道址设计气压,  $kN/m^2$ ;  $T_0$  为标准气温, K, 取  $T_0 = 293.2K$ ;  $T$  为隧道夏季的设计气温, K。

通过隧道汽车 CO 排放量的计算公式为

$$Q_{CO} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{CO} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_v \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (2)$$

式中,  $q_{CO}$  为单车 CO 基准排放量,  $m^3/veh \cdot km$ ;  $f_a$  为考虑 CO 的车况系数;  $f_d$  为车密度系数;  $f_h$  为考虑 CO 的海拔高度系数;  $f_m$  为考虑 CO 的车型系数;  $f_v$  为考虑 CO 的纵坡-车速系数;  $n$  为车型类别数;  $N_m$  为相应车型的设计交通量, 辆/h。

## 2 试验研究

从大量分析研究来看, 国内外确定 CO 基准排放量时, 都是以汽油车为研究对象的。在《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)中, 车速为  $60km/h$  时, CO 的基准排放量取值为  $0.01m^3/veh \cdot km$ , 这一取值比日本 1985 年版<sup>[2]</sup> 的隧道设计规范取值  $0.007m^3/veh \cdot km$  和瑞士 1987 年的取值  $0.0065m^3/veh \cdot km$  还高出  $0.003 \sim 0.0035$ 。由于这一取值的高低直接影响公路隧道通风设计方案的确定和工程投资, 特别是对于长隧道设计尤为突出。国内外研究方法一般有台架试验法、道路试验法和隧道采样研究法<sup>[3-9]</sup>。本研究采用了台架试验法和道路试验法, 并通过模拟隧道环境进行发动机台架实验对数据进行了修正。

### 2.1 CO 排放量实车台架试验研究

CO 排放量实车台架试验研究是在大型转鼓底盘测功机上动态模拟汽车在道路上的运行状况, 用 CVS 采样测定不同车速下汽车的排放量。这种方法试验条件可控, 测试精度较高。

为了使数据具有代表性, 选择试验车型时考虑了车型的代表性和技术状况, 因此从在用车中选择了 3 种类型技术状况良好的轻型汽车。

试验车在转鼓底盘测功机上模拟实际道路运行工况, 在直接档  $40、70、100km/h$  车速下汽车各运行 3min, CFV-CVS 定容取样系统采集并计量样气, 然后送入排气分析仪, 分析测定样品中 CO、HC、NO<sub>x</sub> 的浓度; 同时给出样气排放容积; 司机记录汽车 3min 运行的距离。试验条件满足 GB18352.1-2001。

### 2.1.1 计算模型

$$M_{CO} = C_{CO} \times V_{mix} \times Q_{CO} \times \frac{1}{d} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中,  $M_{CO}$  为 CO 的排放质量,  $g/km$ ;  $C_{CO}$  为稀释样气中 CO 的校正浓度, ppm;  $V_{mix}$  为稀释排气容积 (校正至标准状态  $293.2K$  和  $101.33kPa$ ),  $L/h$  试验;  $Q_{CO}$  为标准状态下 CO 的密度,  $g/L$ ;  $d$  为试验车速下汽车运行的实际里程, km。其中

$$V_{mix} = V \times \frac{T_0}{P_0} \times \frac{P_B - P_1}{T_P} \quad (4)$$

式中,  $V$  为稀释排气实际容积 (校正前), L;  $T_0$  为标准大气温度,  $293.2K$ ;  $P_0$  为标准大气压,  $101.33kPa$ ;  $P_B$  为试验室内大气压,  $kPa$ ;  $P_1$  为容积泵进口处相对于环境大气压的真空度,  $kPa$ ;  $T_P$  为试验期间进入容积泵的稀释排气平均温度, K。校正浓度为

$$C_{CO} = C_e - C_d \left[ 1 - \frac{1}{DF} \right] \quad (5)$$

式中,  $C_e$  为取样袋中稀释排气的 CO 浓度, ppm;  $C_d$  为稀释空气中 CO 浓度, ppm;  $DF$  为稀释系数

$$DF = \frac{13.4}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO}) \times 10^{-4}} \quad (6)$$

