

# 长大公路隧道火灾安全疏散性能化设计与分析

陈长坤<sup>1,2</sup>, 徐志胜<sup>1</sup>

(1. 中南大学防灾科学与安全技术研究所, 长沙 410075;

2. 河南理工大学煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室, 河南焦作 454003)

[摘要] 基于性能化防火设计方法,分析火灾条件下长大公路隧道内人员疏散行为的特点,给出隧道内人员疏散的安全判据,并结合某隧道的结构及车流特征对人员疏散过程进行了数值模拟研究,分析隧道在正常通车和局部行车堵塞时,不同火源位置、横通道间距与横通道宽度对人员疏散时间及安全状态的影响。结果表明,与建筑内人员疏散不同,长大公路隧道内火灾的可用安全疏散时间(ASET)与需要的安全疏散时间(RSET)均为沿隧道长度方向位置的函数。隧道内人员安全疏散的时间曲线在各横通道疏散口出现峰值,这主要是受到横通道通行能力的限制,各疏散口人员集聚等待所致。当隧道发生局部堵塞时,横通道口需要的安全疏散时间显著增加,危险性也急剧增大。隧道内人员疏散的性能化防火设计应综合考虑火源位置对人员载荷及疏散口位置可用安全疏散时间的影响。该研究为公路隧道火灾安全疏散设施的优化设计提供依据。

[关键词] 疏散; 火灾; 隧道; 横通道; 性能化防火设计

[中图分类号] TU998.12 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)09-0078-06

随着我国高速公路的迅速发展,修建了大量的公路隧道。2001年底我国公路隧道有1782座,单洞总长达705 km,其中3000 m以上的隧道超过22座<sup>[1]</sup>。隧道是一种较长的封闭空间,其结构和设施复杂、环境密闭、出入口少、疏散路线长、通风照明条件差<sup>[2]</sup>,一旦发生火灾,其危害性极为严重,事故引发高温与浓烟对于处于其中的车辆及人员会形成极大的威胁<sup>[3]</sup>。近30年来,世界各地发生的隧道火灾屡见不鲜,如1993年6月12日发生在我国的西延线蔺家川隧道的火灾,造成8人死亡,10人受伤,中断运行579.3 h,直接经济损失561万元<sup>[4]</sup>;1999年3月24日,发生在法国和意大利之间的Mont Blanc隧道火灾,死亡41人,36辆汽车被毁<sup>[5]</sup>。公路隧道火灾造成的危害引起了人们对隧道消防安全问题的高度重视<sup>[4,5]</sup>。

作为一种地下建筑,隧道几何形状、内部环境以及功能用途与普通建筑有着非常大的区别,隧道火灾及人员疏散行为也有着与普通建筑不同的特性。

因此,普通建筑用于人员疏散的安全判据和方法未必适用于隧道。针对以上情况,有必要开展隧道内人员疏散的研究,为一些关键防火与疏散参数的选取提供指导,对于降低隧道火灾的潜在危险性及性能化防火设计具有重要的意义。

作者结合长大公路隧道的特点,根据烟气扩散规律,研究公路隧道内人员的疏散规律与模式,分析疏散过程的瓶颈,给出适合隧道内人员疏散的安全判据;结合某隧道的结构及车流特征对隧道内的人员疏散进行了数值模拟研究,分析隧道正常通车和局部行车堵塞时,不同火源位置、横通道间距与宽度对人员疏散时间的影响,为隧道火灾救援、人员逃生及隧道防火设计与分析提供有意义的参考。

## 1 性能化安全疏散设计方法

性能化安全疏散设计是根据建筑结构特征、人员载荷情况确定火灾条件下人员的逃生模式与行为,并通过辨识火灾危险源及规模,设定火灾工况,针对火

[收稿日期] 2006-12-11

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50706059);河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室开放基金资助项目(HKLG200503)

[作者简介] 陈长坤(1977-),男,福建福安市人,中南大学副教授,博士

灾和烟气传播过程及人员疏散过程预测,通过采取一系列防火措施,进行适当的安全疏散设施的设置,以提供合理的人员疏散方法及其他安全防护方法,保证建筑内所有人员在紧急情况下迅速疏散或提供其他方法以保证人员具有足够的安全度<sup>[6]</sup>。

