基于光纤光栅技术顶盖螺栓载荷智能监测系统工程应用的研究

强 杰[1]，唐文利[1]，梁万勤[2]
（1. 国网新源水电有限公司响水涧抽水蓄能电站有限公司，安徽 芜湖 241000；
2. 大连迪施特机电设备有限公司，辽宁 大连 116000）

[摘 要] 水轮发电机组顶盖为机组重要的承载部件之一，顶盖螺栓长期受轴向水推力、转轮上腔水压脉动等交变载荷，螺栓连接的可靠性和安全性对整个机组的正常运行有着至关重要的作用。本文提出了一种基于光纤光栅传感的顶盖螺栓载荷智能监测系统，介绍了传感器设计原理、传感器结构和监测系统设计，应用该系统测量了抽水蓄能电站顶盖螺栓安装时的预紧力及机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水、抽水转停机、停机转发电、发电转停机等工况下的螺栓轴力变化。根据测量结果可得出圆周方向均布 8 颗螺栓同一工况下轴力变化趋势一致，但同一工况下不同位置的螺栓轴力变化量存在差别。采用螺栓载荷智能监测系统对水轮机组顶盖螺栓轴力进行实时监测，可以超前诊断预防不安全事故的发生，为数字化电厂的日常运行监督、检修改造提供技术依据。

[关键词] 水轮发电机组；顶盖螺栓；载荷在线监测系统；智慧电厂；升级改造
[中图分类号] TK730.5⁺1 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3983(2023)05-0082-08

Engineering Application Research on Top-Cover Bolt Load Intelligent Online Monitoring System based on Optical Fiber Technology

QIANG Jie[1], TANG Wenli[1], LIANG Wanqin[2]
(1. XiangShuiJian Pumped Storage Power Station Limited Company of State Grid Xinyuan Hydropower Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 2. Dalian DCT Electrical & Machinery Equipment Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: Top cover is one of the important load bearing components in hydro generator, in long term, top cover screws are suffering the alternating loads which caused by axial water pushing force, hydraulic pulse force from upper cavity of runner, etc. The reliability and safety of bolted screws play a crucial role in the normal operation of the entire unit. The top cover bolt load intelligent online monitoring system that based on optical fiber technology, mentioned in this article, introduce the sensor design principle, sensor structure and monitoring system design. The system is applied to measure the preload force of the top cover bolts during installation period, while also the axial force or load changes during working transfer actions, such as transfer actions from shutdown to pumping & phasing, pumping & phasing to pumped storage, pumped storage to shut down, shutdown to power generation, and power generation to shut down. According to the measurement results, it can be seen that the axial force change trend of 8 bolts in the circumferential direction is consistent under the same working condition, but the bolts installation positions are different, so the axial force changes of each bolt at different positions under the same working condition are different. The bolt load intelligent monitoring system is used to monitor the bolt axial force of the top cover of the turbine unit in real time, which can diagnose and prevent the occurrence of unsafe accidents in advance, provide a technical basis for daily operational supervision, overhaul of the digital power plant.

Key words: hydro turbine generator unit; top cover bolts; load online monitoring system; smart power plant; upgrading and rebuilding

