

文章编号: ISSN1005-9180(2024)05-0019-05

地铁隧道通风系统设备故障统计分析及RAM指标分配

冯腾, 雷崇, 夏继豪

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉, 430063)

[摘要] 通过调研华南某地区3条地铁线路近五年隧道通风系统故障数据, 分析设备运营维护薄弱环节, 得到隧道通风系统各关键设备的故障类型、故障原因以及各设备类型的故障数目和比例, 提供故障检修及维护建议; 综合考虑设备故障率和设备数量, 结合各设备故障数和平均修复时间MTTR, 计算隧道风系统各关键设备平均无故障工作时间MTBR, 该RAM指标可供同行参考。

[关键词] 地铁隧道通风系统; 故障分析; 薄弱环节; 平均修复时间; 平均无故障工作时间

[中图分类号] TU834.4 [文献标志码] B doi: 10.3969/J. ISSN. 1005-9180. 2024. 05. 0005

Statistical Analysis of Equipment Faults in Subway Tunnel Ventilation System and Allocation of RAM Indicators

FENG Teng, LEI Chong, XIA Jihao

(China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: By investigating the fault data of the tunnel ventilation system in subway stations, analyzing the weak links in equipment operation and maintenance, the types and causes of key equipment faults in the tunnel ventilation system, as well as the number and proportion of faults in each equipment type, were obtained. Taking into account the equipment failure rate and quantity, combined with the number of equipment failures and mean time to repair (MTTR), mean time between failure (MTBR) of key equipment in the tunnel air system is calculated. The RAM index can be used as a reference for peers.

Key words: Subway Tunnel Ventilation System; Fault Analysis; Weak Links; Mean Time to Repair; Mean Time Between Failure

地铁车站机电运营耗费了大量人力物力, 有效提升运维效率成为各地地铁运营单位的一个亟需解决的问题^{[1][2]}。地铁隧道通风系统承担着地铁隧道的通风及消防排烟, 系统能否高效准确的运行关系着地铁运行的高效性和经济性。地铁隧道

通风系统所处环境为高风压、高风速、灰尘大等不利条件, 同时伴随着运行时间的加长, 设备故障率呈现上升趋势, 给地铁运营的压力加大。本文从地铁实际运营故障数据出发, 梳理不同设备不同故障类型的数据, 引入RAM(可靠性、可用

收稿日期: 2024-3-6

作者简介: 冯腾(1991-), 男, 工程师, 硕士, 地铁隧道通风技术。E-mail: 1534633850@qq.com

性、可维修性)指标并进行指标分配,为地铁隧道通风系统的高效运营提供技术支持^{[3][4]}。

1 隧道通风系统构成及主要故障

隧道通风系统分为区间隧道通风系统和车站隧道通风系统两部分。

1) 区间隧道通风系统

区间隧道通风系统服务范围为区间隧道,主要由隧道风机、射流风机、组合式风阀、消声器、在线监测装置等组成^[5]。

2) 车站隧道通风系统

车站隧道通风系统的服务范围为屏蔽门外侧的停车隧道。主要由排热风机、组合式风阀、电动调节阀、防火阀、消声器、在线监测装置、风管、轨顶和站台板下土建风道等组成。

隧道通风系统的运营通过各种设备的串并联关系,协同完成隧道通风、消防排烟等一系列任务。通过调研某华南某城市3条地铁线路近5年故障数据,梳理统计得到各关键设备的不同故障类型及故障原因,如表1。

表1 不同隧道风设备的故障类型

设备类型	故障类型	故障原因
隧道风机	传感器故障、软启动器故障、轴温控制器故障、通信故障、高速过载、报警箱故障	质量问题、老化磨损、环境影响、安装问题
	变频器故障、通信故障、接线故障、轨顶盖板松动、软启动故障、轴温报警	
射流风机	振动报警、电气故障、通信故障、启动故障、反转启动故障、轴温报警故障	
电动组合风阀	执行不到位故障、通信故障、连锁故障	

