

# 冷却塔风机齿轮箱及传动轴故障监控系统设计

陈建平, 李瑞, 单瑞

(天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 在详细分析冷却塔风机传动系统中齿轮箱、传动轴失效原因及其失效表现形式的基础上, 设计出冷却塔风机齿轮箱及传动轴故障监控系统, 利用可编程控制器对齿轮箱油液温度、振动和传动轴信号进行采集处理, 利用特定程序, 能够在齿轮箱及传动轴发生失效现象之前及时报警停机, 避免安全事故的发生, 此系统与冷却塔风机智能控制系统相结合, 可以实现冷却塔风机的智能变频与启停、故障预警与停机。

**关键词:** 齿轮箱; 传动轴; 状态监测; 可编程控制器

## Design of Monitoring System for Gear Box and Transmission Shaft of Cooling Tower Fan

Chen Jianping, Li Rui, Shan Rui

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Based on the detailed analysis of failure cause and form of gear box and transmission shaft in the cooling tower fan drive system, the fault monitoring system for gear box and transmission shaft is designed. By using the programmable logic controller to acquire and process the signal of the gearbox oil temperature, vibration and transmission shaft, the system can alarm and stop the gear box and transmission shaft before failure occurrence with specific programs, which effectively avoids safety incidents. Combined with cooling tower fan intelligent control system, the system can realize the cooling tower fan's intelligent inverter and start-stop, and fault early warning and shut-down.

**Keywords:** gear box; transmission shaft; condition monitoring; programmable logic controller

### 0 引言

大型冷却塔风机广泛应用于石油、化工、电力、冶金、纺织等行业, 其主要作用是将热的工业用水强迫冷却, 达到水的循环使用目的, 冷却塔风机传动系统的良好运行状态是生产质量的重要保证。齿轮箱与传动轴作为冷却塔风机传动系统的重要组成部分, 其运行状态的监测显得尤为重要, 为保证监测效果的精确性与可靠性, 设计一种冷却塔风机齿轮箱及传动轴故障监测系统, 可以实现实时监测齿轮箱与传动轴的运行状态, 及时捕捉齿轮箱内部传动部件发生失效及传动轴发生断裂前的信号, 利用特定程序自动停机报警并通知相关工作人员进行故障处理, 防止安全生产事故的发生, 大大解放人力, 提高企业生产的自动化程度。

### 1 齿轮箱传动部件失效现象及原因分析

在齿轮箱的各类传动零件中, 失效比例分别为: 齿轮: 轴承: 轴: 箱体: 紧固件: 油封 = 60%: 19%: 10%: 7%: 3%: 1%。由此可看出, 在所有零件中, 齿轮箱传动部件中齿轮与轴承失效所占比重较大, 其共同所占比例约为 79%。在

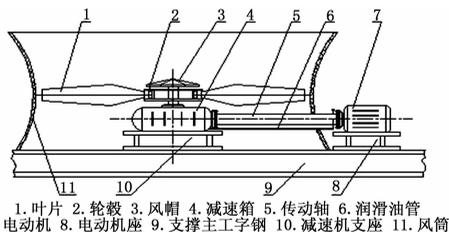


图1 冷却塔风机结构示意图

实际生产过程中, 风机齿轮箱所处环境复杂多变, 齿轮、轴承不但会受到偏载、过载、撞击、润滑不佳等不利因素的影响, 而且与先期加工误差、装配误差共同加快齿轮与轴承的失效速度。齿轮常见失效形式有齿面点蚀、齿面磨粒磨损、齿面胶合、塑性变形以及轮齿折断等。滚动轴承常见的失效形式有疲劳剥落、磨损、腐蚀、烧伤、塑性变形、保持架损坏等。齿轮与轴承失效原理与形式复杂多变, 但无论齿轮与轴承哪一种失效形式都会造成齿轮箱表面振动频率内容的明显改变。齿轮箱传动部件中齿轮与轴承振动固有频率不同, 若其发生故障, 相关振动信号的能量分布就会发生变化, 通过对振动频率相关参数的采集分析, 根据特征量分布情况, 可以间接得知齿轮箱的运行状态, 同时进一步细化分析可知具体部位传动部件的运行状态情况是否良好。通过对监测程序中相关特定参数设置与调整, 利用特定程序, 在齿轮与轴承失效前期自动停机并报警, 避免事态的进一步扩大造成其他传动部位零件失效, 通知相关

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-08-29。

基金项目: 天津市 2010 年应用基础及前沿技术研究计划重点基金资助项目(10JCZDJC23300)。

作者简介: 陈建平(1961-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 教授, 主要从事自动与控制方面的研究。

