doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.06.021

地铁车辆基地高大厂房纵向诱导通风系统的应用

李国庆，孟　鑫，张宇明，张晓伟，王鲁平，马惠颖，马　骁
（北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100037）

摘　要：针对车辆基地高大厂房内传统横向通风系统(风机+风管)存在的相关问题，提出一种纵向诱导通风系统。结合某实际工程，将纵向诱导通风系统与传统横向通风系统进行技术经济对比，分析得知，纵向诱导通风系统增加的初期投资在 4.92 年后即可由节省的电费收回。通过现场测试得出，纵向诱导通风系统开启后工作区域平均风速为 1.1 m/s，运营人员的体感最高温度为 30.3℃，同时噪声能够满足规范要求，库内中部区域 CO_2 浓度得到有效降低，其耗电功率大大降低；与传统横向通风系统的测试结果对比可知该系统显著地改善了运营人员的工作环境。

关键词：轨道交通；高大厂房；纵向；诱导通风；温度；噪声；功率
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2020)06-0134-05

Application of a Longitudinal Induced Ventilation System in Tall Metro Factories

LI Guoqing, MENG Xin, ZHANG Yuming, ZHANG Xiaowei, WANG Luping, MA Huiying, MA Xiao
(Beijing Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: Traditional ventilation systems (axial flow fan + duct) in tall workshops in metro factories encounter various problems. Accordingly, this paper proposes a longitudinal induced ventilation system, which is applied to a metro tall factory to solve traditional ventilation system problems. Combined with a practical project, the longitudinal induced ventilation system is compared with the traditional ventilation system (axial flow fan + duct) in terms of technology and economy. The findings indicate that the initial investment of the longitudinal induced ventilation system can be recovered by the saved electricity cost after 4.92 years. A field test shows that the average wind speed in the working area was 1.1 m/s after the longitudinal induced ventilation system was turned on, and the maximum somatosensory temperature of operators is 30.3℃. The noise can meet the specifications, and the CO_2 concentration in the central area of the warehouse is effectively improved. In addition, the power consumption is greatly reduced. Compared with the test results of the traditional horizontal ventilation system, the proposed system significantly improves the working environment.

Keywords: rail transit; warehouse; longitudinal; induced ventilation; temperature; noise; power

地铁的车辆基地是地铁车辆停放、检查、整备和修理的所在地，是地铁线路的“心脏”。车辆基地的高大厂房内列车停放股道较多，厂房层高较高，一般均超过 6 m；厂房占地面积较大，单个厂房占地面积均超过 10 000 m^2。为厂房设置机械通风系统的主要目的是排除余热；同时某些厂房内车辆维修等工艺过程产生的粉尘、废弃物也能够得以排除[1-3]。

地铁高大厂房内传统的通风系统是采用轴流风机和风管的横向通风系统，基于高大厂房内的接触网等相关专业要求，风管标高至少在 6 m 以上，传统通风系统在高大厂房的上部进行循环，工作人员作业区域

收稿日期：2019-08-23　　修回日期：2019-10-23
第一作者：李国庆，男，教授级高级工程师，博士，从事轨道交通暖通设计及研究工作，ligq@bjucd.com
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC0705000)

风速基本衰减为 0，厂房内 CO_2 浓度相对较高。

目前国内各大城市的车辆基地上盖物业开发项目越来越多，传统地铁高大厂房通风系统要求在上盖地面设置排风竖井、在厂房顶部设置必要的机房，降低了上盖开发的容积率，同时盖下通风系统的噪声及污染物通过顶部风亭传至盖上开发部分，导致盖上开发的建筑品质下降。

为解决上述通风系统存在的相关问题，提出一种纵向诱导通风系统。该系统在高大厂房上部设置诱导风机，在厂房内形成纵向通风系统[4-7]，替代了传统的横向通风系统(风机+风管)。

下面对纵向诱导通风系统在某车辆基地运用库的应用情况进行技术经济分析，同时对现场测试的相关数据进行分析。

1 纵向诱导通风系统的工作原理

如图 1 所示，系统工作时由厂房一侧大门上部引入室外新风，新风由诱导风机在厂房内纵向推送，在人员工作区域形成 1～2 m/s 的纵向风速，携带库内颗粒物和热量的污染空气由厂房另外一侧大门上部的排风口排出室外。纵向诱导通风系统无需在厂房顶部设置风亭，为厂房上部开发创造了良好条件；另外纵向通风系统能够在人员工作区域形成有效的纵向通风风速，提高了运营人员舒适度，并能够有效排除厂房内的余热和污染空气。

