doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2019.04.04

光纤燃油液位传感器研究现状

程欣，葛俊锋，叶林
（华中科技大学 自动化学院，湖北 武汉 430074）

摘　要：液位测量传感器是飞机燃油测量系统中的重要组成部分。光纤燃油液位传感器因其本质安全的特性而在飞机燃油液位测量领域备受关注。根据被测对象对光的调制形式不同，将光纤液位传感器分为光强调制型和波长调制型两类，总结各种传感器的原理和应用现状，讨论不同类型传感器的性能和优缺点，并对今后的发展方向做出展望。

关键词：燃油液位测量；光纤液位传感器；光强调制；波长调制
中图分类号：TB9　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795(2019)04－0035－09

Review on Optical Fiber Types of Fuel Level Sensors

CHENG Xin，GE Junfeng，YE Lin
(School of Automation，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

Abstract：Fuel level measurement has always been an import issue in aircraft fuel system. Optical fiber types of fuel level sensors have attracted more and more attentions in aircraft fuel level measuring field because of its intrinsic safety. This paper classifies all the optical fiber fuel level sensors into two types according to the way to modulate the optical parameters：light intensity modulation and wavelength modulation. Not only the principle of the sensors is introduced，but also the current development status is presented. Finally，the application tendency is discussed.

Key words：fuel level measurement；optical fiber liquid level sensor；intensity modulation；wavelength modulation

0　引言

在飞机燃油系统中，燃油液位的准确测量一直是研究的热点。更高准确度的燃油液位测量系统，可以实现更长的航程、更安全的飞行保障和更多的经济效益。随着下一代航空计划的发展，对燃油液位传感器在安全性和准确度等方面都有了更进一步的要求。

目前，国内外使用最广泛的燃油液位传感器是电容式液位传感器。但由于电容介电常数容易受温度、电磁干扰、燃油类型、污染物等影响，传感器极板间电容值与液位的一致性难以保证，在进行液位测量前需要进行校准。电容是电磁储能元件，在易燃易爆的燃油系统中不能进行本质安全测量，电容两极板之间燃油析出的冷凝水，会造成电容虚指甚至短路。出于安全因素考虑，亟需一种更安全的燃油液位传感器。国内外技术人员已经研究了多种不同原理的液位传感器，包括浮子式、雷达式、超声波式、磁滞伸缩式、激光式、光纤式。但其中的很多新型传感器由于无法兼顾性能、安全性、环境适应性和经济效益，尚未得到广泛应用。而光纤燃油液位传感器因其具有良好的特性，体积小、重量轻、抗电磁干扰、抗腐蚀、对电绝缘、本质安全等，备受关注。光纤液位传感器一般由发射光纤、调制敏感元件和接收光纤组成，功能型光纤的调制敏感元件也是光纤，从而能够得到一体性更好的结构。

按传感器敏感元件改变传输光的光学特性方式的不同进行分类，光纤液位传感器分为光强调制型和波长调制型，通过探测光强或波长，可以获得当前的液位信息。

1　光强调制型

光强是光波诸多特征中探测技术最为成熟的物理量，测量准确度高、性能稳定，因此当前光强调制型的燃油液位传感器种类最多。光强调制型传感器通常使用多模光纤，关注于光强变化而对光的模态要求不高，常用的光强调制方法有：纤芯泄漏、包层泄漏、宏弯泄漏、微弯泄漏、分段泄漏、反射和后向散射。

光强调制型通常基于入射端和接收端之间光的传

输损耗[1]或散射反射损耗。目前在光纤制造过程中，发生损耗的主要原因是光纤中混入杂质，但由于该损耗较小且对外部介质变化不敏感，可以认为光强几乎不变。为了使光纤能够用作燃油液位传感器，可以对光纤进行特殊处理，使得光纤对外部介质敏感，外部介质折射率与光纤折射率的不同使得光在界面处能量传递发生变化，不同的外部介质对光纤的传输损耗影响不同，进而改变光纤中的光强。

1.1 纤芯泄漏型

传光型光纤中的光，只能在纤芯中传播，外部介质不能对传导光产生影响。对光纤纤芯进行处理，通过外部介质直接接触或间接作用，使光纤中的光在传播过程中，传导模变为辐射模，部分光能泄漏到外部介质中，泄漏程度与外部介质直接相关。通过探测泄漏光强或接收端光强可得知液位。

1.1.1 掺入荧光剂

纤芯掺入荧光剂的光纤，能够将传导光变为辐射光。最早的荧光光纤液位测量实验[2]，通过向有机玻璃板中掺杂荧光剂，使得有机玻璃板在空气中时光线发生全内反射；在液体中时光线发生菲涅尔反射，部分入射光会进入到外部液体中。在空气和液体中，光能损耗不同，接收端光强大小与液体浸没有机玻璃板的高度直接相关。

