

高速公路长大隧道轴流风机优化改造与轴承维护周期优化研究

郭航雄

(陕西交通控股集团有限公司,西安 710100)

摘要:随着路网交通量的增长,部分公路隧道已达到交通量设计峰值,通风设施面临高负荷运行、安全运行风险加大的现实问题。依托秦岭终南山公路隧道轴流风机修复改造工程,针对轴流风机动叶可调系统的故障率高、精度要求高且维修费用昂贵等问题,提出静叶可调整替代动叶可调的修复改造方案,通过结构分析和调整实现叶片角度静止可调运行方式;针对电机轴承高故障率,采用双参数威布尔分布函数描述电机轴承的故障变化率,提出一种优化轴承维护周期的模型,应用于秦岭终南山公路隧道风机轴承维护计划。实验结果表明,改造后的轴流风机满足规范设计要求,运行效果良好。分析得到的隧道风机维护计划合理经济,保证轴承的可靠运行并充分发挥其使用价值。

关键词:隧道工程;轴流风机;修复改造;轴承维护周期;长大隧道

中图分类号:U453.5

文献标志码:A

文章编号:2095-2945(2024)16-0148-04

Abstract: With the growth of the traffic volume of the road network, some highway tunnels have reached the design peak of traffic volume, and the ventilation facilities are facing the practical problems of high load operation and increased risk of safe operation. Relying on the repair and reconstruction project of axial flow fan in Qinling Zhongnanshan Highway Tunnel, aiming at the problems of high failure rate, high precision requirement and high maintenance cost of axial flow wind blade adjustable system, a repair and reconstruction scheme of static blade adjustable instead of moving blade is put forward. through structural analysis and adjustment, the static adjustable operation mode of blade angle is realized. In view of the high failure rate of motor bearings, the fault change rate of motor bearings is described by two-parameter Weibull distribution function, and a model for optimizing bearing maintenance cycle is proposed, which is applied to the fan bearing maintenance plan of Qinling Zhongnanshan Highway Tunnel. The experimental results show that the modified axial flow fan meets the design requirements of the specification and the operation effect is good. The maintenance plan of the tunnel fan obtained from the analysis is reasonable and economical, which ensures the reliable operation of the bearing and gives full play to its use value.

Keywords: tunnel engineering; axial flow fan; repair and transformation; bearing maintenance cycle; long tunnel

随着我国公路、铁路、轨道交通等交通工具的快速发展,隧道在山区公路的建设中起到越来越重要的作用。近年来,我国公路隧道建设规模越来越大,长大隧道的数量也在不断增加。随着隧道长度的增长,洞内车辆排放的尾气难以自然排出或稀释,对司乘人员及隧道养护人员的健康造成危害^[1]。从行业制度要求和发展趋势来看,长大隧道通风系统维护应贯穿于公路隧道使用的整个过程,是降低全寿命周期成本,科学养护的必由之路^[2]。而通风系统作为长大隧道不可或缺的一部分,轴流风机的运行维护是隧道通风系统正常使用的关键。本文依托秦岭终

南山公路隧道轴流风机修复改造工程,通过现场检测高负荷工作状态下轴流风机出现的故障,分析主要故障点。对轴流风机的动叶可调系统故障率高、精度要求高且维修费用高昂这一问题进行分析研究,根据秦岭终南山公路隧道通风需求的实际状况,对轴流风机动叶可调系统进行结构分析,将轴流风机静叶可调整替代动叶可调,对叶轮部分和风机机械配套部分进行改造,保证叶轮能够长期可靠运行。针对电机轴承高故障率、高可靠度这一现状,本文在威布尔比例风险模型基础上进行改进,建立起一种高负荷工作下风机轴承单个更换周期内的预防性维

基金项目:2021 年度国家重点研发计划重点专项“重大自然灾害防控与公共安全”专项“长大公路隧道突发事件应急处置关键技术与装备”(2021YFC3002000)项目课题五“隧道典型事故灾变物理试验平台与试验验证及应用示范”(2021YFC3002005)
作者简介:郭航雄(1969-),男,高级工程师。研究方向为高速公路机电设施维护管理。