2 设备故障统计

2.1 不同设备不同类型故障的统计分析

通过统计隧道通风系统故障数据,可以得到隧道风机(TVF)故障数最多,占据总故障的53.6%,其次为电动组合风阀(DZ)占27.0%,排热风机占(13%),如图1所示。

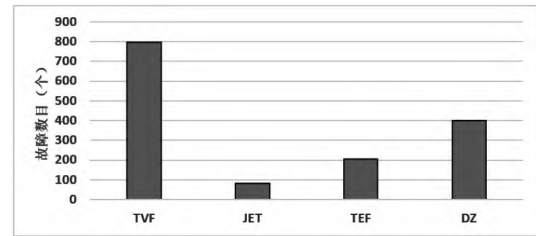


图1 隧道通风系统不同设备故障统计

1) 隧道风机

隧道风机主要包括元器件有叶片、电机、轴承、控制箱、启动器等。其中故障数最多的是风机高速过载导致无法启动,占总故障数的75%。由表可知,风机的叶片、轴承等机械构件较少发生故障,故障主要体现在电气元件方面,如电机、控制柜、通信信号等,占据到总故障数的90%以上。

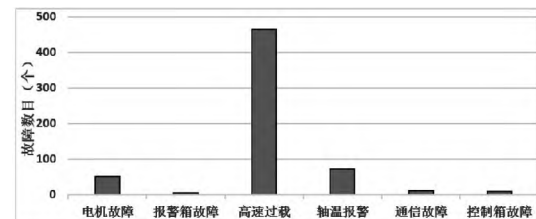


图2 隧道风机故障类型统计

在隧道风机设备故障原因方面,老化磨损引起设备故障占71.8%,质量问题占17.2%,环境影响占8.0%,安装导致的故障占3%。

针对隧道风机75%故障来源于高压过载,这主要是因为全压启动大功率风机时产生的大电流将在长距离进线电缆上造成线路瞬时压降过大,从而引起线路末端接触器等二次设备因电压过低产生电弧而损坏,导致风机无法正常全压启动。可采用适宜截面的控制柜进线电缆,以减少线间压降,或者在设备控制柜内增设UPS(不间断电源)等稳压设备^[6]。

2) 排热风机

排热风机包含的元器件也同样包括风机叶片、轴承、电机、控制箱、启动器、变频器等,一般运营过程中将轨顶风道并入排热风机系统中考虑,此处统计也包括轨顶风道的故障。排热风机的主要故障有变频器故障、启动故障、通信故障、轴温报警、接线故障等。其中发生频次最高的是变频器故障,占总故障的31%,其次是通信故障,占15%。轨顶风道主要的故障是轨顶盖板

松动, 占总故障数的36 %。

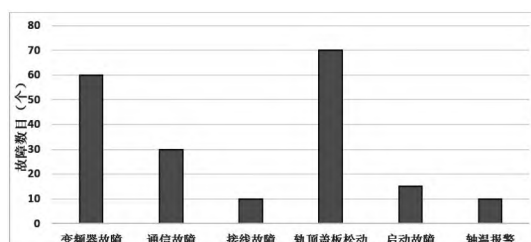


图3 排热风机故障类型统计

在故障发生的原因方面, 设备老化导致的故障占据72 %左右, 设备质量问题占18.5 %, 环境问题占9.5 %。

3) 射流风机

射流风机的故障除了风机常规的启动故障、通信报警故障、电气故障、风机振动故障等。其中故障数量最多的是启动故障, 约占射流风机总故障数的63 %, 启动故障还包括反转启动故障, 反转启动故障数占启动故障的69 %。在风机振动监测方面, 振动异常带来的报警约占10 %, 射流风机一般悬挂于隧道正上方或者侧壁, 其一旦坠落直接威胁行车安全, 因此该故障应得到更多关注。