公路隧道的安全疏散设施包括人行横通道、车行横通道、隧道出入口以及防排烟系统等。目前性能化安全疏散设计方法是作为处方式规范的替代方案提出的,一般只在建筑的设计超越了现有规范或不能满足现行规范的要求时,对其进行性能化安全疏散设计。运用性能化安全疏散设计方法对隧道疏散设施进行设计,其流程如图1所示。

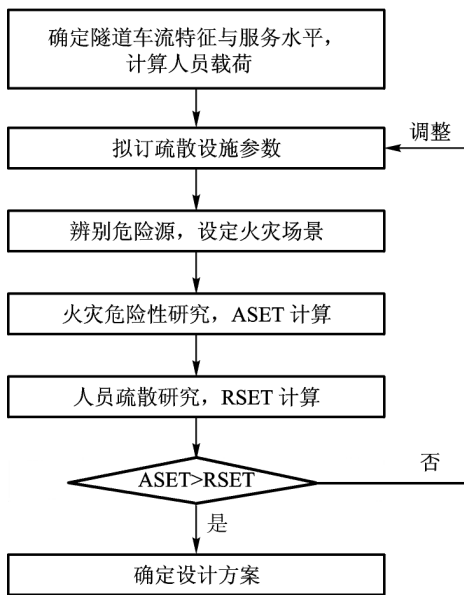


图1 性能化安全疏散设计流程图

Fig. 1 Flow chart of the performance-based safety evacuation design

## 2 火灾时隧道内人员及车辆疏散特点

图2是隧道发生火灾后,人员及车辆疏散过程示意图,主要包括以下几个方面:

- 1) 火灾下游车辆继续前行,从隧道出口离开隧道,或通过车行横通道进入另一孔隧道;
  - 2) 火灾上游车辆通过车行横通道进入另一孔隧道;
  - 3) 火源与其上游相邻车行横通道之间区域的车辆停止前行,人员下车通过人行横通道和车行横通道的人行道进入另一孔隧道;
  - 4) 管理人员采取措施禁止隧道入口进入车辆。
- 火灾所处的两车行横通道间区域为人员的主要疏散区域。

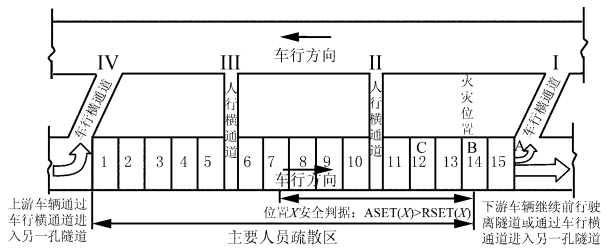


图2 隧道火灾下人员及车辆疏散特点分析示意图

Fig. 2 Scheme of evacuation features of occupants and vehicles in case of fires in tunnel

## 3 隧道内人员疏散的安全判据

与建筑火灾中主要考虑烟气沉降影响不同,由于隧道的纵向尺寸比横向尺寸大得多,火焰及烟气沿纵向蔓延需要一定的时间,因此隧道内不同位置的人员可用疏散时间是位置 $X$ 的函数,即 $ASET(X)$ ,它也表示位置 $X$ 处达到危险状态的时间。

基于以上特点,在进行隧道人员安全疏散判断时,应考虑不同位置人员需要的安全疏散时间,即 $RSET(X)$ ,它也表示 $X$ 处从火灾发生至最后一个人(包括该位置初始人员及疏散过程中进入该位置的人员)撤离该位置所需要的时间(包括预警时间、人员响应时间、人员撤离时间)。隧道发生火灾后,如果不同位置人员能在该处达到危险状态之前全部撤离至安全区域,即

$$ASET(X) > RSET(X) \quad (1)$$

便可认为该隧道的防火安全设计对于火灾中的人员疏散是安全的。

### 3.1 ASET(X)的确定

隧道内不同位置所对应的可用安全疏散时间 $ASET(X)$ 主要由火灾及烟气的蔓延速度决定,其对人体构成伤害的临界判定主要条件<sup>[6]</sup>:

- 1) 上部烟气层的热辐射强度能对人体构成危险,一般取辐射强度达到 $2.5 \text{ kW/m}^2$ ;
- 2) 温度超过 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烟气可直接灼伤人体呼吸道和表皮;
- 3) 有毒燃烧产物的浓度达到对人体构成伤害的危险浓度,典型的是 $\text{CO}$ 体积分数达到 $0.25\%$ ;
- 4) 减光度达到影响人员行动的极限值,典型判据取隧道内最低能见度为 $10 \text{ m}$ 。

