

# 基于光纤光栅传感测试技术的桥梁健康监测系统

刘胜春 郝义昶 南秋明 武汉理工大学光纤传感技术中心 430070

摘要：本文以某长江公路悬索桥为工程应用背景，系统的介绍了基于光纤光栅传感测试技术的桥梁健康监测及数字化管养。

关键词：光纤光栅；健康监测；评估

## 前言

自 1940 年美国的 Tacoma 大桥发生风毁事故以后，桥梁结构健康监测的重要性就引起了人们的普遍重视，但由于早期的检测手段比较落后，所以在应用上一直受到很大的限制。近几年，传感测试技术、数据处理技术、计算机软硬件技术、信号分析技术和人工智能技术等学科的发展为桥梁健康监测与状态评估系统开发研究工作提供的方法和依据。建立一套可靠的桥梁结构健康监测评估系统，使管理维护部门能根据该桥的结构破坏特征及实际使用情况进行有效的维护管养已经成为工程界的共识。而依靠传统的以目测为主的表面巡检已经无法满足特大性桥梁的健康监测和维护管养，且不能有针对性的进行维护。因而桥梁结构健康监测评估，对于确保桥梁结构的安全运营及延长使用寿命，进行科学的管养维护具有重要的理论意义和工程实施价值。本文以某长江公路大桥长期健康监测及数字化管养系统为例，来说明基于光纤光栅传感测试技术的桥梁健康监测。

## 一、光纤光栅传感技术的原理及应用

光纤光栅传感器的工作原理及其应用：

光纤光栅传感器分布在光纤芯的一小段范围内，它通过改变光纤芯区折射率，产生小的周期性调制而形成的，其折射率变化通常在  $10^{-5}$ — $10^{-3}$  之间，并沿光纤轴线发生周期性变化。当光纤的入射光波波长满足布喇格衍射条件

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Gamma \quad (1)$$

其中：

- $\lambda_B$  为布喇格波长；
- $n_{eff}$  为有效纤芯的折射率；
- $\Gamma$  为纤芯折射率的调制周期。

该波长的光波将沿来路发生反射，该反射光就是布喇格反射光。当使用一个宽带光源从光纤光栅传感器一端入射，则波长满足(1)式的光波就会发生布喇格反射，而其余波长的光波仍然照常传播。由此可知，当光纤光栅所处环境的物理量发生变化时，光栅周期或纤芯折射率会随之发生变化，使反射光的波长  $\lambda_B$  发生变化，通过测量变化前后反射光波长的变化，就可以获得待测物理量的变化情况。在光纤若干个部位写入不同栅距的光纤光栅，就可以同时测定若干部位相应物理量及其变化，实现分布式光纤传感或准分布式光纤传感。

将各种光纤光栅传感器埋入建筑结构、桥梁、水坝等大型土木工程结构中，可有效地检测结构的应力、应变、温度、振动、损伤和裂缝等。武汉理工大学根据不同工程的特点和需要，建立了包含传感器、解调仪、数据采集和应用软件等在内的大规模、分布式的光纤光栅健康监测系统。

## 二、健康监测系统

某长江公路大桥为特大型悬索桥，桥跨布置为 250+1280+440 米，矢跨比为 1/10.5。其长期健康监测系统主要由传感器及数据采集传输子系统、中央计算机处理控制系统、健康监测及状态评估专家系统等三部分组成。

### 2.1 传感器及数据采集传输子系统

监测仪表主要有光纤光栅应变计、光纤光栅温度计、光纤光栅测力环、液位连通管、光电绕线传感器、拉绳式位移传感器、GPS、加速度传感器、位移传感器及以光纤光栅传感器作为测量元件的测力环。光纤光栅传感器采用了内部埋入式和外表贴片式两种布置方式。其它信号的引入对于综合状态的评估是很重要的数据和信息，主要包括：桥墩、支点等的沉降检测、交通监控系统、气象站、车辆称重系统和锚碇除湿系统等。

系统监测的内容要遵循功能要求和效益—成本分析两大准则，并优化传感器的布设，以达到用最小的代价来正确把握结构反映全局，避免无效工作和资源浪费。系统监测传感器的布设是在对若干既有桥梁运营情况调查和对典型病害进行分析的基础上，结合有限元模型分析和结构局部应力计算，从而确定了传感器的布设及规模，由此实现对结构状态改变信息的最优采集，使有限的传感器发挥最大的功效，提高系统的性价比。

