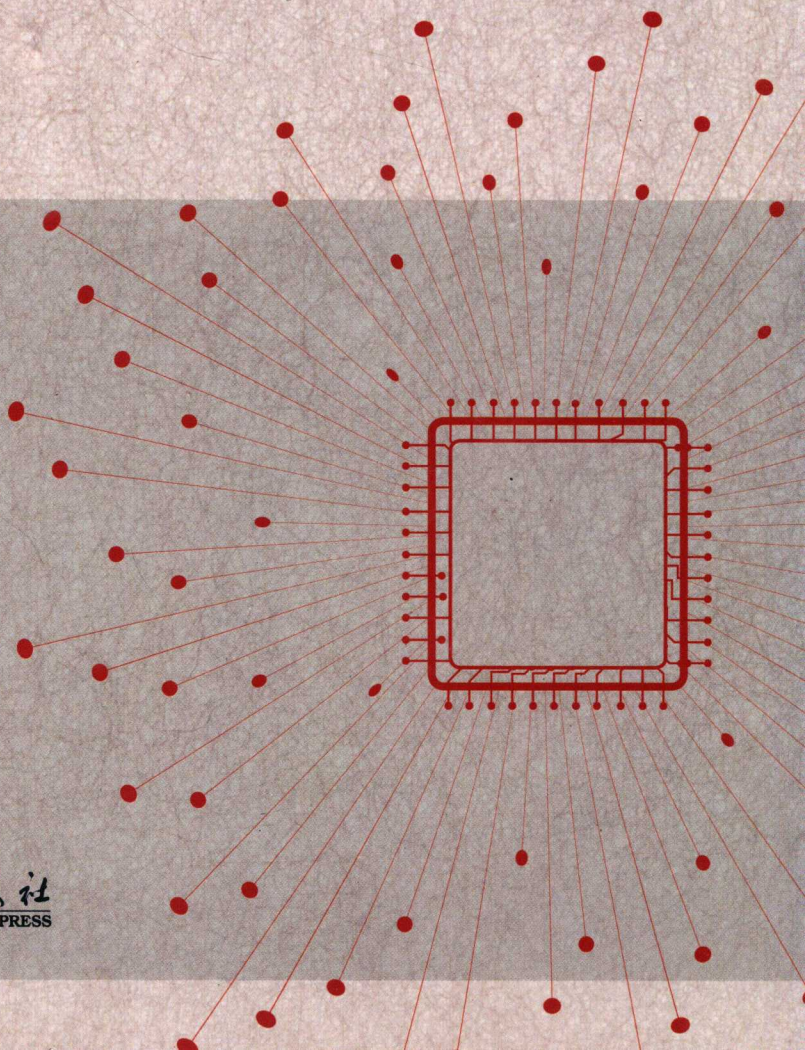


智能高压设备

刘有为 等 编著

SMART HIGH VOLTAGE EQUIPMENT



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

智能高压设备

刘有为 等 编著

SMART HIGH VOLTAGE EQUIPMENT



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

智能化是高压设备技术发展方向。本书介绍了智能高压设备的基本概念,并以电力变压器、高压开关为重点,简述了高压设备智能化的具体实施方案及系统架构,提出了智能组件的概念,对监测、保护、控制等智能电子装置的功能设计、状态感知、信息交互、电磁兼容等进行了较为系统的论述,分析了智能化功能及应用。

全书共分八章,主要内容包括状态感知技术基础、智能化的电磁兼容问题、智能组件及各 IED 的通信与对时、智能电力变压器、智能高压开关设备、电子式电压及电流互感器及智能高压设备的仿真与检测。

本书可供从事智能高压设备研制、生产、检测及智能变电站设计与运行的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能高压设备 / 刘有为等编著. —北京: 中国电力出版社, 2019.4
ISBN 978-7-5198-2779-3

I. ①智… II. ①刘… III. ①智能系统-变电所-高压设备 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 283113 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 薛 红 (010-63412346)