0 前言

水轮发电机组顶盖为机组重要的承载部件之一，其大薄壁件结构长期受轴向水推力、转轮上腔水压脉动等交变载荷，螺栓连接的可靠性和安全性对整个机组的正常运行有着至关重要的作用[1-2]，国内主要水电站均要求大修期间进行水轮机顶盖连接螺栓的更换，以免出现螺栓松动或失效而造成水淹事故的发生，传统的水轮机顶盖连接螺栓的监测主要靠人工巡检，而传统的人工巡检存在及时性、可靠性差，花费人工较多和存在巡视过程风险等缺点，在电力行业，国内外已发生多起因螺栓松动断裂引起水淹厂房和风电机组倒塔事故，造成巨大的经济损失[3-8]，因此对于水轮机顶盖连接螺栓的监测提出了要求。关键部位螺栓的运行状态对设备的安全稳定性极为重要，为了及时掌握螺栓受力状态，国内外学者开展了一系列螺栓松动状态和机理及状态监测相关工作[9-18]。传统的检测技术包括压力传感器、应变片式传感器和超声波传感器。压力传感器外壳多为不锈钢材质，放在螺母与顶盖上表面之间，但水轮机组顶盖螺栓预紧力较大，相匹配的垫圈式传感器厚度很大，使螺栓夹持长度增大，改变了螺栓和连接部件原有结构；应变片式传感器是在螺栓的表面贴 4 个敏感元件，将其接入惠斯通电桥，通过采集输出信号与预紧力的关系进行标定，从而实现对螺栓预紧力的测量，但应变片传感器存在传感信号线过多问题；超声波传感器是在螺栓端部安装传感部件，根据超声波发射、返回之间的时间差变化量判断螺栓所受拉力的大小，但该测量方式对螺栓两端表面平滑度质量要求高，在振动环境容易受干扰导致信号失真。

近年来，光纤传感器在状态监测领域发展迅速[19-21]，水轮机组顶盖螺栓大多都有测长孔，为满足此类中空结构螺栓载荷测量需求，本文提出一种顶杆式光纤智能螺栓传感器，该传感器安装于螺栓测长孔内，与中空结构的螺栓匹配性良好。光纤智能螺栓传感器与传统检测技术相比，具有布线少，多路传感信号可共用一根光纤，抗振动、电磁干扰能力强，不需要对原有的安装结构进行其他改变等特点。

1 光纤光栅顶盖螺栓状态在线监测系统研究

1.1 设计原理

光纤光栅智能螺栓以光纤光栅为敏感元件，光纤光栅埋于传感器中心的小孔内，具有体积小、寿命长、可靠性好以及抗振动、抗电磁干扰、耐腐蚀的优点。适用的螺栓直径为 5mm 以上，最小螺栓夹层为 5mm 以上，能够满足 12.9 级国标螺栓，100% 保证载荷测量需求。

由于光纤光栅对温度敏感，为消除温度变化对测量载荷的影响，在传感器内部埋入两个光纤光栅敏感元件，一个用于轴力检测，另一个用于温度补偿，具体的光栅安装示意图如图 1 所示。其中，1 号光栅埋于螺柱本体内部，主要用于轴力检测；2 号光栅埋于连接器部分，主要用于温度检测。

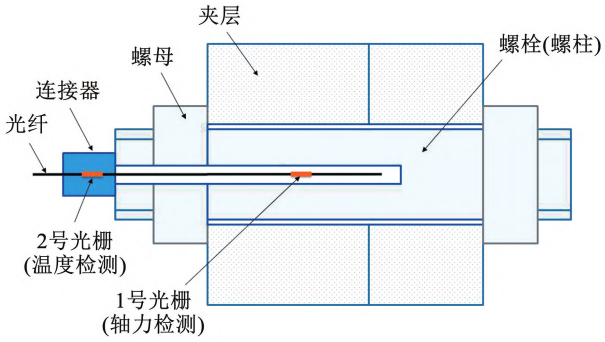

图 1 光栅布置示意图

光栅中心波长 λ 与载荷 F、温度 T 的关系见式(1)：

$$\lambda(F,T)=f(F)+g(T) \tag{1}$$

式中，$\lambda(F,T)$ 为与载荷和温度相关的函数；$f(F)$ 为与载荷相关的函数；$g(T)$ 为与温度相关的函数。

当螺栓受力变形(或拧紧和松动)时，光纤光栅传感器的反射波形将随之发生改变，通过解析光栅中心波长的变化量，即可解读出螺栓的受力情况，如图 2所示。由于 1 号、2 号光栅的安装位置不同，它们对轴力和温度的敏感系数也各不相同，预先分别标定好各自的轴力系数和温度系数，同时检测 1 号和 2 号传感器的波长变化量，经过求解可算出螺栓的轴力和温度，如式(2)所示。

