文章编号：1671-6612（2026）05-743-07

地铁隧道内列车活塞风的利用研究

林　宇[1]　胡晓敏[2]　李　乐[2]　曹　卓[2]

（1.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司　杭州　311122;
2.绍兴市轨道交通集团有限公司　绍兴　312099）

【摘　要】　地铁隧道内由于列车的活塞效应，会形成周期性的活塞风。活塞风的收集利用是近年来具有较高创新潜力的研究方向之一。以绍兴 2 号线中隧道～洞口段内的排烟射流风机为研究对象，采用理论分析与实验验证相结合的方式开展活塞风利用的初步可行性论证，并据此提出相应的设计方案。前期通过隧道通风模拟软件 STESS 搭建节点模型，得出隧道内纵向风速等特征值。活塞风速模拟值约在 0.5～5.3m/s 之间，根据此特征值，搭建实验台模拟出隧道内活塞风环境，对旋转参数和电路参数进行实测。针对其发电特性，后端匹配相应充放电模块，设计出完整的活塞风发电利用系统。从实测结果来看，单机在利用期内平均发电功率为 90W，方案虽然可行，但远期每日发电量在 1kWh 以下，需要通过增大发车频次等措施，方可有利用价值。

【关键词】　地铁隧道；活塞风；储能；射流风机

中图分类号　U453.5　　文献标志码　A

Research on the Utilization of Train Piston Wind in Subway Tunnels

Lin Yu[1]　Hu Xiaomin[2]　Li Le[2]　Cao Zhuo[2]

(1.Power China HuaDong Engineering Co., Ltd, Hangzhou, 311122;
2.Shaoxing Rail Transit Co., Ltd, Shaoxing, 312099)

【**Abstract**】　Due to the piston effect of trains in subway tunnels, periodic piston wind is formed. The collection and utilization of piston wind is one of the research directions with high innovation potential in recent years. Taking the smoke exhausting jet fan in the tunnel-entry section of Shaoxing Subway Line 2 as the research object, a preliminary feasibility demonstration of piston wind utilization is carried out by combining theoretical analysis and experimental verification, and corresponding design schemes are proposed accordingly. In the early stage, a node model is built based on the tunnel ventilation simulation software STESS to obtain characteristic values such as the longitudinal wind speed in the tunnel. The simulated value of piston wind speed is approximately between 0.5 and 5.3m/s. Based on this characteristic value, an experimental platform is set up to simulate the piston wind environment in the tunnel, and rotation parameters, circuit parameters are measured. For its power generation characteristics, a corresponding charging and discharging module is matched at the back end to design a complete piston wind power generation and utilization system. According to the measured results, the single-machine average power generation output is 90W during the utilize period. Although the scheme is feasible, the daily power generation in the long term is below 1kWh, which requires solutions such as increasing the train departure frequency to make it useful.

【**Keywords**】　Subway tunnel; Piston wind; Energy storage; Jet fan

---

作者（通讯作者）简介：林　宇（1995-），男，硕士，工程师，E-mail：lin_y6@hdec.com
收稿日期：2026-06-21

0　研究背景

城市轨道交通是一个庞大的地下线网组织，地下环境在正常工况下主要依靠活塞效应通风，活塞风井或隧道洞口是地下环境与地面空气交换的媒介。如图 1 所示，列车在隧道中行驶，前端所排挤的空气无法完全绕流至车辆后方，有相当一部分空气被推向前方，列车尾部由于车辆驶离而形成的空穴也不能由附近的空气及时补充，吸引远处的空气流入补充。简要来说，活塞风即列车在地下区间行驶时，带动隧道内空气快速流动而形成的周期性气流[1]。

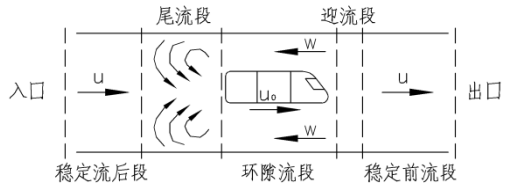


图 1　活塞风形成原理

Fig.1　Formation principle of piston wind

活塞风一般通过隧道洞口或车站风井散失到地面大气中，可以视为是气流动能的一种损失。因此，将隧道中风能进行收集，通过设备转化为其他形式的能量，可减轻系统的部分能耗，也存在一定的经济收益。