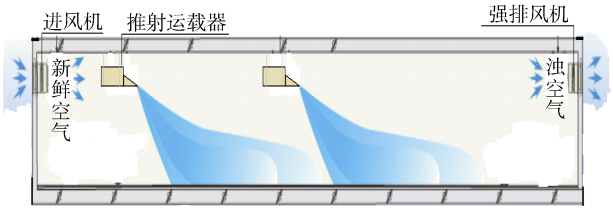

图 1 纵向诱导通风系统原理

Fig. 1 Principle of the longitudinal induced ventilation system

2 技术经济分析

2.1 工程概况

某车辆基地位于夏热冬暖地区，其运用库建筑面积 33 000 m^2，建筑高度 8.9 m，梁下高度 7.4 m。该运用库设置了纵向诱导通风系统。厂房内共设置 147 台诱导风机，风机沿股道设置。

2.2 设备初投资及运营维护费用

运用库内每个防烟分区面积不超过 2 000 m^2，共划分 18 个防烟分区[8]。运用库按照 1 次/h 的换气次数进行风量计算，其计算通风量为 293 700 m^3/h。如果采用传统横向通风系统(风机+风管)，排风系统兼顾排烟，其设备配置及投资如表 1 所示。

表 1 传统横向通风系统(风机+风管)的设备配置及投资

Tab. 1 Equipment configuration and investment of the traditional lateral ventilation system (fan + duct)

序号	设备名称	设备数量	单价/元	价格合计/万元
1	排风兼排烟风机 (133 200/60 000 m^3/h)/台	10	10 万	100
2	金属风管/m^2	12 000	250	300
3	风阀、风口、百叶、消声器等	—	—	52
4	抗震支吊架一项/m^2	—	30	99
5	局部设置工业壁扇/个	610	800	49
6	配套的配电和控制系统	—	—	7
7	土建机房投资	—	—	240
合计				847

若采用纵向诱导通风系统，其设备配置及投资如表 2 所示。

表 2 纵向诱导通风系统的设备配置及投资

Tab. 2 Equipment configuration and investment of longitudinal induced ventilation system

序号	设备名称	设备数量	单价/元	价格合计/万元
1	诱导风机(15 000 m^3/h，1.5 kW)/台	147	3.0 万	441
2	专用排烟风机 (133 200 m^3/h)/台	10	10 万	100
3	送排壁式轴流风机 (20 000 m^3/h，1.5 kW)/台	10	0.5 万	5
4	金属风管/m^2	10 000	250	250
5	风阀、风口、百叶、消声器等			42
6	抗震支吊架一项/m^2		20	66
7	配套的配电和控制系统			7
8	土建机房投资			240
合计				1 151

对两个系统进行了全生命周期的技术经济分析，如表 3 所示。对比年运营费用为估算费用。车辆检修基地全年运营无休，运营时间为 5:00—23:00。对于夏热冬暖地区，其夏季为 5—10 月，夏季闷热潮湿，运营时间通风系统全部在开启状态。过渡季节按照 4 个月的运营情况进行计算，运营人员根据实际情况，平均每天开启 4 h 左右。运营电费按照 0.8 元/kW·h，每个月按照 30 d 进行计算。

表 3　全生命周期的技术经济分析对比

Tab. 3　Comparison of technical and economic analysis of the whole life cycle

	类别	传统(风机+风管)横向通风系统/万元	诱导通风+侧向风管排烟系统/万元
初期投资	通风空调设备投资	501	838
	其他设备投资	7	7
	抗震支吊架	99	66
	土建投资	240	240
	小计	847	1 151
年耗费用	设备年费(按 20 年折算)	30.4	45.6
	土建年费(按 50 年折算)	4.8	4.8
初投资折合年费用		35.2	50.4
年运营费用	年耗电费用	78.4	16.6
	年运行维护费用	0.8	1.0
年综合费用合计	年运营费小计	79.2	17.6
		114.4	68
比例(以传统系统为 1)		1	0.59

