DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.06.011

岸桥起升减速箱停机散热模型构建 与健康状态快速划分研究*

吕赛格,胡 雄*,王 冰,王 微,张道兵 (上海海事大学物流工程学院,上海 201306)

摘要:为了进一步提升岸桥安全监测水平,采用了构建起升减速箱停机散热模型的方法,研究了减速箱的停机散热规律,实现了对 其健康状态的快速划分。结合传热学原理及减速箱停机散热机理,构建出了减速箱的停机散热模型,并利用上海港某岸桥起升减 速箱的现场监测数据进行了数据拟合,找出了对应于影响减速箱散热最重要因素的模型拟合参数,并给出了减速箱的散热规律;在 此基础上,通过减速箱停机散热的初始温度对其进行了健康、亚健康、故障3种状态的快速划分。研究结果表明:基于起升减速箱 停机散热的初始温度,可以对其健康状态进行快速而有效地划分。

关键词:起升减速箱;停机状态;散热规律;状态划分 中图分类号:TH213.8
文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)06-0733-07

Establishment of heat dissipation model and health state fast division of lifting gearbox of quayside crane in stopped state

LV Sai-ge, HU Xiong, WANG Bin, WANG Wei, ZHANG Dao-bing (Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to further improve the safety monitoring level of the quayside crane, the method of constructing the heat dissipation model of a lifting gearbox was adopted to study the heat dissipation law of the gearbox when it stopped and the fast division of its health state was realized. Based on the heat transfer principle and the heat dissipation mechanism of the gearbox stop, a heat dissipation model of the gearbox was constructed. And by using the field monitoring data of the lifting gearbox of a quayside crane in Shanghai port to conduct data fitting, the model fitting parameters corresponding to the most important factors affecting the heat dissipation of the gearbox were found out and the heat dissipation law of the gearbox was put forward. On this basis, the health, sub-health and fault states of the gearbox were divided rapidly according to the initial temperature of heat dissipation when the gearbox stopped. The results show that the health state can be divided rapidly and effectively based on the initial temperature of heat dissipation when the lifting gearbox stops.

Key words: lifting gearbox; stopped state; law of heat dissipation; state division

0 引 言

作为大型集装箱港口装卸设备的岸桥在促进经济 发展中扮演着极其重要的角色^[1]。起升机构是岸桥 的重要组成部分之一,通常岸桥工作环境恶劣,起升减 速箱工作频率高、负载重,会产生大量热量,如果热量 得不到良好散发,会使减速箱的温度升高^[2],故障、损 坏现象会随之出现,这将大大缩短减速箱的使用寿命, 进而影响岸桥正常工作。因此,研究起升减速箱散热 规律,并快速判断健康状态,对提升岸桥安全监测水平

收稿日期:2020-10-03

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2013A20411606);国家自然科学基金资助项目(31300783) 作者简介:吕赛格(1996 -),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事物流装备与安全工程方面的研究。E-mail:1147610556@qq.com 通信联系人:胡雄,男,教授,博士生导师。E-mail:huxiong@shmtu.edu.cn

具有重要意义。

目前,对减速箱散热规律的研究已有少量文献。 高春慧等^[3]对某起升减速箱停机状态下的散热规律 进行了研究,通过集总热容法推导出散热温度模型并 得出了一些散热规律。YAN Ke 等^[4]对减速箱内的球 轴承保持架在超高转速下的散热特性进行了研究,得 出了空气油流量和热沉降与合适的保持架参数紧密相 关。张昕冉等^[5]对风力发电机内部减速箱的散热进 行了初步探讨,分析了减速箱过温的主要影响因素及 危害,并提出了多种散热改造方案。但当前大多研究 是通过热网络法或有限元法来建立减速箱的稳态温度 场分布模型,而对于减速箱非稳态的温度场,即减速箱 温度随着时间的变化而时刻发生变化的温度模型构建 与分析则很少有研究。