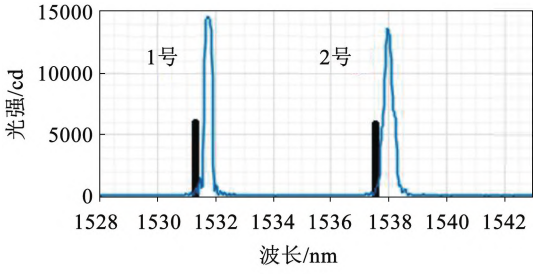

图 2 光栅传感器反射波示意图

$$\begin{cases}\lambda_1=A_1F+B_1T+\lambda_{10}\\ \lambda_2=A_2F+B_2T+\lambda_{20}\end{cases} \tag{2}$$

式中，λ_1为1号光栅的实时波长，nm；λ_2为2号光栅的实时波长，nm；A_1为1号光栅的轴力系数，nm/kN；A_2为2号光栅的轴力系数，nm/kN；B_1为1号光栅的温度系数，nm/℃；B_2为2号光栅的温度系数，nm/℃；λ_{10}为1号光栅的零点波长，nm；λ_{20}为2号光栅的零点波长，nm；F为螺栓轴力，kN；T为环境温度，℃。

由于2号光栅安装于连接器位置，远离螺栓本体，故可认为不受螺栓轴力的影响，其对轴力的敏感系数A_2可以进一步简化为零，故有式(3)和式(4)：

$$T=\frac{\lambda_2-\lambda_{20}}{B_2} \tag{3}$$

$$F=\left((\lambda_1-\lambda_{10})-\frac{B_1}{B_2}(\lambda_2-\lambda_{20})\right)/A_1 \tag{4}$$

1.2 光纤光栅智能螺栓传感器设计

光纤光栅智能螺栓传感器属于细长杆，设计时考虑了压杆稳定性，安装时将传感器放置于顶盖螺栓测长孔内，对原连接结构没有任何改变，保证了测量数据的准确性。传感器主要由固定头和传力钢棒组成，结构如图3所示，固定头的M20外螺纹与螺栓测长孔内螺纹相匹配，起固定传感器作用；钢棒内置光纤光栅敏感元件，外侧套有不锈钢外套管，钢棒的长度和外径与螺栓测长孔相匹配，起传递力作用。传感器拧入螺栓测长孔后，钢棒底部一直处于受压状态，可实时监测螺栓各状态下的受力，安装示意图如图4所示。传感器端部配有可拆卸的FC光接口，可方便与光纤延长线连接，实现信号传输。

