

光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统 在水电机组中使用的必要性及意义

一、光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统使用的必要性

高强螺栓作为影响结构安全性的重要连接构件，其健康状态不容易被直接判断，因此顶盖螺栓监测是水电厂水轮机状态检修的必要项目。若顶盖螺栓发生松动、断裂等故障，会产生重大安全隐患，甚至发生水淹厂房、人员伤亡等重大事故。回龙电站、萨扬等电站发生的事故均是由螺栓把合失效导致的。以萨扬电站为例，经事故分析，在交变应力作用下产生的疲劳破坏是导致失效的主要原因。2号机组顶盖49颗螺栓有43颗断裂，在断裂的43颗螺栓中，41颗的断口上有疲劳破坏痕迹，疲劳破坏面积占总面积的5%~98%不等，其中9颗疲劳破坏面积超过90%。依据上述事故分析，螺栓失效不是一蹴而就的。如果我们能找到一种有效的控制手段，对机组关键部位的把合螺栓预紧力进行实时在线监控，对螺栓预紧力变化的趋势，提早进行预测和防范，并采取相应的措施，上述类似事故就可在很大程度上减少并避免。

二、光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统使用的意义

抽水蓄能电站较其他类型电站相比，具有水头高、冲击力大、工况转换频繁（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）等特点。上述特点对机组的各个部位的运行都是严峻的考验，关键把合部位的螺栓也面临着同样严峻的工况考验。

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、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。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，且无法量化螺栓预紧力的数值。因此对于水轮机顶盖连接螺栓的监测提出了实时在线监测的要求。光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统就可以起到一个辅助机组健康运行的作用。

三、光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统的特点及优势

依据国内水电行业对螺栓预紧力监测的主要诉求，主要概括为：

1. 螺栓预紧力的实时在线监测。
2. 在振动、潮湿浸泡等恶劣环境中的适用性和稳定性。
3. 测量数据精准、稳定，为可靠分析提供数据支持。

光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统完全契合上述诉求，并已在抽水蓄能电站得到成功应用。

光纤式传感器的优势：

1. 基于波长测量，对信号衰减不敏感，适合远距布置，适合长期连续运行。
2. 数据与图谱准确有效，对水轮机组顶盖螺栓轴力进行实时监测，数据稳定。
3. 与传统检测技术相比，具有布线少，温度和轴力传感信号可共用一根光纤。
4. 抗振动、电磁干扰能力强，适用各类恶劣环境。
5. 使用已有的螺栓中心测长孔，不需要对原有的安装结构进行其它改变。

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各种工况下不同位置螺栓的轴力变化值，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、升级做技术支撑及基础数据。

四、光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统成功案例

成功案例一：国网新源控股有限公司响水涧电站 1 号机组成功运行

光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统目前已在国网新源响水涧抽水蓄能电站 1 号机组顶盖螺栓上安装，并从 2022 年 11 月开机运行至今，成功采集多个月数据，已取得 1 号机组在各个工况条件下顶盖螺栓预紧力受力图谱，为健康监测系统后续分析提供了可靠依据。

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。

工况一：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#机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水工况进行了监测，8 颗螺栓数据曲线见图 1 所示，螺栓的轴力数据统计见表 1。