式中,  $C_{CO_2}$ 、 $C_{CO}$ 、 $C_{HC}$  分别为取样袋中稀释排气的 CO<sub>2</sub> (%)、CO (ppm)、HC (ppm) 的浓度。

### 2.1.2 试验结果

通过试验并利用上述模型计算得到的 3 种车型在不同车速下 CO 的排放量见表 1。

表 1 3 种车型不同速度下 CO 排放质量

车型	40km/h		70km/h		100km/h	
	$g \cdot km^{-1}$	$m^3 \cdot (veh \cdot km)^{-1}$	$g \cdot km^{-1}$	$m^3 \cdot (veh \cdot km)^{-1}$	$g \cdot km^{-1}$	$m^3 \cdot (veh \cdot km)^{-1}$
SANTANA2000 (电喷)	2.073	0.00166	0.642	0.000514	0.137	0.00011
HFJ6320 (电喷)	1.67	0.00134	1.23	0.000984	1.11	0.00089
BJ1040 (化油器)	1.67	0.00134	1.03	0.000824	0.89	0.000712
平均	1.804	0.00144	0.967	0.000774	0.712	0.00057

试验结果表明, 各种车速下 CO 排放量均远低于规范 JTJ026.1-1999<sup>[1]</sup> 给定的值; 随着车速增高, 一氧化碳的排放量呈减少的趋势, 且在中低速时, CO 排放量随车速提高下降幅度很大。这是因为档位一定, 车速提高时, 发动机转速增加, 虽然排气量增加了, 但是由于进气紊流增强, 改善了混合气的混合状况, 使燃烧充分, 故 CO 总的排放量得以减少。

### 2.2 CO 排放量实际道路试验研究

为了更好地探讨在用车在实际运行状态下 CO 的排放水平, 试验完全在实际道路上进行。试验车是在在用营运车中随机抽取技术状况一般的、运行里程已超过 30 万 km 的普通桑塔纳轿车。由于影响汽车 CO 排放量的主要因素有: 车辆的载荷、道路状况、燃油品质、车速以及气候条件等, 因此在试验时对车辆按载质量的标准进行配载。选择晴朗无风的天气以减少环境温度、湿度和大气压力变化对测量结果造成的影响。

试验路段选择平坦的一级路面 (西安市草滩路, 坡度不超过 0.3%), 按汽车等速油耗试验规范确定试验段长度为 500m, 加速段长度不小于 1000m。

试验车辆挂常用档位, 分别以 20、30、40、50、60、70、80km/h 的速度等速通过 500m 试验路段, 高级五气分析仪直接采样连续检测汽车尾气中 CO 及各成分的体积浓度和过量空气系数, 确定在 500m 的平均 CO 浓度和平均过量空气系数, 同时油耗仪检测其油耗量及通过路段的时间, 试验流程如图 1 所示。

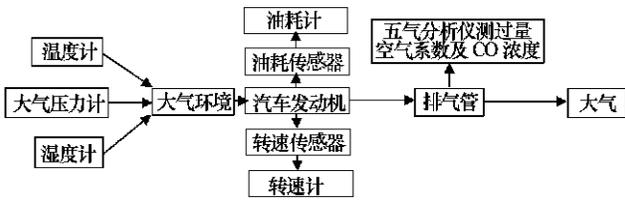


图 1 汽油车 CO 排放道路试验流程图

### 2.2.1 建立 CO 排放量的计算模型

计算模型是基于碳平衡原理<sup>[7,8]</sup>而建立的, 也就是说燃油是碳氢化合物, 根据物质不灭定律, 汽车烧了多少碳的燃油, 排气管就应该排出多少碳 (包括碳粒和含碳化合物)。汽车排放的尾气是进入发动机气缸内燃油和空气的混合气燃烧后的产物, 当混合气完全燃烧时, 其燃烧产物为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O; 不完全燃烧时, 除了 C<sub>2</sub>O 和 H<sub>2</sub>O 外, 还有 CO、HC、自由 C 和没有参加反应的氧气、氮气以及 NO<sub>x</sub> 等。因此 CO 排放率可由下式得到

