

● 徐子生 等 译

光纤传感器技术手册

*Fiberoptic
sensor
technology
handbook*

电子工业出版社

光纤传感器技术手册

徐予生 等 译

电子工业出版社

内 容 简 介

本书是一本供从事光纤传感器研究、设计、制造、应用等各方面工作的工程技术人员和高等院校学生用的参考读物。内容包括：光纤传感器所用光纤、光无源器件、光源、光检测器的性质及制造方法；各类光纤传感器的原理、装置及其特性；光纤传感器阵列和遥测系统的设计和结构等。书后附有术语汇编。本书附表详全，资料殷实，内容丰富，简明扼要，深入浅出。

光纤传感器技术手册

徐子生 等 译

责任编辑：平凡

*

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云卫新综合印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米^{1/32} 印张：8.75 字数：218.7千字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数：1—7100册 定价：2.25元

统一书号：15290·552

ISBN7-5053-0113-6/TN68

译者的话

近几年来，光纤传感器作为一项新兴的应用技术，受到了世界各国科研、工业、军事等部门的高度重视，因而获得了迅速的发展。光纤传感器可广泛用于旋转、加速度、液位、温度、电流、电场、磁场、压力、振动、弯曲、位移、声、流量等各种物理参数的测量，并具有灵敏度高、成本低、耐腐蚀、体积小、抗电磁干扰等优点，发展前景十分广阔。

本手册是一本全面论述光纤传感器的参考读物。具有简明扼要、重点突出、容易理解、内容较新的特点。全书共分六章，分别叙述了与光纤传感器有关的光纤、光无源器件、光源、光检测器的性质及其制造方法；重点阐述了各类光纤传感器的原理、装置和特征；介绍了光纤传感器阵列和遥测系统的设计和结构，并附有术语汇编。因此，对从事光纤传感器研究、设计、制造和应用的工程技术人员和高等学校师生来说是一本很好的参考读物。

本手册由徐予生、王志和、陶声发、徐建根等同志翻译；由上海交通大学的张煦教授和曾庆济同志校审。

原书有个别笔误或排印差错之处，已由译校者一一订正。对本书译、校方面存在的问题和不足，敬请读者批评指正。

前 言

光纤传感器技术手册概括地叙述了纤维光学，特别是光纤传感器领域中的最新技术。本手册中所叙述的光纤传感器技术基本原理和实验将使读者为掌握这一新兴技术打下坚实基础。只需要具有不多的一般技术基础知识便可以完全理解本书内容。作者在撰写内容时尽可能做到清楚和严谨。为了保证本手册内容的前后连贯和一致，所有内容都已经过校核。

动力系统有限公司(Dynamic Systems INC)介绍 DSI 公司是一个致力于系统概念的应用以解决技术开发、工程和管理方面复杂问题的改革型公司。DSI已经向许多政府部门和私人机构提供了内容广泛的有关声光、电光、磁光和光纤传感器系统方面的科学技术和管理经验，在光纤传感器的设计和开发领域中起了关键性的作用。DSI的工作人员参与了最初的研究工作，正是这些研究工作才使上述一些领域达到目前这种水平。同时他们还撰写了许多早期的和现代的论文与专利，这在当时或目前都是领先的。DSI已被公认为是迅速形成的光纤传感器及光波通信领域的领导者。DSI提供专业服务的研究和开发领域，包括声纳、武器系统、火力控制、侵入与保安装置、导航和遥测等。DSI对数学模型、工程设计、系统采集、程序管理、组织计划、后勤、训练以及有关领域中的问题提供保障。

作者介绍

查尔斯·M·戴维斯 (Charles, M. Davis) 博士: 目前戴维斯博士是DSI的主任科学家。他在声光学和物理声学方面有三十年以上的经验。他以前曾任美国大学物理教授以及海军研究试验室 (NRL) 物理声学部的负责人。在担任主任科学家期间, 他致力于光纤水声传感器的开发和光纤传感器系统(FOSS) 方案的制订工作。在DSI他指导了光纤传感器系统的样机研制並撰写了许多这方面的论文。戴维斯博士还参与研制了许多光纤传感器。