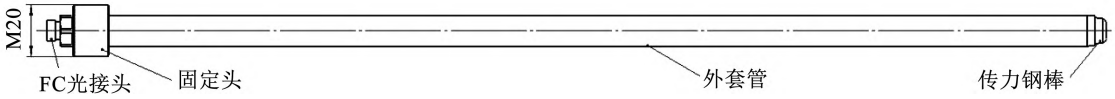

图3 光纤光栅智能螺栓传感器结构图

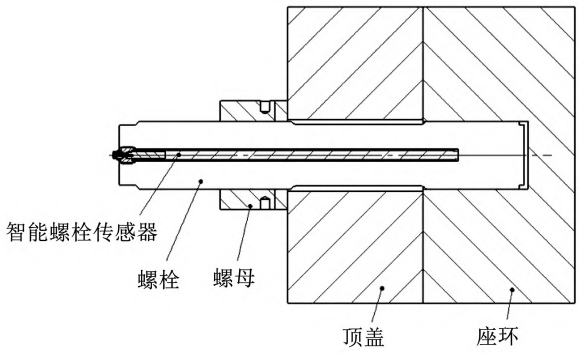

图4 传感器装入顶盖螺栓示意图

1.3 监测系统设计

本文提出了一种使用智能螺栓传感器对水轮机组顶盖螺栓进行载荷在线监测的系统，系统包含光纤智能螺栓传感器、数据采集器和上位机软件，系统框图如图5所示。数据采集器的激光器实时发射光信号并接收智能螺栓传感器的波长数据，通过RJ45数据线上传至工控机，上位机软件接收传感器的波长数据并将其转换为温度和载荷数据，数据可通过图形或曲线方式在软件中呈现；另数据可实时存储在工控机硬盘内，并通过RS485数据线上传至监控中心。

光纤光栅智能螺栓载荷监测系统预期实现以下监测目标：

(1)顶盖螺栓使用液压拉伸器拉伸至最大载荷时螺栓的轴力值；

(2)旋紧顶盖螺栓上螺母，拉伸器卸压后螺栓的轴力值；

(3)水轮机组停机、抽水调相、抽水、发电等各种工况下螺栓的轴力值变化；

(4)判断机组运行过程中螺栓是否发生松动或断裂。

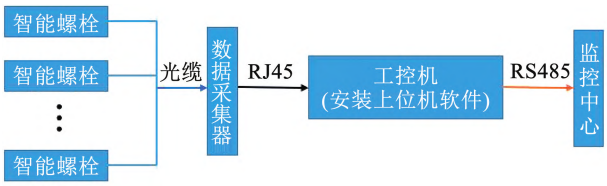

图5 光纤智能螺栓载荷监测系统框图

光纤光栅智能螺栓载荷监测系统软件可实现以下功能：

(1)采集频率设置；

(2)以曲线或图形方式实时显示各监测点的螺栓轴力；

(3)报警功能，通过设置各测点轴力阈值，在超过设定阈值时，实现自动报警；

(4)数据实时采集、存储；

(5)采用Modbus协议以RS485接口将数据实时传输至监控中心。

2 工程应用效果

光纤光栅智能螺栓载荷在线监测系统应用于安徽响水涧抽水蓄能电站有限公司1号水轮机组顶盖螺栓

上，该机组顶盖总重约 98. 2t，由两瓣组装，与座环由 96 个 M80 的螺栓把合。考虑到顶盖螺栓荷载比较复杂，螺栓的受力会有差异，从 96 颗顶盖螺栓中沿圆周均布选择 8 个安装光纤光栅智能螺栓传感器，分别测量了螺栓安装时的预紧力和机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水、抽水转停机、停机转发电、发电转停机等工况下轴力变化。

2. 1 监测系统界面

光纤光栅智能螺栓载荷在线监测系统主要功能包括传感器参数配置、数据显示和存储，数据可通过图形或曲线方式实时显示，如图 6 所示。

图 6 以图形方式显示的数据界面

2. 2 螺栓预紧力数据

使用液压拉伸器拉伸螺栓，测得螺栓安装时的预紧力，见表 1。

表 1 螺栓安装时预紧力

序号	螺栓编号	安装时预紧力/kN
1	6	1147. 3
2	18	1048. 3
3	30	1120. 0
4	42	996. 1
5	54	1036. 2
6	66	1316. 7
7	78	1176. 3
8	90	1310. 8

由表 1 可看出 8 个螺栓安装时预紧力存在分散性，预紧力均值为 1144kN，均方差为 112. 9；各螺栓预紧力偏差较大，与拉伸螺栓时螺母的拧紧程度及螺栓安装位置的顶盖结构有关，比如 42 号螺栓安装于顶盖加强筋部位，预紧力值小于其余螺栓。

2. 3 机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水工况螺栓轴力数据

使用光纤光栅智能螺栓传感器对 1 号机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水工况进行了监测，8 颗螺栓轴力数据曲线如图 7 所示，螺栓的轴力数据统计见表 2。