结合以上临界判定条件,可利用CFD数值模拟分析获得 $ASET(X)$ 。

### 3.2 RSET(X)的计算

根据现有研究成果,在消防安全工程分析中,一般将人员的消防安全疏散过程大致分为察觉火灾、

疏散行为准备、逃生行动、到达安全区域等阶段。

RSET( $X$ )为位置 $X$ 处需要的安全疏散时间,由于隧道本身既是容纳人员的空间,同时又是逃生路径,各位置人员包括了初始人员及疏散过程中进入该位置的人员。因此RSET( $X$ )应为从火灾发生开始至最后一个人撤离该位置所需要的时间,RSET( $X$ )=预警时间 $t_b$ +人员响应时间 $t_e$ +位置 $X$ 处人员开始疏散至所有人撤离该位置的时间 $t_s$ 。 $t_b$ 为火灾开始到人员知道火灾之间的时间。火源临近区域人员主要通过视觉感知火灾发生。而其他区域的预警时间主要与探测和监控系统的性能有关,可取为探测时间60s; $t_e$ 为人员认识火灾到撤离车道或火灾影响区域所需的时间。这里主要包括人员认识到火灾后到决定弃车开始疏散的时间,由探测到火灾后发出录音警报信息,响应时间一般取为120s,靠近火源处响应时间则更短; $t_s$ 为位置 $X$ 处人员开始疏散至所有人撤离该位置的时间,取决于初始及后来进入该位置的人员数量与时刻、出口路径等,需要通过数值模拟分析获得。

作者采用EVACNET4模型<sup>[7]</sup>计算RSET( $X$ )。

#### 4 隧道内火灾场景的分析

隧道内火灾场景的分析与模拟是性能化设计的关键环节,隧道火灾有以下特点:

1) 烟气产生量大,能见度低,蔓延速度快。隧道是近乎封闭的空间,在其中发生的火灾多为不完全燃烧,燃烧产生大量的烟雾和有毒气体CO等。同时由于很难进行自然排烟,热量不容易散发,烟气在高温产生的浮力和机械通风的作用下,会沿隧道纵向迅速蔓延;

2) 通风失效时,如隧道出入口存在水平高度差,烟囱效应将对隧道内烟气的流动产生重大影响。经过一定时间后,烟囱效应使得烟气向出(入)口水平位置高的一端迅速蔓延,而另一端进入空气,呈单向流动。火源功率越大,烟囱效应越强烈;

3) 火灾以车辆燃烧为主,燃料以燃油和货物为主,发生火灾时所释放的热量较大,对人体的高温伤害主要在于火源附近区域,较远处主要是烟气可见度及毒性作用。

因此在选取火灾工况时,应考虑隧道坡度、火源与隧道疏散口的相对位置、火源功率、通风等因素,进而通过分析确定隧道内火灾发生的最不利状况,主要考虑排烟失效的情况下,火源位于隧道下坡段。

利用火灾动力学模拟软件FDS4.0<sup>[8]</sup>对隧道内的火灾及烟气蔓延进行模拟分析,给出可用的安全疏散时间ASET( $X$ ),计算结果见图3与图4。