爱德华·F·卡罗姆博士: 目前卡罗姆博士是DSI的高级科学家和约翰·科罗尔 (John, Corroll) 大学的物理学教授。他曾参与了海军研究试验室的初期研究工作, 这些研究工作促进了光纤水声传感器的发展, 他还撰写过许多有关这方面的论文。他拥有三篇有关的专利並继续指导光纤传感器和元件的研究工作。他为DSI提供了有关开发光纤传感器方面的科学经验。

马丁·H·韦克 (Martin, H. Weik) 理学博士: 目前韦克博士是DSI的高级系统分析家。他设计並研制了陆军弹道研究试验室的电子数字计算机用的元件, 他一直领导着陆军计算机与信息科学研究开发计划和科技信息计划部。他已编著了几本内容广泛的词典, 内容涉及计算机、信息处理系统、纤维光学、光波传播以及一般通信等领域。他目前的兴趣集中在把光纤传感器用于医用测试设备方面。

沙俄尔·伊齐其尔 (Shaoul, Ezekel) 理学博士: 伊齐其尔博士目前是美国麻省理工学院的教授。他一直从事应用光学技术来进行超精密测量方面的研究。最近他研究采用无源谐振器和

光纤干涉仪来进行转速测量。

罗伯特·E·艾因齐格 (Robert. E. Einzig) 电气工程硕士：艾因齐格先生目前是 DSI 公司的四位领导人之一。他经营着好几个内部研制计划并支持了海军/国防部纤维光学传感器系统 (FOSS) 计划。在光纤传感器和数据传输系统方面，他具有广泛的应用经验，此外他还有广博的水下声传感器方面的知识。艾因齐格先生为美国国防部及工业应用的纤维光学传感器系统计划制订了详细规划。

目 录

| | |
|--------------------------------|--------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| §1 背景 | (1) |
| §2 目的 | (2) |
| §3 各章内容 | (3) |
| 第二章 光纤传感器元件 | (5) |
| §1 光纤特性 | (5) |
| §1.1 设计目标 | (5) |
| §1.2 光波传播 | (14) |
| §1.3 传播模式 | (16) |
| §2 光纤制造 | (35) |
| §2.1 折射率分布控制 | (36) |
| §2.2 光纤制造方法 | (39) |
| 2. 2. 1 双坩埚法 | (39) |
| 2. 2. 2 内汽相氧化 (IVPO) 法 | (41) |
| 2. 2. 3 外汽相氧化 (OVPO) 法 | (43) |
| 2. 2. 4 汽相轴向沉积 (V A D) 法 | (44) |
| §2.3 光纤强度 | (46) |
| §3 固体光纤光源 | (50) |
| §3.1 半导体中的能级 | (50) |
| §3.2 发光二极管 (LED) 和二极管激光器 | (57) |
| §4 光电检测器 | (64) |
| 第三章 光纤元件互连 | (68) |
| §1 光纤连接器和固定接头 | (68) |
| §1.1 参考文献 | (80) |

| | |
|-----------------------------|-------|
| §2 光纤耦合器 | (80) |
| §2.1 参考文献 | (85) |
| §3 光缆 | (86) |
| §3.1 概述 | (86) |
| §3.2 商品光缆 | (86) |
| §3.3 小结 | (90) |
| 第四章 光纤传感器中的光波 | (91) |
| §1 干涉型光纤传感器 | (91) |
| §1.1 强度干涉测量法 | (91) |
| 1.1.1 基本原理 | (91) |
| 1.1.2 迈克尔孙干涉仪 | (92) |
| 1.1.3 马赫-泽德干涉仪 | (92) |
| 1.1.4 萨格奈克干涉仪 | (93) |
| 1.1.5 法布里-珀罗干涉仪 | (94) |
| 1.1.6 干涉仪的灵敏度 | (95) |
| §1.2 光纤强度干涉仪 | (97) |
| §1.3 光纤传感器中的偏振 | (98) |
| §2 相位和强度检测 | (103) |
| §2.1 相位检测 | (103) |
| §2.2 零差检测的应用 | (110) |
| §2.3 相位噪声 | (111) |
| §2.4 幅度噪声 | (112) |
| §2.5 伴生模和多模工作 | (114) |
| §2.6 锁相环工作 | (115) |
| §2.7 外差检测 | (117) |
| §2.8 参考文献 | (119) |
| §3 集成光路 (IOC _s) | (120) |
| 第五章 光纤传感器和元件 | (125) |
| §1 调相光纤传感器 | (125) |
| §1.1 概述 | (125) |
| §1.2 光纤声传感器 | (127) |