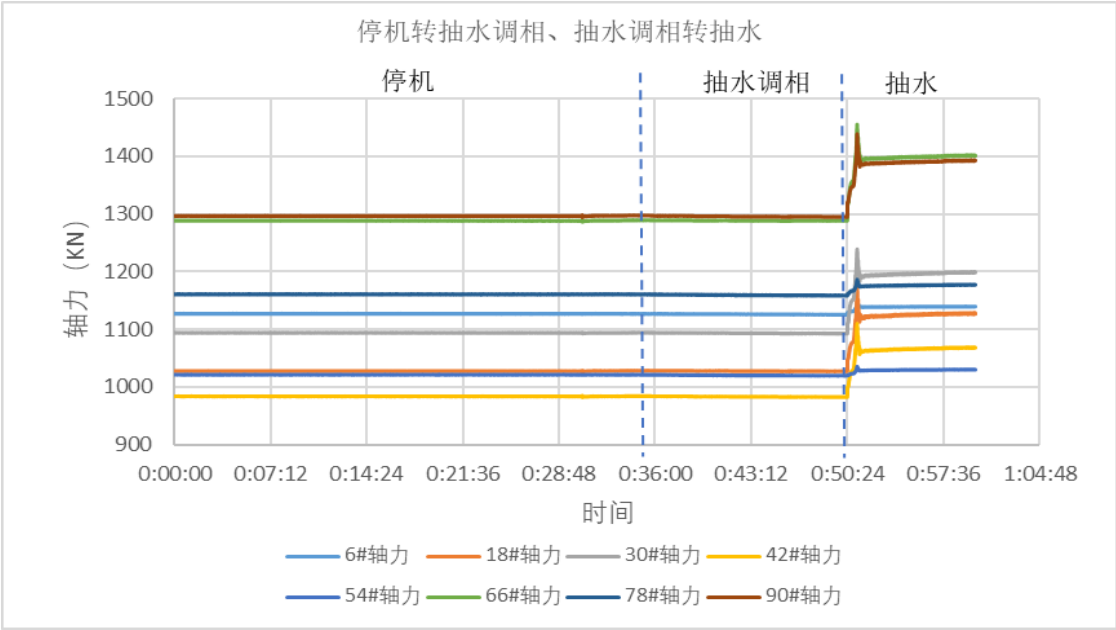


图 1 1 号机组停机转抽水调相、抽水调相转抽水螺栓轴力数据曲线

表 1 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

工况二： 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 颗螺栓数据曲线见图 2 所示，螺栓的轴力数据统计见表 2。

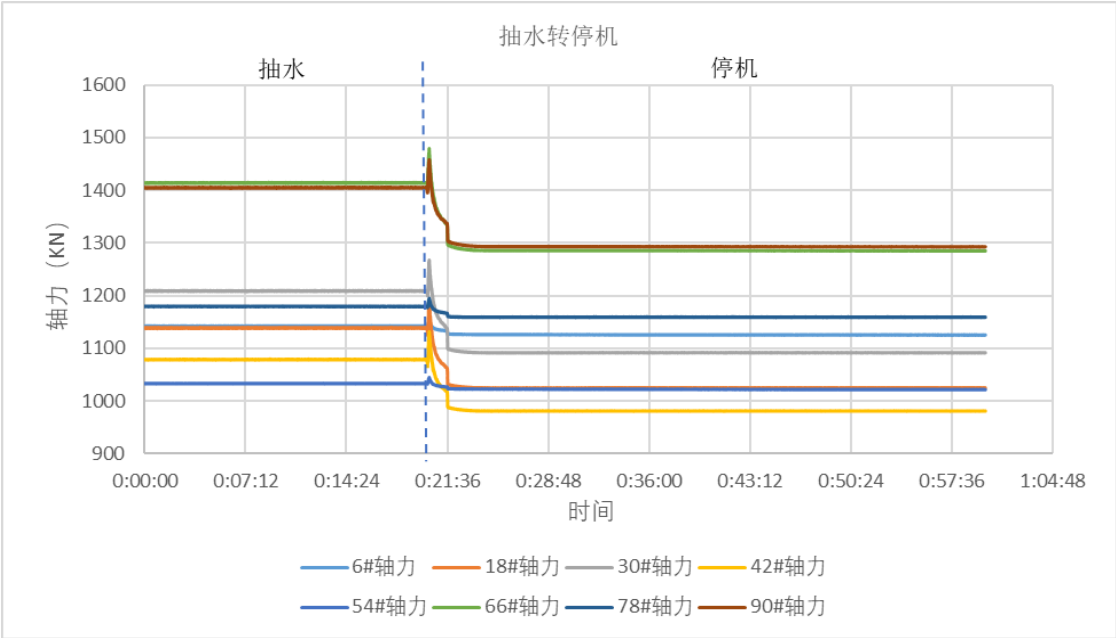


图 2 1 号机组抽水转停机螺栓数据曲线

表 2 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

工况三： 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 颗螺栓数据曲线见图 3 所示，螺栓的轴力数据统计见表 3。

