

公路隧道风能利用初探

文/湖南农业大学 江泽鹏 陈力航 宁盼 王雨晴 李海军

从隧道风力特征入手，进行了一系列的风能调查，其中重点调查了单位车流量对于隧道中风速的影响，再结合当今一些常用风力发电原理，从理论上证明公路隧道风力有较高的利用价值，可以解决偏远山区及不能保证长期供电的高速公路隧道的供电问题。

隧道风能特征的调查

为了减少化石能源消耗，绿化环境，人们迫切需求可持续发展的绿色能源，而风能就是一种绿色能源，目前被广泛地应用在风力资源丰富的野外。

在公路建设中有大量隧道，车辆经过时，会产生活塞风。是否可利用隧道风能发电以节约隧道照明的用电量？我们团队以东西走向的年嘉湖隧道进行了实地调查。年嘉湖隧道位于湖南省长沙市开福区境内，全长约1 400 m，高4.5 m，车道宽7.25 m，单洞宽度10.35 m，车流量一直较大，车辆大多以家庭小轿车为主。平均车速60 km/h的车辆在隧道内产生明显的活塞风。

为了更加清楚知晓隧道中可利用风能资源的多少以及是否可以利用这些风能进行发电，就必须了解隧道中风速的大小以及车流量的多少，分析两者是否存在线性相关关系。所以，我们团队首先在年嘉湖隧道对风速大小和车流量多少的数据进行了统计。之后通过现场采集的数据初步分析隧道风能的分布情况。

1. 试验工具

华谊MS6252A风速仪，计时器，3 m长卷尺，进行现场测量。

2. 试验方法

年嘉湖隧道是东西走向的隧道，选取年嘉湖隧道入口、出口和中间为调查地点。当日天气情况为：温度为14~24℃，风向为东南风，小于等于2级（1.6~3.3 m/s）。在年嘉湖隧道的入口，

出口和隧道内距隧道口约700 m处三个位置进行数据采集；测量高度为距地面上2 m进行试验，统计1 min内经过测量点的车流量和记录1 min内测风仪上的最大和最小风速（每次采集数据均间隔3 min），建立车流量与风速的线性相关关系。

3. 试验数据及分析

统计隧道出口，入口和隧道中的车流量，风速等数据，用统计分析软件Minitab对数据进行分析 and 计算（其中平均风速为算术平均值）。

4. 试验结论

可以得到图1平均风速与车流量的散点图和图2中平均风速的直方图，表1中隧道不同位置的平均风速的特征数值。

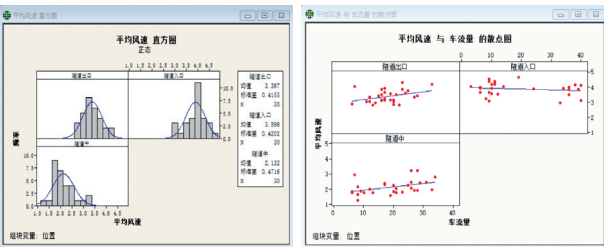


图1 平均风速直方图

图2 平均风速与车流量散点图

表1 试验各点风速统计表

描述性统计：平均风速/（m/s）							
变量	位置	总计数	均值	均值标准误	标准差	最小值	最大值
平均风速	隧道出口	30	3.397 2	0.075 9	0.415 5	2.810 0	4.300 0
	隧道入口	30	3.895 5	0.076 7	0.420 2	2.975 0	4.650 0
	隧道中	30	2.131 5	0.086 1	0.471 6	1.290 0	3.240 0

1) 由图2可知,隧道出口与隧道中风速与车流量相关性较大,随车流量增大而增大;隧道入口风速与车流量相关性较小,与车流量大小基本无关。

2) 通过加权平均值计算可知,隧道入口平均风速为3.895 m/s,隧道中平均风速为2.131 m/s,隧道出口平均风速为3.397 m/s,隧道入口、出口风速较大。

隧道中风力发电可行性分析

由于公路隧道中要安装照明灯,温控设备以及其他的基础设施,所以要是安装风力发电机,选择隧道两边的空间作为安装地点较为合适。如若安装风力发电机一般的公路隧道也有足够的空间,且不影响车辆的运行和隧道的通风。