$$m_{CO} = m_f (1 + \alpha) \frac{M_{rCO}}{M_{resh}} \varphi_{CO} \quad (7)$$

式中,  $m_{CO}$  为 CO 的质量排放率, g/s;  $m_f$  为燃油的质量流量, g/s;  $\alpha$  为废气分析仪测出的过量空气系数;  $M_{rCO}$  为 CO 的分子量;  $\varphi_{CO}$  为废气分析仪测出的 CO 体积浓度;  $M_{resh}$  为排出废气的平均分子量, 可由下式求出

$$M_{resh} = M_{HC} R \varphi_{C_6H_{14}} + M_{rCO} \varphi_{CO} + M_{rCO_2} \varphi_{CO_2} + M_{rNO} \varphi_{NO} + M_{rO_2} \varphi_{O_2} + M_{rH_2} \varphi_{H_2} + M_{rH_2O} K + M_{rN_2} [1 - R \varphi_{C_6H_{14}} - \varphi_{O_2} - \varphi_{CO} - \varphi_{CO_2} - \varphi_{NO} - \varphi_{H_2} - K] \quad (8)$$

$$其中, \quad K = 0.5 [\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2}] Y - \varphi_{H_2} \quad (9)$$

$$\varphi_{H_2} = 0.5 Y \varphi_{CO} \quad (10)$$

式中,  $M_{HC}$  为 HC 的分子量, 依据国家标准汽油中 H 与 C 个数的比例为 1.85:1 进行求取, 即  $M_{HC} = M_C + M_H \times Y$ ,  $Y$  为 H 与 C 的个数比;  $M_{rCO_2}$ 、 $M_{rNO}$ 、 $M_{rO_2}$ 、 $M_{rH_2}$ 、 $M_{rH_2O}$ 、 $M_{rN_2}$  分别为 CO<sub>2</sub>、NO、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub> 的分子量;  $\varphi_{C_6H_{14}}$ 、 $\varphi_{NO}$ 、 $\varphi_{CO_2}$ 、 $\varphi_{O_2}$  分别为废气分析仪测出的 HC、NO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的体积浓度;  $\varphi_{H_2}$  为排气中 H<sub>2</sub> 的体积浓度;  $R$  为由 C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> 测量结果转化为 C<sub>1</sub> 的转化系数, 取  $R = FID \text{ 检测值} / NDIR \text{ 检测值} = 16.5$ 。

$$q_v = 3600 m_f (1 + \alpha) \frac{M_{rCO}}{M_{resh}} \varphi_{CO} / V \quad (11)$$

式中,  $q_v$  为单位里程的 CO 排放量, g/km;  $V$  为通过试验段时汽车实际运行车速, km/h。

由上述分析可知, 只要测出汽车通过 500m 试验段时, 发动机排气各成分的平均浓度、平均过量空气系数以及通过试验段的实际车速和油耗量, 就可以求出单位里程的 CO 排放量。

