现代隧道技术
MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

文章编号:1009-6582(2016)01-0023-05 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2016.01.005

公路隧道节能方式探究

储诚赞[1,2] 刘玉新[1,2] 燕 凌[1,2]

(1交通运输部公路科学研究院,北京 100088;2公路交通安全技术交通行业重点实验室,北京 100088)

摘 要 为了改善公路隧道节能方式,促进我国公路隧道节能技术的应用发展,文章通过对当前我国公路隧道运营能耗状况的调研,分析了公路隧道的节能潜力,分别从技术性节能和管理性节能两方面探究了有效节能方式,提出了8类公路隧道节能方式,包括:设计技术改进优化、新能源技术应用、新设备新材料应用、新型控制技术应用、健全标准规范体系、加强运营节能管理、强化评价与考核、完善节能投入机制等方面,并对每类节能方式的应用可行性和发展方向进行了详细分析,可为今后我国公路隧道节能方式的发展提供参考。

关键词 公路隧道 运营能耗 技术性节能 管理性节能

中图分类号:U459.2 **文献标识码:A**

1 引 言

国务院发布的《节能减排"十二五"规划》中提出建设资源节约型、环境友好型社会,节能问题受到高度重视。随着我国高速公路建设的快速推进,公路隧道里程不断增长,根据2012年公路水路交通运输行业发展统计公报[1],全国公路隧道有10 022座、805.27万米,比2011年末增加1 500座、179.93万米,其中,特长隧道有441座、198.48万米,长隧道1 944座、330.44万米。公路隧道是高速公路运营管理的重要组成部分,其消耗电能的费用在运营成本中占据较大比重。目前公路隧道的用电消耗主要在照明设施、通风设施和隧道监控设施等方面,尤其是在长隧道、特长隧道以及隧道群的运营管理中,隧道照明与通风设施的耗电量尤为明显。以秦岭终南山公路隧道为例,该隧道双向洞长36.04 km,其引线隧道双向洞长2.75 km,共38.79 km,隧道内主要耗电设备为通风和照明等设施,建有13个10 kV箱式变压器用于隧道照明和射流风机供电。隧道左右洞共建有144台22 kW射流风机,并且另外建设3个35 kV配电房专供隧道竖井的32台轴流风机通风用电。隧道照明设施共有208组照明回路,高压钠灯8 700盏,疏散指示灯7 488盏,LED诱导灯10 346个,特殊灯光带6处,金卤灯、射灯共1 376盏,功率为100 W,250 W和400 W。秦岭终南山公路隧道耗电设备全部为机电设施,包含照明、通风、监控、交通控制、通讯、供配电、消防、防灾救援等八大系统十六大类百余种近3万件设备。主要耗电设备包括风机、照明和其它弱电设备,总用电功率达12 652千瓦,其中照明1 278千瓦,风机11 274千瓦,其它弱电设备约100千瓦。如果全部开启每小时耗电将达到12 652度,建成初期隧道每天用电量近8万千瓦时,按目前实际用电情况,照明约占20%,风机约占70%以上,其它主要为弱电设备用电量。另外,陕西省西汉高速公路隧道群中的秦岭1号、2号、3号隧道日均用电量达29万千瓦时[2]。通过以上统计数据分析,在保障交通安全和通行能力的前提条件下,应努力降低公路隧道用电量,节约公路隧道运营成本,积极推进节能型综合交通运输体系建设。

2 公路隧道节能潜力分析

据相关统计,目前公路隧道的主要耗电量在于

修改稿返回日期:2014-11-01

作者简介:储诚赞(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事公路交通机电设施检测与研究工作,E-mail:czchu08@gmail.com.

通风设施和照明设施，约占80%左右，因此隧道节能的重点在改进与优化通风与照明设施的运营。当前我国公路隧道通风与照明设施的配备设计主要依据2000年颁布的《JTJ026.1-1999 公路隧道通风照明设计规范》和2004年颁布的《公路隧道交通工程设计规范》，这两个规范在我国公路隧道建设初期，对隧道通风与照明设施配备设计起到了十分重要的作用。随着多年来公路隧道建设经验与运营经验的积累，实践表明，隧道照明或通风设施的规范要求往往高于实际的应用需求，增加了建设成本和后期运营成本。另外，在工程的勘察设计阶段，缺乏对公路隧道所处现场运营环境的细致调研分析，设计参数取值通常利用规范中推荐值的最高值，采用最高级配备，这就在一定程度上造成了建设期的成本和后期运营能耗的浪费。其次是目前我国公路隧道运营管理方式比较粗放，缺乏精细化管理，在一定程度上造成了电能的浪费。例如，在交通流量很小的山区公路隧道，隧道照明设施可根据洞内外亮度状况以及交通流量进行动态控制，通风设施同样可根据隧道内空气质量状况进行动态控制，不需要按时段定时启动运转。本文主要从技术改进和运营管理两方面挖掘公路隧道的节能潜力，探究节能方式，构建如图1所示的公路隧道节能方式框架。