国内部分研究团队对地铁隧道内的活塞风利用做出了一些理论研究或实验验证。孙振刚[2]、任钰[3]等人提出，活塞风推动叶片转动，风力机使用永磁同步发电机，输出经过整流和逆变过程完成交-直-交的转换。汪浩[4]设计出由羽状风叶、差速装置和机械蓄能装置组成的风力发电设备，进行了相似性实验，验证了活塞风利用的可行性。朱殷桥[5]将风力发电装置设置在风井风道中，并设计出用于广告灯箱的储能供电系统。简立[6]将隧道中的消防风扇与风能利用结合，设计风力发电、转换、储存装置，并进行了经济效益估算。在设备硬件方面，陈祥[7]设计出一种叶轮传动装置，由于隧道内活塞风具有周期性，装置旨在延长叶片的转动时间。此外，张祖涛等[8]借助风轮转动驱使压电片形变、卢源等[9]采用安装于地面风井处的垂直轴风轮，分别设计了活塞风驱动的发电装置，可作为其他形式的活塞风利用系统的参考。综合来看，将隧道活塞风利用系统应用到实际线路运营，目前尚未有突破。

1　活塞风利用的条件

1.1　活塞风利用点位的选择

依托绍兴地铁工程（本线列车横截面积为 10.56m^2，最高速度为 120km/h，隧道起于檀渎站，经过 2850m 盾构段+450m 明挖段后转为地上），其隧道通风原理如图 2 所示。

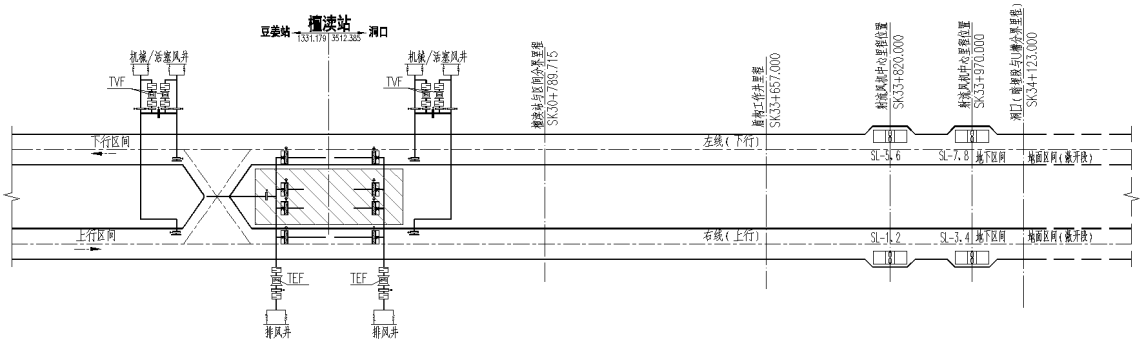


图 2　车站～洞口隧道通风系统原理图

Fig.2　Schematic diagram of tunnel ventilation system from station to portal

考虑到若只是简单地将风力发电装置安装在隧道中，叶片阻挡活塞风的经过，将对地铁的行驶产生阻碍作用[5]，使列车运行的能耗上升。同时地铁的盾构隧道断面空间有限，很难找到多余的安装空间，且存在掉落风险，影响行车安全。因此盾构段区间不是活塞风利用的最佳研究对象。

为使叶片的阻碍作用更小，隧道内射流风机可作为利用对象[6]。首先射流风机是隧道内的既有设备，但仅在消防工况下启用，平时工况下，其自身受活塞风影响而空转，转动过程中产生的动能未被有效利用；其次射流风机一般在明挖段或车站以壁龛式安装，有富余的设备安装空间。将射流风机用于活塞风的收集发电，由于其闲时自身受活塞风力空转，故不会增加列车行驶时的风阻，也不会增加