人员及时更换相关部件, 保证齿轮箱良好的运行状态。

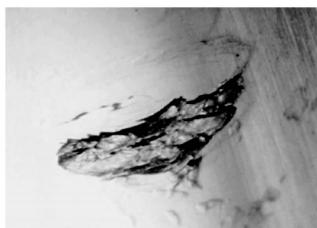
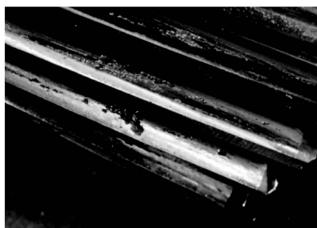


图 2 现场齿轮箱齿轮失效图

图 3 现场轴承失效图

## 2 传动轴失效现象及原因分析

根据实际运行现场故障分析可知, 传动轴失效是由于传动轴联轴器螺栓发生断裂造成, 所以, 在联轴器螺栓即将断裂时监控系统及时监测到此运行状态并报警和停机, 即可有效防止传动轴甩出事故的发生。经过对传动轴失效现象的实际案例分析, 发现半联轴器的螺栓孔明显扩大, 此现象说明事故发生之前隐患已经存在且不断发展, 螺栓与螺栓孔不断撞击造成隐患的不断发展。螺栓断裂发生在瞬时, 但断裂之前联轴器间已经发生了较大的相对位移旋转, 即螺栓孔已被明显扩大, 并不断对螺栓进行冲击, 造成螺栓的断裂。由失效实例分析可知只要能及时监测两联轴器间的相对位移, 并在相对位移发展到失效前及时报警和停机, 就可在螺栓被剪断前停机, 避免传动轴甩出对其他设备造成破坏事故的发生, 工作人员可以及时进行检修, 保证生产设备具有良好的运行状态。



图 4 变形螺栓孔

图 5 传动轴联轴器螺栓断口

## 3 监测方法的设计与研究

### 3.1 齿轮箱监测

振动信号为齿轮箱故障特征的载体, 故要想监测齿轮箱运行状态, 首先需要实现对齿轮箱振动信号的采集。在齿轮箱输入轴箱体外壁沿 X、Y、Z 三个方向分别安放振动传感器, 并做紧固与防水处理, 传感器引出线置于塔上接线箱内, 塔上接线箱为中控室控制箱信号采集模块的延伸。传感器引出线与来自中控室 SM1281 振动模块的信号线缆在塔上接线箱内正确连接, 以实现对齿轮箱相关信号信息的采集。利用齿轮箱监控系统采集齿轮箱输入速度值、齿轮箱速度与加速度均方根值, 通过特定程序设定警戒线与报警线, 同时结合对齿轮箱油温、油位的监控, 综合分析, 实现对齿轮箱运行状态的监控。当特征值大于警戒线设定值时, 系统进行警戒报警提醒, 提醒相关工作人员应注意此台设备同时应制定安排检修计划, 此时不会自动停机; 当特征值大于报警线设定值时, 系统进行报警同时自动停机, 此状态下, 相关工作人员必须对齿轮箱进行检修维护, 否则无法启动相关冷却传动系统。齿轮箱运行状态监测系统同时绘制速度谱、加速度谱、包络谱, 系统自动将相关数值

传送给专家系统, 专家系统对齿轮箱运行状态进行预见性判断并通过对相关记录数值的分析, 确认相应部件故障特征频率成分, 对报警数值来源进行定位, 实现靶向性检修维护, 缩短检修时间, 提高修复效率。将振动信号同时作为设备运行与否(设备运动时会检测到连续的振动信号)的反馈信号, 当采集到连续振动信号同时振动信号数值大于设定值时, 系统认为齿轮箱处于运行状态, 齿轮箱监测系统程序才会自动启动对齿轮箱运行状态进行监测。

### 3.2 传动轴监测

作为冷却塔系统动力传动主要部件的传动轴, 由于其状态为高速转动模式, 在其旋转圆柱体内, 现有监测设备无法直接对传动轴运行状态进行监测, 致使传动轴运行状态监测相对于其他传动部件较为困难。传动轴作为旋转物体, 带线监测设备不适用对其进行状态监测。根据对传动轴失效现象及原因分析, 依据触发与信号传输相分离原则, 据此避免发生信号线在传动轴运行时缠绕现象, 设计出分离式差值扫描监测法, 其具体实现形式如图 6 所示, 在两联轴器同一截面处不同位置分别放置一信号发生器, 信号发生器上方对应固定放置两个霍尔传感器, 传动轴每次转动时都会带动两信号触发器同步运动, 信号发生器每次经过固定放置的霍尔传感器下方都会对传感器进行一次触发。此方法解决了与传动轴同步运行的信号触发器无线缆缠绕问题, 作为信号传输介质的信号线不与传动轴运行状态保持一致, 整个方法不存在线缆缠绕传动轴问题。