掺入荧光剂的光纤，其侧面发光强度会随光纤长度衰减，通过浮子探测液面处光纤发光强度[3-4]，可以得知光源到液面的距离，从而得知液位信息。该连续液位测量方法可以实现 1.2 m 量程、10 mm 的分辨力。但浮子属于可动部件，系统结构不稳定，改进的方法是使用双荧光光纤[5]，通过两光纤侧面发光耦合，如图 1 所示，探测光纤可以接收并检测发射光纤的侧面光强，即可实现液位连续测量。该方法提高了荧光光纤的稳定性和灵敏度。

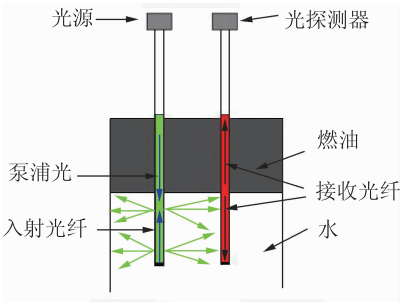


图 1 双荧光光纤侧面耦合

荧光光纤燃油液位传感器能够进行连续液位测量，光纤加工简单、量程大，但荧光光纤发光强度随温度变化，需要进行补偿。

1.1.2 掺入散射粒子

散射是光纤中一种重要的光能泄漏方式，主要分为瑞利散射、米氏散射与拉曼散射。其中米氏散射的散射截面更大、总散射功率更高，更适合用于泄漏传输损耗式光纤燃油液位测量。

向光纤中掺入 1 ~ 5 μm 的微粒，可使光纤中的传导光发生米氏散射，散射作用越强，光强调制作用越强，这种光纤通常称为侧发光光纤。入射光角度和散射粒子半径对于光纤的散射作用有很大影响[6]：增大入射光的传输角，能够提高光纤的散射能力；当入射角较小时，减小粒子半径能够提高散射能力；当入射角较大时，增大粒子半径能够提高散射能力；使用大入射角和大粒子半径是提高散射能力的最佳途径。光纤在水中泄漏的光能大于在空气中泄漏的光能，接收端面的光强与光纤被液体浸没高度直接相关。

侧发光光纤中的光被纤芯散射晶体所散射，部分光散射进入外部介质。U 型侧发光光纤传感器[7]利用光纤弯曲部分在空气和液体中光能损耗差值大的特性进行液位测量，直接探测接收端光强。对射型散射耦合光纤[8-9]使用两根并行排列的侧发光光纤作为测量部件，利用介质折射率对光耦合效率的影响，探测耦合光纤中的光强进而求得液位。螺旋型侧发光光纤液位传感器结构如图 2 所示，通过光纤弯曲进一步增大光的泄漏，进而提高传感器的灵敏度，可实现更高准确度的连续液位测量。

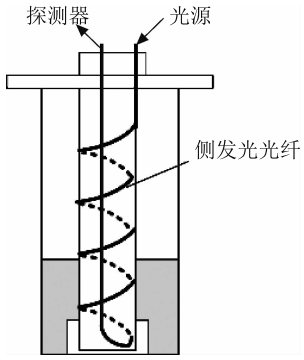


图 2 螺旋型侧发光光纤液位传感器

1.1.3 改变纤芯结构

在纤芯中划刻光栅可以改变光的传导模式。使用 10°倾斜布拉格光栅 TFBG[10]，如图 3 所示，可将传导模的光反射转换成为包层模，通过测量与光栅浸没长度相关的包层模波长带宽的变化和传输损耗的变化来

测量液位。基于长周期光纤光栅 LPG 的光纤液位传感器[11]，其光强泄漏与液体浸没高度有关，最大衰减量随着液面升高而增大。但是光栅的加工过程复杂，光泄漏造成的光强调制深度较小，仅为 0.6 dB/mm，与其他泄漏型光纤相比没有明显优势。

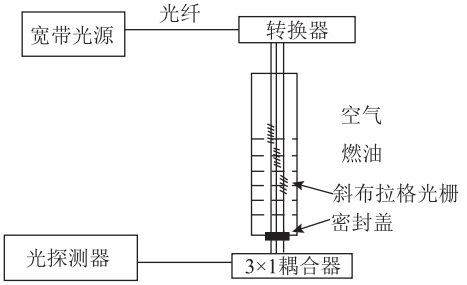


图 3　倾斜布拉格光栅传感器

处理纤芯方式还有 V 形槽[12]，在光纤包层和纤芯部分挖成一个 V 槽，将光纤纤芯直接暴露在外部介质中，传导光发生泄漏。当外部介质是燃油时，泄漏较少；当外部介质是空气时，泄漏较多；通过探测接收端的光强大小即可得知 V 槽处的液位情况。等距离挖多个 V 槽，液体浸没的 V 槽数目越多，损失的光能越少，探测光强越大，可用作多点测量，测量准确度是两相邻 V 槽的物理距离，可以实现高准确度液位测量。但该方法破坏了光纤包层和纤芯，使得光纤更容易损坏，限制传感器量程不能过大。