| | | |
|---------|--------------------|-------|
| 1. 2. 1 | 声压传感器 | (127) |
| 1. 2. 2 | 压力梯度传感器 | (132) |
| §1.3 | 光纤磁传感器 | (135) |
| §1.4 | 光纤电流传感器 | (138) |
| §1.5 | 光纤谱声检测仪 | (140) |
| §1.6 | 小结 | (142) |
| §1.7 | 参考文献 | (142) |
| §2 | 强度调制光纤传感器 | (143) |
| §2.1 | 概述 | (143) |
| §2.2 | 迅衰场光纤传感器 | (144) |
| §2.3 | 反射系数光纤传感器 | (144) |
| §2.4 | 移动光栅光纤传感器 | (145) |
| §2.5 | 微弯光纤传感器 | (147) |
| §2.6 | 参考文献 | (156) |
| §3 | 光纤线性加速度计 | (156) |
| §3.1 | 参考文献 | (161) |
| §4 | 光纤转速传感器 | (161) |
| §4.1 | 引言 | (161) |
| §4.2 | 转速传感方法 | (162) |
| §4.3 | 光纤转速传感器的优点 | (163) |
| §4.4 | 真空中的萨格奈克效应 | (164) |
| §4.5 | 介质中的萨格奈克效应 | (166) |
| §4.6 | 萨格奈克效应量值 | (167) |
| §4.7 | 光纤转速传感方法 | (168) |
| §4.8 | 光纤转速传感器的基本限制 | (169) |
| §4.9 | 光纤转速传感器 | (171) |
| §4.10 | 光子散粒噪声限制 | (172) |
| §4.11 | 理想性能 | (174) |
| §4.12 | 非互易相移测量 | (175) |
| §4.13 | 非互易调相方法 | (177) |
| §4.14 | 开环与闭环工作 | (179) |

| | |
|-------------------------|--------------|
| §4.15 光纤转速传感器存在的问题 | (182) |
| §4.16 集成光纤“陀螺” | (183) |
| §4.17 光纤陀螺的性能 | (184) |
| §4.18 转速传感器小结 | (185) |
| §4.19 光纤传感器总结 | (185) |
| §4.20 参考文献 | (185) |
| 第六章 光纤传感器阵列和遥测系统 | (188) |
| §1 光纤传感器阵列 | (188) |
| §1.1 光纤传感器阵列设计考虑 | (188) |
| 1.1.1 总的考虑 | (188) |
| 1.1.2 特定的设计考虑 | (189) |
| §1.2 光纤传感器阵列的基本结构 | (189) |
| §1.3 光纤传感器阵列的估算 | (200) |
| §2 光纤遥测系统 | (201) |
| §2.1 光纤遥测系统设计方案的选择 | (203) |
| §2.2 光纤遥测系统的基本结构 | (203) |
| §2.3 遥测系统估算 | (205) |
| 2.3.1 上升时间的估算分析 | (205) |
| 2.3.2 光功率估算分析 | (210) |
| 2.3.3 成本估算分析 | (213) |
| §2.4 光纤遥测系统具体结构 | (213) |
| §3 光纤传感器阵列遥测传输线路参数 | (216) |
| §3.1 传输线路的一般参数 | (216) |
| §3.2 传输线路的特定参数 | (218) |
| §3.3 光纤的多路复用 | (220) |
| §3.4 连接器参数 | (221) |
| §4 终端(接收机)的考虑 | (222) |
| §5 小结 | (222) |
| 附录 光纤传感器术语 | (224) |

第一章 绪 论

§1 背 景

长期以来，人们要求增加通信系统容量、降低单位信道成本，这种要求促进了数百个光通信系统的研究和安装，目前，这些通信系统正在世界上许多地方运行。与金属线缆系统相比，光纤通信系统具有如下优点：每单位信道-每哩(1哩=1609.344米)所需的能量少；单位距离上的信号衰减小；带宽宽，因而可以增加信道容量；抗电磁干扰；串音小；防窃听(视)能力强；受冲击的危害小；尺寸小；重量轻；减少了紧缺金属的消耗等等。这些优点成了改进光源、光纤、光缆以及连接器和光检测器的动力。光纤数据线路已经成熟，随时可供安装使用。目前每年要花费数亿美元的资金来改进光通信系统元件。

