

# AI 泛在电力物联网时代

## 荧光光纤温度热点监测系统

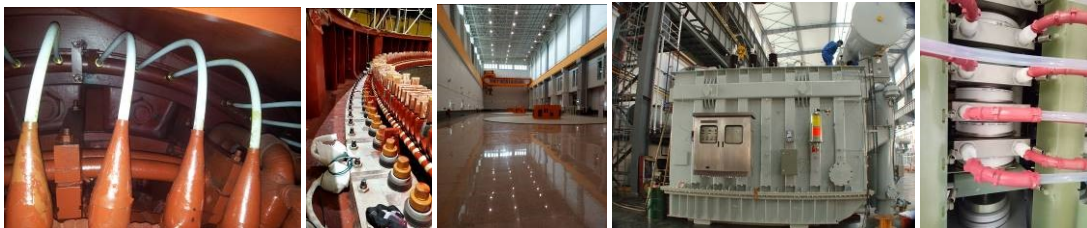
### 在高压电力设备智能化的应用现状与前景

关键字：光纤传感 4.0 智能化运维 状态检修 设备亚健康管理

**摘要：**智能电网/泛在电力物联网的建设，对直接监测/监控大电机/变压器/互感器等高压设备的热点温度，实现电网设备的智能化有特殊需求。高RRAS 级的在线温度监测作为“综保系统”有益的非电量参数补充，对保障电网安全运行、能源互联互通、电力系统/设备全寿命管理、即时判断设备的实际负荷能力以提高设备的经济效益等，具有非常现实的意义。本文论述了自 2010 年开始英迪戈在三峡、葛洲坝等电厂成熟运用的荧光式光纤传感技术，在高压电气设备在线监测/监控应用的发展现状，分析了国内推广运用这一新技术的方法及前景，同时也指出了所面临的问题及解决方案。

#### RRAS 的定义：

*Reliable* 可靠（可靠的意义——值得信赖！）  
*Real-time* 实时（在线的意义——可实现闭环操控）  
*Accurate* 精准（准确的意义——AI 泛在电力物联网基础）  
*Stable* 稳定（稳定的意义——值得长期信赖！）



#### 一、行业痛点

大电机、变压器、电力电子器件等高压电气装备，是发电和输变电系统的关键设备，它们的安全可靠性和使用寿命，对整个输变电系统的安全可靠运行和寿命是至关重要的。这些高压设备大多采用封闭结构，长期工作在高电压、大电流、强磁场的环境中，使得热量聚集。发热温升增加了输电系统的损耗，如果散热不良还会危及设备的正常运行，甚至会造成故障，社会不良影响和经济损失不可估量。

据统计，高压电气系统的故障及事故 50%以上都是由温升引起的。如果我们能够在毫秒级及时、准确地感知设备的热点温度，就能够提前预知、预防这类事故的发生，大幅度提升电力系统供电可靠性，降低维护成本。

由于技术产品成熟度和成本等等原因，目前市场上还缺少能够完全满足高压电气设备在线温度监测/监控的可靠技术和成熟产品，现在这些关键设备普遍没有安装热点监测系统，即使使用了传统的铂电阻、热电偶或半导体测温原件进行测温，由于传统技术本身的可靠、稳定性、高压绝缘以及电磁干扰等天生的缺陷，使得系统损坏率高，误报、漏报严重，无法满足电气系统对恶性事故提前预测、预防的迫切需求，更不能满足 AI 泛在电力物联网对实时、洁净大数据的要求。