1.2　包层泄漏型

包层与外部介质直接接触，通过处理包层，光在纤芯包层界面不能发生全内反射，使得不同折射率的外部介质可以对传导光造成不同程度的影响。

1.2.1　包层厚度处理

光波在纤芯和包层的界面处存在透射场，并有一定的透射深度，如果包层过薄，在透射深度的作用下，部分光会泄漏到外部介质中。根据菲涅尔反射，透射光大小与外部介质的折射率有关，当外部介质的折射率大于包层的折射率时，光会通过透射场泄漏；当外部介质的折射率小于包层的折射率时，会阻止泄漏。

通过侧面抛光或包层腐蚀的方法，减小包层的厚度，同时由于液体折射率大而空气折射率小，可以实现液体浸没部分光发生泄漏，空气部分不泄漏。通过探测接收端的光强大小，即可实现液位的连续测量。

侧面抛光和包层腐蚀的方法需要复杂的处理过程，并严格要求包层厚度不能过薄。更简单的方法是将小段包层完全去除[13]，如图 4 所示，当这些无包层段浸没在液体中时，大部分光会泄漏，由于去包层段的长度很短(1 mm)，因此传导模在每段无包层段的损失都比较小。通过对多段光纤去除包层，液体浸没的段数越多，泄漏的光强越多，在出射端面检测光强，即可实现液位的多点测量。

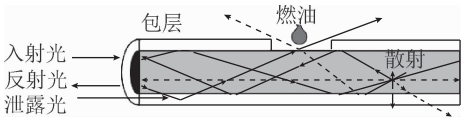


图 4　光纤去除小段包层

1.2.2　D 型光纤

特殊形状的包层处理能得到更好的效果，D 型光纤[14]只去除部分包层形成 D 型，外部介质折射率变化，会极大地影响光纤瞬逝波的电场分布。通过检测瞬逝波电场的变化，可以得知测量点的液位变化。

通过 D 型光纤和单模光纤级联[15]，如图 5 所示，不仅可以实现光强调制，更可以实现波长调制，倾角波长也会随着液体浸没高度变化而变化，光强调制和波长调制的共同作用使得液位测量结果更准确。

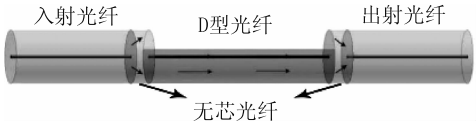


图 5　D 型光纤与单模阶跃光纤级联

纤芯处理法和包层处理法需要对光纤进行物理化学方式处理从而改变光在光纤中的传播特性。近年来又提出了基于宏弯现象的光纤弯曲处理方法，只需将光纤弯曲为合适的曲率即可，制作方式更简单。

1.3　宏弯泄漏型

光通过全内反射在光纤中传播。光纤弯曲时光会产生大量的包层模式，这些包层模式将在弯曲的包层与环境界面发生菲涅尔反射。当高折射率介质接触或靠近光纤包层时，会导致部分包层模式光泄漏进入外部介质，导致光能损耗。因此，利用光纤宏弯，不用对光纤进行纤芯包层处理，仅设置光纤弯曲曲率，即可实现光传输损耗。

1.3.1　单宏弯光纤

部分传导光在光纤弯曲部分可能发生泄漏，造成传输损耗。当弯曲曲率在 2.5 mm 左右时[16]，可以达到理想的光强泄漏效果，并且保持光纤承受恰当的弯曲应力，而不至于折断。宏弯光纤浸没在液体中时，会产生光能损耗，从而导致探测到的光强减小。通过在接收端探测光强大小，可以得知光纤所在位置的液

位情况。单宏弯光纤环可用作单点液位，也可通过竖直放置多个光纤环用作多点测量。单宏变光纤环如图 6 所示。

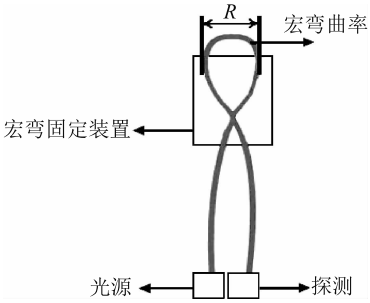


图 6　单宏弯光纤环

1.3.2　螺旋型宏弯光纤

单宏弯光纤环的设计结构不稳定，可能在测量过程中发生变形或位移。将光纤弯曲设计成螺旋型结构，缠绕在固定装置上，通过设定固定装置的尺寸改变光纤弯曲曲率，实现泄漏式光纤，通过测量接收光强可以得知液体浸没光纤的高度。常见做法是将光纤螺旋缠绕在圆柱上，实现液位的连续测量。

