傅里叶变换近红外光谱仪在汽柴油

分析中的应用

李琪1 杜彪2 张正东1\* 陈晓翔2 李轲1 方旭1,3 李庆武1 舒慧1

1. 中国计量科学研究院，北京 100029; 2. 北京易兴元石化科技有限公司，北京 101301;

3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要：**

目前傅里叶变换近红外光谱方法能够同时定量分析汽、柴油中辛烷值，芳、烯烃，苯等30项指标。相比传统方法需要多台设备才能完成以上检测，傅里叶变换近红外光谱方法具有测量参数多、速度快且测量准确度好的优点，在石油产业中得到了迅速的推广及应用。本文回顾了傅里叶变换近红外光谱方法的研究进展，介绍了傅里叶变换近红外的基本物理原理，装置的主要结构及采用关键技术，以及傅里叶变换近红外光谱分析汽、柴油成分方法。并介绍了中国计量科学研究院在油品分析傅里叶变换近红外光谱仪方面的研究成果。

**关键词：**汽、柴油组分; 近红外; 傅里叶变换光谱; 红外干涉;

**The Application of Near FT-IR in Analysis of Petrol and Diesel Oil**

LI Qi 1 DU Biao 2 ZHANG Zheng-dong 1\* CHEN Xiao-xiang 2  LI Ke1 FANG Xu 1,3 Li Qing-wu 1 SHU Hui 1

(1 National Institute of Metrology, China, Beijing 100029; 2. Beijing Yixingyuan Petrochemical Technology Co., Ltd., Beijing 101301, China; 3. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China )

**Abstract：**Comparing to the traditional measurement method which utilizes multi devices to analyze petrol/diesel component contents separately, the Near Infrared Fourier Transform Spectroscopy method can make quantity analysis of octane level, arene, alkene, benzene, and up to 30 components simultaneously, which takes advantages of the characteristics of the multi-parameter fast scans as well as the high accuracy. All the above helped the method develop rapidly in oil industry on abroad. The article firstly reviewed the progress of the Near Infrared Fourier Transform Spectroscopy Method since it developed, then discussed the basic principle of the Near Infrared Fourier Transform Spectrum method, the main structure of the device and the key technologies, besides, the near infrared Fourier spectroscopy analysis method for petrol/diesel was also introduced. At last, the article also introduced the research progress of the near infrared Fourier transform spectroscopy in National Institute of Metrology, China.

**Keywords:** Petrol/diesel Components; Near Infrared; Fourier Transform Spectrum; Infrared Interference; Measurement coherence

1 引 言

傅里叶变换近红外光谱是指在(1000~2500) nm近红外频谱区，对应波数为(10000~4000) cm-1范围内形成干涉光束后，照射被测样品从而得到吸收、反射或透射的光谱[1-2]。此时在不同干涉光程差位置接收到的光强是红外光谱傅里叶变换的值，通过采集一系列等光程差间隔位置处的光强值，经过傅里叶逆变换后即可计算出近红外光谱。傅里叶变换光谱仪具有非常高的光谱分辨率、灵敏度和准确度，在医药、化工、能源、环境以及半导体领域都有重要的应用。

自1969年世界上第一台实用化傅里叶变换光谱仪问世开始，其最高波数分辨率就达到了2 cm-1，相比光栅色散型光谱仪具有明显的性能优势。同时在采集时间上，傅里叶变换近红外光谱仪由于不需要狭缝，具有很高的光通量，因此采集时间也大大缩短，在4 cm-1分辨率下测量样品时间可小于30 s，并且一次性得到所有近红外频率的光强值。随着技术的不断进步，傅里叶变换光谱仪的性能也得到了不断提升，光谱仪核心干涉部件已发展出迈克尔逊干涉结构、钟摆式干涉结构、潜望镜式干涉结构等多种结构及其变种，以抵销安装及运动过程中干涉镜偏转误差以及干涉光束横向偏移。与此同时，随着半导体技术的不断进步，包括热释电探测器(DTG)、铟镓砷探测器(InGaAs)以及碲镉汞探测器(MCT)在内的近红外探测器也使傅里叶变换光谱仪的探测灵敏度不断提高。另外显微成像傅里叶变换光谱仪和时空联调型傅里叶红外光谱仪等新型光谱仪也不断涌现，现在傅里叶变换光谱法已经成为一种高分辨率的分析测试手段[3-5]。