过去几年，人们利用能够得到的光学元件，在研制一类新的光纤传感器方面，已经取得了显著进展。这些传感器能探测声场、直线加速度和旋转加速度、电场和磁场以及其他许多物理参数。实际上，传感器调制的是光纤中光波的某一特性参量，如强度或相位。通常，相位调制必须先转换成强度调制，然后才能探测。这一转换过程可用光干涉仪来完成。这种调制信号(强度或相位)可以通过光纤信号传输(遥测)系统传送到远离传感器(换能器、调制器)的其他地方进行遥测。光信号可以是模拟信号或离散信号，不论是否具有光-电或电-光转换，光纤系统均可工作。本手册中所叙述的光纤传感器不仅可以采用电的或电磁传输

系统，而且可以采用光纤传输系统。即使在最简单的情况下（视觉信息或图像信号在具有相干性的光缆中传输），光纤束本身必须起传感器的作用，因而应该考虑如何用光纤来接收光波的所有问题。

§ 2 目 的

作者意将这本光纤传感器手册编写成一本能满足多方面需要的独特的技术文献。为便于读者了解纤维光学领域所包括的，特别是那些应用于光纤传感器的概念，本手册介绍有关的基础知识：叙述光纤特性及光纤的制备；以及与光纤传感器有关的光源和光检测器的特性；着重说明了这些主要元件和有关的连接器、固定接头、耦合器以及光缆的设计考虑。

为了检测物理参数，可以采用多种不同的方法来控制光波。本手册阐述了其中的一些方法，包括干涉测量技术、偏振技术和调制技术，并从零差和外差检测角度，对强度调制和相位调制进行了讨论，此外，还讨论了集成光路，重点介绍它们的制备和工作原理。

本书从设计和工作原理两方面，阐述了各类光纤传感器。其中包括强度调制传感器和相位调制传感器、转速传感器和加速度计。所讨论的器件包括水听器、磁强计、地震仪中所用的光纤传感器（换能器、调制器）。

大多数应用光纤传感器及传感器阵列的场合，往往需要遥测整个距离范围内所检测到的数据。因此，还讨论了各种光纤传感器阵列及遥测方法；给出了有关上升时间和功率的估算资料；简单地讨论遥测系统总的设计考虑。

§3 各章内容

第一章绪论之后，第二章专述光纤传感器的基本元件，即光纤本身的特性。详细讨论了按波动方程在光纤中传播的电磁波（光波）；光波在光纤输入和输出端的耦合；以及由于吸收、漏泄、散射所产生的功率损耗。第二章还讨论了光纤的不同特性、基本结构和影响因素，诸如：全内反射的基本概念、临界入射角和数值孔径的概念；介绍了模式传播、折射率分布和偏振等概念，叙述了光纤的不同制造方法，包括几种拉制光纤的方法；同时，还叙述了获得所需要的光纤折射率和尺寸，强度及纯度等问题。在第二章的最后，还详尽地研究了不同型式的光源特性，以便读者了解这些光源在光纤传感器中的应用。本章结尾部分讨论了光检测器的特性及其影响因素，着重说明光检测器的重要性以及光检测器在检测光纤传感器输出信号方面的应用。

第三章接着讨论了把光纤传感器输入端接到电源或光源的各种方法，以及把它的输出端接到光检测器或显示器的各种方法。传感器与光纤光缆的连接，可以用各种类型的连接器、固定接头、耦合器、合路器以及光缆来完成。连接器和固定接头主要用来连接光纤与光缆；耦合器用来将一个光源与多根光纤连接起来（分路）；合路器用于多根光纤与一个光检测器的耦合（合路）。

不了解光波所产生的各种效应以及光波间可能发生的相互作用，就不能很好的理解光纤传感器的工作原理。这些相互作用中，有许多是检测物理参数的基础。第四章所讨论的光波特性包括干涉测量、偏振以及与零差和外差检测有关的强度调制和相位调制。第四章结尾部分叙述了集成光路用的光波控制技术。