设备投资。

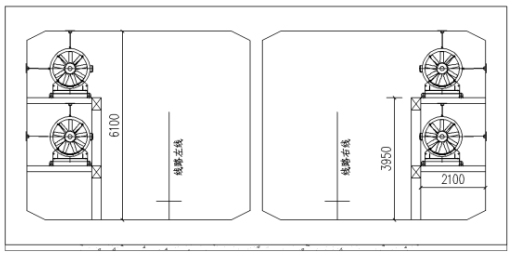


图 3　明挖区间射流风机段断面图

Fig.3　Sectional view of jet fan segment in open excavation section

选择檀渎～洞口段明挖区间作为活塞风利用的研究对象。其断面图如图 3 所示，其标准断面积 28.3m²，装有射流风机段的断面积 43.7m²。射流风机段的隧道断面局部扩大，可以缓解叶轮对行车造成的阻力影响。

1.2　活塞风的特性

为了解活塞风特征，得出地下线网中活塞风的风量信息，利用地铁隧道通风模拟软件 STESS，以一维定常流动的计算方法搭建檀渎站～洞口隧道通风网络模型。其局部节点图、各子段几何参数如图 4 所示。其他输入参数：日发车计划（见表 1）、列车最大运行速度 120km/h、车辆断面积 10.56m²、壁面摩擦系数 0.033、列车牵引计算曲线。从 STESS 导出活塞工况下风量的瞬时值，隧道（右线）行车对数为 8 对/h 时，檀渎～洞口区间的风量-时间变化值如图 5 所示。