在汽、柴油以及航空燃油生产过程及成品的品质检测中，由于油品成分中分子将吸收近红外频谱段的光子产生分子键振动，且不同的分子键对应特定的红外吸收光谱，因此可以用具有高分辨率和灵敏度的傅里叶变换近红外光谱仪检测油品本身和添加剂的成分，并进行精确的定量分析[6-10]。由于傅里叶变换近红外光谱仪能够快速定量分析汽、柴油以及航空燃油中烃、苯、醇以及添加剂等30项指标，因此在从炼油厂的制程控制，石油公司油品调和分析，加油站油品快速检测，环境安监部门执法监管甚至汽车发动机性能评价方面都起到日益重要的作用。

目前国外在傅里叶变换近红外光谱在汽、柴油油品检测方面的发展十分迅速。欧洲一些国家已经开始采用傅里叶近红外光谱检测全国石油运输及存储网络油品品质的可靠性和一致性；此外相应技术还被用于机场存储航空油料的品质检测。在国内，目前汽、柴油指标的检测如十六烷值、馏程、硫含量等需要多台仪器完成检测，成本高、效率低。傅里叶变换近红外光谱方法作为一种快速、经济、准确的光谱方法未来有广阔的应用前景。

本文首先介绍了傅里叶变换近红外光谱仪的基本原理[11-14]，然后介绍仪器结构和关键技术，介绍了中国计量科学研究院在油品分析傅里叶变换近红外光谱仪方面的研究成果。

2 傅里叶变换近红外光谱仪基本原理

傅里叶变换近红外光谱仪测量方法涉及分子近红外吸收以及红外干涉光谱的傅里叶变换原理，下面将分别介绍。

**2.1 近红外吸收原理**

近红外光谱吸收的原理为当分子在未受光照射之前，能量处于基态；当受到红外光辐射后，产生振动能级跃迁并伴有偶极矩改变，此时便形成了红外吸收光谱。对于分子中的C-H，O-H以及N-H键，其价键振动的2阶和3阶倍频(Overtone)(Δυi=2, 3)以及组合频(Combination bands)都出现在近红外区，因此得到的是近红外吸收光谱[15-16]。通过分析近红外吸收光谱可以研究化合物中含氢原子官能团性质，进而计算出汽、柴油的成分含量。

**2.2 红外干涉傅里叶变换原理**

由红外吸收光谱原理可知，只要得到带有被测物信息的吸收、透射或反射特征光谱，就能分析出被测物组成及含量。但是在实际测量中，不同频率的红外光是互相叠加的，怎样将不同频率红外光分离并测量其光强，一种方法是通过狭缝和衍射光栅将不同频率的光色散，这种方法的不足之处在于获得的光谱分辨率不高，一般大于8 cm-1，用于油品测量可能漏掉特征峰或发生特征峰混叠。而傅里叶变换近红外光谱方法原理如公式(1) - (5)所示。设近红外光谱中任意一单波长近红外光λi经过傅里叶变换光谱仪干涉结构后产生两路光强比为50: 50的分束光路，分成的两路光束和的表示式为：

 (1)

 (2)

其中表示位矢，*t*是从光源到观测点经过时间，=是分束后光路的光强最大幅值，和是波矢量，*ω*是*λ*i的角频率，和是初始相位。 当两路光束产生干涉时，产生的光强变化分量为：

 (3)