责任校对: 黄 蓓 朱丽芳

装帧设计: 王英磊 赵姗姗

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2019 年 4 月第一版

印 次: 2019 年 4 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张: 19.75

字 数: 348 千字

定 价: 98.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

编写人员

刘有为	王小华	高文胜	卢斌先	肖燕
须雷	窦仁晖	陈硕	黄在朝	潘丁
刘定新	李志远	冀增华	王化鹏	任雁铭
胡绍谦	钟建英	张一茗	王园园	程婷婷
许婧	刘占元	陈磊	李传生	曲平

前 言

电力电子化、智能化是电网发展的两大趋势。高压设备是组成电网的基本元件，高压设备的智能化是电网智能化的基础和重要组成部分，高压设备已写入《中国制造 2025》，加速推进智能高压设备的研制与应用已在行业内形成共识。

智能高压设备是传感器技术、控制技术、计算机技术、信息技术、通信技术与常规高压设备的有机融合，具备了测量数字化、控制网络化、状态可视化、信息互动化的新特征，实现了从模拟接口到数字接口、从电气控制到智能控制的跨越，显著提升了高压设备与电网的互动水平，代表了高压设备的技术发展方向。

本书总结了国家高技术研究发展计划（863 计划）课题“高压开关设备智能化关键技术”的研究成果，与高等学校、制造企业合作完成。本书第 1 章及第 2 章的 2.1、2.2 由中国电力科学研究院有限公司刘有为、肖燕编写，2.3 由清华大学高文胜、程婷婷等编写，2.4 由西安交通大学王小华等编写；第 3 章由华北电力大学卢斌先编写；第 4 章由南京南瑞继保电气有限公司须雷、中国电力科学研究院有限公司窦仁晖、全球能源互联网研究院黄在朝等编写；第 5 章 5.1~5.4 及第 6 章 6.1~6.3 由刘有为、西安西电开关电气有限公司王园园、保定天威保变电气股份有限公司冀增华等编写，5.5、5.6、6.4 由王小华、刘有为、程亭

婷等编写；第7章由许继集团有限公司潘丁、全球能源互联网研究院有限公司陈硕等编写；第8章由刘有为、中国电力科学研究院有限公司李志远编写。华北电力大学石俏、曹凯参与了书稿的校对整理工作，全书由刘有为统稿。

高压设备智能化是一个新的课题，由于编著者水平有限，书中疏漏与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2018年11月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 历史沿革	1
1.2 基本结构及特征	2
1.3 应用前景	4
参考文献	4
第 2 章 状态感知技术基础	5
2.1 状态感知的概念	5
2.2 常用传感器及原理	7
2.3 状态评估	30
2.4 智能故障诊断技术	40
参考文献	57
第 3 章 电磁兼容	59
3.1 电磁环境	59
3.2 电磁干扰抑制方法	63
3.3 电磁兼容试验原理	79
参考文献	96
第 4 章 通信与对时	98
4.1 通信	98
4.2 对时与同步	139
参考文献	148
第 5 章 智能电力变压器	149
5.1 基本结构及功能	149
5.2 监测	152

5.3	保护	167
5.4	控制	168
5.5	智能评估	180
5.6	智能化功能及应用	194
	参考文献	198
第 6 章	智能高压开关设备	199
6.1	基本结构	199
6.2	监测	202
6.3	控制	215
6.4	智能评估	228
	参考文献	246
第 7 章	电子式互感器	247
7.1	电子式互感器概述	247
7.2	电子式电流互感器	249
7.3	电子式电压互感器	269
7.4	合并单元	279
	参考文献	282
第 8 章	仿真与检测	284
8.1	概述	284
8.2	常用监测 IED 性能检测	285
8.3	常用控制 IED 功能检测	293
8.4	通信功能检测	299
8.5	可靠性检测	302
	参考文献	305

第 1 章 概 述

1.1 历史沿革

高压设备是组成电网的基本元件，高压设备一旦发生事故，对电网安全运行及供电可靠性都会产生不利影响。为了不断提升电网安全及供电可靠性水平，一方面要不断提升高压设备的可靠性水平，如改进绝缘材质、优化结构设计、提升工艺水平等；另一方面，不断应用新型传感技术，对高压设备的运行状态进行连续监测，使电网尽可能早地掌握设备状态，有预见地提前隔离存在潜在故障的设备。这两个方面始终是高压设备的研究与发展的方向。