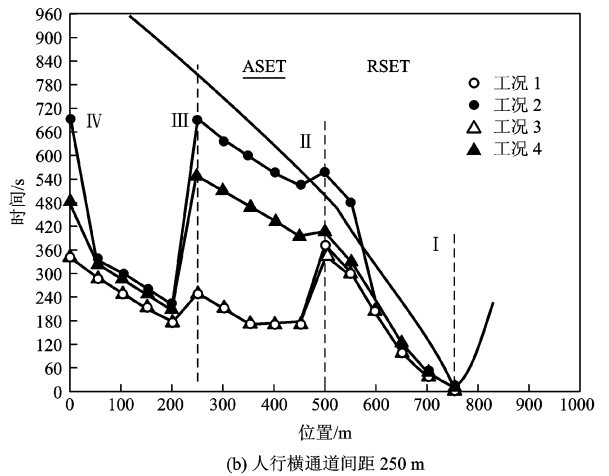
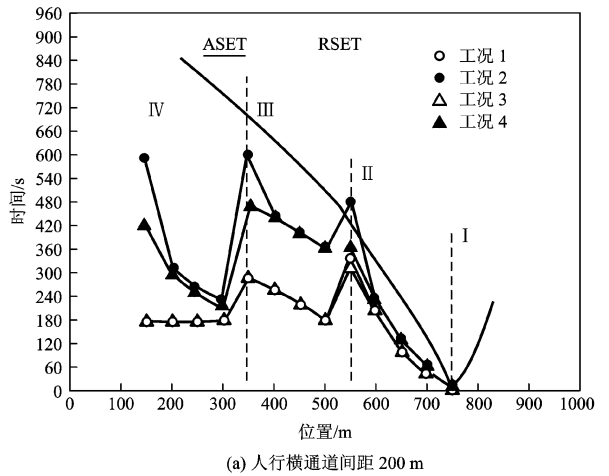
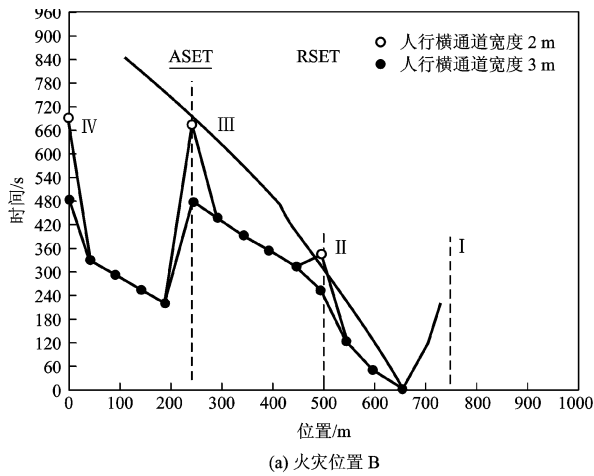


图3 不同人行横通道间距RSET与ASET比较 (火灾位置A、通风失效)

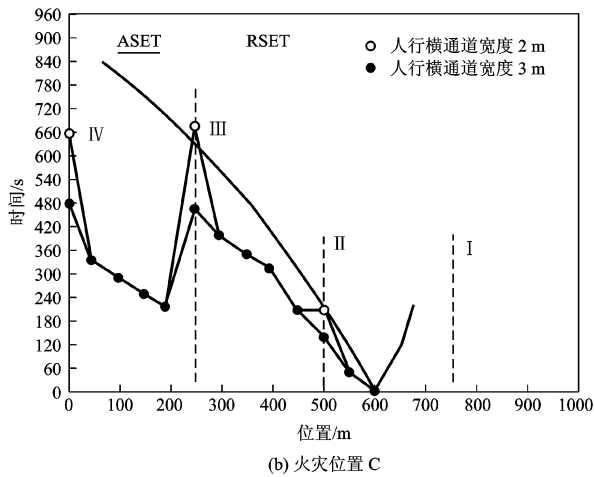
Fig. 3 Comparisons between RSET and ASET under conditions of various spacing of man-use transverse passageways (fire source location A, ventilation failure)

#### 5 隧道内人员疏散的数值模拟与分析

采用网络节点式的疏散模型EVACNET4进行隧道内人员的疏散模拟与分析。结合隧道结构特点,该模型可对隧道区间结构进行网络描述,进而对人员的疏散过程进行数值模拟。依据EVACNET4.0中对不同宽度通道通过率及人员速度级别的分类<sup>[7]</sup>,该疏散模拟取通道路径能力为级别Service C,有效疏散宽度内的人员平均通过率为40人/m·min,人员逃生的平均速度取1.2m/s,烟气的蔓延过程采用FDS4.0进行数值模拟分析<sup>[8]</sup>。



(a) 火灾位置 B



(b) 火灾位置 C

图4 不同火源位置及横通道宽度下 RSET 与 ASET 的比较

Fig. 4 Comparisons between RSET and ASET under Conditions of (Various Fire Source Locations and Widths of Transverse Passageways)

### 5.1 隧道结构及车流量

某公路隧道长 4 312 m, 车道宽度 11.76 m, 隧道的设计车速为 60 km/h, 车行堵塞情况, 全隧道车辆将以 10 km/h 车速缓慢行驶。采用纯纵向通风方式进行防灾通风, 人员疏散采用车行横通道与人行横通道结合的方案, 见图 2。表 1 给出了不同目标年的隧道交通量。

表 1 隧道交通量

Table 1 Tunnel traffic flow

年 度	2007	2010	2015	2020	2025	2027
混合车辆 /辆·d <sup>-1</sup>	6538	8360	11955	16205	20080	21769