护优化模型,分析模型结果,确定风机轴承最优维护周期,避免出现过维护及欠维护的现象。

1 长大隧道风机故障诊断与分析

1.1 工程概况

秦岭终南山公路隧道全长 18.02 km,是目前国内最长的高速公路隧道,是国家高速公路网包(头)茂(名)线的关键控制性工程,也是陕西省“2637”高速公路网西安至安康高速公路的重要组成部分,是我国高速公路隧道示范工程和标志性工程。

秦岭终南山公路隧道于 2007 年 1 月建成并投入运行,其中通风系统共安装动叶可调轴流风机 32 台,风机品牌数量信息详见表 1。动叶可调轴流风机是指通过调节动叶轮角度,使风机性能曲线移位,以产生一系列的工作点,可以在不停机的情况下提供性能曲线上不同的风量和风压,从而适应不同的工况条件。

动叶可调轴流风机通风系统是一个复杂的工业机械化和自动化系统,包含机械、电子、控制、通信等各方面的技术和设备,其动叶可调系统装置制造精度高,装置复杂,同时维护要求高。

表 1 轴流风机品牌数量信息表

类型	品牌	电机品牌	数量/台
送风风机	南方风机	赛力盟/重庆	17
排风风机	Flakewood(伍兹)	WEG(韦高)	15
	/英国	/巴西电机	

1.2 轴流风机故障点检测

2017 年、2018 年和 2019 年对轴流风机及其配电、控制系统进行了专项维修,2020 年对 6 台轴流风机进行了返厂维修。经过历次维修,隧道中轴流风机均有不同程度的故障,主要故障点见表 2。

表 2 轴流风机主要故障点

序号	名称	数量/台
1	电机轴承更换	28
2	动叶可调系统故障	21
3	软启动器故障	11
4	电机烧毁	4

由表 2 可以看出,电机轴承及动叶可调系统的故障数量多,且故障率分别高达 87.5%和 66.625%,历次维修造成了巨大的时间损失和高昂的事后维修成本。

经过现场实地检测检查,将轴流风机的动叶可调系统故障点整理如下。

叶轮部分:28 台风机的叶轮、叶片、轮毂结构完好,无损坏,有 4 台风机的叶轮连接件松动。

风机机械配套部分:①部分风机油站有漏油现象,不

能正常工作,通过远控开启风机后虽然风机能够正常转动,但风机的叶片角度没有达到运行位置;②油站控制卡故障或报警,液压系统油泵异响报警;③风机表面及内部结构油污严重;④16 个风阀的执行器不能正常工作,风阀油污严重,调叶执行器不能完全关闭;⑤4 台电机烧毁,电机绝缘支柱开裂,电机轴承结构烧毁;⑥3 个软连接破损开裂。

1.3 原因分析及维护改造措施

1.3.1 原因分析

①终南山隧道 2007 年投入使用后的起初几年,由于车流量小,轴流风机通风系统使用率较低,设备维护保养不及时,造成设备后续使用时故障频繁。②近年来机动车保有量高速上涨,秦岭终南山公路隧道虽设计年限未到,但当前车流量已达到施工图设计年限的交通量峰值,且在特殊时段远超设计交通量,通风设施长期处于高负荷工作状态,造成故障率增加,极大影响了设备寿命。③自 2007 年运行以来,部分设备由于长期运行磨损老化严重,造成故障停机。