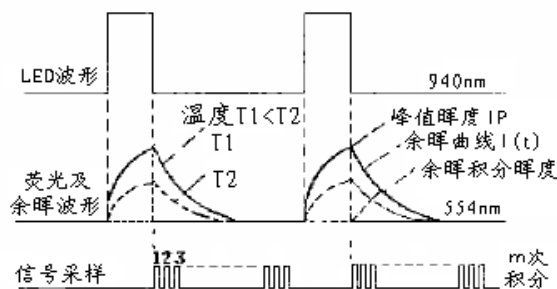
2010 年即在三峡电站成熟应用的荧光式光纤温度传感系统，填补了这一空白。荧光式光纤测温系统具有**抗电磁干扰、高压绝缘、稳定可靠、高精度、高灵敏度、微小尺寸、长寿命及耐腐蚀、环境适应性好**等特点，**全寿命无须校准标定**，非常适合应用于高电压、强电磁(EMI/RFI/EMP)等特殊工业环境中的温度监测。系统设计形式灵活、可靠性高，适合于各种测温需求及拓扑结构复杂的多点温度监测应用领域。

AI 至今已经走过了 60 年的历程，AlphaGo 的突破就在于系统的深度学习，而深度学习的基础是“洁净”的大数据！作为当前建设泛在电力物联网的薄弱环节-感知层，其核心为高可靠高稳定性、快速响应的传感技术。高“RRAS”级的荧光式光纤传感技术能够带来稳定可靠的“洁净大数据”，让高压电磁环境中的温度量测不再成为难题！

#### RRAS 的定义：

- Reliable 可靠（可靠的意义——值得信赖！）
- Real-time 实时（在线的意义——可实现闭环操控）
- Accurate 精准（准确的意义——AI 泛在电力物联网基础）
- Stable 稳定（稳定的意义——值得长期信赖！）

荧光式温度传感探头是由特殊多模光纤和其顶部涂敷的荧光感温膜组成。其测温原理是：荧光感温膜接受一定波长(受激谱)的能量激励后，受激辐射出荧光，荧光发光的持续性取决于荧光物质材料特性及环境温度。这种受激荧光通常是按指数方式衰减的，称衰减的时间常数为荧光寿命(ns)。通过测量荧光寿命的长短，就可以得知探头温度。



荧光式光纤温度传感器的原理及产品结构较之其他光纤温度传感技术更简单，核心技术在于其荧光感温材料和相应的解调算法，技术门槛更高。而感温荧光材料是经过 1300℃ 高温煅烧而成的陶瓷物质，相对于其他类型的光纤传感器具有更强的稳定性、结构强度和更长的寿命，微小的探头响应更快，并且适合于大规模工业化批量生产和应用，更容易实现在工业领域的推广。

- 纯光纤探头具有本质安全，高压绝缘，对电磁干扰天然免疫；
- 系统可靠稳定，无漂移，响应迅速；
- 具有自我诊断功能，防止测温系统误报、漏报；
- 探头及解调器小巧灵活，易于安装及维护，全寿命 30 年无需标定校验；
- 采用模块化设计，可随意灵活组网，随时无限扩展，无资源浪费；
- 数字及模拟输出，便于进行自动化实时控制及数据管理。

利用荧光式光纤温度传感器实时、可靠、精准监测高压电气设备内部热点温度的优势，结合继电保护系统的电流、电压、功率因数、有功、无功、环境温度、环境湿度等综合参数，通过大数据建模实现 AI 智能化设备“**亚健康运维管理**”，实现预测设备故障，判断设备的实际负荷能力，提前预测、预防事故，并为设备超负荷安全运行提供科学依据，实现安全在线增容，提高经济效益。