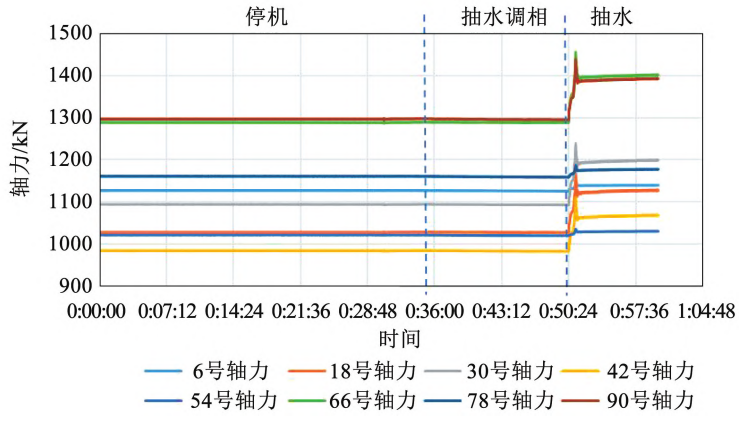

图 7 1 号机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水螺栓轴力数据曲线

表 2 停机转抽水调相、抽水调相转抽水工况下 8 颗螺栓轴力数据

序号	螺栓编号	停机时轴力/kN	抽水调相轴力/kN	抽水调相轴力变化量/kN	抽水调相转抽水过程中最大轴力/kN	抽水调相转抽水轴力变化量/kN	抽水态轴力/kN	抽水态轴力变化量/kN
1	6	1127. 1	1126. 9	-0. 2	1147. 0	19. 9	1142. 0	14. 9
2	18	1027. 3	1028. 1	0. 8	1169. 0	141. 7	1138. 9	111. 6
3	30	1094. 0	1094. 2	0. 2	1238. 0	144. 0	1209. 0	115. 0
4	42	983. 3	983. 9	0. 6	1110. 0	126. 7	1078. 6	95. 3
5	54	1020. 9	1021. 1	0. 2	1035. 0	14. 1	1033. 0	12. 1
6	66	1288. 2	1288. 8	0. 6	1455. 0	166. 8	1414. 0	125. 8
7	78	1160. 5	1160. 1	-0. 4	1186. 0	25. 5	1179. 9	19. 4
8	90	1296. 4	1297. 2	0. 8	1437. 0	140. 6	1405. 3	108. 9

注:抽水调相轴力变化量 = 抽水调相轴力 - 停机时轴力
抽水调相转抽水轴力变化量 = 抽水调相转抽水过程中最大轴力 - 停机时轴力
抽水态轴力变化量 = 抽水态轴力 - 停机时轴力