1.3.2 维护改造措施

①轴流风机的改造与修复方案。目前轴流风机的动叶可调系统故障率过高,使用较差,且车流量已达到施工图设计年限的交通量峰值,在特殊时段远超设计交通量,使得通风设施长期处于高负荷工作状态,风机在最大负荷工况下运行,动叶可调轴流风机的高精度调节装置已经没有使用的必要。根据秦岭终南山公路隧道通风需求的实际状况,改动叶可调为静叶可调,取消调叶执行器、液压油站等复杂易损故障元件。②电机轴承维护周期优化。目前,在风机轴承维护工作多采用经验判断维护周期,具有很大的不确定性,且随着轴承的使用寿命的增加,轴承发生失效的概率也会增加,此方法缺乏可靠的科学依据。因此,为避免过维护与欠维护造成的时间及成本损失,需要找到单个轴承更换周期内最佳维护周期,在维护周期及维护成本间进行寻优。

2 动叶可调系统改造方案

2.1 叶轮结构改造方案

将叶轮轮毂、叶片、连接旋转件解体后进行清洗,并分别进行 X 光检测发现:①将动叶可调叶轮与静叶可调叶轮叶片角度调节方式进行结构对比,其叶片固定方式不一样,如果把动叶可调叶轮里面的角度调节机构强行锁死,不能保证叶轮长期可靠运行。②静叶可调叶轮的叶片是通过 M36 叶柄固定在轮毂壳上,动叶可调叶轮的轮

毂壳厚度为 50 mm,而且叶片位置已经加工成通孔,没有任何加工余量来改造为静叶可调轮毂;③圆轴盘高度约 350 mm,其高度尺寸、直径尺寸、孔未尺寸与新设计的轮毂不能匹配。

因此,不能使用之前的轴盘、轴头、叶柄等,需对原轮毂进行替换,叶片可以继续使用。风机叶轮结构改造的关键一步是制造与原叶片相匹配的新叶轮,对原叶轮各部件进行测绘,设计完全非标的叶轮制造图纸,并对新叶轮进行功能性试验使其能够长期可靠运行。根据图纸制造出新的叶轮,并与原叶片进行组装。

2.2 风机机械配套部分改造方案

经过现场仔细检测排查和分析,确认秦岭终南山公路隧道安装的 32 台动叶可调轴流风机机械配套部分调整改造方案,实现叶片角度静止可调运行方式,满足高负荷运行的工况要求,具体技术改造和结构调整工作内容如下:

①拆除油站以及油站控制系统;②将所有的电机轴承进行更换,全部重新注油;③维修或更换电机轴承温度传感器;④4 台烧毁的电机进行维修,重新绕组,或者直接更换为全新电机;⑤所有的进风口风阀执行机构、连杆、叶片进行修复或更换;⑥所有的出风口风阀去除执行机构,将叶片固定在水平位置;⑦更换有破损开裂软链接,共 3 个。

2.3 动叶可调系统改造效果

全部风机和所有风机机械配套安装完毕后,对通风系统进行调试、试运行。应用该修复改造方案,能使该批次风机在正常维修保养工况下,运行寿命至少为 10~15 年,并达到与更换全新风机完全一样的运行效果,实现与原设计通风系统完全匹配,满足该隧道原始设计的通风功能要求。此外,全部更换全新轴流风机的预算为 4 544.865 5 万元,而采取该修复方案预算为 700 万元,仅为 15.4%,极大地节省了改造成本。

3 风机轴承维护周期优化

3.1 威布尔比例风险模型优化

根据隧道轴流风机故障统计数据,双参数威布尔比例风险模型可以很好地描述风机轴承的故障率变化规律,在该故障分布模型基础上引入故障率演化模型,描述在单个更换周期内对风机轴承进行预防性维修后得到的改善状况。 t 时刻风机轴承初始故障率及在第 i 个周期预防性维护周期内故障率函数如下

$$\lambda_i(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad i=1 \quad (1)$$

$$\lambda_i(t) = \prod_{k=1}^{i-1} B_k \lambda_1(t + A_k \varepsilon_k) \quad i \geq 2 \quad (2)$$