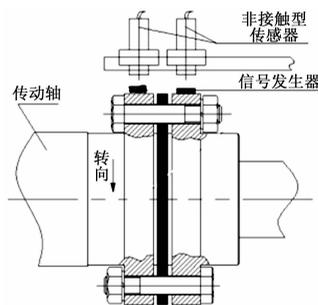


图 6 差值扫描监测法传感器安装图

此方法主要通过测量两联轴器上安装的信号发生器触发传感器的时间是否同步来判别两联轴器是否发生相对位移, 即通过记录两传感器在规定时间内被触发次数是否一致来判定两联轴器是否发生相对偏移。正常情况下, 两联轴器上安装的信号发生器与轴同步运行, 在规定时间内两处信号触发器触发传感器次数应该一致, 同时为排除信号发生器及传感器安装误差造成的测量误差, 将两传感器触发次数处理为一极小时间段, 即在此时间段内, 两处传感器均受到信号发生器的触发, 认为其触发同步, 同时若触发次数一致, 则认为传动轴的运行状态正常, 若在此时间段内触发不同步, 认为器触发次数不一致, 则记录一次失效累计, 当失效累计达到报警累计次数时, 系统自动停机报警, 通知相关人员进行检修处理, 保证生产的安全性与可靠性。检修处理完毕后, 只需重新启动系统即可再次进入监测模式, 系统中设置有自动复位指令, 无需工作人员进行设置。为排除偶然事件造成的失效累计记录值增加造成的误报现象, 将失效累计记录报警值设置为 10 次, 同时为防止偶然误差累积造成的误报停机现象, 设置每 30 min 将误差累积复位

一次,此设置可以实现误差累计的非连续性,最大程度保证监测系统的可靠性。

## 4 监控系统设计

### 4.1 监控系统硬件设计

此系统塔上部分包括振动传感器、霍尔传感器以及油温油位传感器等不同功能传感器,塔下部分只包括控制室放置的上位机与下位机,上位机采用力控控制系统与触摸屏控制系统相结合,下位机采用西门子 S7-1200 系列 PLC\_CPU1214C 配置 SM1281 振动模块,整个系统放置在控制柜中。通过上位机可以实现风机运行状态(手动/自动)的选择,并且可以实现运行及监控参数的设定,同时可以实时显示齿轮箱、传动轴、变频器运行状态和油温、油位的报警情况,同时显示进水与出水温度。PLC 系统除对上述部件进行监控外,还可以通过对进、出水温度的采集判断,智能改变风机运行频率的大小以及风机的运行总台数,与生产所需相匹配,大大节省系统所消耗电量,避免造成资源浪费,实现风机冷却系统智能监测与控制。

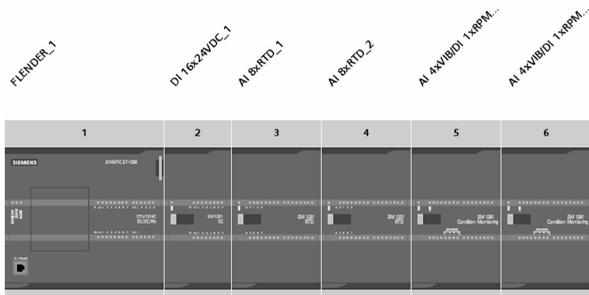


图 7 硬件组态

### 4.2 监控系统软件设计

下位机 PLC 程序采用 TIA V14 系统进行编制,下位机程序可以实现风机手动/自动启停、智能改变运行频率、运行状态监控预警,齿轮箱主要部件运行状态监控预警以及传动轴运行状态监控预警。程序的主要编制思路为:PLC 的每个扫描周期都会对输入接口进行数据采集,并利用特定程序对数据进行处理,当处理结果大于设定值时,即当齿轮箱振动频率大于设定值以及两个霍尔传感器数据采集时间不一致时都会进行相应报警并自动停机,避免断齿、轴承失效或者传动轴断裂等安全事故的发生,同时通过声光报警,通知相关工作人员进行处理。齿轮箱运行状态检测过程中,专家系统不断通过对 PLC 收集的数据的分析进行相关部件寿命预判,当故障发生时,可以利用专家系统进行故障定位,实现靶向维护,减少检修时间,提高响应速度,最大程度的减少因故障停机对正常生产的影响。