随着机械设备日趋复杂,多数学者倾向于研究机 械设备的故障位置或类型,常常忽略其健康状况,而健 康状态识别为机械故障诊断奠定坚实的基础^[6]。当 前最普遍的研究主要是基于振动信号的分析与处理来 对减速箱进行健康诊断。振动信号具有丰富的健康状 态信息和易于测量的特点,因此,提取足够健康状态信 息的特征是减速箱健康诊断的关键^[7]。LI Yong-zhuo 等^[8]基于信号稀疏分解和阶数跟踪技术,提出了一种 从减速箱非平稳振动信号中提取故障特征的新方法, 用于对减速箱的健康状态识别。侯美慧等^[9]以岸桥 减速箱为研究对象,基于 Weibull 和 GG 模糊聚类对其 进行了健康状态识别,划分了健康、亚健康、故障3种 状态。BARBIERI N 等^[10]以汽车变速箱为研究对象, 通过比较受损与未受损振动信号的能量级和熵来直接 验证变速箱是否存在损伤。CHEN Hui-peng 等^[11]采 用基于深度卷积神经网络的双向振动信号数据融合方 法对行星减速箱进行了健康状态识别,并与 SVM 和 BPNN 方法进行了比较,其分类准确率明显更高。

虽然大部分设备的故障都可以通过分析振动信号 来反映,但现场采集的信号数据往往掺杂着许多干扰 信号,使得信号的特征与故障并不是简单对应的关系, 从单一的振动信号中提取出判断故障的依据比较麻 烦^[12]。所以,需要寻求其他的指标来共同完成对设备 健康状态的评估,若将几个衡量减速箱健康状态的指 标结合起来共同进行分析研究,这将会降低提取判断 故障依据的复杂性,并提高减速健康诊断的准确性与 可靠性。然而,目前基于温度信号的减速箱状态划分 很少有研究。

由于工作状态下,影响减速箱散热的因素过于复杂,因为减速箱的散热系统在整个运行过程中都是起

作用的,在工作状态下与在停机状态下的散热系统是 相同的,散热条件也是一样的。而在停机状态下研究 散热系统,建立散热模型相比于工作状态时影响因素 少,较为简单。

综上所述,笔者针对停机状态下的减速箱散热规 律及健康诊断进行研究,以上海港某岸桥起升减速箱 为研究对象,分析散热机理及影响散热的主要因素,进 而建立散热温度模型,从而得到散热规律;最后通过停 机散热初始温度的判断对减速箱的健康状态进行快速 划分。

1 减速箱的散热温度模型

1.1 散热机理分析

为研究影响某岸桥起升减速箱散热的因素,笔者 对其散热机理进行分析。减速箱的热态过程包括产生 热量和散发热量的过程^[13]。减速箱由啮合齿轮、轴承 及齿轮搅动润滑油的摩擦等原因产生热量,通过箱体 内润滑油的吸热及箱体表面向空气中传递热量来散发 热量,即齿轮、轴承等产生的摩擦热一部分由润滑油吸 收,另一部分散失到空气中。正常情况下,润滑油吸收 的热量与散失到空气中的热量总和远远大于减速箱内 各构件由于摩擦产生的热量,因此会减少减速箱的温 升,达到散热的目的。

1.2 影响散热的因素分析

在工作状态下,减速箱的温度受各种因素影响而 时刻发生变化,不易分析,而停机状态下的温度曲线是 单调下降的,此时只有散热没有产热,只需分析影响散 热的因素,主要包括:散热系数、散热表面积、润滑油的 品质、润滑油量、初始温度和环境温度等^[14]。本文采 集高速轴上一处的温度,在减速箱高速轴、润滑油确定 的情况下,高速轴的散热系数、散热表面积、润滑油的 比热容等为恒定的量。下面分析其余变量对减速箱散 热的影响情况:

(1)润滑油油量

在不超过额定油量时,减速箱温度与润滑油量成 负相关,即油量越多,吸收的热量越多,减速箱的温度 下降越快。但润滑油量越多、吸收的热量越多时,油温 会升高,导致粘度减小、流动性增加,进而增加润滑油 的泄漏机率,使整个润滑系统油压减小,引起润滑油成 膜性能变差,导致减速箱内部构件发生接触磨损,最终 使得减速箱频繁发生故障^[15]。

(2)初始温度

笔者选取上海港3台岸桥在同一天同一时间段的

散热温度数据,3台岸桥构造基本一致,又处于同一环 境中,此时的变量为岸桥停机时减速箱的温度,即减速 箱开始散热的初始温度。

不同初始温度下,3 台岸桥起升减速箱经过相同时间(4 h),测得的温度变化率如表1 所示。

岸桥	初始温度 <i>T</i> ₀/℃	4 h 后的温度 <i>T/</i> ℃	温度变化率 /(%)
1#	78.458 6	58.741 9	25.13
2#	67.357 4	55.704 6	17.30
3#	57.485 6	50.483 9	12.18

表1 不同初始温度下岸桥起升减速箱温度变化率

根据表1可以看出:经过相同时间,初始温度低的 减速箱温度变化率比初始温度高的小,即初始温度越高,减速箱温度下降趋势越大。这可能受冷却风扇的 调节作用,当温度较高时,风扇会增大自身功率来加快 散热的速率。

(3)环境温度

由传热学原理可得,减速箱温度与环境温度成负 相关,即环境温度越高,从减速箱散失到空气中的热量 就越小,减速箱温度下降的速率就越慢。

1.3 散热温度模型

停机状态下,减速箱只散热不产热。散失的热量 一部分由润滑油吸收,一部分则散失到空气中,所以温 度 *T* 与润滑油吸收的热量 *Q*_{oil}和散失到空气中的热量 *Q*_{oi}相关,可表示为:

$$T = f_s(Q_{\text{oil}}, Q_{\text{air}}) \tag{1}$$

式中: $f_s(Q_{oil}, Q_{air}) - T 与 Q_{oil} 和 Q_{air}$ 的函数关系。

影响物质吸热能力的因素有:物质的种类、质量及 其温度变化值。对于润滑油,其吸热的公式如下^[16]:

$$Q_{\rm oil} = cm\Delta t \tag{2}$$

式中:c—润滑油的比热容, J/(kg·K);m—润滑油的 质量, kg, 质量等于体积v 乘以密度 ρ , 润滑油的体积可 以等效为润滑油量 q; Δt —润滑油温度的变化值, \mathbb{C} 。

散失到空气中的热量为:

$$Q_{\rm air} = \alpha S(T_0 - T_{\rm air}) \tag{3}$$

式中: α —散热系数, W/(m・K); S—散热表面积, mm²; T_0 —初始温度, °C; T_{air} —环境温度, °C。

由式(1~3)可得:

$$T = f'(c, q, \alpha, S, T_0, T_{air})$$
(4)

式中: $f'(c,q,\alpha,S,T_0,T_{air})$ 一T与 c,q,α,S,T_0 和 T_{air} 的函数关系。

由 1.2 分析影响减速箱散热的因素得:*c*, α 和 *S* 是确定的,所以温度模型为:

$$T = g(q, T_0, T_{air}) \tag{5}$$

式中: $g(q, T_0, T_{air})$ 一温度 T 与润滑油量 q、初始温度 T_0 和环境温度 T_{air} 的函数关系。

2 起升减速箱数据拟合



图1 某岸桥起升机构结构及测点布置示意图

本文需要采集的信号数据为高速轴的振动与温度 数据。起升减速箱高速轴上的实际温度、振动加速度 传感器测点图如图2所示。



图 2 起升减速箱高速轴实际温度、振动加速度 传感器测点图

2.1 数据采集

笔者对上海港某岸桥进行数据采集。该岸桥在 2009年刚投入使用为健康状态,高速轴轴承在2014 年发生故障,并在维修后恢复工作,此处采集了从2009 年至2015年,即减速箱从正常工作到故障再到正常工 作一个周期的数据。岸桥在工作过程中,会由于台风或 者检修等原因,不定时地停机,使得非工作态数据会混 杂在工业大数据中,同时也会产生部分由于传感器故障 导致的数据缺失。本文在分析前已进行了数据的预处 理,祛除了无效数据和缺失数据,所以并不影响研究。