早期，高压设备仅配置一些基本的监测与告警装置，如油位指示、气体继电器、气体绝缘设备的密度继电器等，主要是开关量，用以监视状态量是否越限，除温度之外，大都不具有连续监测功能，对高压设备状态的反映极为有限。20 世纪 70 年代，随着传感器技术、电子技术及计算机技术的发展，开始探索应用传感技术在线连续监测设备状态量，进行故障早期预警，此时对状态量的分析已不再是简单地辨别是否越限，而是基于专业分析做出评估，故障预警。经过三十多年的研究与实践，在线监测技术有了很大发展，从最初在线监测电容型设备的三相不平衡电流起步，目前已经可以在线监测局部放电、油中溶解气体、绕组热点温度等需要复杂传感技术才能采集的参量，可监测的参量越来越多，监测数据的品质越来越好，监测系统的可靠性越来越高，在高压设备安全运行方面发挥着越来越重要的作用。

但是，在线监测技术定位于常规告警功能的扩展，立足于监测高压设备的运行状态，服务于状态检修。长期以来在线监测一直自成体系，属于可有可无的附加功能。近年来，部分在线监测系统与生产管理信息系统（project management information system, PMIS）对接，成为 PMIS 的一个子系统，但并没有直接参与电网的运行控制。由于监测数据格式不规范、品质良莠不齐、数据分析挖掘不够，未被变电站标准设计采用，应用范围有限。

未来电网呈现两大发展趋势，即电力电子化和智能化。随着 IEC61850 的发布，高压设备智能化工作开始起步。早期，主要是通过过程层设备，转化高压设备的状态采集方式，从常规模拟量采集，升级为全数字采集，以适应变电站全数字化的新环境。本世纪初，首次出现了智能高压开关设备的概念，其核心是高压开关设备配置了开关设备控制器（智能终端），同时应用部分较为成熟的在线监测技术，实现了基于网络的控制和对重大异常状态的告警。但此时并未深入研究智能电网对高压设备的需求，围绕高压开关设备的二次设备依然按功能独立配置，控制与监测彼此自成体系，分别服务于运行控制和状态检修，制约了智能化功能的实现和应用。

近年，智能电网研究与建设工作全面展开。根据我国电网发展规划，将新建数千座智能变电站，智能高压设备的应用场景及技术需求具体化，而且市场需求量巨大，智能高压设备的概念受到了重视。我国电网企业立足于智能电网的技术需求，开始探索智能高压设备的技术架构，提出了全新的智能高压设备技术方案。同时，国内研究院、高校、高压设备骨干企业组成技术联盟，通过合作研究，就智能高压设备的组成、结构、功能形成共识，建立起智能高压设备基本技术标准，开始了智能高压设备的研制与应用。目前，智能高压设备已在我国电网大量应用。

1.2 基本结构及特征

这里所述智能高压设备主要由三部分组成，分别是高压设备本体、实现智能化需要配置的各型传感器/执行器以及实现或支持实现智能化功能的智能电子装置（intelligent electric device, IED）。如图 1-1 所示。

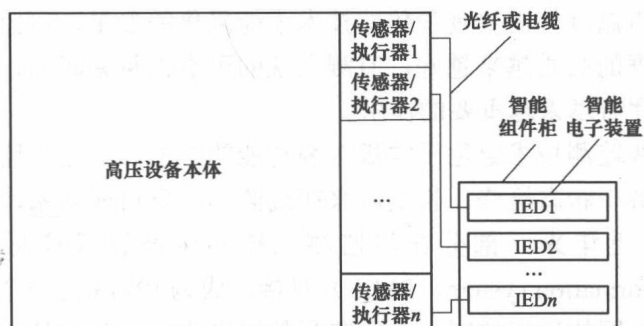


图 1-1 智能高压设备结构示意图

传感器用于感知高压设备的状态，包括运行状态、控制状态和负载能力等，根据传感需求进行配置，与高压设备本体进行一体化设计，传感器与高压设备的融合是整个制造过程的一部分。传感器宜选择无源型，如果必须选择有源传感器，应尽可能将有源部分安装在易于维修的地方。传感器与高压设备本体关键部件或介质有直接接触的情形，应符合相容性要求。