以图3所示隧道断面为例,拟定风力发电机布局方案。考虑台阶的宽度大约为0.8 m,为了不影响车辆的正常通行要保证风轮外缘不超出台阶边界,所以选取风轮的回转半径为0.4 m。与此同时为了充分利用隧道中的风能,采用梅花布局,每个断面可布4~6个回转半径为0.4 m的风扇,每个风扇的受风面积 $S = \pi R^2 = 3.14 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^2 = 0.5024 \text{ m}^2$ 。隧道安装风机的位置如图4所示。

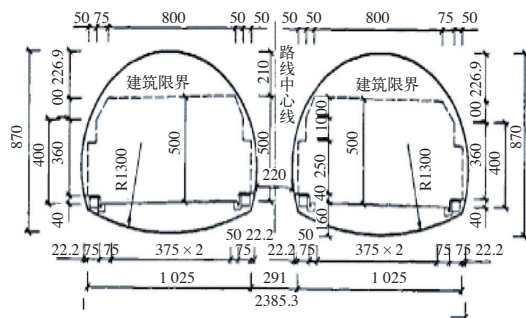


图3 隧道断面示意图

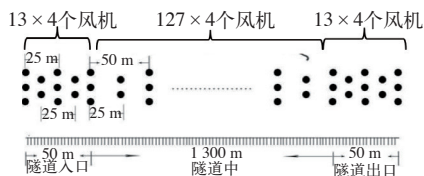


图4 隧道风机布局示意图

通过查阅资料和分析,风能计算公式为 $P = 1/2 \rho s v^3$,这里取偏小转换系 $C_p = 0.3$ 。因目前有关小风扇的发电功率计算,还没引起普遍关注。缺少相关资料。本文的计算是按中大型风机的理论计算的,存在计算误差;小型风机的发电功率还需以试验数据为准,这也是下一步研究的重点方向。根据上述风扇回转半径及布局方案,得到不同位置平均功率(因时间较短,只采集数据点为

入口、中部和出口。此数据并不完善,仅用于前期的初步估算。若需更准确的数据,则需要按风扇布局位置,逐点采集风速)如表2所示。

表2 隧道各点风速与功率对应表

序号	平均风速	功率/W	序号	平均风速	功率/W	序号	平均风速	功率/W
1	3.995	6.184 7	31	3.235	3.283 9	51	3.855	5.557 1
2	3.945	5.955 4	32	2.065	0.854 1	52	3.68	4.834 1
3	3.59	4.488 0	33	1.79	0.556 3	53	3.505	4.176 7
4	2.975	2.554 1	34	2.83	2.198 5	54	3.35	3.646 8
5	3.885	5.687 8	35	0.95	0.691 9	55	3.13	2.974 4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	4.21	7.238 0	46	1.805	0.570 4	76	3.87	5.622 2
27	3.66	4.755 7	47	1.29	0.208 2	77	3.59	4.488 0
28	3.855	5.557 1	48	2.105	0.904 7	78	3.61	4.563 5
29	3.68	4.834 1	49	1.575	0.379 0	79	3.925	5.865 3
30	4.03	6.348 7	50	1.895	0.660 1	80	4.3	7.712 2
平均值		5.923 8			1.081 2			3.971 2

注:风速单位均为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对数据进行分析 and 计算。

用统计分析软件Minitab对功率与位置之间关系进行的分析,如图5所示。并使用TuKey法对信息进行分析,表3中不共享字母的均值之间具有显著差异。Tukey95%整体置信区间位置,水平间的所有配对比较。单组置信水平=98.06%,表示均值的概率分析有98.06%的可信度,说明这个均值可用。

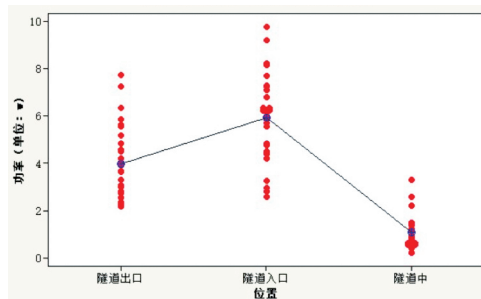


图5 隧道各处与功率单值图

表3 隧道各处风速均值图

位置	N	均值	分组
隧道入口	30	5.924	A
隧道出口	30	3.971	B
隧道中	30	1.081	C

注:风速单位均为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

上表是隧道入口、出口和中间不同位置的面积 $S = 0.5024 \text{ m}^2$,风轮平均产生的功率。把隧道出口、入口长度都以50 m计算,其余都算隧道中间。考虑风扇安装位置安全性和风经风扇后的能量衰减的问题,以及尽可能最大限度地利用风能,风扇安装方式采用梅花布局。隧道风扇的具体布局如图4所示。