## 二、对高压电气设备实时在线温度监测的意义

1. 在当今大数据/AI 时代，泛在电力物联网领域对“**洁净大数据**”的强劲需求，荧光式光纤传感技术为强电场、强磁场环境中的实时温度监测监控成为可能。
2. 对于在大电机轴瓦、转子/定子测温系统中，采用荧光光纤温度传感技术，具有长期可靠稳定、长寿命、本质安全、高压绝缘、抗电磁干扰等特性，彻底弥补 RTD 技术缺陷，杜绝误报漏报，大电机测温系统终身无需更换和校验。
3. 在变压器等高压设备内部热点埋设光纤式温度传感器，直接监测、监控绕组等设备内部热点温度是现在的发展趋势。从安全角度考虑，热点温度不能超过绝缘介质耐热等级所允许的最高温度，防止绝缘性能降低导致击穿而发生事故。
4. 研究表明温度每增加 6K，绝缘寿命将减少一半。变压器在运行时，绕组温度分布是不均匀的，决定绝缘寿命的关键因素是绕组最热点的绝对温度，而不是绕组平均温度。新修订的电力变压器负载导则( IEC-354) 认为：“绕组最热区域内达到的温度，是变压器负载值的最主要限制因数，故应尽一切努力来准确地决定这一温度值”。所以，对大容量变压器而言，必须在结构上保证绕组热点温度在合格范围内，在运行中能控制绕组热点温度的最高允许值，并能计算热点温度对绝缘预期寿命降低的情况，设法以降低热点温度来补偿所由于温升而牺牲的寿命。

5. 从输变电设备的运行效率来看，在变压器配备了稳定可靠的温控系统之后，我们就可以根据该系统提供的参数，在合理的范围内充分发挥设备的负载能力，提高绝缘寿命，从而提高设备的经济运行效益。

### 三、 光纤测温技术的发展现状及应用可行性

荧光式光纤传感器测温系统，是专门针对高压电气设备温度监测监控应用而设计的，它采用纯光学原理传感器和光信号传输通道，对电磁干扰“天然免疫”，传感器尺寸小，可靠稳定，易于在狭小的高压设备内部安装，从根本上解决了电类、气压类及红外测温系统的缺陷。构成光纤传感器测温探头的材料绝缘性能、化学和机械性能极佳，特别适合应用于高压环境，不会给大系统带来负面影响。

荧光式光纤传感器能够为监控系统提供更加准确可靠的热点温度值，从而使设计人员能够准确把握温度对设备的影响，从而将风险准确控制在安全范围之内。

从 2002 年开始国内开始尝试在变压器中采用光纤传感器进行测温，之后在出口的多台大型变压器中，成功进行了商业应用，至今工作良好，成为全球领先的变压器设备制造商。现在光纤测温系统的技术成熟度和产品化程度，已经比几年有了大幅度的提高，目前价格也已经成倍下降，该项技术在高压电气温度监测方面大面积应用的时机已经成熟。

针对光纤测温新技术在高压电气温度监测监控的应用，国家有关主管部门相继颁布了一些相关标准法规：2012年国家颁布了《256604\_DLT\_1163-2012\_隐极发电机在线监测装置配置导则》，2016年颁布了《QGDW 11478-2015 变电设备光纤温度在线监测装置技术规范》，2018年中国电力工程顾问集团有限公司编著的电力工程设计手册《火力发电厂电气二次设计》等行业标准。

国网/南网公司、电力设计院的多位专家多年就开始关注并呼吁国家监管机构、设备制造厂商、发电和输变电企业和科研机构，积极推进该项技术的推广与应用，主要观点如下：

1. 光纤传感器是一项适用于高压设备测温、提高系统安全性的新技术。目前我国实际应用还较少，但非常值得在高压输变电领域推广应用。
2. 建议国内高压设备厂家接受这一技术作为工业标准，并积极开展在高压设备上的安装应用。
3. 建议输变电及发电行业业主在招标文件中，将这项技术纳入标书范畴。
4. 建议电力研究部门积极开展高压输变电系统中应用这一技术的研究。
5. 光纤测温原理简单，技术先进，成本随着市场的迅速扩大正在快速降低，在达到一定应用量时，其费用不会比常规的测温设备费用高出多少，尤其与变压器、可控硅阀等大型设备配套安装时，其费用可以忽略不计，但却成为一个用户选择用其设备的有利理由。