通常，一台高压设备配置一组 IED，分别实现高压设备的测控、监测、保护等智能化功能。具体配置方案取决于智能化的目标，但至少配置 1 个 IED，对于状态感知应用较多情形，可配置多个 IED，组成智能组件。智能组件中有 1 个 IED 应设置为主 IED。若按智能变电站“三层两网”布局，主 IED 为间隔层设备，主要承担聚合传感信息、完成综合分析、报送智能告警信息等功能；其他 IED 为过程层设备，主要承担传感信息的采集、处理，或通过执行器执行控制指令，实现智能控制。智能组件内各 IED 通过网络共享传感信息。智能高压设备应具备以下基本特征：

(1) 测量数字化。测量数字化是高压设备智能化的基本特征之一，指对高压设备运行、控制直接相关的状态量进行就地数字化采集，采集数据通过网络在智能组件内共享，以支持其他 IED 完成相关智能化功能。常见的状态量包括变压器的油温与油位；有载分接开关挡位；开关设备分（合）闸位置、气体密度继电器接点信息等。

(2) 控制网络化。控制网络化是对智能高压设备的基本要求，指高压设备或其组（部）件实现基于变电站通信网络的控制，包括接收并响应控制指令、反馈控制状态及联锁联控等。如继电保护等有特别要求，智能高压设备也支持“点对点”的控制。

(3) 状态可视化。状态可视化是对电网调度（控制）中心及生产管理信息系统而言，指智能高压设备基于传感信息，通过自主分析，对控制可靠性、运行可靠性、负载能力做出评估，并将此评估结果通过变电站通信网络报送至电网调度（控制）中心及生产管理信息系统，以支持电网运行控制和状态检修。

(4) 一二次融合。一二次融合代表了智能高压设备的技术发展方向，指用于输变电的一次设备（即高压设备）与用于运行控制的二次设备（即各 IED）融合设计、整体调试与运行。具体来讲，即高压设备与相关测量、控制、保护、监测、计量等二次设备形成一个有机整体，对内共享传感信息，对外提供统一通信接口，共同实现常规一次设备的功能及智能化的目标。

(5) 信息互动化。信息互动化是智能化的基础，包括三个部分，一是智能组件各 IED 之间基于变电站通信网络共享传感器信息；二是智能高压设备之间

基于变电站通信进行信息互动，实现联锁控制、并列运行控制及保护闭锁等智能化功能；三是智能高压设备基于变电站通信及设备与电网调度（控制）中心、生产管理信息系统进行信息互动，实现变电站层级的智能化目标，如主动保护与控制等。

1.3 应用前景

当前，智能高压设备研制与应用面临两个方面的问题：首先是可靠性问题。经验表明，安装在高压设备近旁的电子设备，故障率明显偏高，长期以来这一问题一直没有得到很好解决。智能化大量应用传感器及 IED，存在着同样的问题，这已成为制约智能高压设备技术发展和工程应用的主要瓶颈。其次是智能化技术的实用化问题。许多智能化功能是一个完整的系统，需要一次及二次在管理上实现进一步的整合才能实现。由于传统上一次与二次各自相对独立，这种整合还需要一个过程。

智能高压设备适应了电网智能化、数字化的需要，不仅实现了全部接口的数字化，而且还实现了从常规电气控制到智能控制的跨越，同时展示了从状态感知到智能告警，进而实现主动保护的应用前景。这些新的特征可有效提升电网运行控制的效率和安全性。因此，智能高压设备代表了传统电力设备的技术发展方向，这是业内形成的广泛共识。随着问题的逐步解决，智能高压设备将有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 刘有为，肖燕等. 智能高压设备技术策略分析[J]. 电网技术，2010，34（12）：11~14.
- [2] DL/T 1411，智能高压设备技术导则，2015.