本文涉及的测点编号、名称及其通道如表2所示。

表 2 涉及测点的名称及对应通道

测点编号	测点名称	对应通道
HGH1V	减速箱高速轴振动烈度(V向)	24
HGH1W	减速箱高速轴温度	26

2.2 数据预处理

采集的信号包括工作信号和停机信号:工作时的

振动信号是有明显的幅值,而停机状态下的振动信号幅 值接近地毯值[17];对于温度信号,工作状态下减速箱既 产热又散热,温度信号呈现频繁波动的形状,而停机状 态下减速箱不产热只散热,则温度信号是单调下降的。

振动信号与温度信号的时序图如图3所示。



圆圈以外为工作状态下的信号,圆圈以内则是停 机状态下的信号。

由于现场存在环境噪声等多种因素干扰,采集的 数据并不都是完整的,为了提高数据分析与处理的准 确性和可靠性,需要对原始数据进行预处理。预处理分 为两个阶段:第一个阶段处理毛刺,运用采集系统自带 的功能进行毛刺剔除;第二阶段根据研究需要进行处 理,包括去除本底噪声、清除空数据和信号平滑处理等。

本文通过系统编程清除空数据,采用局部最小值 法去除本底噪声,对由量化误差造成曲线抖动的数据 进行平滑处理,得到较为平整光滑的信号。

平滑处理前后的温度信号如图4所示。

笔者提取停机状态下的温度数据进行拟合,对数 据进行多项式拟合和非线性拟合。不同拟合模型对 2011年4月9日至15日中停机状态下的温度数据的

4种拟合模型的拟合度如表3所示。

拟合模型	拟合度(R ² /R-Sqr)
四阶多项式拟合模型	0.999 5
Exp3P2 拟合模型	0.984 89
Exponential 拟合模型	0.990 81
Explinear 拟合模型	0.99979

表3 4种不同模型的拟合度

由图 5 及表 3 可以看出, Explinear 指数模型的拟 合效果最好。笔者选其作为减速箱的散热温度模型, 其数学表达式为:

$$y = p_1 e^{-\frac{x}{p_2}} + p_3 + p_4 x \tag{6}$$



该模型的拟合参数如表4所示。

表4 Explinear 模型拟合参数

拟合模型	拟合参数				
	p_1	p_2	p_3	p_4	
Explinear 拟合模型	12.548 08	743.80047	42.22779	-0.002 25	

笔者对选定的散热温度模型进行可靠性验证:将 该模型对 2009 年至 2015 年间的停机散热数据进行拟 合,其中 4 组数据的拟合情况如图 6 所示。

将拟合参数及误差生成报告,如表5所示。



图 6 Explinear 模型验证

表5 4 第	组验证数据的拟合参数及误差
--------	----------------------

会粉	拟合1		拟合 2		抄	拟合 3			
∕────────────────────────────────────	参数值	误差	参数值	误差	参数值	误差	参数值	误差	
p_1	25.464 29	0.672 41	14.88046	0.326 45	14.711 46	0.210 47	20.141 21	0.257 08	
p_2	1 067.667 26	47.011 62	680.082 1	27.213 43	807.517 64	18.962	827.773 88	19.377 06	
p_3	34.933 44	0.722 17	46.66644	0.342 88	49.549 37	0.223 33	27.401 43	0.272 58	
p_4	-0.001 77	1.44903×10^{-4}	-0.003 06	9.649 59 $\times 10^{-4}$	-0.001 96	5.926 05 $\times 10^{-4}$	-0.001 19	6.543 35 × 10 ⁻⁴	