### 2.2 健康状态评估子系统

目前，桥梁健康状态综合评估的方法有多种，但所采用的理论主要集中在层次分析法、专家系统、模糊理论、可靠度理论和神经网络等，本系统采用专家系统来评估桥梁的健康状况。

桥梁结构健康状况评估子系统是整个长期健康监测系统的核心，根据传感器系统、数据采集和预处理系统获得的数据和信息，评估系统进行科学分析和客观评估，实现对桥梁结构的整体安全性、耐久性和正常使用性做出科学评价，为桥梁的管理者提供维护决策依据。

为实现这一目标，评估子系统包含如下功能：

- \* 基于可视化仿真的实时监测及预警报警功能；
- \* 损伤及剩余寿命评估功能；
- \* 桥梁健康状况分析评估功能；
- \* 运营周期费用分析；
- \* 基于 GIS 的数字化管养决策支持功能。

### 2.3 预警报警系统

大跨度悬索桥是否处于正常工作状态，结构整体和局部工作状态和受力状况如何是桥梁管理者所关心。为此，在健康监测和安全评估中建立一个阈值预警报警子系统。该系统主要对关键部位的应力、索力、线形、位移等监测指标的异常提供预警及报警信号，以便引起桥梁管理者重视，并为其它系统工作进行提供相应依据。

#### (1) 直接识别流程

报警从系统实时接受数据开始就能进行分级报警。对于风速、温度、车辆超载等监测指标，可采用直接识别报警。即根据设置的超限阈值，判断传感器监测传输来的数据，如果超限，就实施报警，并触发紧急事件措施，监测数据存入超值域事件数据库，以便进行大桥健康状态的影响评估，直接识别流程如图 1。

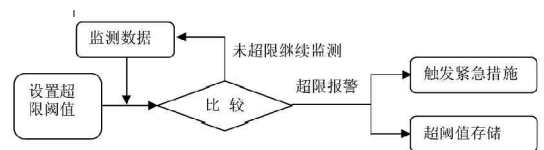


图 1 直接识别预警报警

#### (2) 分别识别预警报警

而根据车辆超载、地震、环境等引起的大桥结构响应，对大桥的健康状态进行识别，属于结构分析上的“反问题”范畴。以现有的研究理论水平解决这样的“反问题”还有相当大的困难。本方案采用基于有限元模型修正方法进行问题的正分析。分析识别报警方法是通过营运初期传感器监测大桥结构反应的有限点数据，对大桥结构模型进行修正，并进行动、静态特性分析，从而设置相应的响应阈值，然后与实时监测值进行比较，自动判别是否触发报警和进行紧急处理。如果超限，就实施报警，处理措施同直接识别报警。分析识别的流程如图 2：

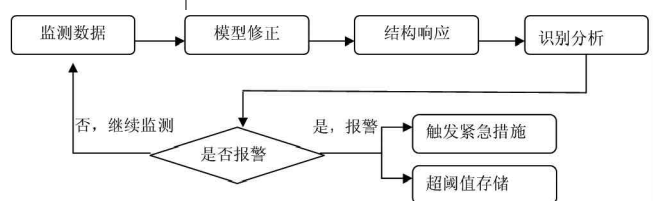


图 2 分析识别预警报警

### 2.4 桥梁健康状况分析评估

有针对性的选择桥梁健康状况的评估模块是分析评估的重点，健康状态评估模块主要包括桥梁结构的定期健康状态评估和对监测指标和整体状态的趋势预测。评估模块的基础是评估模型的选择和建立，根据悬索桥的特点，评估模型按评估对象的层次建立，评估对象按桥梁的主要构件划分，分为索塔、主索、主梁、吊杆。每个主要构件又可划分为若干子构件，每个子构件拥有各自的多项属性，该属性即为评估指标，可以是文字描述，也可以是量化的数据；同时，建立的评估模型应该包含所有在大桥上进行的在线监测的全部评估指标。根据评估模型建立的健康状况评估模块见图 3。

## 三、结束语

桥梁健康监测是国际上前沿热点研究领域，目前正迅速发展。大型桥梁的健康监测及数字化管养系统涉及到桥梁结构、计算机、信息科学、智能材料和测试技术等多个领域，通过多学科交叉、综合而成，而基于光纤传感测试技术的桥梁健康监测有着广泛的应用前景。但桥梁健康监测尚处于起步阶段，通过测量信息对结构进行健康评价还没有建立完善的科学理论；同时，健康监测中也有些问题需要我们做进一步的研究和深化。

### 参考文献：

- [1] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报. 2001, 29(1): 65 - 69.