## 5 试验测试结果与分析

由于现场传动轴失效周期较长,人工实验安全性要求极高同时相关部门授权困难,进行细致的参数分析同样较为困难,故通过模拟实验验证上述传动轴监测系统的稳定性与精度。具体实验实施如下:

利用 S7-1214C 改变 MM440 型变频器输出频率,MM440 型变频器控制三相异步电机启停以及其运行频率,利用 3D 打印机打印的与现场传动轴相同尺寸的模拟轴,借助搭

建的实验平台进行实验同时记录实验数据,通过对实验数据的分析来进行系统方案可行性校验。本实验过程主要应用到控制变量法、等效替代法等实验方法。

在四根模拟轴圆周面侧方分别以错开角度  $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$  安装两处信号触发器,为方便实验的进行,同时为保证实验结果的准确性,在每根模拟轴安装到测试实验系统之后,利用测试程序依照 35 Hz、40 Hz、45 Hz、50 Hz 顺序调节电机运行频率,而不是在某一运行频率下依次改变两处信号发生器的错开角度。电机通过变频器控制在每个运行频率下每次稳定运行 5 min。

实验过程中充分考虑到冷却塔风机传动轴的实际运行情况,离散出其具有代表性的实际运行频率,同时检验系统在风机运行频率改变过程中的可靠性。两处信号触发器互为参照,可以实现传动轴在运行频率改变过程中仍然对其运行状态进行监测,不必等到传动轴运行频率稳定后再进行监测。实验同时验证传动轴运行状态监测系统能否在传动轴处于任何运行状态下都可以保证监测的高灵敏度与结果的准确性。

通过多次实验,得到实验数据如表 1 所示。

表 1 传动轴故障监测实验数据

运行频率	35 HZ				40 HZ				45 HZ				50 HZ			
信号发生器 错开角度	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$												
实验次数	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
是否报警	否	是	是	是	否	是	是	是	否	否	是	是	否	否	是	是
是否停机	否	是	是	是	否	是	是	是	否	否	是	是	否	否	是	是

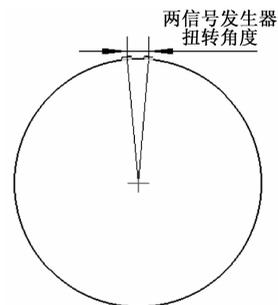


图 8 信号触发器扭转角度示意图

通过对以上实验数据可知,当两信号发生器扭转角度(即两联轴器相对扭转角度)超过  $2^\circ$  时,监控系统自动报警停机,与现场已失效联轴器比对发现:此监控方法报警停机时,还未到达联轴器破坏性失效极限,此时联轴器螺栓未被剪断,也就是说系统报警停机时,传动轴已经达到危险失效边缘,但此时传动轴联轴器还未将连接螺栓剪断,自动停机后,相关工作人员必须对联轴器与连接螺栓进行更换,对应冷却塔风机才可正常启动。在未对联轴器与连接螺栓进行更换的情况下,启动对应冷却塔风机后,监测系统通过对数据的再次采集分析,仍然会自动将对对应冷却塔风机的运行状态改为停止,相关工作人员在此情况下无法正常启动对应冷却塔风机。

## 6 结束语

利用现有传感设备,在详细分析冷却塔风机主要传动部

件齿轮箱与传动轴失效原因及形式的基础上, 设计出齿轮箱及传动轴故障监控系统, 此系统经过在中国石化集团天津石化公司的实际运行可知能够对齿轮箱及传动轴的运行状态进行良好的监控, 在其失效之前及时报警停机, 避免生产事故的发生, 并通知相关工作人员进行检修维护, 保证冷却塔风机整个传动系统始终具有良好的运行状态, 大大解放人力, 极好的保证生产的安全可靠进行。将此系统与冷却塔风机智能控制系统相结合, 可以实现冷却塔风机的智能变频与运行启停、故障预警与停机。由现场运行情况可知, 冷却塔风机齿轮箱及传动轴故障监控系统精度高、响应快、可扩展性好, 与冷却塔风机智能控制系统组成的冷却塔风机智能控制与故障监控系统运行状态良好, 改变了企业需要特定工作人员上塔启停风机、每个工作周期定时上塔巡检设备运行状态的情况, 在平时以及极端天气下, 工作人员只需在塔下控制

(上接第 45 页)