跑道螺旋结构[17-18]与圆柱型螺旋泄漏光纤(如图 7 所示)相比，既有弯曲光纤部分也有直光纤部分，在弯曲部分光泄漏，在直光纤部分光传导模式重新分布，可以提高测量的一致性和重复性。通过多点液位测量实验和仿真可知，跑道螺旋的结构设计，可以得到更稳定的测量结果，重复性更好。

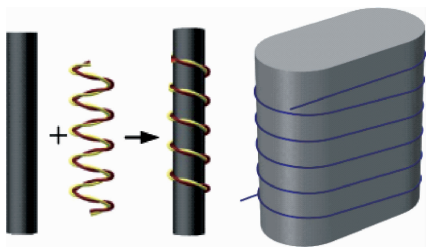


图 7　圆柱螺旋和跑道螺旋光纤液位传感器

1.3.3　双绞宏弯光纤

两根宏弯光纤之间会有暗场耦合现象。将两根光纤绞合在一起并弯曲到合适的曲率，两光纤之间的暗场耦合可以改善光纤间的光模式分布，使得光纤弯曲部分光强分布更稳定均匀。图 8 为双绞宏弯光纤示意图。通过实验验证了双绞宏弯光纤耦合[19]，与单根宏弯光纤相比，光强调制没有提升，但可以显著提高光强与宏弯曲率的一致性，使传感器测量稳定性更好。

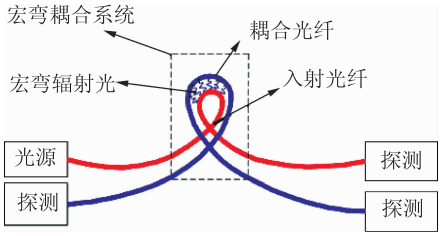


图 8　双绞宏弯光纤

1.4　微弯泄漏型

微弯泄漏式光纤燃油液位传感器[20]利用光纤的受力微弯效应，弯曲部分光会泄漏到光纤外部，泄漏式光纤接收端的光强减小。将光纤微弯泄漏式液位传感器放于油箱底部，压强 p 作用于活动膜片，使光纤发生形变，纤芯中一部分光在弯曲的界面处会泄漏到包层中，出射端面的光强大小会发生变化，通过检测光纤出射端面的接收光强大小，即可得知压强的大小，进而根据压强和液体高度关系求得液面位置。微弯泄漏式光纤传感器(如图 9 所示)质量轻、体积小、结构简单、灵敏度高，但是压力过大会导致光纤损坏，影响传感器的性能，测量量程不大。

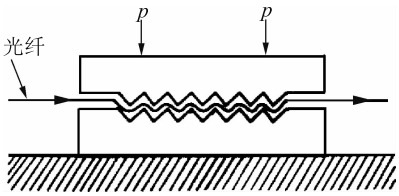


图 9　压力式微弯光纤液位传感器

1.5　分段泄漏型

将光纤切割分为多段，竖直同心放置，变为不连续的光纤[21]，各光纤段之间存在外部介质，对光有较强的吸收作用，当两光纤段之间的介质是空气时，光的损耗较少；当两光纤段之间的介质是燃油时，光的损耗较大；在接收端探测到的光强与液体浸没的光纤段数直接相关，可以用作多点液位测量。但是每个分段的光损耗过大，不能有太多段光纤，传感器量程较小。图 10 为分段型光纤示意图。

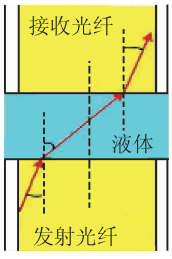


图 10　分段型光纤

1.6　反射型

由菲涅尔反射可知：光在经过不同介质表面时会发生菲涅尔反射，且其反射光与外部介质折射率有关，故可以通过测量反射光强来判断外部介质，从而进行液位点测量。为了实现最大的光强调制，通常会使传感器工作在全内反射的邻域内，当外部介质是空气时，发生全内反射的反射光远大于外部介质是液体时发生菲涅尔反射的反射光，便于测量。

由光路可逆性可知，平端面光纤在空气中时，出射断面不可能发生全内反射。可以通过使用棱镜或者斜端面的方式，增加端面的入射光角度，以在端面处发生全内反射。

通常需要使用两根光纤，发射光纤中的光调制之后被接收光纤探测。使用半圆筒[22]和尖锥端面光纤[23]，如图11(a)所示，改变界面倾角，使得入射光在空气中发生全反射，在液体中发生菲涅尔反射，反射光进入接收光纤中被探测。同样的原理，还可以使用棱镜[24]，通过设置棱镜的角度，来制造全内反射条件，如图11(c)。该测量方法通常用作测量点的点位测量。将多个点测量信号器布置在竖直放置的固定装置中，可以进行多点测量，测量的准确度就是相邻点信号器的物理距离。

斜端面光纤[25]通过对光纤出射端面进行斜刨来制造全内反射条件，如图11(b)所示，通过侧面耦合原理，使用耦合光纤来测量反射光功率。光纤作为传光元件的同时也作为光调制元件，避免使用外接的调制元件，简化了结构。