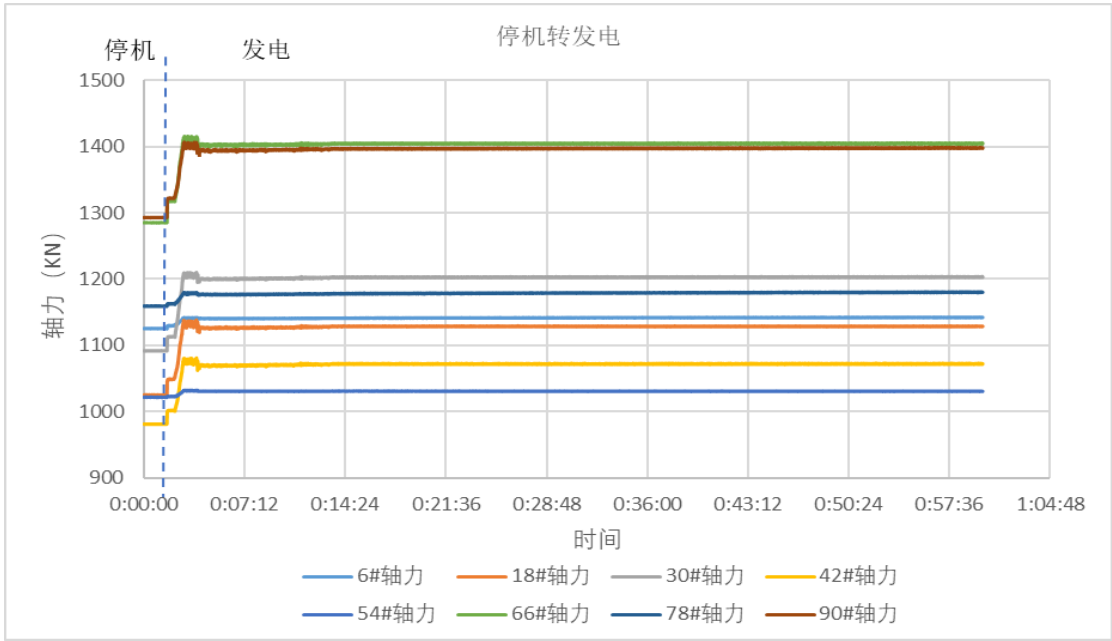


图 3 1 号机组停机转发电螺栓数据曲线

表 3 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

工况四：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 颗螺栓数据曲线见图 4 所示，螺栓的轴力数据统计见表 4。

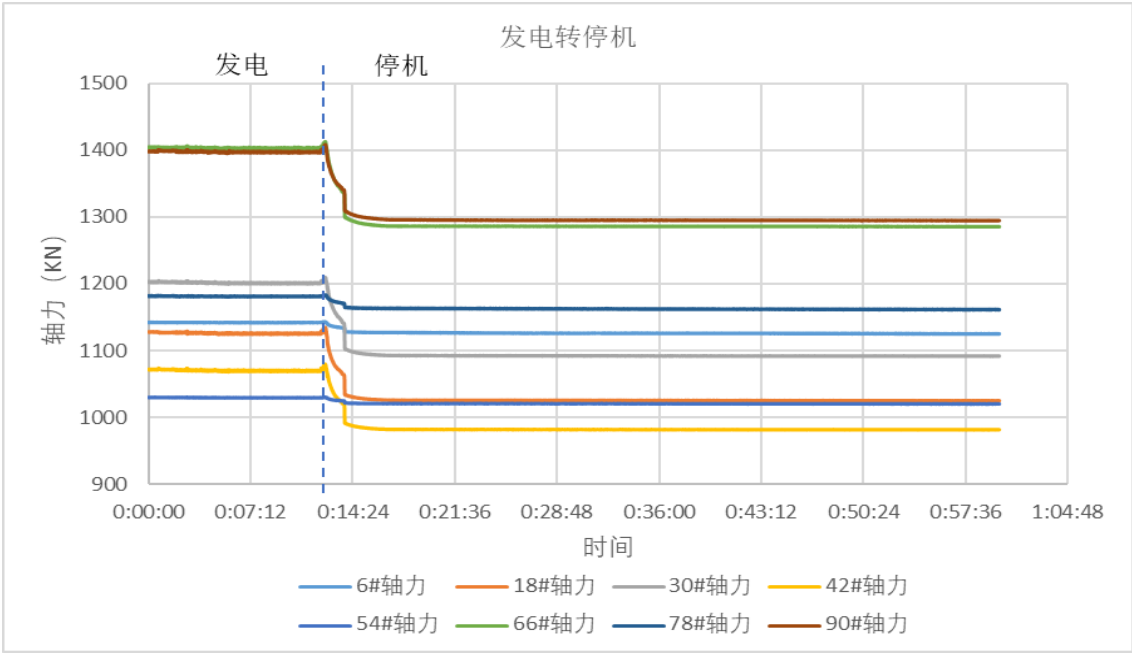


图 4 1 号机组发电转停机螺栓数据曲线

表 4 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 1-图 4 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#、54#、78#轴力变化量较小，其它 5 颗螺栓轴力变化量较大。

光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测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和图谱，具体总结如下：

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它改变；
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差异较大，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；