第五章把主要注意力从光纤传感器工作的一般原理和所用的技术转向传感器本身及其元件叙述方面。作为光纤传感器的应用

实例，本章讨论了强度调制传感器和调相器件，诸如：在水声器、磁强计、转速传感器、加速度计和地震仪中所用的那些器件。

第六章论述把光纤传感器组合成传感器阵列以及把它们的输出信号输入到远端的问题。还深入地讨论了光纤阵列和遥测系统的设计选择、基本结构、上升时间、功率、成本估算以及特殊结构，同时还讨论了光纤传感器有关的光源、传输线和终端设备。

和各章节主题有关的书目列在该章节的末尾。附录中包括了纤维光学领域中有权威性的术语和定义的词条汇编，着重叙述与光纤传感器设计、制造和工作有关的常用术语。在词条汇编中，特别注意本手册所用的那些术语。把许多和光纤传感器有关的论题和概念、光纤传感器的工作原理和基础理论放到词条汇编中去，以便在讨论主要论题时，不致因过份繁琐而使读者负担过重。例如将有关色散、麦克斯韦方程、调制、偏振、反射和传输系数以及各种型式的光纤传感器和干涉仪的一些概念都放在词条汇编中叙述。

第二章 光纤传感器元件

§1 光纤特性

在本节中，我们将相当详细地讨论光纤的基本特性，着重叙述与光纤传感器技术有关的重要概念。光纤结构十分简单，如图2.1所示。它基本上由具有很小直径的分层玻璃或塑料圆柱体构成。有一个中心圆柱体，称为纤芯，它由某种类型的玻璃或塑料制成。环绕着纤芯的是一层圆柱形套层，称为包层，它由特性与纤芯略有不同的类玻璃或塑料制成。纤芯或包层材料之间的差别将在后面讨论。最后，这一分层的圆柱体通常用一层护套包覆。光纤的导光能力取决于纤芯和包层的性能，而光纤的强度则由护套来维持，护套通常由塑料制成。



图2.1 光纤的基本结构

§1.1 设计目标

在研制一根优良的光纤时，所考虑的某些设计目标可以用

图2.2中所示的一个简单系统来说明。该系统包括一个脉冲调制光源。左侧的输入信号表示加到光束上的（即调制光束的）消息（情报信息），该光束从光源射出后用透镜聚焦并入射到光纤的一端。光在光纤中传输并从光纤的另一端射出，直接或经过第二个透镜聚焦后射入光电检测器。

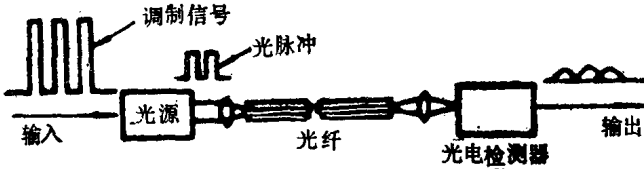


图2.2 基本的光纤线路

我们将讨论四个主要的光纤设计目标。第一个主要设计目标是要使输入（或耦合进）光纤纤芯的有用光量最大。正是纤芯中的这种光才能沿整个光纤长度传播，并具有很低的光功率损耗。为了使输入（或耦合进）纤芯的这种光量最大，必须使光纤的数值孔径(N.A.)最大。这是光纤的四个重要参数之一，这些参数严重影响了图2.2所示简单系统的特性。在介绍过其他三个重要参数之后，将更详细地逐一讨论这些参数。

光纤的第二个设计目标是要使光束从光纤输入端沿着纤芯传输到输出端时，光束的光损耗最小。这种光损耗称为衰减（功率损耗）率，通常以每公里光纤中的dB（分贝）数表示。

光纤的第三个设计目标是要使光纤的信息容量最大。输入光纤的可能是强度连续变化的光束或是如图2.2所示的一组轮廓分明的光脉冲。当光脉冲沿光纤传播时，由于衰减，其幅值将减小。此外，单个脉冲还可能增宽（展宽），这是因为存在着一些其他影响因素所致，这将在以后讨论。如果这些脉冲变得太宽，那么，它们相互间在时间上要部分重叠或者重合。若发生这种情况，原先加在光束上的消息（信息）将会损失掉。在光纤中发生的脉冲展宽称为色散，这一参数限制了光纤的信息容量（信号传