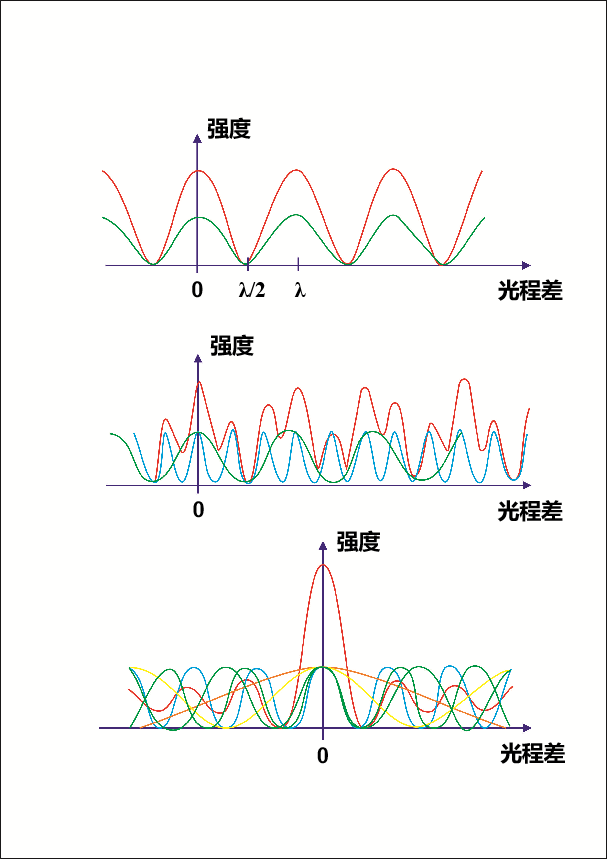
其中δ为相位角。又δ与干涉光程差Δ有如下关系：，其中*ν*i是*λ*i的频率，则干涉光强的变化量为。考虑到傅里叶光谱仪探测器接收到的光强是近红外光谱的叠加，另外假设对不同近红外频率*ν*，被测物的吸收率为，则在某一光程差*Δ*位置处，归一化幅值、并去除偏置后探测器的光强值为：

 (4)

公式(4)是实对称函数的傅里叶变换形式，因此红外光谱干涉的实质是用光学方法实现了傅里叶变换。

为获取特征吸收光谱以进行分析，后续需要傅里叶逆变换方法进行处理。具体实现上是通过让探测器在等间隔光程差的位置上采集一系列的光强信号，然后进行实数傅里叶逆变换，即可得吸收光谱曲线。

 (5)



**图1 近红外光谱干涉图**

**Fig.1 Near infrared spectrum of interferogram**

3 仪器构成及关键技术

傅里叶变换近红外光谱仪主要由近红外光源、光学镜组、光阑、干涉装置(干涉分束镜、反射镜及位移机构)、633 nm激光器、样品室、抛物面或椭圆面镜组以及探测器等结构组成。其中近红外光源通常采用熔融石英卤素灯。光源发出近红外光后经过光学镜组和光阑进行聚束、准直，然后入射到干涉装置中。此时干涉装置的分束镜将红外光分为两束振幅相等、相位相同的光束，分别射向固定的参考反射镜和移动的测量反射镜，返回的光束再次经过分束镜合束后产生红外光谱干涉并出射。同时，在傅里叶变换近红外光谱仪中，进入干涉装置的光还包括一束633 nm激光，且激光与红外光在干涉装置中有共同的光路。在仪器中633 nm激光的作用相当于一把精密的尺子，准确的记录测量反射镜的位移，从而精确的在等间隔干涉光程差处采集光强，计算光谱值。干涉装置的出射光到达样品室后照射在被测样品上被反射或透射，再经过抛物面或椭圆反射镜聚焦到探测器上，通常采用镀金膜抛物面或椭圆面反射镜以最大限度的增强信号，在探测器端采用的是电子制冷InGaAs探测器，具有高的灵敏度和低的噪声。