2. 4 机组抽水转停机工况螺栓轴力数据

使用智能螺栓传感器对 1 号机组抽水转停机工况进行了监测，8 颗螺栓轴力数据曲线如图 8 所示，螺栓的轴力数据统计见表 3。

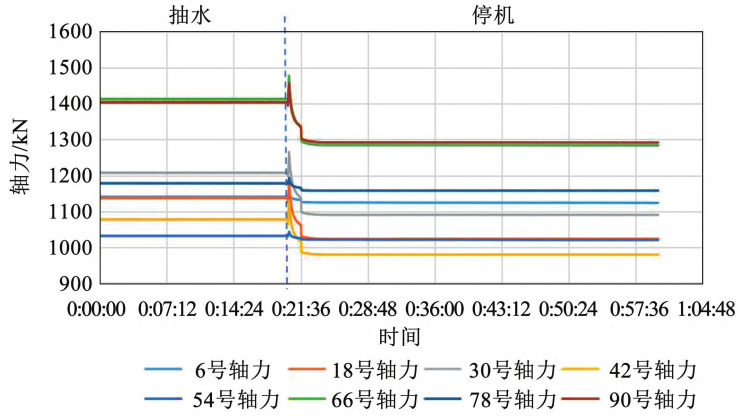

图 8 1 号机组抽水转停机螺栓轴力数据曲线

表 3 抽水转停机工况下 8 颗螺栓轴力数据

序号	螺栓编号	抽水态轴力/kN	抽水转停机过程中最大轴力/kN	抽水转停机过程中轴力变化量/kN	停机时轴力/kN	停机时轴力变化量/kN
1	6	1142. 5	1152. 8	10. 3	1126. 0	-16. 5
2	18	1138. 9	1189. 5	50. 6	1025. 0	-113. 9
3	30	1208. 8	1267. 6	58. 8	1091. 8	-117. 0
4	42	1078. 2	1131. 1	52. 9	981. 1	-97. 1
5	54	1032. 8	1044. 7	11. 9	1022. 7	-10. 1
6	66	1413. 8	1479. 4	65. 6	1285. 8	-128. 0
7	78	1179. 5	1195. 1	15. 6	1159. 1	-20. 4
8	90	1404. 9	1457. 5	52. 6	1293. 5	-111. 4

注:抽水转停机过程中轴力变化量 = 抽水转停机过程中最大轴力 - 抽水态轴力
停机时轴力变化量 = 停机时轴力 - 抽水时轴力

2.5 机组停机转发电工况螺栓轴力数据

使用智能螺栓传感器对1号机组停机转发电工况进行了监测，8颗螺栓数据轴力曲线如图9所示，螺栓的轴力数据统计见表4。

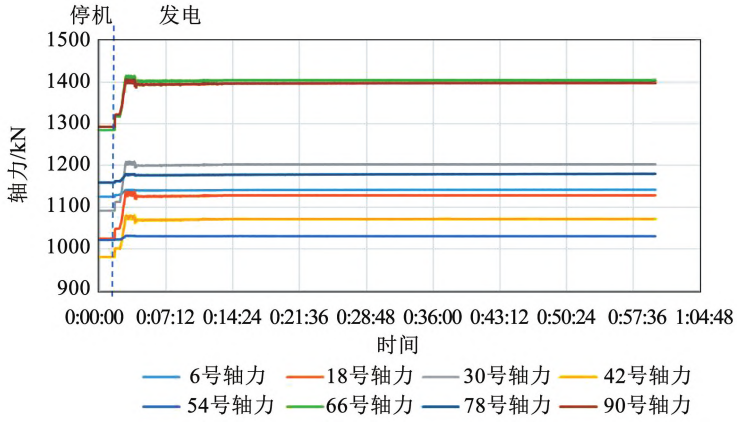

图9 1号机组停机转发电螺栓轴力数据曲线

表4 停机转发电工况下8颗螺栓轴力数据

序号	螺栓编号	停机时轴力/kN	停机转发电过程中最大轴力/kN	停机转发电过程中轴力变化量/kN	发电时轴力/kN	发电时轴力变化量/kN
1	6	1125.4	1142.0	16.6	1141.1	15.7
2	18	1024.6	1137.7	113.1	1129.0	104.4
3	30	1091.3	1210.2	118.9	1202.0	110.7
4	42	980.6	1081.0	100.4	1071.6	91.0
5	54	1021.4	1032.1	10.7	1030.5	9.1
6	66	1284.9	1415.2	130.3	1404.5	119.6
7	78	1159.1	1180.0	20.9	1178.3	19.2
8	90	1292.9	1406.3	113.4	1396.7	103.8