第2章 状态感知技术基础

2.1 状态感知的概念

2.1.1 状态感知的需求

电网中高压设备数量庞大，数以万计。高压设备的可靠运行是电网安全稳定运行的重要基础。随着设计、材质及制造工艺的不断创新，高压设备的可靠性越来越高。尽管如此，由于数量庞大，每年仍有相当数量的运行故障发生。为了降低设备故障给电网安全运行带来的风险，现代电网已经采用了冗余设计和先进的运行控制及保护技术，但是，高压设备故障依然会对电网安全运行造成或大或小的冲击，甚至诱发电网大停电事故。世界范围内许多大停电事故是由高压设备故障引发的。

智能高压设备是电网态势感知的一部分，在承担输变电功能的同时，对高压设备本体的运行可靠性、控制可靠性及负载能力等进行实时评估，评估形成的结果信息拓展了电网调度（控制）中心的决策信息维度，提升了电网调度（控制）中心应对一次设备故障的主动性和时效性，优化了电网的运行环境。状态感知是智能高压设备的核心功能之一，这里“感”是传感器对状态信息的采集，是“知”的基础；“知”是对传感信息的分析、评估，并最终形成支持决策的结果信息。为此，智能高压设备对状态感知提出了四个方面的要求：

（1）状态量的选择。高压设备的状态量可细分为反映运行可靠性的状态量、反映控制可靠性或支持控制的状态量和反映负载能力的状态量。感知需求不同，状态量的选择也不尽相同，但应遵循以下原则：

- 1) 有适用的传感技术，将反映高压设备的某种特征转化为可采集的电量；
- 2) 采集的传感信息或其所包含的可解析信息应与设备状态之间存在明确的关联关系；
- 3) 所选择的状态量可在设备运行状态下实现安全、稳定和持续采集；

- 4) 有相对成熟的数据处理和状态评估方法，误判率在可接受的水平；
- 5) 符合设备寿命周期成本管理的目标。

(2) 一次、二次的融合。在拟监测的状态量选定之后，植入传感器为关键一步，要求既要考虑高压设备本身的安全，也要顾及传感器的安全、寿命、灵敏性和易维护性，这一要求应贯彻到从设计到制造的全过程。同时，为了实现数据源的高度统一，避免重复采样，同一传感信息应在智能组件内部测控、计量、监测和保护等相关 IED 之间实现共享。

(3) 数据品质管理。通过传感器采集的数据可大致分为两类，一类有确定的物理意义，如温度、位置、压力等，这类数据的品质决定于不确定度，可通过与标准源比对的方法进行检定；另一类，如设备振动信号、特高频 (ultra high frequency, UHF) 射频信号等，需要应用适宜的方法从中提取特征值，建立起特征值与设备状态间的关联关系，再进行判断，这类数据的处理通常是评估方法的一部分，其数据品质宜通过评估结果的可信度予以检定。

(4) 综合状态评估。目前，单一状态量的评估大都有一些方法，如阈值法、指纹法等。智能高压设备常常同时监测多个状态量，此时，最终的结果信息不宜限于单一状态量。事实上，各状态量之间存在互证或互补关系，因此，汇总的状态量越多，评估结果的可信度越高。通常，评估结果的可信度决定于状态量、数据品质及评估方法，通过与运行经验或专家评估的一致性作为综合状态评估效果的评判依据。

2.1.2 常用状态量

(1) 温度。温度与高压设备的状态息息相关，如油浸式电力变压器绝缘的油面温度、底层油温、绕组温度等；SF₆ 气体绝缘设备的气体温度；开关设备的触头温度等。

(2) 压力。压力也是高压设备的重要状态量，如油浸式电力变压器绝缘油的动态压力；SF₆ 气体绝缘设备的充气压力；断路器在静态及分（合）闸过程中储能介质压力等。

(3) 水分。水分与绝缘介质强度密切相关，如油浸式电力变压器绝缘油的含水量；SF₆ 气体绝缘设备各气室的含水量等。

(4) 小电流。这里所谓小电流是相对于一次电流而言的，具体包括绝缘介质的漏电流、高压设备对地电容电流、各类设备接地引线电流以及开关设备控制线圈电流、驱动电机电流等。