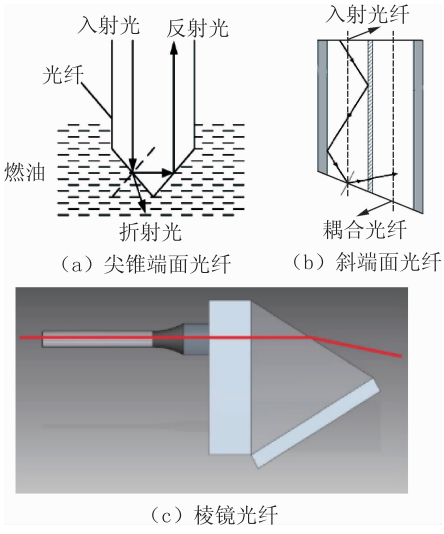


图11　尖锥端面光纤、斜端面光纤和棱镜光纤

特殊结构的反射型光纤如径缩光纤[26]，如图12所示，在光纤直径缩小的部分，由于光纤不匹配，会在径缩斜面发生光的菲涅尔反射，光强变化与外部介质有关。该结构简单、易于制造，但稳定性较差。

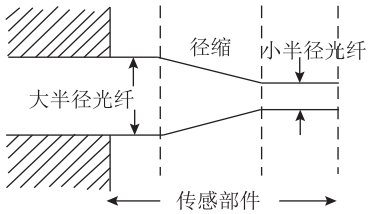


图12　芯径缩小光纤

1.7　后向散射型

S型光纤可以利用后散射光[27]来进行液位测量，如图13所示。S型光纤中的入射光经过光纤S部分时，会有部分光发生后向散射，向后传播返回发射端，液体浸没S型光纤的高度会改变后散射光的散射状态进而改变接收光强。通过检测散射光的状态即可得知液位高度。该传感器可用于连续液位测量。

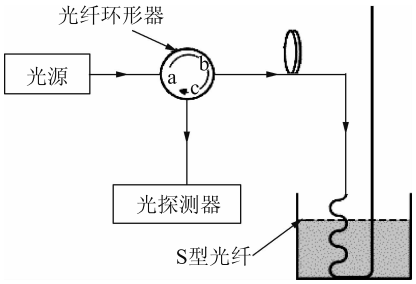


图13　后向散射S型光纤液位传感器

1.8　光强调制型传感器小结

其他种类的光纤燃油液位传感器，例如压力式传光光纤[28]，压力改变两光纤偏移角度，使得入射光纤中的光不能全部进入接收光纤；浮子式光纤液位传感器通过浮子带动遮光装置，如进位码盘或遮光片，改变两束光纤之间的通光面积，从而实现液位连续测量。但这些设计存在可动部件且测量准确度低，这里不做过多介绍。

光强调制传感器的迅速发展依赖于成熟的光强探测技术。目前可以在很大光强变化范围内实现光强高灵敏度测量，因此传感器设计重点可以放在调制光强方面，不用过于关注探测手段。但是，接收端光强不可避免地受到光源波动的影响，产生测量误差，而高稳定性光源价格昂贵、环境条件要求极高，尚未在工程中得到广泛使用，因此目前光强调制的测量结果通常都有较大的扰动。当前大部分泄漏调制型传感器，

能够探测到的泄漏光强本就很小，光源扰动就会造成较大的测量误差。

2　波长调制型

光波长检测需要复杂的方法和昂贵的仪器设备，受限于探测技术，目前波长调制型的燃油液位传感器发展较慢。

波长调制型光纤燃油液位传感器通常使用单模光纤，对光源的模态要求很高。波长检测不受光源波动和环境光污染的影响，解决了光强调制型传感器因光源波动造成误差的难题，因此测量结果误差小、一致性较好。

2.1　光纤光栅

光栅工作方式类似于滤波器，长周期光纤光栅 LPG 属于透射型带阻滤波器，同向传输的纤芯基模与包层模发生耦合，可以在接收端检测调制光；光纤布拉格光栅 FBG 属于反射型带通滤波器，反向传输的纤芯基模与包层模之间发生耦合，可以在发射端检测调制光。两种光纤都可以在光栅的物理特性发生改变时，改变光的波长。

LPG 光谱中的衰减峰值由传导模和包层模的耦合系数决定，当 LPG 中的一段浸没在液体中时，该光栅可以视作两个不同周期的光栅，在光谱中产生两个中心波长不同的衰减峰，与液体中光栅峰值衰减值比较即可得到液位。但是长周期光纤光栅的波长变化易受温度变化影响，在使用中要考虑温度交叉敏感性，不适合温度变化剧烈的飞机燃油系统。