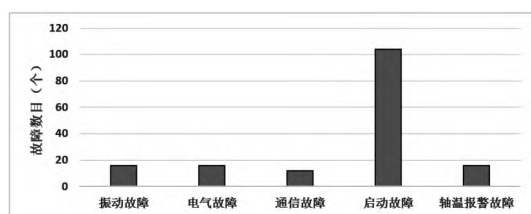


图4 射流风机故障类型统计

射流风机故障原因同样包括多方面, 其中老化磨损占总数的66.6 %。

4) 组合式风阀

风阀主要组成部分有阀叶、执行器、风阀主体等部件, 风阀呈现最多的故障为风阀执行不到位或者处于中间状态, 占据总故障的87 %, 同时联动风阀的连锁故障、通信和电气故障只占到13 %, 如图5所示。对于故障导致的原因, 设备老化磨损占据60 %, 环境影响因素占据26 %。

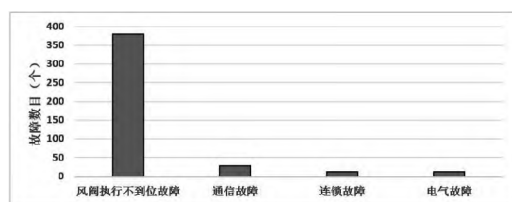


图5 组合式风阀故障类型统计

通过对隧道风机、排热风机、射流风机、组合式风阀等设备故障的统计, 可以得到设备检修故障排序: 隧道风机 > 组合式风阀 > 排热风机 > 射流风机。从单个车站来看, 一般一个车站有4台隧道风机, 2台排热风机, 16个组合式风阀, 单条线路中射流风机台数4到10台左右。隧道风机数量约为排热风机的2倍, 但是故障数仅为排热风机的4倍, 一定程度反应出隧道风机的故障率高于排热风机。据此可以推断出故障率排序: 隧道风机 > 排热风机 > 组合式风阀。

随着运行年限增长, 老化磨损的故障数明显增多, 老化磨损主要体现在阀门执行件锈蚀、电机故障、启动通讯故障、风机叶片异响等。而对于新近开通的线路, 大部分故障来源于安装调试遗留问题, 需要运维人员在后续运行中发现。

2.2 逐年故障统计分析

本次统计的三条线路开通时间分别是2011年、2016年和2020年, 考虑到三条线路整体运营时间较短, 且隧道通风设备运行频次较少, 故障频次未展现出逐年增加的趋势, 这主要是因为安装调试遗留下来的问题逐渐被解决, 风机和风阀的故障数呈现逐年减少的趋势。但是随着运行时限的继续增长, 设备达到使用年限的情况将增多, 运维人员应引起重视。

表2 风机和风阀逐年故障频次

线路1数据					
年份	2018	2019	2020	2021	2022
风机故障频次	227	225	147	170	80
风阀故障频次	54	94	70	62	56
线路2数据					
年份	2018	2019	2020	2021	2022
风机故障频次	25	37	41	27	37
风阀故障频次	16	8	18	8	4
线路3数据					
年份	2018	2019	2020	2021	2022
风机故障频次	/	/	62	55	35
风阀故障频次	/	/	50	24	10

3 设备修复时间统计

平均修复时间 (Mean time to repair, MTTR), 是描述产品由故障状态转为工作状态时修理时间的平均值。通过统计每种设备平均修复时间, 可以得到表3。可知, 电动组合风阀平均修复时间最长, 不可用性最高。隧道风机和排热风机平均修

复时间相对较低,说明平时运营过程中运维人员对于风机的修复较风阀关注度更高。

表3 隧道通风系统各设备平均修复时间

设备类型	平均修复时间(h)
隧道风机 TVF	57.78
排热风机 TEF	68.96
电动组合风阀 DZ	395.34
射流风机 JET	132.07

通过统计每种故障的平均修复时间,得到表4。可知,隧道传感器故障、排热风机和射流风机启动故障、组合式风阀连锁故障和执行不到位故障均超过60h,需要运维人员调整运维计划,保证系统整体平稳安全运行。