傅里叶变换近红外光谱仪中关键技术包括：

**3.1 红外干涉技术**

在2.2节傅里叶变换红外干涉原理中已介绍通过干涉装置，光谱仪不只针对单一波长，而是对近红外光谱实现了干涉。红外干涉事实上相当于对红外光进行了傅里叶变换，当经过被测物后将携带被测物与光谱作用的信息，并在接收器端被接收。与此同时，由于傅里叶变换与逆变换求解运算是以等间隔采样为前提条件的，因此装置中引入了第二路632.8 nm波长激光进行等间隔位移测量。632.8 nm激光根据干涉装置结构的不同，可以做到每隔316.4 nm, 158.2 nm甚至更短距离产生采样信号。在光谱仪中由于632.8 nm波长激光与红外干涉光路是完全重合的，因此避免了位移测量时的几何误差。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**图2 两种干涉仪结构**

**Fig.2 two types of interferometer structure**

在干涉装置结构中，最常见的是基于迈克尔逊干涉结构的形式，它由分束镜、补偿镜、一个固定干涉反射镜和一个移动干涉反射镜构成。测量时移动干涉反射镜运动，与固定干涉反射镜产生变化的光程差。迈克尔逊干涉结构的优点是光路简单，组成部件少，但是该结构产生的光程差范围较小。除此之外，干涉装置结构还包括基于钟摆式的干涉结构和基于潜望镜式的干涉结构[17-20]。这两种干涉结构的优点是它们都采用差动式干涉，因此可以产生较大的光程差范围，但是缺点是结构较复杂。如钟摆式干涉结构中绕中心轴旋转的差动臂加工误差，以及潜望镜结构中多片平面镜组平行度误差都会影响最终测量精度。

另外，由于傅里叶变换近红外光谱仪对干涉光准确度要求非常高，因此通常的平面反射镜会由于安装误差或运动振动造成微小倾斜，从而导致入射光与反射光不平行。为提高精度，目前大部分光谱仪采用角锥干涉反射镜，该反射镜由3对邻面互相垂直的平面镜构成，它能保证任意方向入射光线被反射后反射光线与之平行。但与此同时，角锥反射镜会使反射光与入射光之间产生平移，可以通过平移调整反射镜位置，保证两束干涉光线的重合。在红外干涉中还需要考虑光程差不一致时产生的色散效应，需要进行色散补偿。

**3.2 高波数分辨率技术**

由于汽柴油中一些红外光谱特征峰位彼此靠近，因此要求用于检测的仪器具有高的波数分辨率。在傅里叶变换近红外光谱仪中，波数分辨率与最大干涉移动距离*l*，采样间隔以及光束准直程度直接相关。根据红外干涉理论，波数分辨率等于(*2l*)-1；与此同时，由632.8 nm波长激光产生的等间隔采样信号*x*也影响着波数分辨率，采样距离必须满足奈奎斯特采样率条件，其中为最大波数。事实上，最大干涉移动距离与采样间隔关系可以类比为视频信号和视频电视，只有同时满足4K视频信号(*l*)和4K电视(*x*)条件，才能得到最高分辨率图像(波数分辨率)，否则分辨率则受限于最低的因素(最大干涉移动距离*l*或者采样间隔*x*)[21-25]。

另外由光源出射的红外光的准直程度也直接影响了干涉效果，进而影响波数分辨率。本质上说，红外光束因非准直产生的会聚或发散倾角，将产生寄生干涉现象，该现象随干涉移动距离*l*增大而加强，直至最终淹没干涉信号。具体分析可知，对于具有微小倾角*α*的光束，由中心光线到边缘光线的光程差将呈现连续变化，此时在光源成像面上任意一点的光强由中心 到边缘的光线叠加得到，将产生一个光强沿径向正弦变化的干涉环[26-30]。因此干涉装置移动时，最终效果是干涉装置干涉与干涉环光强的叠加。由于探测器的平均效应，干涉信号将被削弱甚至淹没。根据几何关系，边缘光线与中心光线光程差*d*OPD有倍余弦关系，当α足够小时，可以近似为1/2α2。因此当干涉镜移动距离*l*[31-32]，则中心光线光程变化2*l*，此时*d*OPD是2*l*的1/2α2倍：