由表5可以看出,选定的 Explinear 指数模型拟合 效果良好,则将其作为散热温度模型符合减速箱停机 散热规律。

高春慧对减速箱的停机散热建立集总热容模型, 对数据进行拟合后得到数学模型 y = e^{a+bc+cx²},虽然拟 合效果良好,但其只是对减速箱散热模型的建立做了 基础性的工作,并没有将拟合出的公式与实际影响散 热的因素对应起来。由于篇幅原因,本文将不对两个 模型的具体对比进行阐述,会在后续的研究中进行 完善。

2.4 停机散热规律

结合停机散热模型及拟合参数、误差整合可以得

到以下规律:

(1)上海港某岸桥起升减速箱的停机散热温度曲 线呈指数衰减形式,其数学表达式基本符合式(6);(2)曲线拟合得到的 Explinear 指数模型的参数中,参 数 p₄ 为负数,参数 p₂ 的数量级在 4 个参数中最大;(3)在拟合过程中参数 p₂ 的误差最大,说明 p₂ 对减速 箱的停机散热影响最大,其对应于影响减速箱停机散 热的因素中最重要的因素;(4)从拟合曲线可以看出, 停机状态下减速箱的温度先下降很快,当下降到一定 程度后,下降趋势变得平缓,即减速箱散热存在着先快 后慢的规律。原因是运行结束后,减速箱温度较环境 温度高,所以其传递热量的能力较强,热量散失较多, 此时温度下降较快;当减速箱温度下降到接近环境温 度时,由于温差越来越小,传递热量的能力也随之变 小,热量散失较少,此时温度下降趋势变得平缓。

3 减速箱健康状态快速划分

减速箱正常工作时,散热系统是健康的,此时散热 远大于产热,停机时的温度较低,即减速箱开始停机散 热的初始温度较低;而当减速箱出现故障时,散热系统 不能正常运作,产生的热量得不到良好散发,停机时的 温度较高,即减速箱开始停机散热的初始温度较高。 由此可得,减速箱的状态与其停机散热的初始温度相 关联,将其作为减速箱健康状态快速划分的依据。

基于停机散热初始温度的减速箱状态快速划分流 程图如图 7 所示。



图 7 基于停机散热初始温度的减速箱状态快速划分流程

首先笔者进行温度数据的采集、预处理,然后提取 停机散热曲线的初始温度,将所得的初始温度绘制成 变化趋势图,从图中分析得到减速箱的健康状态情况。 李亚洲^[18]通过振动信号的振动烈度熵将上海港某岸 桥起升减速箱划分为健康、亚健康、故障 3 种状态,并 给出了对应的时间段。

本文对 2009 年至 2015 年采集的温度数据进行预 处理后,提取每个月减速箱停机散热时的初始温度,并 绘制初始温度的变化趋势图,如图 8 所示。



从图 8 中可以看出,减速箱停机散热的初始温度 存在明显的规律:2009 年 1 月至 2010 年 6 月、2014 年 10 月至 2015 年 12 月初始温度较低,此时对应健康状态;2014 年 1 月至 8 月初始温度较高,此时对应故障 状态;2010年7月至2013年12月初始温度介于中间, 此时对应亚健康状态。

减速箱健康状态划分结果如表6所示。

表6 减速箱健康状态划分结果

时间段	减速箱健康状态
2009年1月至2010年6月	健康状态
2010年7月至2013年12月	亚健康状态
2014年1月至8月	故障状态
2014年10月至2015年12月	健康状态

4 结束语

本文基于 2009 年至 2015 年期间现场采集的上海 港某岸桥起升减速箱在停机状态下的温度数据进行了 研究,构建了岸桥起升减速箱的停机散热模型,并对起 升减速箱的健康状态进行了快速划分;其主要过程 如下:

(1)结合传热学原理及减速箱停机散热机理,分析了影响减速箱停机散热的因素,推导了散热温度模型;