式中: $\lambda_1(t)$ 为 t 时刻风机轴承的初始故障率函数; m 为形状参数, $m>0$; η 为尺寸参数, $\eta>0$; $\lambda_i(t)$ 为 t 时刻风机轴承在第 i 个预防性维护周期内的故障率函数; B_k 为故障递增因子; A_k 为役龄递减因子; ε_k 为预防维护周期的间隔时间;其中 $k=1,2,\dots,i$ 。

3.2 维护周期确定

假设风机轴承在第 i 个预防性维护周期内进行 $N-1$ 次预防性维修,第 N 次为预防性更换,维护周期的间隔时间为 ε_i 。根据故障率函数 $\lambda_1(t)$ 推导出风机轴承部件第 i 个预防性维护周期内的可靠度函数如下

$$R_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} \quad 0 < t < \varepsilon_i \quad (3)$$

当风机轴承可靠度达到高负荷状态可靠度阈值 R_z 时,即 $R_i=R_z$ 时,需要及时对设备部件进行预防性维修工作,以此确定预防性维护周期的间隔时间 ε_i ,即

$$e^{-\int_0^{\varepsilon_i} \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^{\varepsilon_2} \lambda_2(t) dt} = \dots = e^{-\int_0^{\varepsilon_i} \lambda_i(t) dt} = R_z \quad (4)$$

联立式(2)、式(3)、式(4)即可得到风机轴承在第 i 个预防性维护周期的时间间隔 ε_i

$$\varepsilon_i = \eta \left[-\ln(R_z) \right]^{\frac{1}{m}} \quad i=1 \quad (5)$$

$$\varepsilon_i = \left[\frac{-\ln(R_z) \eta^m}{\prod_{k=1}^{i-1} B_k} + \left(\sum_{k=1}^{i-1} A_k \varepsilon_k \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} - \left(\sum_{k=1}^{i-1} A_k \varepsilon_k \right) \quad 2 \leq i \leq N \quad (6)$$

预防性维护周期的间隔时间不可能设置为无限长,时间间隔之和需小于轴承的单个更换周期 T ,即: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_k \leq T$ 。

3.3 维护成本计算

以风机轴承在单个更换周期内单位时间维护成本 C 最小为目标,对维修策略模型进行优化。风机轴承单个更换周期内维护费用 SUM 包括为轴承进行预防性维修的维修成本和场地使用成本,可表示为

$$SUM = N(C_{pw} + \theta \gamma_w) \quad (7)$$

式中: C_{pw} 为进行单次预防性维修的维修成本; θ 为场地占用费用率; γ_w 为预防性维修的时间。

以单位时间内维护成本最小为目标,则优化模型的目标函数为

$$\min C = \frac{SUM}{T} \quad (8)$$

3.4 模型应用分析

以秦岭终南山公路隧道轴流风机轴承作为维护对象进行维护周期分析。根据历年风机维修数据记录,使用极大似然估计的方法分析确定双参数威布尔分布的参数值分别为 $m=15, \eta=912$; 得到比例风险模型为

$$\lambda_i(t) = \frac{15}{912} \left(\frac{t}{912} \right)^{15-1} \quad i=1 \quad (9)$$

优化模型中的其他参数见表 3。

表 3 参数设置表

参数	参数值	参数	参数值
A_i	$i/(6i+8)$	θ	20
B_i	$(11i+1)/(10i+1)$	γ_w	0.9
R_c	0.85	C_{gr}	3 000

当风机轴承可靠度达到满负荷状态可靠度阈值时 $R_c=0.85$ 时,需要对设备部件进行预防性维修工作,通过 MATLAB 软件进行数值仿真,以此确定预防性维护周期的间隔时间,假定当间隔时间小于 180 天时,风机轴承需要进行更换,则风机轴承单个维修周期为 $\sum \varepsilon_i$ 。轴承单个周期内的可靠度变化趋势如图 1 所示。