如图 14 所示，当压力变化时，传统的布拉格光栅的物理结构会改变，进而影响对波长的滤波作用。因此布拉格光栅的反射波长和所受压力直接相关[29]，通过测量反射光谱，可以得到波长进而得到压力，根据压力可以求得液面。但是压力在飞机起飞降落时受到等加速度的影响，故应尽量避免使用压力式液位测量。

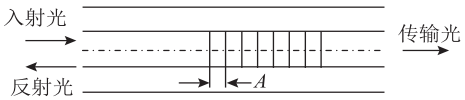


图 14　光纤布拉格光栅

侧面抛光的光纤布拉格光栅[30]，如图 15 所示，其波长调制作用对外部介质折射率敏感，不同的外部介质会改变通过光栅的光波长，通过探测波长变化可以得知液体浸没高度，实现液位连续测量。通过斜布拉格光栅[31]的光波，其耦合模式会发生改变，如图 16 所示。当外部介质是液体时，光耦合模式改变量远大于外部介质是空气时的改变量，液体浸没高度会改变耦合情况进而改变接收端波长。斜布拉格光栅的制作过程复杂，但可以得到更高的的测量准确度。

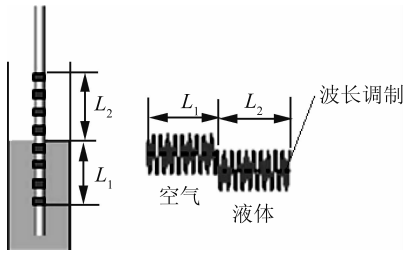


图 15　侧面抛光布拉格光栅

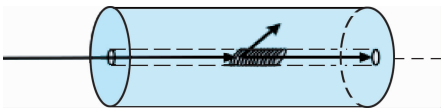


图 16　斜布拉格光栅

2.2　布里渊散射

布里渊散射是光在不均匀介质传播过程中发生的光与物质相互作用的散射现象，它会使入射光发生频移和强度变化。当两束光的频移与布里渊频移相同时，弱信号将被强信号放大，高频光把能量转给低频光。

布里渊散射对温度敏感，当光纤的温度发生改变，将改变整个光谱区间的频移，通过扫频的方式检测输出光谱来确定光纤各位置的布里渊频移，可得各位置温度变化。外部液面发生变化，会使得温度分布变化，导致发生布里渊频移[32]，液面的位置温度变化最为剧烈，通过探测频移的变化，可以得出液面位置。

2.3　多模干涉

多模干涉型传感器如图 17 所示，主要由一段包层腐蚀多模光纤和未腐蚀的芯径不同多模光纤级联而成。由于纤芯失配[33]，光纤内部会产生多种纤芯模式，形成模场干涉，产生一系列对液位灵敏度不同的干涉峰。检测各峰谷变化，可得知液位的变化，实现对液位的连续实时测量。腐蚀一段包层，可以避免输出与温度、液位的交叉敏感，提高测量的稳定性。

2.4　自映像效应

在两个单模光纤之间连接一个无纤芯光纤，该无纤芯光纤工作特性就像一个带通滤波器[34]，对入射光的波长进行调制。无纤芯光纤浸没在液体中，光波长改变量与浸没高度直接相关。通过探测光波长的变化可以得知浸没高度。自映像效应如图 18 所示。

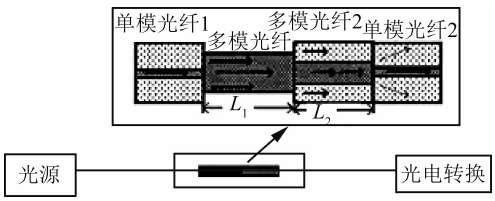


图 17　多模干涉光纤

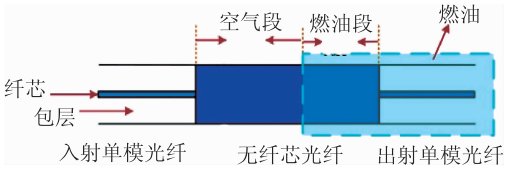


图 18　自映像效应

2.5　光纤 F-P 腔

F-P 腔光纤液位传感器[35-37]由弹性膜片、光纤和光纤固定装置组成，膜片和光纤端面共同构成 F-P 腔的两个端面，相干光通过光纤进入 F-P 腔时，被膜片全反射，反射光与入射光的频率相同但相位不同，两者在空腔中会产生干涉现象。施加在膜片的压力会使膜片发生形变，进而使得 F-P 腔上下端面的距离变化，入射光与反射光的相位差也发生改变，干涉光会发生周期性的变化，因此通过检测干涉光便可知所受压强 p 的大小，进而得知液位信息。这种测量方式设计简便，但具有较大的误差。目前要获得较高准确度就要对其相位进行解调，但实现起来比较复杂。