根据已运营的实际工程案例，纵向诱导通风系统可以根据运营的实际需要分股道开启，且低频运行能够有效地满足运营需求，增强了运营的灵活性，有效地降低运营能耗。根据工程现场实际测试情况，诱导风机低频运行时，对于两台间隔 25～30 m 的诱导风机布置的条件下，工作区域测试高度为 2 m，此时工作区域的断面风速为 1～1.5 m/s。在此情况下统计运营的实际耗电量，按照诱导风机全部开启，夏季运行时按全部风机 50%频率运行，由于各种因素的影响作用，实际运行的单台风机运行电量平均在 375 W 左右。库门上方的送排风机其运行电量平均为 1 kW/台，按照全部开启进行计算。

依照上述条件，计算纵向诱导通风系统的年平均耗电量。诱导风机年平均运营耗电量为 0.375×147×(18×5×30+4×4×30)×0.8=14.02(万元)；库门上方的轴流风机年平均运营耗电量为 1×10×(18×5×30+4×4×30)×0.8=2.54(万元)。该系统的年平均总耗电量为 14.02+2.54=15.56(万元)。

通过表 1 及表 2 数据显示，纵向诱导通风系统的设备初期投资高于传统横向通风系统(风机+风管)约 304 万元。表 3 数据显示纵向诱导通风系统的年耗电费用为 16.6 万元，比传统轴流风机系统低 61.8 万元，其节电效果非常显著。运营 4.92 年后其增加的初期投资可以收回。

3　现场测试情况分析

夏热冬暖地区高大厂房采用纵向诱导通风系统后，对其进行现场测试分析，同时对采用传统横向通风系统的高大厂房也进行了对比测试分析。

3.1　测试内容

如图 2 所示，运用库的纵向诱导通风系统测试对象为红线所框区域，主要测试的通道为 16A-B 通道，测试点位是诱导风机的正下方以及两台风机的中间区域。车库中的 A、B 段分别是车辆入库方向的顺序，A 段为图 2 中的右半部分，包含有车库的大门和咽喉区，B 段为图中的左半部分，靠近车库的附属用房。

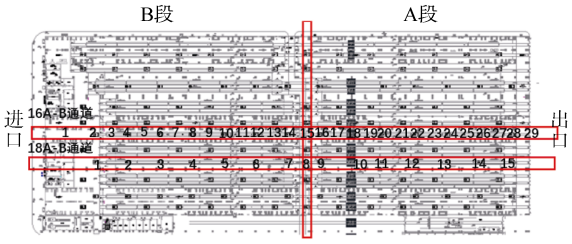

图 2　测试位置

Fig. 2　Test location diagram

测试时间为 2017 年 8 月上旬。测试内容主要包括厂房内的干球温度、湿度、风速、CO_2 浓度、噪声及功率等。诱导风机实物如图 3 所示。

图 3　诱导风机

Fig. 3　Induced fan

3.2　结果分析

3.2.1　工作区温度及风速

选取单独开启 16A-B 通道的全部诱导风机的测试数据，分析 16A-B 通道的工作区风速以及体感温度。一般情况下，人体表面温度大约 32 ℃，但由于湿度和

风速的原因，促使人体表面汗液蒸发，使肌体向外散热从而降低人体表面温度，使人感觉到舒适。由于该项目采用了纵向诱导通风系统，使得人体表面温度和所测的空气干球温度不同，因此采用体感温度数来表征人体的舒适度[9]。

$$t_e=t_a-0.4(t_a-10)(1-U)$$

式中：t_e 为体感温度；t_a 为干球温度；U 为相对湿度。

图 4 和图 5 分别是通道 16A-B 的工作区风速及体感温度分布。图 4 显示工作区的风速分布没有特定规律，风速最低为 0.1 m/s，最高为 2.2 m/s，工作区的平均风速为 1.1 m/s。图 5 显示 16A-B 的工作区体感温度呈现进口低、出口高的趋势，此规律与纵向诱导通风系统的工作特点相符合。测试时室外干球温度为 33℃。测试出口处体感温度 29.4℃，高于入口体感温度 29.0℃。这是因为入口及出口处靠近车库大门，与室外温度相近，空气流动速率较高，因此人的体感温度相对较低。15 点位为通道的中间位置，距离室外最远，受室外环境影响最小，其温度为 30.2℃，低于人体表面平均温度 32℃，工作人员感觉相对舒适。