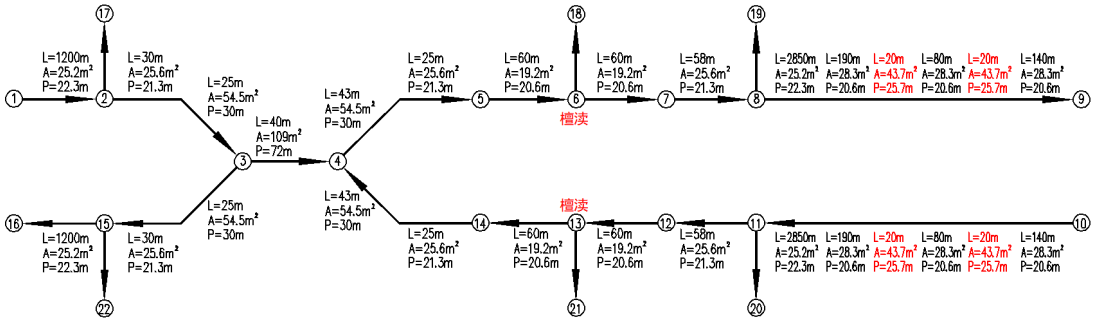


图 4　隧道通风计算模型局部节点图

Fig.4　Local node diagram of tunnel ventilation calculation model

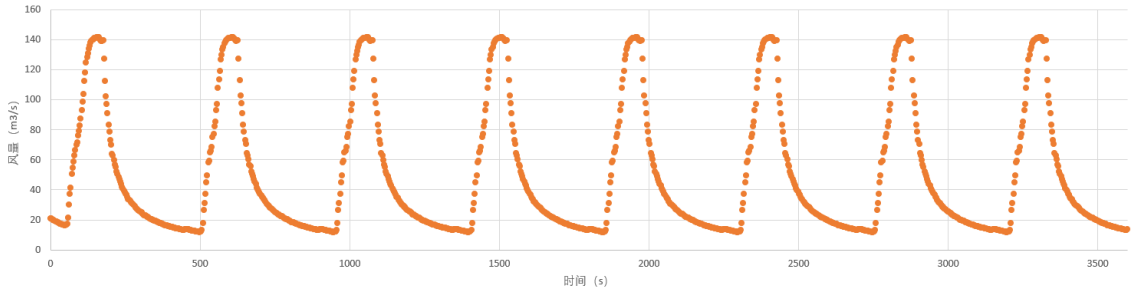


图 5　正线区间活塞风量随时间变化曲线

Fig.5　Curve of piston air volume variation with time in the main line section

从模拟中可以得到活塞风的以下特征：

（1）活塞风的周期性与行车对数相关，波峰的重现次数=行车对数。

（2）对单洞单线隧道而言，隧道内活塞风的气流始终与行车方向一致。风速范围在 0.5～5.3m/s 之间。

（3）活塞风量的峰值与列车最大车速正相关，但不是线性关系。

（4）模拟将空气视为一维不可压缩流体，由不可压缩流体连续性微分方程可知，在每个时刻，一个区间内任意断面通过的风量值相等，风量与此时车辆所在的位置无关。

1.3　能量转化过程

风机使用永磁同步电机，叶片在风力作用下，将空气动能转换为叶轮转动的机械能，使发电机得到相应的转速，发电机转子向回路提供可调频率的电压。

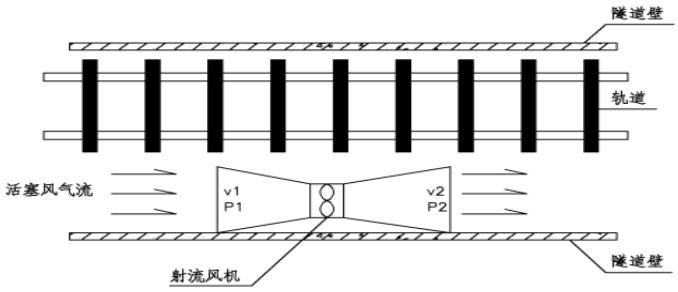


图 6　射流风机前后示意

Fig.6　Front and rear of jet fan

如图 6 所示，以风力发电设备为研究对象，对于气流推动叶片转动的过程，有能量方程：

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2+\frac{N}{G} \tag{1}$$

式中：N 为从叶片中提取的功率，W；G 为进入转子的气流体积流量，m^3/s；ρ为空气密度，kg/m^3；p 为气流静压，Pa；v 为风速，m/s。

当风机前后面积不同时，式（1）也可写成：

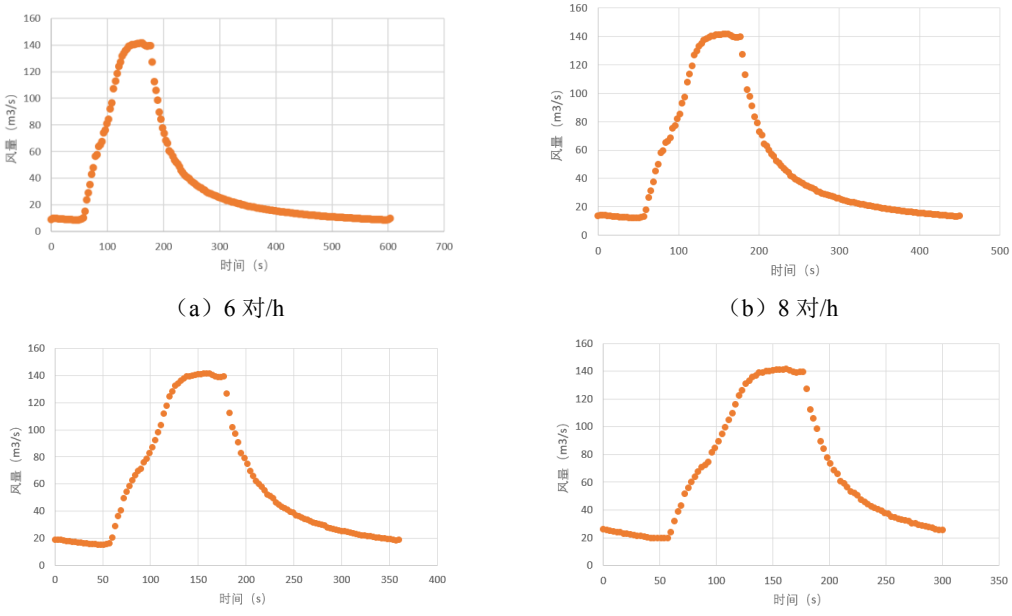
$$N=G\cdot\left(p_1-p_2\right)+\frac{1}{2}\rho G^3\left(\frac{1}{F_1^2}-\frac{1}{F_2^2}\right) \tag{2}$$