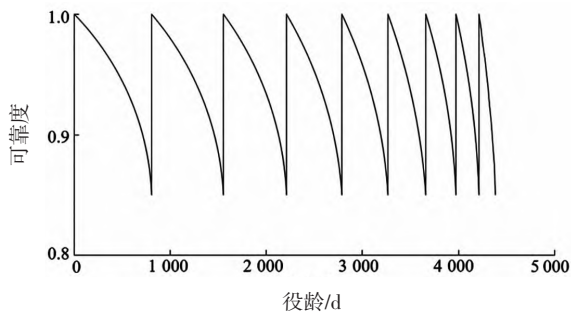


图 1 可靠度变化趋势图

可靠度阈值 $R_c=0.85$ 的维修计划见表 4。

表 4 可靠度阈值 $R_c=0.85$ 的维修计划

R_c	N	ε_i/d	T/d
0.85	9	807-745-661-571-480-394-314-240-173	4 385

由表 4 可知,随役龄的增加,当可靠度 $R_i(t)$ 下降到 0.85 时,需要对轴承进行预防性维护工作,且 $i=9$ 时, $\varepsilon_i \leq 180 d$,可知轴承的第 9 次维护需要更换轴承部件,则最佳维护周期次数为 9 次。

当上述分析中的假定阈值 R_c 发生变化时,最佳维修次数与风机轴承单个维修周期 $\sum \varepsilon_i$ 也会随之改变,为使单个更换周期内单位时间维护成本 C 最小,需计算不同可靠度阈值 R_c 条件下单位时间维护成本 C ,优化结果见表 5。

由表 5 可知, R_c 设置的越高,由于增加可维修次数,部件的单个维修周期 $\sum \varepsilon_i$ 越短,说明频繁的预防性维修

工作会加快轴承的老化速度使部件寿命变短,因此需选取合适的可靠度阈值满足设备生产任务需要。

当选取可靠度阈值 $R_c=0.85$ 时,单个轴承更换周期内维修计划见表 4,单位时间维护成本 $C=6.19$ 最小,且维护次数相较于 $R_c=0.65, R_c=0.75$ 较少,能够满足风机日常维护工作需要。

表 5 不同可靠度阈值 R_c 优化结果

R_c	T/d	N	SUM	$C/\text{元}$
0.65	4 808	10	30 180	6.28
0.75	4 680	10	30 180	6.45
0.85	4 385	9	27 162	6.19
0.95	4 065	9	27 162	6.68

为使风机经济可靠运行,须加快对风机轴承进行预防性维修工作频率来避免部件的突发性故障,延长部件使用寿命、节约费用。而频繁的预防性维修工作会加快轴承的老化速度,且维修后部件的改善程度越来越差。采用风机轴承维护周期优化模型可以根据可靠度变化制定具有针对性的维护计划,与运营经验判定维修计划相比,避免了前期因频率过高的预防性维修工作导致维修过剩,后期预防性维修工作较少出现维修不足的情况,充分发挥轴承使用价值,节约维修成本。

4 结论

本文依托秦岭终南山公路隧道轴流风机修复改造工程,对高负荷工作状态下轴流风机进行现场检测,探讨长大隧道轴流风机的改造方案并制定风机轴承维护计划,得到如下结论:①静叶可调代替动叶可调的修复改造方案能使该批次风机在正常维修保养工况下达到与更换全新风机完全一样的运行效果,实现与原设计通风系统完全匹配,满足该隧道原始设计的通风功能要求。②在双参数威布尔比例风险模型基础上引入故障函数,建立了以单位时间维护成本最低为目标的优化模型,能够更好地表示维修后部件可靠度变化趋势。③以秦岭终南山公路隧道轴流风机轴承作为维护对象进行维护周期分析,制定具有一定的针对性和实用性的维护计划,避免过维护与欠维护造成的时间及成本损失,可为风机轴承的预防性维护计划制定提供有力支持。

参考文献:

- [1] 赵忠杰,朱斌.变频调速在公路隧道通风控制中的应用[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(4):71-74.
- [2] 魏新江,李帅,杜世明,等.超长公路隧道运营通风控制技术与空气质量研究综述[J].现代隧道技术,2022,59(S1):1-12.