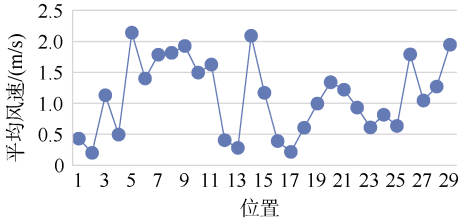

图 4　工作区平均风速

Fig. 4　Working area mean wind speed

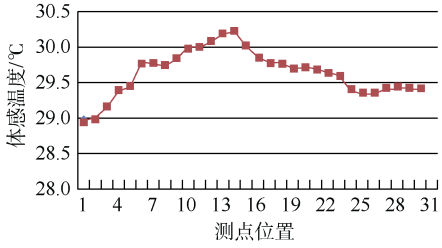

图 5　工作区体感温度

Fig. 5　Workspace body feeling temperature

3.2.2　工作区的噪声

选取某夜间测试数据，当夜间车库内停止作业，所有设备未开启时，测试背景噪声在 30 dB(A)左右；此时厂房内的诱导风机全部开启，中间通道和其他各点处的噪声如图 6 所示，工作区的噪声为 75～80 dB(A)，满足规范要求[10]。

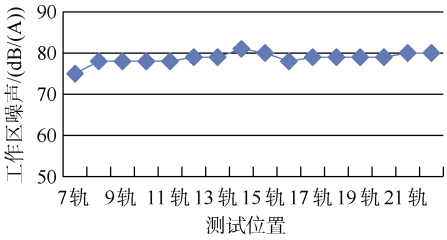

图 6　工作区噪声

Fig. 6　Workspace noise

选取某日上午测试数据，库内有部分车辆在进行检修作业，同时开启库内全部诱导风机。测试库内 16A-B 通道的噪声最大值为 85 dB(A)，最小值为 80 dB(A)。工作区的噪声在人耳承受的标准之内[3]。

3.2.3　CO_2 浓度及 $PM_{2.5}$

选取某日上午测试数据如图 7 和图 8 所示，测试时高大厂房内有车辆进行维护。高大厂房 CO_2 浓度变化相对平稳，由入口的 625～640 ppm 缓步变化到出口处 620 ppm 左右。中间点位处的 CO_2 浓度并没有高于入出口处的浓度。由图 8 可以看出，工作区 $PM_{2.5}$ 浓度在 8～12 μg/m^3，此时库外 $PM_{2.5}$ 浓度为 13 μg/m^3。尽管高大厂房内在进行检修作业，但是库内中部区域的 $PM_{2.5}$ 浓度并没有明显增高，16A-B 股道整体的 $PM_{2.5}$ 浓度变化平稳。说明纵向诱导通风系统对于高大厂房中部的通风换气是有效的。

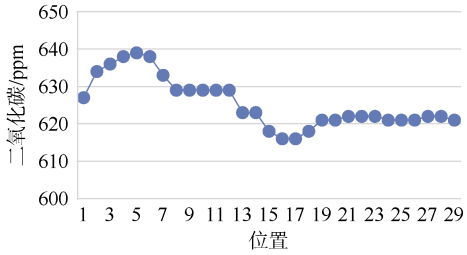

图 7　工作区 CO_2 的浓度

Fig. 7　Concentration of CO_2 in the workspace

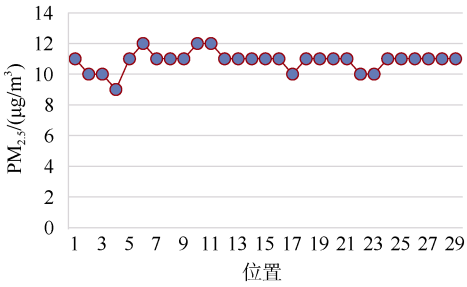

图 8　工作区 $PM_{2.5}$ 的浓度

Fig. 8　Concentration of $PM_{2.5}$ in the workspace

3.2.4 风机运行功率

测试时运用库内全部风机工频运行，总功率为 257 kW，测试时局部风机故障，实际运行的风机有 133 台，平均每台风机的运行功率在 1.93 kW。当单独开启一条通道的 14 台风机时，总功率为 28 kW，单台风机的运行功率为 2 kW。该系统能够智能控制，根据实际检修工作需要开启工作区的风机，相对于传统的横向通风系统(风机+风管)，其运行功率大大降低。