注：停机转发电过程中轴力变化量=停机转发电过程中最大轴力-停机时轴力
发电时轴力变化量=发电时轴力-停机时轴力

2.6 机组发电转停机工况螺栓轴力数据

使用智能螺栓传感器对1号机组发电转停机工况进行了监测，8颗螺栓轴力数据曲线如图10所示，螺栓的轴力数据统计见表5。

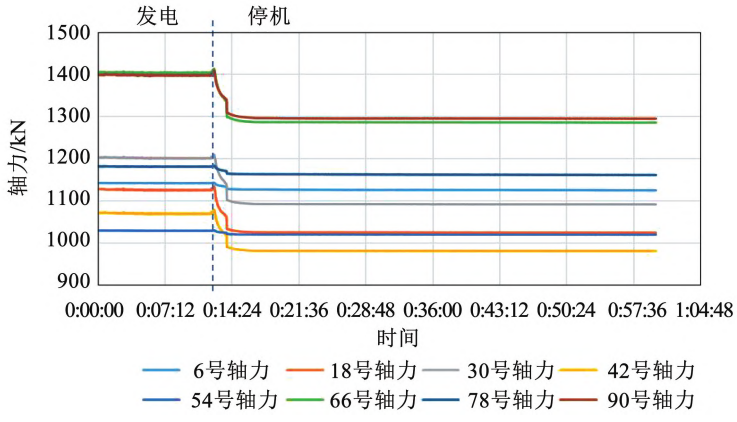

图10 1号机组发电转停机螺栓轴力数据曲线

表 5 发电转停机工况下 8 颗螺栓轴力数据

序号	螺栓编号	发电时轴力/kN	发电转停机过程中最大轴力/kN	发电转停机过程中轴力变化量/kN	停机时轴力/kN	停机时轴力变化量/kN
1	6	1142.3	1142.8	0.5	1126.0	-16.3
2	18	1125.2	1133.9	8.7	1025.6	-99.6
3	30	1200.7	1208.3	7.6	1092.1	-108.6
4	42	1069.7	1077.9	8.2	982.2	-87.5
5	54	1029.5	1030.5	1.0	1020.7	-8.8
6	66	1403.4	1411.0	7.6	1286.2	-117.2
7	78	1181.4	1183.1	1.7	1163.1	-18.3
8	90	1397.4	1404.9	7.5	1295.1	-102.3

注:发电转停机过程中轴力变化量 = 发电转停机过程中最大轴力 - 发电时轴力

停机时轴力变化量 = 停机时轴力 - 发电时轴力

从图 7 ~ 图 10 可看出，不同工况下 8 颗螺栓轴力变化趋势一致，但螺栓安装位置不同，同一工况下轴力变化量有较大差别，6 号、54 号、78 号轴力变化量较小，其他 5 颗螺栓轴力变化量较大。

3 结论

本文介绍了一种光纤光栅螺栓载荷智能监测系统，该系统包含的光纤智能螺栓传感器作为新技术在国网新源控股有限公司抽水蓄能电站首次应用并测得有效数据，具体结论如下：

(1)该系统采用的顶杆式传感器适用于各种型号带测长孔的顶盖螺栓，该传感器置于测长孔内，与中空结构的螺栓匹配性较好，不需要对原有的安装结构进行其他改变；

(2)应用该系统可协助电站在螺栓安装时进行预紧力大小判定，另外可实时在线监测机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水、抽水转停机、停机转发电、发电转停机等各种工况下不同位置螺栓的轴力变化值；

(3)从 96 颗顶盖螺栓中沿圆周均布选择 8 颗安装了光纤光栅智能螺栓传感器，测得 8 颗螺栓同一工况下轴力变化趋势一致，但螺栓安装位置不同，同一工况下不同螺栓轴力变化量存在差别；

(4)1 号机组的监测点位较少，为更好地分析顶盖各位置螺栓的受力情况，后续应增加传感器的测量点位；

(5)根据传感器监测的历史数据，结合水轮机组的运行状态，可判断所监测的螺栓是否发生松动；

(6)同一工况下不同位置的螺栓轴力变化值存在差异，机组长期运行后轴力变化值大的螺栓更易出现松动和疲劳破坏，因此水电站可将轴力变化值大的螺栓作为重点关注对象，日常巡检时进行重点关注。

采用光纤光栅螺栓载荷智能监测系统对水轮机组螺栓进行轴力实时监测，可以超前诊断预防不安全事故的发生，为数字化电厂的日常运行监督、检修改造提供技术依据，也可为水轮机组的结构设计提供技术参考，为产品的优化、升级做技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 刘育，邓林森，晋健，等. 水轮机顶盖连接螺栓疲劳寿命的评估方法及监测系统：中国，CN110826203A[P]. 2020-02-21.