### 2.2.2 试验及计算结果

实际试验测试结果见表 2, 分析计算结果见表 3。

表 2 SANTANA 轿车 CO 排放道路试验数据

方向	距离/km	时间/s	油耗量/mL	$\bar{\alpha}$	$\bar{\varphi}_{CO}$ /%	$\bar{\varphi}_{CO_2}$ /%	$\bar{\varphi}_{HC}$ /ppm	$\bar{\varphi}_{NO_x}$ /ppm	$\bar{\varphi}_{O_2}$ /%
东行	0.5	87	39.4	1.043	0.44	13.7	75	166	1.24
西行	0.5	87.9	40.6	1.049	0.5	14.0	76	172	1.38
东行	0.5	62.4	31.2	0.985	1.03	13.9	81	251	0.42
西行	0.5	61.3	32.9	0.990	0.89	13.8	89	389	0.44
东行	0.5	46.4	31.7	0.990	0.74	14.0	90	364	0.34
西行	0.5	45.9	32.9	0.995	0.66	14.1	89	539	0.39
东行	0.5	35.7	34.5	0.995	0.54	14.3	107	781	0.32
西行	0.5	34.9	32.1	0.998	0.38	14.3	122	867	0.34
东行	0.5	31.7	31.7	0.995	0.38	14.1	182	588	0.28
西行	0.5	31.6	34.4	1.020	0.38	14.3	162	1170	0.81
东行	0.5	26.3	34.9	1.003	0.29	14.3	195	993	0.42
西行	0.5	27	32.1	0.991	0.43	14.3	188	690	0.24
东行	0.5	22.9	39.2	1.016	0.32	14.3	141	767	0.37
西行	0.5	23	32.7	0.996	0.35	14.1	142	736	0.27

表 3 SANTANA 轿车道路试验 CO 排放量计算结果

平均车速 /km·h <sup>-1</sup>	$\bar{\alpha}$	$\bar{\varphi}_{CO}$ /%	平均油耗 /mL	废气流量 /m <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup>	排放量平均值 /m <sup>3</sup> ·(km <sup>3</sup> ·veh) <sup>-1</sup>
20.585(3 档)	1.046	0.47	40.00	0.783	0.0037
29.105(4 档)	0.988	0.96	32.05	0.592	0.0057
39.005(5 档)	0.993	0.70	32.30	0.600	0.0042
50.998	0.997	0.46	33.30	0.621	0.0029
56.872	1.008	0.38	33.05	0.623	0.0024
67.554	0.997	0.36	33.50	0.625	0.0018
78.432	1.006	0.34	35.95	0.677	0.0023

从表3可以看出：汽车挂四档车速30km/h时，CO排放量最大，但是也没有超过规范JTJ026.1-1999<sup>[1]</sup>给定的值，随着车速的提高，CO排放量逐渐减少，超过70km/h后，排放量又略有回升。

上述研究中的CO排放量是在开放环境得到的。实际上汽车在隧道运行时，进入气缸的空气是污染空气，因此还需探讨在汽车发动机进气受到污染时，对CO排放量的影响问题。

### 2.3 模拟隧道环境的发动机台架试验

为了研究发动机进气受到污染时，即模拟隧道环境进气对汽车排放、动力性、经济性的影响，还进行了发动机台架模拟试验。

#### 2.3.1 废气回流量的确定

在进行模拟试验之前，做了解放CA6102发动机尾气排放中CO排放浓度的负荷特性曲线如图2所示，由图可以看出，CO排放浓度的平均值大致为0.4%。当要求隧道内CO浓度为200ppm(0.02%)时，通过通风风机送入的空气量和排出的废气量最终使汽车排气在隧道内的含量大约保持在5%左右。因此，在发动机台架模拟试验中，将废气的回流率控制在5%左右。

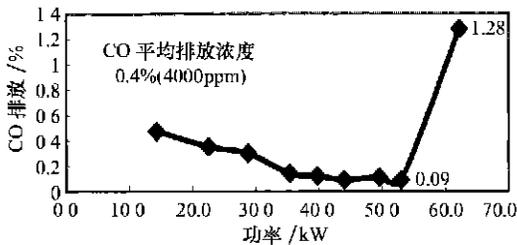


图2 发动机尾气中CO排放浓度的负荷特性 (1800r/min)