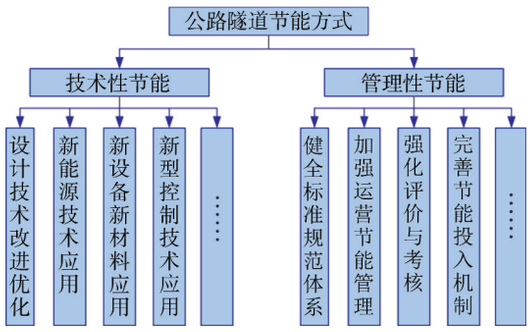


图1　公路隧道节能方式框架图

Fig.1　Frame diagram of energy-saving modes for highway tunnels

3　技术性节能方式

技术性节能主要是在满足使用需求的情况下，通过设计技术、新能源、新设备新材料、新的控制技术来降低公路隧道运营的用电量，实现节能减排。

3.1　设计技术改进优化

首先需要从设计规范与标准方面进行研究，科学优化设计，确定合理的设计参数和设计值，实现节约型设计。目前我国公路隧道通风与照明的设计主要是依据2000年颁布的《JTJ026.1-1999 公路隧道通风照明设计规范》。该规范中，公路隧道的照明设施设计主要分为入口段、过渡段、中间段和出口段[3]。

（1）入口段的亮度主要依据洞外亮度计算，计算公式为：$L_{th}=k\cdot L_{20}(S)$，其中k为入口段亮度的折减系数，其值大小依据设计的交通量和设计通行速度确定；$L_{20}(S)$为隧道洞外亮度。

（2）过渡段亮度根据隧道所处环境及隧道长度，可分为过渡TR_1、过渡TR_2、过渡TR_3等三个照明段，与之对应亮度在规范中按表1取值。过渡段的长度依据设计时速确定。

表1　过渡段亮度

Table 1　Luminance of the transition section

照明段	TR_1	TR_2	TR_3
亮度	$L_{TR1}=0.3L_{th}$	$L_{TR2}=0.1L_{th}$	$L_{TR3}=0.035L_{th}$

（3）中间段亮度依据设计时速和交通量确定，具体亮度取值参考上述设计规范。

（4）出口段照明长度宜取60 m，亮度一般宜取中间段亮度的5倍。

目前该规范中照明设施的设计对象包括国内所有隧道，并没有对数量逐渐增多的长隧道、特长隧道以及隧道群的照明设计做出更精细的优化与修正[4]。近期相关文献从驾驶人视觉障碍产生机理入手研究，结合人眼视觉、心理学相关理论，利用模糊数学方法建立相关数学模型，研究夜间高速公路隧道中间段的最佳照度值。结果表明：现有隧道照明标准和运营实践中，夜间隧道环境照度值过高，应控制在9 Lx以下为宜；夜间隧道环境照度，在入口段逐渐增加至9 Lx，中间段保持为9 Lx，在出口段逐渐降低至0 Lx[5]。如果按照该参数设计隧道照明设计，将大大降低照明能耗。因此，隧道照明设施设计的改进优化需要综合考虑隧道所处地理环境、隧道长度、设计速度、设计交通流量、驾驶员心里学以及人眼中间视觉理论等因素，编制精细化设计细则。

3.2　新能源技术应用

目前在公路交通行业运用的新能源技术主要是光伏应用技术、风电应用技术和风光互补应用技术。在太阳能与风能资源充足的地区，新能源技术

的应用可以有效降低电能消耗。据中国气象局风能太阳能资源评估中心估算，我国太阳能资源十分丰富，总储量达1.47×108亿千瓦·时/年，相当于2.4万亿吨标准煤，太阳能丰富区域主要集中在新疆、西藏、青海、宁夏、甘肃和内蒙古等西部地区。尤其是青藏高原平均海拔高度在4 000 m以上的地区，全年气候干旱，云量稀少，大气透明度好，其总辐射量（约5 850 MJ/m^2·a以上）和日照时数（约3 000 h以上）均为全国最高，属世界上太阳能资源丰富地区之一。另外，中国气象局在20世纪90年代，根据全国900多个气象台站的实测资料，做出了多年年平均风能密度分布图，首次完整细致地估算出我国各省及全国离地面10 m高度层上的风能资源储量，给出我国陆地上10 m高度风能资源总储量达32.26亿千瓦，可开发量为2.53亿千瓦。以上估算进一步证实我国东南沿海及附近岛屿、甘肃走廊、内蒙古、东北、西北、华北和青藏高原等部分地区风能开发利用价值很大。因此，在太阳能资源、风能资源丰富的区域，应该尽快完善太阳能应用技术、风能应用技术和风光互补应用技术的相关标准规范，提高太阳能和风能的转换效率，降低负载功耗，在保障公路隧道运营安全的前提下，扩大推广应用范围。