[2] 张忠伟，王敬贤，张倩南，等. 测力螺栓:中国，CN106706189A[P]. 2017-05-24.

[3] 姬升阳，毛延翩，刘志辉，等. 水轮发电机组螺栓应力在线测量与分析[J]. 人民长江，2021(5)：203-207.

[4] 葛新峰，徐旭，安方辉，等. 轴流式水轮机内外顶盖螺栓刚强度分析[J]. 大电机技术，2019(4)：45-49.

[5] 杨建东，赵琨，李玲，等. 浅析俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站 7 号和 9 号机组事故原因[J]. 水力发电学报，2011，30(4)：226-234.

[6] 李立，张法，伍志军，等. 某抽水蓄能电站防水淹厂房关键技术研究[J]. 水电能源科学，2020，38(5)：81-85.

[7] CHOU J S，TU W T. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower [J]. Engineering Failure Analysis，2011，18(1)：295-313.

[8] 应华冬，何俊尉，何国栋，等. 风电机组桨叶螺栓断裂失效原因分析[J]. 装备制造技术，2017(12)：203-206.

[9] 胡清娟，曾艳梅，蒋明东，等. 抽水蓄能电站引水系统设置快速截断水流设备的可行性分析与探讨[J]. 大电机技术，2019(5)：57-63.

[10] 王立贤，杨威. 水电站机组在线监测技术概述

[J]. 大电机技术, 2011(3): 65-68.

[11] Chaki S, Comeloup G, Lillamand I, *et al*. Combination of longitudinaland transverse ultrasonic waves for in situ control of the tightening ofbolts [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129: 383-390.

[12] 向志海, 黄俊涛. 螺栓松紧程度的受控敲击检测方法[J]. 实验力学, 2012, 27(5): 545-551.

[13] 张俊, 顾临怡, 钱筱林, 等. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 216-220.

[14] 王星, 刘育, 严飏, 等. 预紧力作用下水轮机顶盖螺栓刚强度分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 128-132, 142.

[15] Huang Xingxing, Chen Liu, Wang Zhengwei, *et al*. Stress Characteristic Analysis of Pump-Turbine Head Cover Bolts during Load Rejection Based on Measurement and Simulation[J]. Energies, 2022, 15(24): 9496-9496.

[16] 欧文浩, 费香泽, 马潇, 等. 一种测力螺栓: 中国, CN215262197U[P]. 2021-12-21.

[17] 王勇飞, 刘育, 李世强. 水轮机顶盖部分螺栓破坏对剩余螺栓强度影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 126-130.

[18] 葛新峰, 张敬, 祝双桔, 等. 水轮机顶盖螺栓受力特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(17): 55-62.

[19] 夏翔, 朱利锋, 葛青青, 等. 改进极限学习机在FBG的光纤光栅传感器标定中的应用研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2023-01-12]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23. 1202. th. 20230216. 1210. 006. html

[20] 樊卓杨, 吴超, 王霞. 光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(10): 1-12.

[21] 夏翔, 李贤良, 潘华, 等. 基于广义回归神经网络的光纤光栅传感器解调技术研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2023-01-12]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23. 1202. th. 20230215. 1106. 006. html

[收稿日期] 2023-01-20

[作者简介]

强杰（1985-), 2007年毕业于黑龙江科技大学，现从事抽水蓄能电站水轮机组运维工作，工程师。

梁万勤（1980-), 2007年毕业于沈阳航空工业学院，现从事智能螺栓传感器的研究，工程师。(通讯作者)

* *