3.3 传统系统的测试结果

对该地区采用传统横向通风系统的高大厂房进行了对比测试，测试结果表明工作区域基本风速为 0，噪声高于 85 dB(A)，运营人员的平均体感温度为 37℃，高于采用纵向诱导通风系统的厂房内的平均体感温度，运营人员感到闷热潮湿。

4 设计回访问卷调查

该系统投入使用后，项目组进行了设计回访问卷调查，通过分析问卷调查的相关内容得出，100%工作人员表示，夏季关闭该系统后无法正常工作。该系统投入使用后运用库内的通风效果得到明显改善，其运行功率大幅降低。

5 结语

综上所述，纵向诱导通风系统的设备初期投资高于传统横向通风系统约 35.9%，但系统能耗低，运行效果好，运营 4.92 年后其增加的初期投资可以收回。分析实际工程的测试数据以及设计回访问卷调查得知，纵向诱导通风系统显著地改善了运营人员的工作环境，降低了通风系统的运营耗电量。尤其对于高大厂房采用纵向诱导通风系统方案时，其上部不用设置排风竖井，更有利于上部开发，对地铁高大厂房通风系统是一种非常好的选择。

参考文献

[1] 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范：GB 50019—2015[S]. 北京：中国计划出版社, 2015: 40.
Design code for heating ventilation and air conditioning of industrial buildings: GB50019—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2017: 40.

[2] 孙永强，张宇明，叶蔚. 封闭式地铁车辆检修库通风模式模拟比选研究[J]. 轨道交通暖通空调，2017，47(5): 42-47.
SUN Yongqiang, ZHANG Yuming, YE Wei. Simulation and study on different ventilation modes for closed underground railway vehicle service workshop[J]. HV&AC, 2017, 47(5): 42-47.

[3] 邰彦寰，张旭，叶蔚，等. 某地铁检修库不同通风模式研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(3): 82-85.
TAI Yanhuan, ZHANG Xu, YE Wei, et al. Study on different ventilation systems of a study service workshop in Shanghai[J]. Building energy & environment, 2016, 35(3): 82-85.

[4] 李炎锋，崔彦强，常琳，等. 地下车库射流诱导通风的数值模拟研究[J]. 广西大学学报, 2017, 42(1): 365-370.
LI Yanfeng, CUI Yanqiang, CHANG Lin, et al. Numerical simulation of jet ventilation for underground garage[J]. Journal of Guangxi University, 2017, 42(1): 365-370.

[5] 梁海嵘. 地下汽车库诱导通风系统的设计初探[J]. 大众科技, 2016, 18(6): 32-33.
LIANG Hairong. Analysis of inductive ventilation system's design in the underground garage[J]. Popular science & technology, 2016, 18(6): 32-33.

[6] 李晓冬，岳峻岷，陆亚俊，等. 地下车库中诱导通风方式的数值模拟[J]. 哈尔滨商业大学学报，2003，19(5): 32-33.
LI Xiaodong, YUE Junmin, LU Yajun, et al. Study on application of inductive ventilation system in underground parking[J]. Journal of Harbin University of Commerce Natural Sciences Edition, 2003, 19(5): 32-33.

[7] 林国真. 地下车库无风管诱导通风系统的优化研究[D]. 天津：天津大学, 2008.
LIN Guozhen. Optimizing research on ductless inductive ventilation system for underground car parks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[8] 建筑防烟排烟系统技术标准：GB 51251—2017[S]. 北京：中国计划出版社, 2017: 24.
Technical standard for smoke management systems in buildings: GB 51251—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017: 24.

[9] 刘璟瑜. 空气湿度和风对体感温度的影响[J]. 河南气象, 2003(3): 34.

[10] 工业企业噪声控制设计规范：GB/T 50087—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2014: 4.
Code for design of noise control of industrial enterprises: GB/T 50087—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2014: 4.

（编辑：王艳菊）