(下转第34页)

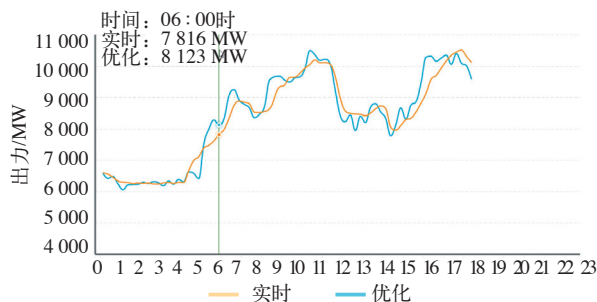


图2 机组调节控制曲线图

现大范围闭环控制，将众多分散的小风场等值成若干虚拟的大风机，利用一部分非调频水电机组的快速调节能力部分补偿虚拟大风机的功率预测偏差，相当于在某个风电集群中引入一台小容量平衡机，从而等效于大幅度提高了某个风电集群的风功率预测精度，部分实现风电准确预测、能准确控制的理想目标，也将为未来风电作为可控电源参与市场交易创造一定基础条件。**EA**

(上接第28页)

由图4可得隧道入口、中间、出口能安装的风力发电机个数 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为42、508、42。计算隧道内单位时间产生的总功率

$$\begin{aligned} P &= n_1 P_{\text{入}} + n_2 P_{\text{中}} + n_3 P_{\text{出}} \\ &= (42 \times 5.9238 + 508 \times 1.0812 + 42 \times 3.9712) \text{ W} \\ &= 964.8396 \text{ W} \end{aligned}$$

其中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别代表隧道入口、中间、出口处所安装风力发电机的数目。一天内隧道风力发电机能产生的总能量

$$Q = PT = 964.8396 \times 60 \times 60 \times 24 \text{ J} = 83\,362\,141.4 \text{ J}$$

额定功率为10 W的LED灯在额定工作环境下一天所消耗的电能为

$$Q_a = 10 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ J} = 864\,000 \text{ J}$$

所产生的电能能驱动额定功率为10 W的LED灯在额定工作环境下24 h照明的数量为

可得产生的电能可驱动96盏10 W的LED灯工

$$N = \frac{Q}{Q_a} = \frac{83\,362\,141.4 \text{ J}}{864\,000 \text{ J}} \approx 96$$

作24 h，综合以上分析结果，我们初步得出隧道风能有一定的利用价值。

应用前景及进一步研究方向

1. 应用前景

在能源紧缺的当今，利用风能发电已经逐渐成为代替能源方式的其中一种。而隧道因车辆运动产生活塞效应，其风力相对外界大很多，由我们实际采集的数据以及对数据进行的分析可以明显看出利用隧道风力发电可节省的电能也十分的

可观。根据交通运输部综合规划司2015年4月30日发布的2014年交通运输行业发展统计公报，我国已经是世界上公路隧道最多发展最快的国家，近十年来，公路隧道年均增长率达24%，公路隧道的重要性日益凸现。截止到2014年，全国公路隧道为12 404处，全长达1 075.67万m。按年嘉湖隧道数据进行能量的初步计算出是一个较为可观的能量数值。并且我国地形复杂，在较多偏远山区修建隧道保证道路畅通已实属不易，安装电力系统则更加困难。但往往这些地区的风力要远远大于城市，可利用的风能也就更多。既可以节约资源，又可以降低隧道修建难度，所以此项研究有十分可观的发展前景。

存在的不足

由于本次试验时间、资源方面都受到限制，有些没有考虑到的因素还没有进行进一步研究，所以这次试验还可以从以下几个方面进行改进。

将车辆的类型分类，估算车辆的速度。因为两者对风速都会有影响。

天气情况是否会对隧道风产生影响，因数据采集过少，无法做出判断。

由于年嘉湖隧道入口不远处有一红绿灯，会从很大程度上影响单位时间内车流量的数量，可以从隧道另一侧进行相应测量。

可以考虑隧道的走向，选择多组不同走向的隧道进行相同测量，看二者是否有关。**EA**