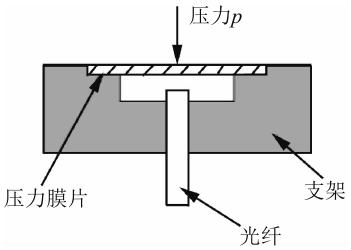


图 19　光纤 F-P 腔液位传感器

3　总结

本文中提到的光强调制型和波长调制型光纤传感器，大多是进行液位直接测量，即液位变化会直接影响探测光的光强或波长变化。也有部分属于间接测量，通过将液位转换为压力或热量，测量该中间物理量后再转换为液位。由于飞机燃油系统具有高温高压、强电磁干扰、大加速度等特点，对中间物理量造成极大的扰动，比如飞机起飞、降落过程中的加速度对压力有很大扰动，燃油系统工作时对温度的扰动。在表 1 中，对这些间接测量方法进行总结。

表 1　间接液位测量传感器

章节	光纤种类	间接物理量
1.4	微弯泄漏型光纤	压力
1.8	传光角度型光纤	压力
2.1	压力布拉格光栅	压力
2.5	光纤 F-P 腔	压力
2.2	布里渊散射光纤	热力

下一代航空计划对于燃油液位测量的性能提出了更高的要求，包括灵敏度、准确度、稳定性、量程等。

波长调制式传感器准确度高，但量程也较小，适用于小量程高准确度液位测量。光强调制式传感器一般量程较大，但准确度较低，如何提高传感器的灵敏度和准确度是今后研究的重点。对于多点液位测量传感器，相邻的点位传感器之间的物理距离就是准确度，受限于点位传感器的尺寸，准确度不能达到很高的要求，但可以有较大的量程。对于飞机燃油液位的大量程连续测量需求，泄漏式的光强调制型液位传感器和连续多点液位传感器如果能进一步改进性能，将具有良好的应用前景。

参 考 文 献

[1] 华滨，葛俊锋，叶林，等. 泄漏式光纤液位测量方法研究进展[J]. 国外电子测量技术，2016，35(5)：39-43.

[2] Weiss J D. Fluorescent Optical Liquid-level Sensor[J]. Optical Engineering，2000，39(8)：2198-2213.

[3] Weiss J D. A Fluorescent Long-line Fiber-optic Position Sensor [J]. Sensors，2005，22(3)：28-32.

[4] Aiestaran P，Dominguez V，Arrue J，et al. A Fluorescent Linear Optical Fiber Position Sensor[J]. Optical Materials，2009，31(7)：1101-1104.

[5] Weiss J D. A. Novel Fiber-optic Fluid Interface Sensor [EB/OL]. [2012-06-23]. http://www.sensorsmag.com/da-control/a-novel-fiber-optic-fluid-interface-sensor-1476.

[6] 赵呈锐. 基于光泄漏原理的光纤式飞机燃油液位测量方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.

[7] 舒俊，葛俊锋，叶林，等. 一种基于弯曲损耗的光纤油位信号器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术，2016(8)：82-85.

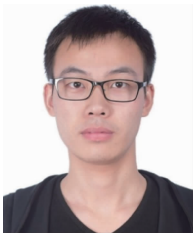
[8] 赵呈锐，叶林，葛俊锋. 基于侧发光光纤对射耦合的光纤式液位测量[J]. 仪表技术与传感器，2012(8)：74-77.