(下转第 126 页)

# 钢包车断轴的分析 and 对策

石玉梅 安阳钢铁公司第二炼轧厂

摘要：本文针对二炼连铸设备钢包车轴断轴频繁发生进行了技术改造，原钢包车轴一个月平均断三根，月修频率最多可达 12 次，直接影响炼钢生产，改造后经投入使用已 6 个多月，未发生断轴现象，同时也解决了轮罩、滚键的发生，改造效果显著，为炼钢快节奏生产创造了有利条件。

关键词：钢包车；断轴；措施

## 概况

钢包车是安阳钢铁公司第二炼钢厂的主要设备之一，在线运行和备用的共有 9 台次。随着炼钢生产单炉产量的不断增加和生产节奏的不断加快，经常出现断轴突发性事故，导致钢水包倾斜，甚至翻倒，直接影响着后续生产的正常进行。钢包车故障频繁发生，仅更换钢包车轴月修频率可达 12 次，每年断轴在 30 根左右，还经常发生轮罩、滚键设备事故，每星期有两根钢包车轴需要下线修理，不仅严重制约着设备的正常运行，而且材料、备件费用一直居高不下，还增加了工人的劳动强度，并危及其人身及设备安全，给生产带来了不利的影响。对钢包车的改造势在必行。

## 1、分析原因和方案

经过长时间仔细观察、反复思考，分析研究钢包车轴的断裂面和位置，发现轴在交变应力的反复作用下产生了疲劳裂纹，继而发生了疲劳断裂。随着应力循环次数的增加，疲劳裂纹不断扩展，使轴承受载荷的有效面积不断减少，最后当减少到不能承受外加载荷作用时，就突然发生断裂。如图 1 所示，疲劳断口是以小裂纹为疲劳源逐渐向内扩展成若干弧线的光滑区和最后断裂的粗糙区组成。根据力学模型，制定三种改造方案。第一方案是增加钢包车轴的横截面积，即把原钢包车轴加粗，但会影响与轴配合的其他零件的尺寸，且增加轴的材料给加工造成不便。第二种方案是不改变原来轴的横截面积，而是改变材质，将原来的 45 号钢改为合金钢或其它高强度材料但造价太高会增加费用，这与我们提出的降低成本增加效益相悖，也就增加了吨钢的成本。第三种方案是既不改变轴的横截面积，也不改变它的材质，只改变装配形式。

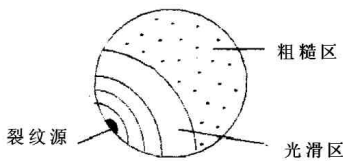


图 1

通过对这三种方案进行的可行性研究，显然，第三种方案是可实施方案，且对比前两种方案，投入的成本也较小。

## 2、改造方案的实施

在轴的总长和轨道不改变的情况下，以原钢包车为基础，保证原有的装配技术要求，对钢包车主动轮轴、被动轮轴及车身进行了必要的技术改造。

### 1) 主动轮轴的技术改造

钢包车主动轮轴在改造前是由两个轴承支撑，轴承座均布在车轮的外侧，其改造前的受力分析及内力图如图 2 所示，在截面 B、C 处及其之间，钢包轴的弯矩最大，轴在这种情况下工作，不断发生疲劳破坏，当轴破坏到一定程度，不能在承受作用力时就突然导致轴断裂。