式中：F_1、F_2 分别为风机前后过风面积，m^2。

由推导可知，集流罩面积 F_1 负责从隧道中获取更多分配的流量，扩散罩面积 F_2 负责将流量中的动能转化为功率。为使功率提升，设计中应使 F_1 尽可能增大，同时需保证 $F_2>F_1$，才能回收动能。

1.4　基于明挖区间的活塞风利用系统

在一个行车周期内，右线（车辆出洞）活塞风量随时间变化详情如图 7 所示（0 时刻为列车头部进入檀渎站站台），行车对数分别为 6、8、10、12 对/h。



（a）6 对/h　　（b）8 对/h

（c）10 对/h　　（d）12 对/h

图 7　一个行车周期内右线区间纵向风量的变化

Fig.7　Curve of longitudinal air volume within the right track section during a train operation cycle

区间内纵向风量的峰值与列车加速基本同步，列车加速至最高速度时，纵向风量达到最大值。若将曲线叠加，可见不同行车对数下，一个周期内风量的变化趋势相同，风量波峰（即能够利用发电）持续的时间相同。行车对数较低时，活塞风量大部分时间处在较低的水平。左线的活塞风量趋势、峰值、持续时间等与右线较为类似。

列车日行车计划和风量积分平均值的关系如表 1 所示。

表 1　列车日行车计划和一个行车周期内的活塞风量平均值

Table 1　Daily train operation plan and the average piston air volume within a single operation cycle

	行车对数/h^{-1}			右线平均值/(m^3/s)			左线平均值/(m^3/s)		
时刻	初期	近期	远期	初期	近期	远期	初期	近期	远期
5:00~6:00	6	7	8	39.3	44.4	49.3	35.8	40.9	45.8
6:00~7:00	8	10	12	49.3	58.4	66.9	45.8	54.9	63.6
7:00~9:00	8	12	14	49.3	66.9	72.2	45.8	63.6	71.0
9:00~17:00	8	10	12	49.3	58.4	66.9	45.8	54.9	63.6
17:00~19:00	8	12	14	49.3	66.9	72.2	45.8	63.6	71.0
19:00~20:00	8	10	12	49.3	58.4	66.9	45.8	54.9	63.6
20:00~21:00	6	8	10	39.3	49.3	58.4	35.8	45.8	54.9
21:00~22:00	6	7	8	39.3	44.4	49.3	35.8	40.9	45.8
22:00~23:00	6	6	6	39.3	39.3	39.3	35.8	35.8	35.8
23:00～次日 5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0

按照排烟计算工况，在檀渎～洞口段明挖区间距离洞口 150m、250m 处各设置一组 11.2#射流风机。射流风机经产品定制后，在平时工况下起风力发电机的作用，在火灾工况下起射流风机的作用，通过电动装置切换两种状态。结合发电机组所处活塞风场的周期性变化规律，对发电机组起动风速及有效工作风速范围进行程序设定，实现对蓄电池组进行相对稳定的连续充电。系统工作原理如图 8 所示。

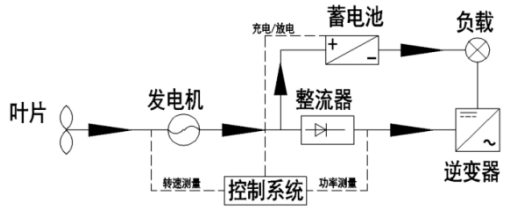


图 8　射流风机发电工作原理

Fig.8　Working principle of jet fan power generation

2　风机实验研究

2.1　实验设计

在得到活塞风量的模拟值后，需设计实验以获取发电量数据。因射流风机与发电机实为一体，故电动机转子即发电状态下的转子，采用三相交流永磁同步电机，在负载原动机运行时逆向发电输出。在这一前提下，设计搭建如下实验装置：