### 5.2 人员载荷

隧道内人员载荷 = (大客比例 × 大客载客量 +

小客比例 × 小客载客量 + 其他车比例 × 其他车载容量) × 总车辆数 (2)

客货车比例为 0.65, 大型客车与小型车比例为 0.0961:0.3454, 结合隧道的车流特征和服务水平, 人员载荷分为两种情况: 正常行驶时, 隧道内有 366 人; 行车堵塞时, 隧道内有 9 160 人。

表 2 2027 年高峰时隧道内人员载荷

Table 2 Occupant loads in tunnel at peak time in 2027

	小客/辆	大客/辆	其它车/辆	人员载荷/人
正常行驶	17	5	11	366
行车堵塞	438	122	302	9160

### 5.3 模拟工况

对隧道内人员疏散进行模拟与分析时, 将考虑人员载荷、横通道间距及人行横通道宽度等工况, 如表 3 所示。

表 3 隧道内人员疏散模拟工况

Table 3 Cases of evacuation simulations of occupants

工况	人员载荷		人行横通道宽度/m	
	正常行驶	行车堵塞	2	3
1	√		√	
2		√	√	
3	√			√
4		√		√

火灾场景考虑单辆货车着火, 火源功率为 20 MW, 通风失效, 不同火源位置工况。

### 5.4 模拟结果与分析

图 3 给出了火灾发生在位置 A (见图 2), 隧道内排烟风机失效, 人行横通道间距分别为 200 m 与 250 m 时, 不同工况 RSET(X) 与 ASET(X) 的比较。可以看出 RSET(X) 曲线在各疏散横通道口位置 II、III、IV (见图 2) 出现峰值, 这主要是由于人员均是经过横通道口进入另一孔隧道, 因此进入该位置的人员最多, 所需要的 RSET 也最大, 同时由于疏散过程中横通道口聚集大量人员, 可能发生拥塞, 人员等待疏散的时间较长, 出现疏散瓶颈。比较图 3(a) 与图 3(b) 可以看出, 人行横通道间距为 200 m 时, 人员疏散的最大 RSET 值约为 600 s; 人行横通道间距为 250 m 时, 人员疏散的最大 RSET 值约为 700 s, 这种差别主要是受到人员载荷及疏散路径缩短的影响。横通道宽度对人员疏散的影响, 主要表现为人员单位时间内通过该通道的能力; 增加横通道宽度, 对缓解人员大量积聚而发生拥塞, 减小需要的人员疏散时间 RSET 具有重要的影响。由数值模拟结果看出, 当行车堵塞且横通道宽度为 2 m 时, 靠近火源的

第一个横通道口需要的安全疏散时间 RSET 超过该位置的可用安全疏散时间 ASET,不能满足安全疏散要求,其他工况均能满足要求。

图 4 给出了不同火源位置及横通道宽度下 RSET ( $X$ )与 ASET( $X$ )的比较。可以看出,火灾位置的不同,对隧道人员的安全疏散有着明显的影响。当火灾越靠近疏散横通道口II时,火灾位置与横通道口II之间需要疏散的人员就越少,因此相应的 RSET 值降低。火灾分别发生在 B 和 C 位置时,横通道口II位置的 RSET 由 350 s 下降至 210 s,有利于人员安全疏散。但另一方面,火灾蔓延至横通道口II~IV的时间相对缩短,也就是说各位置 ASET 也相对减小。火灾分别发生在 B 和 C 位置时,横通道口II位置的 ASET 由 335 s 下降至 240 s,横通道口III位置的 ASET 由 700 s 下降至 630 s,不利于人员的安全疏散。

## 6 结论

结合长大公路隧道的结构特征及人员载荷特点,给出相应的火灾安全疏散性能化设计方法,通过长大公路隧道内人员疏散过程的分析与模拟研究,可得以下结论:

1)与建筑内人员疏散不同,隧道内火灾的可用安全疏散时间 ASET 与需要的安全疏散时间 RSET 均为沿隧道长度方向的位置函数;

2)隧道内人员疏散时间曲线 RSET 在各横通道疏散口处出现峰值,为疏散瓶颈,主要是由于各疏散口人员集聚等待导致的,当隧道发生局部堵塞时,横通道口需要的安全疏散时间显著增加,危险性也急剧增大;

3)横通道宽度对人员疏散的影响,主要表现为人员单位时间内通过该通道的能力,提高横通道宽度,可缓解人员大量积聚而发生拥塞,减小需要的人员疏散时间 RSET;