#### 2.3.2 试验仪器

为了使试验时CO的测试结果与道路试验相吻合，废气分析仪和油耗计均与道路试验时所用仪器相同，同时选择另一台废气分析仪监控进气中CO的浓度。

#### 2.3.3 试验方法<sup>[9]</sup>

在室内发动机台架上专门设计了废气回流装置。装置中用节流阀调节废气的回流量，并渗入进气中，同时监控进气中CO的浓度。试验流程如图3所示。测定不同进气回流量（即CO进气浓度下）时发动机的输出功率、油耗量及CO排放浓度。

#### 2.3.4 试验结果及分析

试验结果如图4、图5、图6所示。

分析得知：进气中CO浓度每增加100ppm，发动机功率下降0.3%；发动机比油耗上升0.25%；尾气

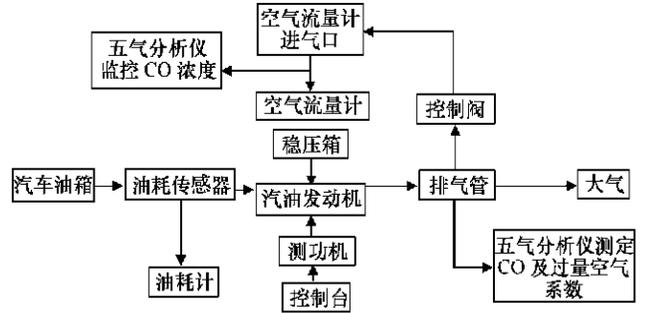


图3 发动机台架试验测试流程图

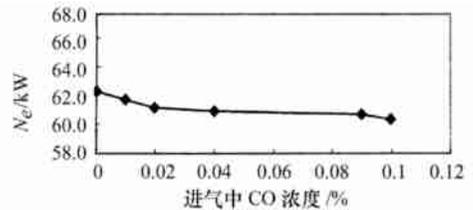


图4 进气中CO浓度对发动机动力性的影响

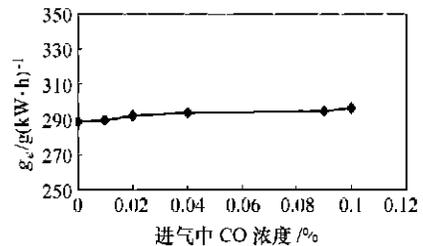


图5 进气中CO浓度对发动机比油耗的影响

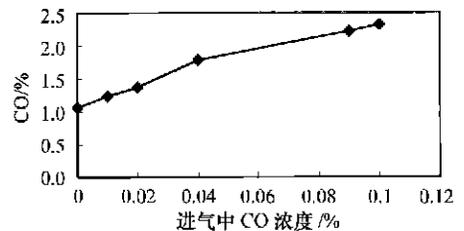


图6 进气中CO浓度对发动机CO排放浓度的影响  
中CO排放上升11%。

可见发动机进气中废气量增加，对发动机动力性、经济性影响不太大，但是对CO的排放浓度影响较大。由此可以看出，在确定隧道CO单车基准排放量时，必须考虑进气环境空气质量的影响。

### 3 结论及需进一步研究的问题

(1) 从国外制定的基于公路隧道的CO的基准排放量取值和本次试验研究结果来看，我国在规范JTJ026.1-1999<sup>[1]</sup>中，CO的基准排放量取值为0.01m<sup>3</sup>/veh·km偏高。随着我国汽车排放标准的严格，以及汽车技术的进步，深入研究我国基于公路隧道的CO基准排放量具有重要的意义。

(2) 从汽油车CO排放量整车台架试验和道路试

验比较来看, 台架试验条件可控, 是进行 CO 基准排放量试验研究的理想方法; 道路试验由于试验模型中很多参数是近似确定的, 而且取样方法误差也较大, 会给研究结果带来较大的误差。

(3) 从汽油机模拟隧道环境台架试验的结果可以看出, 汽油机进气 CO 浓度每增加 100ppm, 废气排放中 CO 排放量上升 11%, 而且对汽车的动力性和经济性也有一定的影响。因此研究确定基于公路隧道汽车 CO 基准排放量时, 必须考虑进气环境的影响。

(4) 在确定基于公路隧道的 CO 基准排放量还需研究汽车技术状况、发动机负荷、隧道所处的海拔高度等, 这些都对汽车排放量有较大的影响。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范 (JTJ026.1-1999) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] 日本道路协会. 道路トンネル技术基准 (换气编) [S]. 丸善

珠式会社出版, 1985.