[9] 龚英，葛俊锋，叶林，等. 对射式螺旋形光纤液位传感器的

设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(3): 87 - 90.
[10] Jiang Q, Hu D, Yang M. Simultaneous Measurement of Liquid Level and Surrounding Refractive Index Using Tilted Fiber Bragg Grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170(1): 62 - 65.
[11] Khaliq S, James S W, Tatam R P. Fiber-optic Liquid-level Sensor Using a Long-period Grating[J]. Optics Letters, 2001, 26(16): 1224 - 1226.
[12] Antunes P, Dias J, Paixão T, et al. Liquid Level Gauge Based in Plastic Optical Fiber[J]. Measurement, 2015, 66(1): 238 - 243.
[13] Yun C Y, Dhital D, Lee J R, et al. Design of Multiplexed Fiber Optic Chemical Sensing System Using Clad-removable Optical Fibers[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(1): 269 - 280.
[14] Luo H, Sun Q, Li Y, et al. Highly Birefringent D-shaped Microfiber and Its Application in High-sensitive Optical Sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12): 4793 - 4797.
[15] Dong Y, Xiao S, Xiao H, et al. An Optical Liquid-Level Sensor Based on D-Shape Fiber Modal Interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1067 - 1070.
[16] 刘文怡, 侯钰龙, 张会新, 等. 基于 POF 光纤宏弯的液位传感器: CN104482984A[P]. 2015.
[17] Zhao A C, Ye L, Ge J, et al. Novel Light-leaking Optical Fiber Liquid-level Sensor for Aircraft Fuel Gauging[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 4402.
[18] Jing N, Teng C, Zheng J, et al. A Liquid Level Sensor Based on a Race-track Helical Plastic Optical Fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(1): 158 - 160.
[19] Hou Y L, Liu W Y, Su S, et al. Polymer Optical Fiber Twisted Macro-bend Coupling System for Liquid Level Detection[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23231 - 23241.
[20] 李学金. 光纤微弯传感器及反射式强度调制光纤传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
[21] Lin X, Ren L, Xu Y, et al. Low-cost Multipoint Liquid-level Sensor With Plastic Optical Fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1613 - 1616.
[22] Khotiaintsev S, Pérezgarcía S, Beltránhernández A, et al. Plastic Optical Fiber Multipoint Liquid-level Sensor with Single Semi-cylindrical Detection Element[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7839(1): 207 - 208.
[23] Golnabi H. Design and Operation of a Fiber Optic Sensor for Liquid Level Detection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(5): 801 - 812.
[24] Onorato G, Persichetti G, Grimaldi I A, et al. Optical Fiber Fuel Level Sensor for Aeronautical Applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017(4): 260.
[25] Zhang W, Gong Y, Ge J, et al. An Optical Fiber Point Liquid Level Sensor[C]// AOPC 2015: Optical Fiber Sensors and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015.
[26] Linesh J, Sudeesh K, Radhakrishnan P, et al., Liquid Level Sensor Using Etched Silica Fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(4): 883 - 886.
[27] Linesh J, Sudeesh K, Radhakrishnan P, et al. Liquid Level Sensor Using Etched Silica Fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(4): 883 - 886.
[28] 景宁, 李墅娜, 陈媛媛, 等. 基于光时域反射技术的塑料光纤液位传感器及测量方法: CN105444839A[P]. 2016.
[29] 于春和, 王晓萌. 一种光纤液位传感器及其测量方法: CN201410532700.5[P]. 2015 - 01 - 28[2018 - 10 - 09].
[30] Marques C A, Peng G D, Webb D J. Highly Sensitive Liquid Level Monitoring System Utilizing Polymer Fiber Bragg Gratings [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6058 - 6072.
[31] Dong X, Zhao R. Detection of Liquid-level Variation Using a Side-polished Fiber Bragg Grating[J]. Optics and Laser Technology, 2010, 42(1): 214 - 218.
[32] Mou C, Zhou K, Yan Z, et al. Liquid Level Sensor Based on an Excessively Tilted Fibre Grating[J]. Optics Communications, 2013, 305(3): 271 - 275.
[33] 袁治君. 基于布里渊光时域分析的光纤液位传感研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
[34] 童峥嵘, 杨娇, 曹晔, 等. 基于腐蚀型多模光纤的干涉型传感器实现温度和液位同时测量[J]. 光电子 · 激光, 2014(1): 118 - 122.
[35] Ran Y, Xia L, Niu D, et al. Design and Demonstration of a Liquid Level Fiber Sensor Based on Self-imaging Effect[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 237: 41 - 46.
[36] Lü T, Yang S. Extrinsic Fabry-perot Cavity Optical Fiber Liquid-level Sensor[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3682.
[37] Wang W, Li F. Large-range Liquid Level Sensor Based on an Optical Fibre Extrinsic Fabry-Perot Interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 201 - 205.

基金项目: 国家自然科学基金(61104202)

作 者 简 介



程欣(1996 -), 男, 硕士研究生, 研究领域包括检测技术与自动化装置、光电传感技术、光纤液位传感器。

2018 年于华中科技大学自动化学院获得工学学士学位, 目前于华中科技大学人工智能与自动化学院攻读硕士学位。

葛俊锋（1981 －），男，副教授，博士，研究领域包括结冰探测与防除冰技术、传感器与测控系统、无人系统感知与控制。湖北省自动化学会理事。

2009 年毕业于清华大学自动化系，同年到华中科技大学工作至今。主持并参与了国家自然科学基金、国防基础科研计划、国家安全重大基础研究等十余项科研项目。发表学术论文 50 余篇，授权发明专利 8 项。获中国航空工业集团公司航空科学技术奖三等奖 1 项，国防科技进步奖三等奖 1 项。

叶林（1960 －），男，教授，博士生导师，研究领域包括结冰传感器与防除冰技术、发射率测试与非接触测温。

1988 年，毕业于原华中理工大学自动控制系，同年留校工作至今，曾于 1992 ~ 1993 年在莫斯科动力学院自动化系、1998 ~ 1999 年在美国华盛顿大学航空航天系作访问学者。主持承担了国家自然科学基金、总装预研项目、国防基础科研计划、国家安全重大基础研究等二十余项科研项目，研发了填补国内空白的平膜结冰传感器和光纤结冰传感器。发表学术论文 80 余篇，授权发明专利 10 余项。获得国家级技术发明奖 1 项，中国航空工业集团公司航空科学技术奖三等奖 1 项，国防科技进步奖三等奖 1 项。