4)当火灾越靠近疏散横通道口时,一方面,火灾位置与横通道口之间需要疏散的人员就越少,相应的 RSET 值降低,另一方面,火灾蔓延至该横通道口的时间相对缩短,各位置 ASET 也相对减小,人员疏散的性能化防火设计应综合考虑火源位置对人员载荷及疏散口位置 ASET 的影响。

## 参考文献

- [1] 张硕生,张庆明,毛朝君. 隧道防火保护的现状及发展趋势[J]. 消防技术与产品信息, 2003, (7): 6~9
- [2] 夏永旭,赵峰. 特长公路隧道纵向一半横向混合通风方式研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 80~83
- [3] 李元洲,霍然,易亮,等. 隧道火灾烟气发展的模拟计算研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(2): 67~72
- [4] 周旭,赵明华,刘义虎. 长大隧道火灾与防治设计研究[J]. 中南公路工程, 2002, 27(4): 87~90.
- [5] 倪照鹏,陈海云. 国内外隧道防火技术现状及发展趋势[J]. 交通世界, 2003, (2): 28~31
- [6] 霍然,袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 2003
- [7] Kisko T M, Francis R L, Nobel C R. EVACNET4 User's Guide Version 10/29/98[R]. University of Florida, 1998
- [8] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, Hamins A, Forney G P, Floyd J E, Hostikka S, Prasad K. Fire Dynamics Simulator (Version 4) — Technical Reference Guide[R]. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology; 2004

# Performance-based Fire Protection Designs and Analyses for Occupant Evacuations in Super-long Road Tunnels

Chen Changkun<sup>1,2</sup>, Xu Zhisheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Henan Key Lab. of Preventing and Curing on Coal Mine Gas & Fire, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

[Abstract] In this paper, the evacuation characteristics of occupants in super-long road tunnels in the case

of fires were analyzed and the corresponding safety criteria for evacuations were given. Numerical simulation studies were conducted on the evacuation of occupants under conditions of normal traffics and local jams respectively in a tunnel by taking its structure and the vehicles flows into consideration. Influences of various fire locations, spacing between and widths of transverse passageways were considered. Results show that the available and the required safe evacuation time (ASET and RSET, respectively) are both functions of positions in the longitudinal direction of the tunnel, which is different from the case in building evacuations. Peaks occur on the time curves of occupant evacuations at the gate of each transverse passageway, which is mainly caused by the aggregating and waiting behaviors at each gate. When a local traffic jam occurs, the RSET for the region near the gate of transverse passageways is dramatically enhanced, the same are the hazards. And the performance-based fire protection designs for occupant evacuations in super-long tunnels should consider the influences of fire source locations on occupant loads and the ASET at evacuation gates comprehensively. The investigation for the performance-based fire protection designs for the occupant evacuations in super-long road tunnels could provide the valuable references for the optimization designing of the safety evacuation establishments for the road tunnels.

[Key words] evacuation; fire; super-long tunnel; transverse passageway; performance-based fire protection design

## 《中国工程科学》2007 年第 10 期要目预告

创新的中国高速铁路技术(下) 何华武  
 印度洋 8.7 级与 8.5 级地震的物理前兆 孙威等  
 卡特里娜飓风的启示——有关海洋和水利工程的风  
 险分析 刘德辅等  
 创建新医学的思考 马蔼乃等  
 基于可拓论的不相容问题求解研究 杨春燕  
 基于灰色模糊数的公交线网优化研究 邓卫等  
 基于人工免疫算法的 SVG 电压外环控制器控制策  
 略 杨建宁等  
 移动式颗粒床除尘器的设计研究 吕保和  
 一种时空权重和边缘自适应的扫描格式转换  
 丁勇等  
 单边直线感应电机等效电路参数研究 徐伟等

低成本 SoC 平台 MPEG - 4 AAC 解码器优化  
 策略 高谷刚等  
 循环网络模拟技术在土石方工程中的应 6 用  
 胡程顺等  
 自然通风对细水雾降温速率影响研究 房玉东等  
 毫米波遥控弹道修正弹拦截机动反舰导弹命中概率  
 的仿真研究 胡荣林等  
 水库优化调度的 Pareto 强度值 SCE - UA 算法  
 林剑艺等  
 自恢复容错系统的建模与分析 郭成昊等  
 人工湿地强化运行措施研究 鄢璐等  
 火箭炮交流位置伺服系统的鲁棒最优控制  
 柴华伟等