（1）实验采用管内流，设置约 12 米长的圆管道。采用一台变频风机作为驱动模拟等效活塞风源。将驱动风机连接至管道的起点，并设置一定长度的均流段。在不同的频率设置下，管内流风速可以达到 3～15m/s 不等的管内流风速。

（2）在管道终点设置被测射流风机（风机为 10 叶片，直径 1120mm）。

（3）在被测风机出口处设置红外线转速仪，测量叶片转速。在管道中部开小口，将风速仪和压力计伸入，测量管内气流速度和静压。

（4）在被测风机的电机输出端子上连接导线，接至不同大小的负载之上，负载电路参数通过示波器显示读数。

实验所需器材：驱动风机 1 台、被测风机 1 台、金属圆管、U 形压力计 1 支、红外转速仪 1 支、热线风速仪 1 支、10Ω电阻 6 只、示波器 1 台、导线若干。实验装置搭建完成后如图 9 所示。



图 9　实验台搭建

Fig.9　Laboratory bench construction

2.2　实测数据收集与分析

驱动风机分别设置在 20～50Hz 的频率下，吹动射流风机的叶片转动，测量记录每一组条件下管内风速、静压、叶片转速和电路参数（测量值取三次测量

的平均值）。更换负载后，重复以上实验。得到实验　　数据如表 2、表 3 所示。

表 2　空载状态下实验结果

Table 2　Experimental results under no-load condition

驱动风机频率/Hz	气流参数			电路参数		
	叶片前风速/(m/s)	叶片前静压/Pa	叶片转速/(r/min)	电压有效值/V	频率/Hz	功率/W
15	2.8	20	18	5.5	1	——
20	5.5	30	104	28.6	5	——
25	7	30	168	47.5	8	——
30	9	50	227	63.6	10	——
35	11	60	288	77.7	14.2	——
40	13.2	65	340	94	16.9	——
45	14.8	75	395	104.6	19.8	——

表 3　负载 10Ω状态下实验结果

Table 3　Experimental results under the condition of load 10Ω

驱动风机频率/Hz	气流参数			电路参数		
	叶片前风速/(m/s)	叶片前静压/Pa	叶片转速/(r/min)	电压有效值/V	频率/Hz	功率/W
20	3.8	30	17.7	4.6	0.85	2.12
25	5.1	55	36.5	10	1.8	10.01
30	6	70	58	15.4	3	23.72
35	7.4	95	84	22.5	4.1	50.63
40	9.5	130	112	30.8	5.5	94.86
45	10.8	155	148	40.5	7.2	164.03
50	12.6	175	184	50	9	250.00

对上述数据进行分析，可以得到以下结论：

（1）管内风速的提高，叶片转速近似于线性地提高。气流全压和电功率近似于平方关系。在相同的风速下，外接负载以后，叶片转速相比空载情况下降 40%～65%。

（2）叶片转速和产生的功率近似于三次方关系，这一点可以类比于风机通风工况下，消耗的电功率与叶片转速的关系。

3　后端模块研究

3.1　风机产生电能特性

根据实验情况，当风速在 2m/s 以下时，活塞风无法推动叶片转动。活塞风每次波峰取风量在 100m^3/s 以上的 80s 为利用时段。一个周期内的平均风速约为 6.13m/s，平均发电功率约为 90W，计算可得每台风机在一个周期内发电量约为 7200J。取每个周期为最小分割对象计算发电量，风机运行总时长取决于行车数量，结合运营年段，通过发电功率与时间–转速曲线，预估风机发电量如表 4 所示。

表 4 风机发电量估算

Table 4　Estimation of wind turbine power generation

年段	每天经过车次	一个周期内发电量/kWh	单台全天发电量/kWh	所有风机全天发电量/kWh
初期	136	0.002	0.272	2.176
近期	176		0.352	2.816
远期	208		0.416	3.328