由于隧道通风系统在运营过程中,隧道风机、排热风机等设备使用频次较低,除了早晚通风需要每天运行隧道风机及相应的组合式风阀,若不发生隧道超温或者阻塞等突发情况,其它设备运行时间很短,这也就导致隧道风机故障数高

于其他设备。整体来看,隧道通风设备使用频次较低,设备完备的紧迫性相对较小,造成设备不同程度的缺少维护行为。

隧道通风系统涉及的设备繁多,故障类型涉及到机械、通信、电气故障等,不同设备不同类型的故障的平均修复时间存在差异大的情况,例如风机轴温报警故障平均修复时间在2.79~6.2 h之间,而风阀执行不到位故障修复时间为181 h,出现这种情况的主要原因是不同故障维修难易程度不同,另一方面故障的紧迫性不同也会造成不同的维护时间。设备从故障到维修需要一定的响应时间,从不同设备故障类型的平均修复时间也可以发现,相比与需要人工巡检发现的故障,通过通信信号传递的自动报警故障的,平均修复时间普遍较短,如轴温报警3.4 h,振动故障5.74 h。

4 隧道通风系统RAM指标分配

目前,欧洲部分国家已建立了完善的RAMS系

表4 不同设备故障类型平均修复时间

隧道风机		排热风机		射流风机		组合式风阀	
故障类型	平均修复时间 (h)	故障类型	平均修复时间 (h)	故障类型	平均修复时间 (h)	故障类型	平均修复时间 (h)
传感器故障	63.15	变频器故障	20.9	振动故障	5.74	风阀执行不到位故障	181.7
高速过载	30.17	通信故障	23.42	电气故障	8.295	通信故障	60.1
轴温报警	3.4	接线故障	59.57	通信故障	16.02	连锁故障	103.7
通信故障	35.46	轨顶盖板松动	9.01	启动故障	135.2	电气故障	35.1
控制箱故障	12.64	启动故障	69.7	轴温报警故障	2.79	/	/
/	/	轴温报警	6.2	/	/	/	/

列标准并在产品平台的开发中推广应用,RAMS工程已走上系统化发展之路。RAM指标分配是将系统的总体系统可用性目标的一部分分配给每个子系统,以实现总体顶级系统RAM性能要求。

隧道通风系统的可用性指标:可用性 $S_{IG} \geq 99.9\%$,隧道通风系统的不可用性指标:不可用性 $S_{IG} \leq 0.1\%$ [7]。

于一台设备的每种故障模式的故障率相同,则有:

$$\text{不可用性}_{S-\text{system}} = \text{不可用性}_{SIG} \times \frac{\text{故障数}_{S-\text{system}}}{\text{故障数}_{SIG}}$$

不可用性 $S_{-\text{system}}$ 为隧道通风系统不可用性指标,故障数 $S_{-\text{system}}$ 和故障数 S_{IN} 为单种设备的故障数目和隧道通风系统的总故障数 [8]。

单种设备中断时间(单位:h)计算公式为:

$$\text{中断时间}_{S-\text{system}} = 24 \times 365 \times \text{不可用性}_{S-\text{system}}$$

单种设备的平均无故障时间:

$$\text{MTBF}_{S-\text{system}} = \frac{\text{MTTR}_{S-\text{system}}}{\text{不可用性}_{S-\text{system}}}$$

MTTR $S_{-\text{system}}$ 为单种设备的平均修复时间。

MTBF $S_{-\text{system}}$ 为单种设备的平均故障间隔时间。

采用上述方法对隧道同分系统及其设备进行RAM指标分配,计算结果见表3。

表3 隧道通风设备RAM指标分配

隧道通风系统设备类型	不可用性 $S_{-\text{system}}$	MTBF/h
隧道风机	0.000536	107858
排热风机	0.000139	496836
射流风机	0.000055	2390191
组合式风阀	0.000270	1463065

5 总结

1) 本文统计了地铁隧道通风系统不同设备的故障数以及不同故障类型的数量,通过横向比较,可以得到隧道风机相对故障数和故障率最大,故障率排序为隧道风机>排热风机>组合式风阀。故障的主要来源是设备老化磨损,占总故障原因的60%~75%。