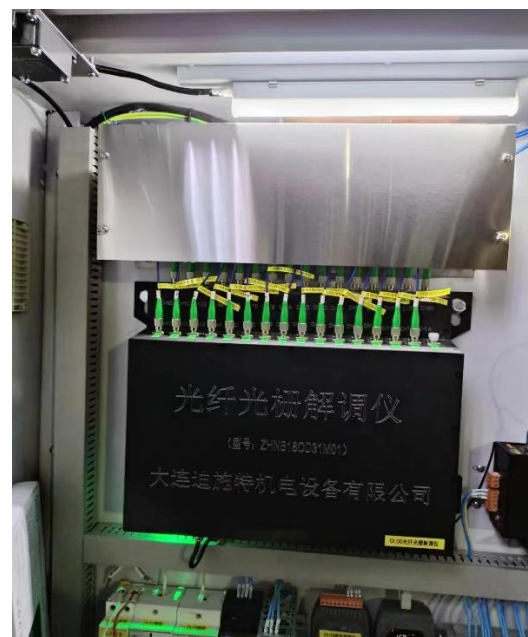
采用光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统对水轮机组螺栓进行轴力实时监测，可以超前诊断预防不安全事故的发生，为数字化电厂的日常运行监督、检修改造提供技术依据。

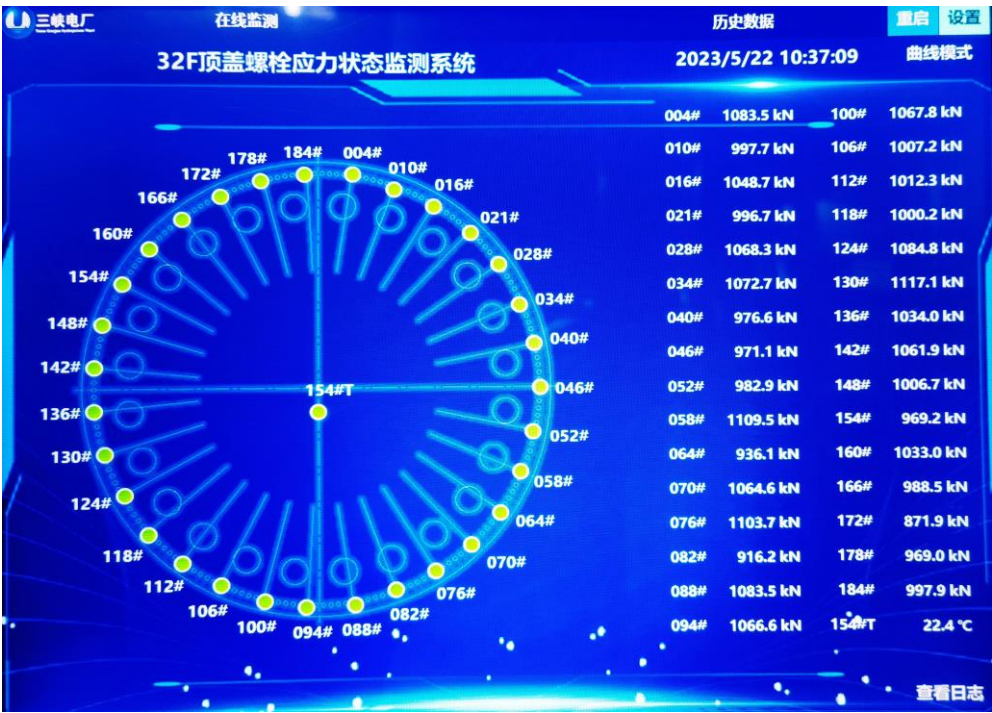
成功案例二：哈尔滨电机厂有限责任公司三峡数字孪生一期项目成功安装

2021 年哈尔滨电机研究所对顶盖螺栓预紧力监测先后进行了多次模拟试验：单拉伸试验、模型装置模拟试验、4 家传感器厂家同台对比试验。根据试验数据分析，无论是单独承载试验，还是同台对比试验，光栅光纤传感式传感器数据精度和稳定性均相对较好。



2023 年 5 月光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统已在三峡 32 号机组顶盖螺栓预紧力监测系统成功安装。





综上所述，建立监测系统整体方案，满足现场安装应用要求，旨在保障水轮机的运营安全，对顶盖高强螺栓进行主动监测，确保及时预警高强螺栓预紧力异常变化并提前采取措施，减少事故的发生，光栅光纤传感式螺栓预紧力在线监测系统具有重要工程实用价值。