3.3 新设备新材料应用

新设备新材料的应用在当前公路隧道运营中主要有新型隧道照明灯具的使用、新型衬砌装饰材料和新型路面材料。目前我国隧道常用灯具主要有高压钠灯、荧光灯、无极灯和LED灯等。其中高压钠灯特性稳定，光通量维持率高，透雾性强，在隧道照明特别是高山区等城市外的隧道中大量使用。但高压钠灯输出光通量会随电压波动变化最大，由于高速公路隧道所在地段偏远，往往电网经常不稳定，造成线路的电压波动大大超过国际标准，许多地区的波动甚至超过额定电压的± 4%~15%，特别是在夜晚的后半夜，由于用电负荷减少使得电网电压有时接近245 V，致使隧道内高压钠灯灯泡的实际使用寿命大幅下降[6]。LED照明灯具具有寿命长、启动快、显色性好、定向光、高节能性等优点[7]。隧道照明的光源，除了应满足在隧道特定环境下的光效、光通量、显色性、寿命、工作特性和控制配光的难易程度等主要要求外，还要综合考虑隧道的节能、环保并且在隧道内汽车排烟形成的烟雾中仍能保证有良好能见度，以保障车辆通行安全。综上，在隧道里采用高压钠灯与LED照明灯具组合式的照明方法，既能有效保障隧道运营安全，又能较好地实现节能。

隧道新型衬砌装饰材料和新型路面材料也是隧道运营节能的重要方面。衬砌装饰材料和路面材料的反射系数对隧道照明亮度效果和照明均匀度有着重要影响，从而影响到隧道运营照明能耗。另外随着隧道运营时间的增长，受汽车尾气、油烟和灰尘等因素的影响，隧道的照明效果会逐渐下降，如果能够研制出吸噬油烟、排斥灰尘的新型衬砌装饰材料，则更是隧道运营所亟需的，目前隧道静电除尘技术也正在研究与探索中。

3.4 新型控制技术应用

新型控制技术主要包括照明设施控制技术和通风设施控制技术两大类。目前国内专家学者对照明控制技术、控制算法和控制策略的研究较多，由最初的手动控制、全天分时段控制逐渐向动态自动控制、模糊控制发展。新型的照明控制技术需要综合考虑隧道内外的气候条件、亮度、平纵线形以及交通流量特征等因素。隧道通风设施控制技术主要有直接控制法、间接控制法、组合控制法、程序控制法、现代控制法以及模糊控制法[8]。新型的通风控制技术需要综合考虑隧道内的CO浓度、能见度、交通流量以及洞外的风向、风速状况等因素。目前在隧道轴流风机的控制方面出现了变频控制技术的应用，变频控制技术在隧道地下风机房的应用环境下，需要解决变频器的有效防护和散热等一系列问题。

4 管理性节能方式

管理性节能主要是在保障隧道运营安全的前提下，通过调整和优化公路隧道运营的管理制度和手段来实现公路隧道用电量的降低，是技术性节能的重要补充。

（1）健全隧道能耗标准、规范体系。综合考虑地理环境、交通流量、隧道长度、运营年限等因素，建立公路隧道能耗设施的配置体系以及能耗限值标准。

（2）加强公路隧道运营节能管理。编制公路隧道运营精细化管理指南，明确规定隧道照明设施、通风设施的开启条件、运行时间以及运营级别，并严格执行隧道机电设施养护规范，做好隧道内机电设备的养护工作，发挥最佳效能，制定有效节能的管理手段，提高运营效率。

（3）强化公路隧道节能考核与评价。综合考虑地理环境、交通流量、隧道长度、运营年限、技术更

新、节能潜力等因素，合理确定各路段所属隧道的节能目标，完善公路隧道节能统计、监测与考核体系，健全公路隧道节能评价制度。

（4）完善公路隧道节能投入机制。针对全国范围内气候条件、能源资源分布、隧道分布以及交通流状况，合理安排节能资金投入，促进公路隧道节能技术创新和推广应用，在保障公路隧道运营安全的条件下，实现节能效果与资金投入的最优化，避免出现“节能不节钱”的现象。

5 结束语

通过对我国公路隧道运营能耗数据的分析研究，表明公路隧道节能潜力存在较大空间。采用现场调研和文献资料分析的方式，从技术性节能和管理性节能两方面，对8类公路隧道节能方式进行了探究分析，阐述了我国公路隧道节能方式的应用现状、应用潜力以及今后的发展方向，为今后公路隧道节能方式的发展提供参考。

参考文献

References

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2012年公路水路交通运输行业发展统计公报[R]. 2012.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin of Industrial Development in Highway and Waterway[R]. 2012.