(5) 位移。位移表征高压开关设备在分（合）闸过程中动触头的运行状态，

是高压开关的重要状态量。

(6) 油中溶解气体。油中溶解气体是反映油浸式电力变压器健康状态的关键状态量，可以反映大约 70% 的缺陷或故障。

(7) 振动。高压设备的振动有三类：第一类是磁致伸缩等引起的振动，具有绕组和铁心的设备，如电力变压器等，由于磁致伸缩等原因，运行中线圈和铁心会产生轻微振动；第二类是开关设备操作过程中因机械撞击引起的振动，如有载分接开关、高压断路器等，由于操动机构相关部件间存在较为强烈的机械撞击，会引发极为明显的振动；第三类是由设备内部出现放电性缺陷引起的微弱振动。设备振动具有指纹属性，其特征改变通常预示着存在某种缺陷。

(8) 特高频信号。油浸式电力变压器及气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated metal enclosed switchgear, GIS) 等充 SF₆ 的高压设备，内部发生放电性缺陷时，会发射特高频信号。

2.2 常用传感器及原理

2.2.1 概述

传感器是高压设备智能化的基础，其作用是通过传感器中的敏感元件，感知设备状态，将设备状态信息转化为监测IED可采集的电信号。

传感器主要有以下技术指标：

(1) 灵敏度。灵敏度是传感器的基本状态量，一般指被传感量的单位变化所引起传感器输出的变化量。

(2) 噪声。指无传感输入时，传感器的随机输出，通常为白噪声。广义上，噪声还包括传感器在工作环境中耦合的背景噪声。根据噪声的特征，可以通过软硬件技术进行隔离和降噪处理。噪声水平决定了传感器的最小可测量。

(3) 线性度。指被传感量与传感器输出之间的线性相关程度，线性度越高越好。但实际传感器总有非线性特性，多数情况下非线性特性可以通过软硬件设计予以改善。

(4) 复现性。在传感器全量程范围内，保持被传感量不变，重复多次测试，传感器输出量的稳定度。稳定度越高，则复现性越好。复现性与传感器的噪声及传感特性等相关。

(5) 响应时间。在被传感量发生阶跃变化时，传感器输出通常可以表达为 $1 - e^{-t/\tau}$ ， τ 决定了输出达到稳定值的时间长度。对于部分用于控制的状态量，

要求传感器的 τ 值越小越好。

(6) 迟滞。指被传感量从小到大直至最大量程，再由大到小直至最小量程，其输入-输出曲线不重合的现象。迟滞越小传感器性能越好。

(7) 漂移。指被传感量保持固定不变的情况下，传感器输出随时间变化的现象。其中，最常见的是温漂，即输出随温度变化。过大的漂移容易导致误判，漂移越小传感器性能越好。

用于智能高压设备，对传感器有以下额外要求：① 适应强电磁场环境的能力；② 若用于高电位，应有良好的绝缘能力；③ 植入式传感器应与高压设备绝缘介质具有良好的相容性。

2.2.2 温度传感技术

2.2.2.1 电阻型温度传感器

电阻型温度传感器的感温元件为热电阻或热敏电阻，其工作原理是通过感温元件将温度测量转化为电阻测量。热电阻的材料为金属，常用的有铂(Pt)、镍(Ni)等。铂电阻温度传感器线性度高、复现性好，具有较高的检测精度，在智能高压设备中有广泛应用。铂电阻温度传感器的精度与铂的纯度有关，纯度越高测量精度越高。常用铂电阻温度传感器的 R_0 (0°C 时的电阻值)有10、100 Ω 及1000 Ω 等，分别为Pt10、Pt100和Pt1000。在变压器油面温度等监测中，普遍采用Pt100。需要指出的是，铂电阻温度传感器热容量较大，因此响应时间较长，限制了其在动态测量中的应用。

热敏电阻的材料为半导体，主要由锰、钴、镍等金属氧化物混合烧结而成。与金属热电阻相比，热敏电阻的电阻率大，且温度系数要大4~9倍，因此，由热敏电阻制成的电阻型温度传感器具有体积小、热惯性小(即响应时间短)、灵敏度高优点，但热敏电阻的阻值随温度呈非线性关系，复现性和互换性较差。

2.2.2.2 光纤温度传感器原理

常用的光纤温度传感器主要有透射型、荧光发光型、荧光余辉型三大类。与电阻型温度传感器最大的区别在于光纤温度传感器可以直接用于高电位部件的温度测量，特别适宜用于变压器绕组温度的监测。