3.2　充放电装置组成与工作原理

针对隧道场景，设计风机控制逆变一体机，其基础功能包括：

（1）风机控制：支持两路 500W 风机接入，实时采集风机转速，适配三相 AC10~70V 输入，动态跟踪风机发电最大功率点，实现发电的稳定控制与高效电能采集，可靠接收三相交流电。

（2）发电转换：由控制板将交流电经整流、稳压及最大功率点优化后，转化为直流电能，用于 12V、100Ah 铅酸电池或直接为负载供电。

（3）电池管理及监控：内置充电器，支持市电或风力机电能为电池充电，自动控制充电启停；实时采集电池状态与风机控制模块状态。

（4）逆变输出与切换：内置 1kW 离网逆变模块，将 12V 电池转换为 AC220V 为隧道内负载供电；同时具备 220V 市电接入功能，可实现风能与市电供电的切换，保证负载不中断。

3.3　智能切换逻辑

由于隧道活塞风的特点（周期性、间歇性），充放电模块的切换逻辑核心为：

（1）优先风能供电，在达到启动转速后，输出三相 AC10~70V，风机控制模块启动最大功率跟踪功能，优先由风力为负载供电，剩余电能经控制板转换后为 12V 铅酸电池充电。

（2）当风机发电功率＜负载功率时，或蓄电池 SOC 低于设定值时，自动将隧道负载切换为 220V 市电供电；当蓄电池 SOC 高于设定值时，或风机恢复正常发电，发电功率＞负载功率时，自动将隧道负载切换为电池逆变供电，优先利用电池电能。

（3）当风机需要正常启用通风时，由控制器接收信号，自动切断发电回路，风机进入通风工况运行。

4　结论

（1）利用隧道内既有消防风机兼做活塞风利用装置，可避免其他活塞风利用形式的弊端，具有较高的可行性与独创性。

（2）单洞单线隧道内活塞风量的变化以周期为最小研究单位，在线路条件下活塞风量模拟值约为 20~140m^3/s，每周期内可利用的时间范围约为 80s。在风机前后设集风罩可进一步扩大风量。

（3）实验得出模拟活塞风条件下输出的电路参数，电压在 10～50V 之间，单机单车次周期内发电量约为 7200J。

（4）匹配后端储能模块后可设计出完整的活塞风利用发电系统。然而由于线路车次和风机数量的限制，发电量总体处于较低的水平，但绍兴 2 号线仍然是活塞风利用系统进入地铁实际运营的首次创新应用，可作为其他地区在发车频次更高、射流风机数量更多、集风罩安装条件更好的线路上应用的参考。待电池储能技术得到进一步发展后，本系统有望取消市电供电，将活塞风产生电能就地消纳，减少隧道内原有照明供电的建设成本。

参考文献：

[1] 任明亮,陈超,郭强,等.地铁活塞风的分析计算与有效利用[J].上海交通大学学报,2008,(8):1376-1380,1391.

[2] 孙振刚,魏德仙,谢坚伟,等.地铁隧道风力发电系统研究[J].可再生能源,2016,34(9):1333-1341.

[3] 任钰,宋磊,马李琼,等.基于地铁风能的广告牌设计[J].西安交通工程学院学术研究,2022,(1):7.

[4] 汪浩,张骁勇.利用地铁隧道风能发电的设计与研究[J].大学物理实验,2012,25(4):9-13.

[5] 朱殷桥,唐龙.基于地铁隧道的风力发电利用系统研究[J].技术与市场,2014,21(8):10-12.

[6] 简立,童精中,申大为,等.基于地铁隧道消防设备的绿色活塞风能利用系统[C].北京:中国土木工程学会,2012.

[7] 陈祥.一种隧道风力发电装置[P].中国专利:CN110159487B,2020.

[8] 张祖涛,漆令飞,许攀,等.一种隧道活塞风发电机构[P].中国专利:CN109113936B,2019.

[9] 卢源,卢迪,张喆姝,等.一种以地铁活塞风为动力的风动装置[P].中国专利:CN216665812U,2022.