[2] 张林芳, 张 莹. 高速公路隧道节能分析与探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, (5): 251-253.
ZHANG Linfang, ZHANG Ying. Analysis and Discussion on Energy-saving of Highway Tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technical Edition), 2012, (5): 251-253.

[3] 中华人民共和国行业标准. JTJ026.1-1999公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
Industrial Standard of the People's Republic of China. JTJ026.1-1999 Specifications for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2000.

[4] 涂 耘, 王少飞, 张 琦, 等. “低碳经济”背景下公路隧道照明节能策略[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (3): 14-21.
TU Yun, WANG Shaofei, ZHANG Qi, et al. Strategy for Illumination Energy-saving of Highway Tunnels under the Condition of “Low-carbon Economy” [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (3): 14-21.

[5] 边浩毅, 赵炜华, 刘浩学. 高速公路长隧道夜间中间段最佳照度研究[J]. 公路, 2013, (7): 267-270
BIAN Haoyi, ZHAO Weihua, LIU Haoxue. Study on Optimum Illumination in the Middle Section of Long Expressway Tunnels during Night Time[J]. Highway, 2013, (7): 267-270.

[6] 王亚琼, 谢永利, 赖金星. 隧道钠灯与LED灯组合照明试验研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5 (3): 505-509.
WANG Yaqiong, XIE Yongli, LAI Jinxing. Experimental Research and Application of High Voltage Sodium Lamp and Low Emitting Diode Combined Lighting in Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5 (3): 505-509.

[7] 沈建国, 童华炜, 石 山, 等. 我国现行公路隧道照明规范亟待修正——公路隧道照明节能减排探讨[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (4): 49-54.
SHEN Jianguo, TONG Huawei, SHI Shan, et al. Current Specification and Trends of Highway Tunnel Lighting: A Discussion of Energy-saving Techniques[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (4): 49-54.

[8] 杨 超, 王志伟. 公路隧道通风技术现状与发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7 (4): 819-824.
YANG Chao, WANG Zhiwei. Current Status and Development Trend of Ventilation Technology for Highway Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (4): 819-824.

现代隧道技术

On the Energy-Saving Mode for Highway Tunnels

CHU Chengzan[1,2] *LIU Yuxin*[1,2] *YAN Lin*[1,2]
(1 Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088;
2 Key Laboratory of Road Safety Technology of Ministry of Transport, Beijing 100088)

Abstract To improve energy savings and promote the energy-saving development of highway tunnels in China, this paper analyzes the energy-saving potential of highway tunnels based on research of energy consumption during operation. It proposes eight types of effective modes considering both technicality and manageability: the optimization of design technology, application of new energy resources, application of new equipment and materials, application of new control technologies, modification and revision of the national standard/code system, promotion of energy-saving management, strengthening evaluation and assessment, and improving investment mechanisms. The feasibility and development of each mode is analyzed in detail.

Keywords Highway tunnel; Energy consumption during operation; Energy saving in terms of technology; Energy saving in terms of management

(上接第22页)

On Nondestructive Testing for Cavities in Immersed Tunnel Foundations by the Sand-Flow Method

LI Bangxu *MA Yonglang* *LIU Shangchun*
(China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731)

Abstract Regarding the sand-flow method applied to immersed tunnel foundations, the quality of the sand foundation is directly related to the quality and safety of tunnel construction. However, how to effectively test the construction quality of the sand-flow method has always been a key issue and a major challenge. In this paper, using the construction of an immersed tunnel on Fenjiang Road as an example, a nondestructive testing method is proposed that combines the elastic wave imaging method with the transient Rayleigh wave method based on a full-scale tunnel model test. Additionally, a broadband detector and data analysis software were developed in light of the characteristics of the nondestructive testing. The main influential factors like the hypocenter, coupled mode and acquisition parameter were studied so that the tunnel floor, sand foundation and ground foundation could be layered, and the defects of the sand foundation were identified. The results show that the analyzed results agree well with the actual ones, revealing the feasibility and effectiveness of this testing method.

Keywords Immersed tunnel; Sand foundation; Elastic wave imaging method; Transient Rayleigh wave method