与同类型的设备相比较, 并结合其变化综合判断。由于绝缘电阻和温度密切相关, 测量绝缘电阻的同时记录被测物的温度。

## 2.2 上位机软件

为方便用户的操作, 结合 C# 和 SQL SEVER 数据库设计了人机交互软件, 软件的主要功能是进行用户管理及测量数据的管理, 从而完成直流耐压测试系统界面设计。界面中主要包括通道选择、测量数据显示、测量结果分析、数据保存、历史数据以及报表打印等。界面与下位机通过串口进行通信, 可实时的将测量参数显示在界面中, 实现绝缘耐压测量的实时监控。

同时, 也可在上位机界面中输入测量的相关参数, 发出指令给下位机, 实现绝缘耐压测量。其软件流程图如图 7 所示。

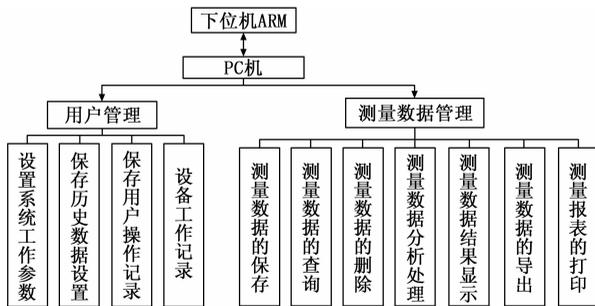


图 7 上位机软件流程图

## 3 实验结果与分析

对系统的硬件部分和软件部分分别测试, 并进行系统的整体调试。首先完成控制系统硬件测试, 硬件测试包括控制板测试和硬件电路测试, 为硬件系统正常运行奠定了基础。软件测试主要对控制板中各模块的软件测试以及系统整体软件调试, 检测系统程序设计是否满足系统要求。最后进行系统整体调试, 系统整体上电后, 借助上位机界面和操作台按键完成调试。经过系统多次运行及对被测物的测试结果表明, 绝缘耐压

室对系统进行上电, 系统可自动实现风机启停与运行状态监测, 此系统提高了企业的自动化程度, 受到企业的高度认可, 推广价值大, 前景良好。

## 参考文献:

- [1] 廖常初. S7-1200 PLC 编程及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 吴明强, 李霖红, 曹爱东, 等. 故障诊断专家系统综合智能推理技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (10): 932-934.
- [3] 李 剑. 基于 PLC 与变频器的风机节能控制系统应用探讨 [J]. 制造业自动化, 2011, 23: 127-129.
- [4] 初 琦, 樊继红, 李 娜. 自适应 PID 控制在智能楼宇空调节能系统中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2012 (12): 92-94.

测试系统的设计满足绝缘耐压测试的功能需求, 并且在试验过程中运行稳定可靠。

## 4 结论

本文介绍了耐压绝缘测试系统的工作原理, 说明了基于 STM32F429 的耐压绝缘测试系统的设计方法, 给出了硬件原理设计框图及下位机和上位机软件设计流程图。并对系统的硬件部分和软件部分进行了调试及软硬件联合的系统调试。满足当前耐压绝缘阻抗测试仪的升级需求, 对实现绝缘耐压测量的自动化, 具有一定的实用意义和推广价值。

## 参考文献:

- [1] 赵忠红, 朱建伟, 何勇军, 等. 基于 LABView 的绝缘耐压自动测试系统设计 [J]. 内燃机车, 2010, (6): 16-17, 30.
- [2] 杨文思. 通信电缆的绝缘和耐压测试 [J]. 电信科学, 2007 (8): 34-39.
- [3] 陈显东. 轨道交通绝缘耐压标准对比分析研究 [J]. 工程技术: 文摘版, 2016 (11): 00289-00289.
- [4] 黄 颖, 李瑞强, 张鹿平. 基于 C8051F 的耐压及绝缘阻抗测试系统的设计 [J]. 微计算机信息, 2005, 21 (23): 64-65.
- [5] 陈力生. 数字式兆欧表的设计 [J]. 电测与仪表, 2005 (10): 15-18.
- [6] 龚雄文, 汪仁煌, 严仍友, 等. 一种新型自动调压的电气耐压测试装置 [J]. 广东工业大学学报, 2007, 24 (1): 40-42.
- [7] 古子熔. 一种 16 位  $\Sigma-\Delta$  转换器的数字部分设计及实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [8] 李 谨. 交、直流耐压测试分析 [J]. 品牌与标准化, 2015 (5): 83-84.
- [9] 倪 婧. 直流耐压测试方法应用分析 [J]. 东南传播, 2015 (1): 153-154.
- [10] 金月新, 张彩霞. 绝缘电阻的测量 [J]. 中原文化研究, 2008, 16 (6): 122-122.
- [11] 鞠 跃. 水内冷发电机组绝缘性能测试的研究与实现 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.