#### 四、 市场现状及应用前景

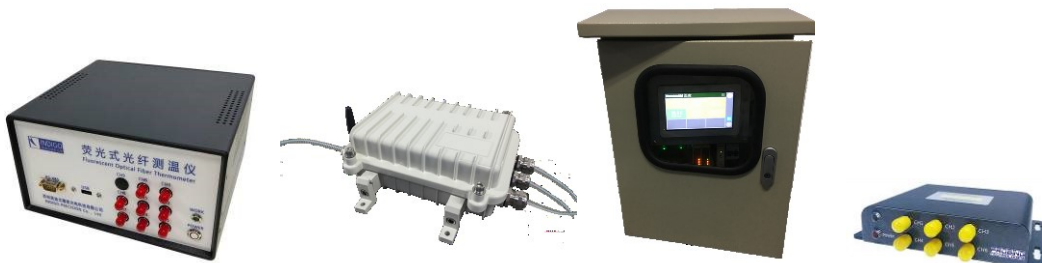
由苏州英迪戈精密光电科技有限公司研发生产的FOT系列荧光式光纤传感器，是专门针对高压电气设备温度监测而设计的，它无论在产品性能、质量，还是成本，都达到了全球领先的水平，具有最高的性能价格比。

光纤传感技术的应用，可以大幅度提高输变电设备的安全可靠性，提高设备运行效率，减轻人员劳动强度。随着市场认知度的提高、成熟产品的上市、设计及制造工艺的日趋完善、行业标准的逐步建立，光纤传感器技术在高压电气设备温度监测领域中广泛应用的前景是无可置疑。

#### 五、 结论及建议

光纤温度传感技术产品的特点非常突出，在高压电气设备的在线监测、监控应用中具有非常明显的优势，给输变电及发电行业带来革命性的影响，是一项值得全面推广的新技术。

- 建议国家相关管理部门积极研究光纤传感技术的应用，并在电力行业积极推广现在已经颁布的相关标准（如：2016年颁布的《QGDW 11478-2015 变电设备光纤温度在线监测装置技术规范》等），积极培育市场，向国内研究机构提出明确需求，促进应用技术的市场化、产品化。
- 建议生产厂家积极研究该技术在设备制造中的应用，通过技术进步提高企业核心竞争力。比如在变压器等高压设备中埋设光纤传感器之前，可用先通过模拟计算，对高压设备热点温度的分布情况先作分析，确定最热点所在的大致位置。工艺设计方面可以采取一下措施：设计畅通油路、采用适当地绕组电流密度、采用换位导线降低环流耗及涡流耗、采用大功率高效冷却器等。
- 建议业主和设计部门在充分的市场调查基础上，积极推广这一技术在行业的应用，将该技术纳入项目招标书标准要求的范畴。
- 建议系统集成商积极围绕这个新技术产品，进行有针对性的应用开发，提高该技术的附加价值。
- 加大产业合作，进一步建立行业规范，使光纤传感器产品的引进、研发、生产、宣传推广步入良性循环的轨道。



## 附录：高压设备的热点温度监测、监控的技术难点

直接测量高压设备的热点温度，技术上有很多困难，主要问题有：高压绝缘、强电磁干扰、系统长期可靠稳定性等。目前国内高压电气设备温控技术主要采用热电阻 (Pt100)、热电偶 (高阻线) 等电类传感器测温、压力式温度计、红外测温、传光型“光纤”温度传感模块和 GPRS 无线传输等。

以上这些技术方法，首先遇到的困难是高压绝缘问题：电类传感器、气压式测温系统、以及红外测温等方法，都面临无法彻底解决金属导线、金属零部件或屏蔽措施、高压区安装压力温包或红外探头对高压设备绝缘安全带来的绝缘隐患。