透射型半导体光纤温度传感器的传感原理是：当一束光照射到一半导体晶片时，低于某个波长(λ_c)的光会被半导体晶片吸收，而高于该波长(λ_c)的光则可透过半导体晶片。 λ_c 称为半导体的本征吸收波长。这是由于当光子能量达到半导体的禁带宽度 E_c 时，半导体中的电子会吸收光子，从价带跃迁到导带。由于 E_c 随着温度升高而降低，本征波长 λ_c 会随着温度升高而增大，半导体的透

光率会随着温度的升高而减小，如图 2-1 (b) 所示。这一特性正是透射型半导体光纤温度传感技术的原理，基于这一原理的光纤温度传感器基本结构参见图 2-1 (a)。实际的传感器采用可补偿光源功率波动和损耗等结构，以降低测量温度值的不确定度。通常不确定度小于 2°C ，温度感知范围可达 $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

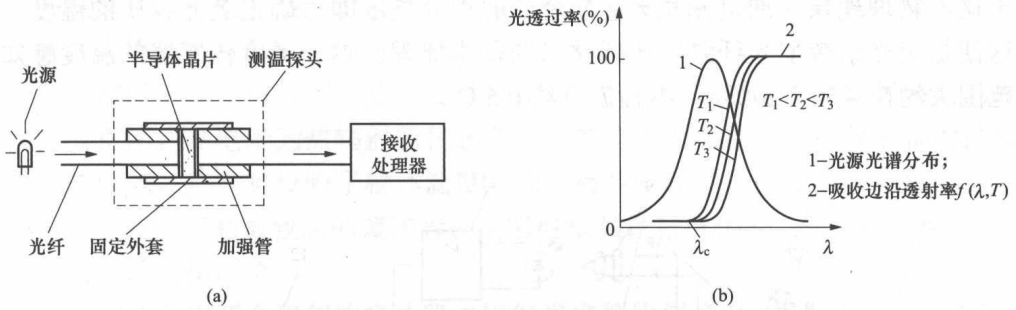


图 2-1 透射型半导体光纤温度传感器结构示意图

(a) 传感器原理示意图；(b) 温度与透过率

荧光发光型光纤温度传感器的传感原理是：某些荧光物质，如掺有微量稀土铈的磷化物，在紫外光的激励下能发出可见光，其发射光谱与温度有关，光谱中某些波长的荧光对温度敏感，荧光强度会随着温度的增加显著减少；另一些波长的荧光受温度影响很小，荧光强度几乎不随温度的变化而改变，如图 2-2 所示。两者之比，会在某个温度区段形成一条只与温度相关，而与激励光源强度、耦合损耗及传输损耗无关的曲线。这便是荧光发光型光纤温度传感技术的原理。图 2-3 为基于这一原理的传感器示意图，其温度感知范围大约在 $-50\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，不确定度约 0.1°C ，响应时间小于 1s 。

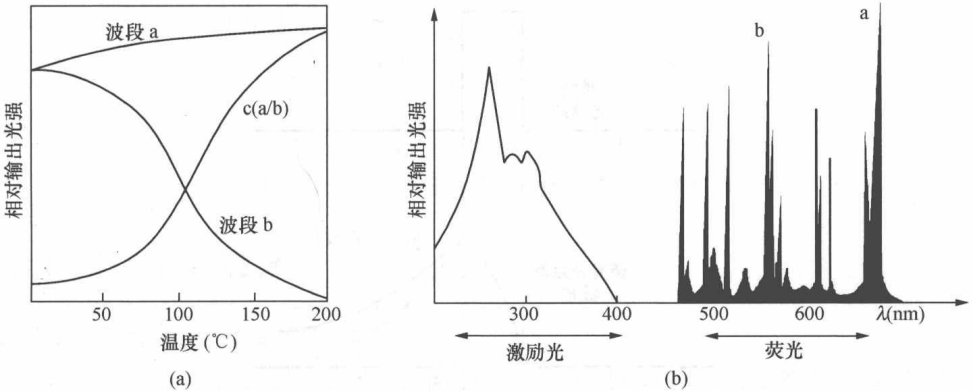


图 2-2 荧光物质发射光谱及温度特性

(a) 荧光谱线强度与温度的关系；(b) 激励光源及受激发射的光谱