(2)通过数据拟合、验证得到了停机散热的数学 模型,归纳了减速箱的散热规律,找出了对应于影响减 速箱散热最重要因素的拟合参数,为运行状态下减速 箱的散热系统状态研究提供了指导意义;

(3)以减速箱停机散热的初始温度为判断依据,

对减速箱进行了健康、亚健康、故障3种状态的快速 划分。

本文的研究结果可为后续的研究人员制定减速箱 的故障诊断及维修保养方案提供参考。

参考文献(References):

- [1] 李明轩, 耿卫宁, 宋海涛. 我国岸边集装箱起重机技术发展回顾及展望[J]. 集装箱化, 2018, 29(11):8-11.
- [2] 谢凯武,黄长征,龙 慧,等.基于热平衡的齿轮减速器箱 体内腔结构设计研究[J].机电工程技术,2019,48(11): 141-143.
- [3] 高春慧,胡 雄. 某起升机构减速箱停机散热规律研究[J]. 机械传动,2016,40(9):48-51,60.
- [4] YAN Ke, WANG Ya-tai, ZHU Yong-sheng, et al. Investigation on heat dissipation characteristic of ball bearing cage and inside cavity at ultra high rotation speed[J]. Tribology International, 2016(93):470-481.
- [5] 张昕冉,高 阳,袁小华,等.对风机机舱内部齿轮箱散热的初步探讨[J].电子世界,2019(23):104.
- [6] LI Ma, TAO Zhang. Health status identification of rolling bearing based on SVM and improved evidence theory[C]. Proceedings of 2016 IEEE 7th International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing:IEEE,2016.
- [7] LIU Li-bin, LIANG Xi-hui, ZUO M J. A dependence-based feature vector and its application on planetary gearbox fault classification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018 (431):192-211.
- [8] LI Yong-zhuo, DING Kang, HE Guo-lin, et al. Non-stationary vibration feature extraction method based on sparse decomposition and order tracking for gearbox fault diagnosis

[J]. Measurement, 2018(124): 453-469.

- [9] 侯美慧,胡 雄,王 冰,等. 基于 Weibull 和 GG 模糊聚
 类的岸桥减速箱健康状态识别方法[J]. 机械强度,2019,
 41(5):1023-1028.
- [10] BARBIERI N, MARTINS B M. Analysis of automotive gearbox faults using vibration signal [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019(129):148-163.
- [11] CHEN Hui-peng, HU Niao-qing, CHENG Zhe, et al. A deep convolutional neural network based fusion method of two-direction vibration signal data for health state identification of planetary gearboxes [J]. Measurement, 2019 (146):268-278.
- [12] 高春慧.基于数据驱动的桥吊起升减速箱健康诊断与评价技术[D].上海:上海海事大学物流工程学院,2016.
- [13] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版 社,2006.
- PRERINI V L, MILANESE F H, MELO C R, et al. Analysis of heat transfer of a speed reducer [J]. Semina: CiênciasExatas e Tecnológicas, 2014, 35(1):87-102.
- [15] GAN Zhuo-ting, YAO Ting, ZHANG Meng, et al. Effect of temperature on the composition of a synthetic hydrocarbon aviation lubricating oil [J]. Materials, 2020, 13 (7): 1606.
- [16] 刘志全.高速滚动轴承热分析[J]. 润滑与密封,1998 (4):66-68.
- [17] YIN Yin-an, HU Xiong. Vibration carpet value in classification and evaluation of the motor condition [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(1513):445-449.
- [18] 李亚洲.基于信息融合的桥吊起升减速箱健康诊断与评价技术[D].上海:上海海事大学物流工程学院,2017.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

<sup>吕赛格,胡 雄,王 冰,等. 岸桥起升减速箱停机散热模型构建与健康状态快速划分研究[J]. 机电工程,2021,38(6):733-739.
LV Sai-ge, HU Xiong, WANG Bin, et al. Establishment of heat dissipation model and health state fast division of lifting gearbox of quayside crane in stopped state[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(6):733-739.</sup>