其次是电磁干扰问题，弱电温度信号在强磁场环境中受到干扰，使得系统的稳定可靠性受到置疑。

第三是金属导线和金属零部件在电磁环境中产生涡流、造成损耗和自身发热的问题。

第四的系统寿命问题，尤其是传光型的点式“光纤型”温度传感器、无线传输型温度传感系统和气压式测温系统，系统寿命问题尤为突出：

- “光纤型”温度传感器和 GPRS 无线传输型温度传感系统存在模块内供电电池及其他零件长期在高温环境下工作寿命短及维护困难等问题，造成系统整体可靠性下降，实用性受到影响。

- 气压式测温系统会随着温包内部压力的泄漏而使整个测温系统报废。

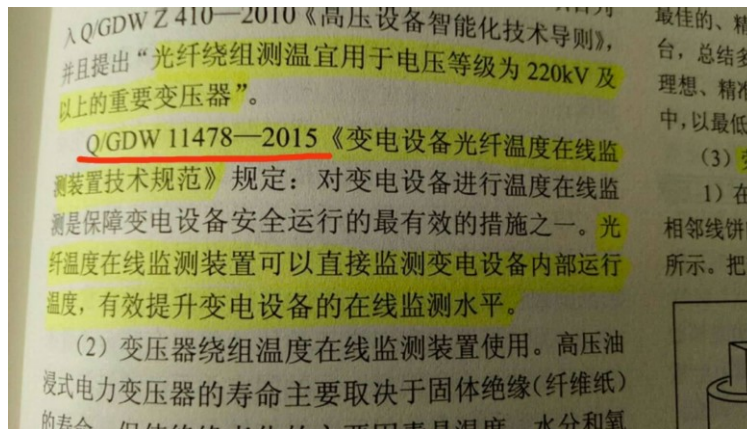
综上所述，热电阻、热电偶等电类传感器测温都需要用金属导线传输信号，由于电磁干扰、金属零部件/导线在强电磁环境下，存在严重的电磁干扰和涡流发热现象，以及无法保证长期稳定可靠的高压绝缘性能，使之在高压电气温度监测应用中，存在先天不足，误报、漏报严重，让一线运维人员无所适从。

另外，传统技术产品的感温探头体积过大、存在金属零件（如屏蔽网、屏蔽外壳、压力温包、红外探头等）问题，也给上述测温系统在变压器绕组或其他高压电气设备内部安装带来不便，对系统对温度的时间响应速度带来不利影响。

**各类光纤温度传感技术比较：**

四类光纤传感技术		荧光式	光纤光栅	拉曼/布里渊	半导体吸收
1	原理	荧光余辉延迟	光栅中心频率偏移	拉曼/布里渊散射	光子吸收
2	光源	LED	激光光源	激光光源	激光光源
3	调制参量	余辉时间积分	光频率	拉曼/布里渊散射	光强

4	信号解调	容易	复杂	复杂	较易
5	精度	极高	高	低	中
6	参数漂移	不漂移	漂移	漂移	漂移
7	可靠性	高	中	中	中
8	受振动影响	无影响	影响	影响	无影响
9	测温形式	点测温	准分布式	分布式	点测温
10	探头寿命	30 年以上	10-15 年	20 年	15 年
11	生产工艺	简单	一般	复杂	一般
12	性价比	最高	高	低	中



变压器绕组温度在线监测的发展历程和方法与发电机基本相同，并且在使用上比发电机应用的更成熟和广泛，目前，使用较多的是光纤式，在变压器绕组制造过程中埋入光纤，由光纤传播信号在高电压、高磁场条件下实现在线、实时准确测量绕组的热点温度，埋入点越多越精确。以前主要用于变压器在实验过程中与热模拟测量法进行比较，校对热模拟测量的误差，现阶段随着技术的发展，采用光纤直接测量绕组温度逐渐成为监测变压器绕组热点的首选方法。其中应用较好的是荧光技术测温。

采用光纤测温可以构成完整方案的变压器测温在线监测系统，通过变压器内置的光纤传感器直接监测绕组的热点、铁芯和顶部油温以及其他位置产生的

END