- [3] Johannes Staehelin, et al. Emission Factors from Road Traffic from a Tunnel Study (Gubit Tunnel, Switzerland) [J]. Atmos. Environ., 1998, 32 (6): 999-1009.
- [4] Steven N R, Ute P, Tom D, et al. Gaseous Emission from Vehicles in a Tunnel in Vancouver [J]. Air&Waste Manage. Assoc., 1998, 84: 604-615.
- [5] Steven H Cadle, Robert A Gorse, Mark Carlock. Real-world Vehicle Emission; A Summary of the Fourth Annual CRC-APRAC. On-Road Vehicle Emission Workshop [J]. J Air & Waste Manage. Assoc., 1994, 44: 1180-1187.
- [6] 邓顺熙, 史宝忠. 我国轻型汽车污染物排放因子的测试研究 [J]. 中国环境科学, 1999, 19 (2): 178-181.
- [7] 杨延相, 杜红, 刘昌文, 等. 用于汽车道路行驶排放测量的车载实验系统 [J]. 长安大学学报, 2002, 22 (4): 62-65.
- [8] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [9] 王生昌. 基于公路隧道汽车污染物基准排放量的研究 [D]. 长安大学硕士论文, 2003.

(上接第 152 页)

浏览器, 监控终端登录到视频监控服务器上后, 即可执行全部的视频图像监控任务。

### 3.3 省级视频监控中心设计方案

从图 5 中省厅监控中心部分可以看出省级视频监控中心与各地市视频监控分中心相似, 但考虑到视频监控数据的存储已由各市分中心完成, 省中心无需考虑数据存储, 因此也就不需要视频存储系统。

## 4 视频监控系统软件方案

系统软件包括视频监控软件、视频监控系统数据库、局域网软件 3 个方面, 其中视频监控软件可以根据实际需求进行全新开发, 也可以要求视频监控系统供应商在其现有配套商业应用软件的基础上, 根据实际需求增加或修改部分功能, 以实现应用软件的针对性。视频监控系统数据库、局域网软件可根据功能需求及网络设备在现有软件中进行选购。

## 5 结语

目前, 国外发达国家的道路运输安全生产综合服务系统由于使用了大量诸如视频监控、GPS 定位等先

进而又实用的技术, 已逐步走向系统化、网络化和工程化。我国道路运输行业对视频监控技术的应用还处在初步阶段, 还没有实现一个省或地区的联网监控。论文以一个省为研究对象, 对全省一二级客运站安全生产的远程视频监控网络系统的组成与功能、网络的布局方案设计、远程视频监控方案设计和视频监控软件方案等方面进行了探讨, 旨在为我国道路运输安全生产综合服务系统逐步走向系统化、网络化和工程化提供一定的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 培燕. 关于远程视频监控系统的研究 [J]. 现代计算机, 2002 (4): 48-51.
- [2] 王宝顺, 张炜. 校园网设计与远程教学系统开发 [M]. 人民邮电出版社, 2003.
- [3] 谷红勋. 互联网接入基础与技术 [M]. 人民邮电出版社, 2002.
- [4] 刘伟娜, 张德运, 等. 基于 Internet 的远程视频监控系统的实现 [J]. 计算机工程, 2003 (8): 156-157.
- [5] 陈学光, 陈维荣, 等. 一种基于多媒体的远程视频监控系统方案 [J]. 铁道学报, 2001 (6): 105-109.