2) 风机较少发生在物理机械构件故障,多数故障发生在电气元件方面,例如电机、控制柜、通信信号等方面,占到总故障数的90%以上。

3) 从各设备平均修复时间来看,隧道风机虽然故障数和故障率最高,但是在运维过程中响应的最短,由此也可以看出运维过程中隧道风机和排热风机相较于其他设备,运维人员的关注度更高。同时在运维过程中可适当增加通信监测装置,以减少设备故障修复时间^[9]。

4) 隧道通风系统的关键薄弱点主要在于隧道风机高速过载、轨顶风道盖板松动、射流风机正反转启动故障、组合式风阀执行不到位故障等,需要相应增加运维力度,保证系统整理的高效稳定运行。

5) 本文总共确定了10余种影响服务的故障模式,并将统计结果用作RAM分配工作的输入条件,完成地铁隧道通风系统可靠性指标的分配,得到各关键隧道通风设备的RAM指标,用于运营过程中的量化指标参考。

参考文献:

- [1] 魏广宏. 北京地铁环境通风系统的改造分析[J]. 工程建设与设计, 2005(11): 53-56.
- [2] IO.M.拉金采夫, 丁儒朋. 地铁隧道通风技术水平及其提高的方法[J]. 地下工程与隧道, 1991(03): 44-47.
- [3] 曾若辰. 城市轨道交通RAMS技术发展展望[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(19): 1-9+16.
- [4] 王延翠等. 基于模型的动车组空调系统RAMS协同设计方法[J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(05): 123-129.
- [5] 刘艳荣, 毛军. 列车活塞风对隧道通风系统运行状态的影响[J]. 工程建设与设计, 2003(04): 3-6.
- [6] 肖锋, 王琮元. 成都地铁18号线隧道风机全压启动故障研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 139-142.DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.024.
- [7] 杨俊杰等. HX_D2机车牵引通风系统RAMS评价[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(S1): 19-23.

[8] 王梓丞等. 铁路信号系统RAM指标分配方法[J]. 交通世界, 2021(11):14-15.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/t.2021.11.006.

[9] 常军. 基于BIM的地铁车站机电设备维修管理系统设计[J]. 设备管理与维修, 2022(20):12-14.DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2022.10D.06.

(上续第15页)

菌消毒装置以消除室内细菌及有害物质,保证室内空气品质。

10 结语

该项目供能业态含办公、展示会议、配套商业,楼栋单体众多,存在自持租售、售卖业态形式,冷热源选型设计时需要充分考虑运维及后期业主改造的便利性。

具体冷热源配置在设计过程中需要满足建设方后期运营方需求,如加班与上班空调物业费用收取一致性的具体需求,可通过采用热泵等技术来降低整体运营费用及碳排放量。空调末端系统选取应以消除建设方运维痛点为目的,杜绝新技术堆砌,采用契合业主实际需求的空调形式。

参考文献:

- [1] 肖鲁江, 张金水. “双碳”目标下夏热冬冷地区绿色产业园建筑设计策略——以江苏省南京市江北新区软件园超高层产业园区项目为例[J]. 建筑与文化, 2022, 41(7): 113-115
- [2] 陈建功. 中关村软件园太湖分园一期能源方案选择[J]. 制冷与空调, 2014, 14(3): 80-821
- [3] 昂超. 双碳目标下对夏热冬冷地区空调冷热源方案的思考[J]. 建筑技术, 2023, 54(2): 193-198
- [4] 中国建筑科学研究院. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2023-2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html, 2023-02-07
- [6] 姚喻晨. 夏热冬冷地区某超高层建筑暖通空调系统设计[J]. 暖通空调, 2023, 53(1): 166-169
- [7] 曾伟. 变流量空调水系统水泵变频控制及能耗分析[J]. 建筑热能通风, 2022, 41(6): 45-48