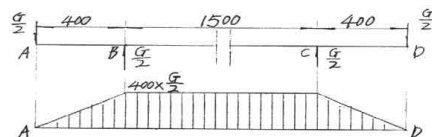


图 2 改造前受力分析及内力图

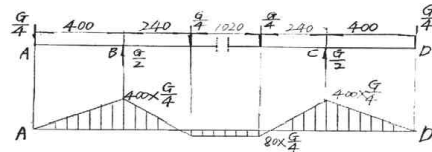


图 3 改造后受力分析及内力图

经过研究分析，采用增加支撑的办法，来分散载荷，减少最大弯矩。改造后在车轮的内侧各增加一个轴承座组件，其改造后的受力分析及内力图，如图 3。由图可知并与改造前比较，在截面 B、C 处及其之间内力分别相应减小，使轴所受的弯矩大大减小，可见，增加两个轴承座组件后，轴在四个支反力作用下，避免轴发生断裂。在车轮的外侧各增加了一对螺母，对车轮进行轴向固定，改变了原来依靠轴套和轴承两侧的挡板来定位的方法。解决了钢包车轮罩的问题。

为了防止滚键的发生，增大了轮与轴配合过盈量达到了 0.15—0.25mm，在这样大的过盈量

下，原来的装配方法已不能使用，由过去的锤击法改为热装法，降低了工人的劳动强度。对车轮加热温度严格控制在 250 防止因受热温度过高而改变金属内部组织。通过车轮与轴配合面间的摩擦力与键共同作用，来增加车轮的径向固定。

### 2) 被动轮轴的技术改造

被动轮轴与原主动轮轴的结构相同，改后也由四个支撑座支撑，不一样的地方是将原来的整根钢包车轴改为两根短轴，每根短轴由两个轴承座支撑。改变目的是减小因道轨不平对钢包车造成影响，同时又降低了材料和加工费用。

### 3) 钢包车车身的改造

根据改造后的主动轴和被动轴的安装结构，经过认真测量和下料，在原来的钢包车身上加装焊接了新增各轴承座的基础，使轴与车身能良好的配合安装，更好地发挥车身的作用，增大了车身的承载能力，延长了车身的使用寿命。

## 3、钢包车轴改造后的经济效果分析

原来钢包车轴每年有 30 根左右发生断裂，每根轴的备件费为 10000 元左右，每个车轮造价在 3400 元左右，每套轴承的备件费为 1000 元左右，每根钢包车轴装配下来的总成本为：

总成本=钢包车轴的备件费+钢包车轮的备件费 × 2+轴承的备件费 × 2=10000+3400 × 2+1000 × 2=18800 (元)

每年钢包车上所消耗的维修费为：18800 × 30=464000 (元)

钢包车技术改造后，每年预算按断轴 6 根计算，节约维修费用为：18800 × (30-6)=451200 (元)

显而易见对钢包车轴改造，为公司创造了可观的经济效益，不仅节约了维修费用，而且还减少了钢包车轮罩维修时间和工人的劳动强度。

## 4、结束语

通过对改造后的钢包车检查、调试、上线运行后，经过半年多的使用，各项指标均已达到改造设计的要求，收到了很好的效果，至今未发生断轴现象，彻底解决了断轴、滚键、轮罩的问题，为炼钢快节奏生产创造了有利的条件。

(上接第 124 页)

[2]杨大智主编.只能材料与智能系统[M]天津.天津大学出版社.2000.  
 [3]姜德生, Claus Richard.智能材料器件结构与应用[M].武汉:武汉工业大学出版社.2000.  
 [4]李宏男,李东升.土木工程结构安全性评估、健康监测仍断评述[J]地震工程与工程振动.2002, 22(3):83-90.  
 [5]秦权.桥梁结构的健康监测.中国公路学报.2000. 13 (2).

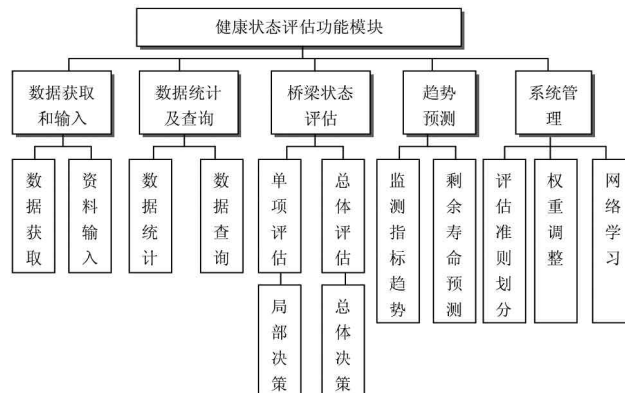


图 3

健康状况评估功能模块