 (6)

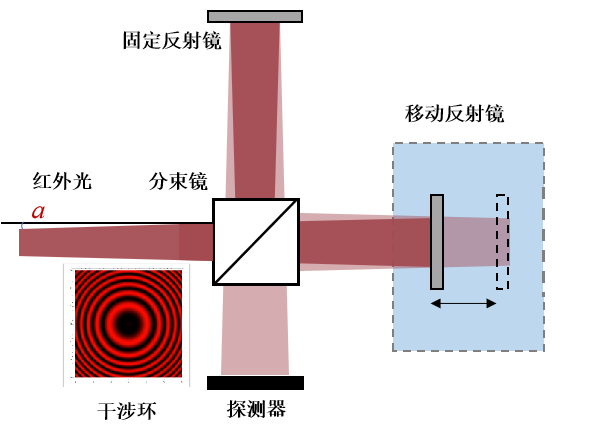
因为波数分辨率等于(2*l*)-1，公式可变为：

 (7)

另外受寄生干涉现象影响，随着干涉镜移动距离的增加，*d*OPD随之增大，红外干涉信号被不断削弱。当*d*OPD*≥* 1/2*λ*时，干涉信号完全消失。以最小波长*λ*min或最大波数为限，可以求出α的最大允许误差：

 (8)

因此如果最高波数为10000 cm-1的傅里叶变换近红外光谱仪要达到4 cm-1波数分辨率，光束准直误差必须小于0.02弧度。



**图3 光束倾角产生干涉环**

**Fig.3 Interference rings caused by light diverging**

在实际装置中，光源发出的光线是发散的，因此傅里叶变换近红外光谱仪通常使用镀金抛物面反射镜准直光线。相比凸透镜准直光线，镀金反射镜对光线的反射可达99%以上，同时抛物面反射镜光线准直时没有像差，而普通凸透镜只有近轴光才没有像差像差。另外光源有一定的尺寸，不都处于焦点位置，因此经过抛物面镜准直后，仍会有部分不平行光。高波数分辨率傅里叶变换近红外光谱仪会采用特定的视场光阑(Jacquinot光阑)限制光束直径，屏蔽光束外层干涉环。该光阑在光源的中间成像面上，通过保证中心和边缘光线的光程差*d*OPD < *λ*min/10，可以有效避免干涉环噪声降低仪器产生的红外干涉信号。

**3.3 信号处理技术**

傅里叶变换理论上是连续函数在无穷区间上的变换，但是傅里叶近红外变换光谱仪实际的干涉移动距离是从-*Δ*到+*Δ*有限区间，因此实际傅里叶变换相当于对真实光谱和窗函数*D*(x)的乘积进行变换，此时*D*(x)即为切趾函数。又在频域内，上述变换相当于FT{}与FT{}的卷积。因为不同切趾函数FT的衰减速度和旁瓣大小不同，与真实光谱FT卷积后，最终计算光谱的信噪比和分辨率都不同，因此需要仔细选择。另外需要重点注意的是分析中对红外光谱的采样都是从零光程差处采集第一次信号，然后随着平台运动，在正负对称的范围内等间隔采样。但在实际中，由于定位误差，起始采样点往往不在零光程差位置处，产生的效果是得到的红外干涉图不再完全中心对称，而是引入了微小的相位偏差；其他能引起干涉图微小相位偏差的因素还包括光学或电子噪声，以及数字滤波等。这些引入的相位偏差使最终计算的傅里叶变换红外光谱不再是实数，而是包含了虚数分量，因此需要先在中心峰值两侧采集小范围数据，进行相位校正。除此之外对于得到的光谱还需要进行插值、带通滤波、光谱平滑等多种信号处理操作[33-34]。

4自研装置及特点

由于国外用于油品分析的傅里叶变换近红外光谱仪价格昂贵，油品分析功能和参数设定不符合我国国家标准及计量校准规范，且不提供接口不允许改动，并使我们在关键设备上有受制于人的风险。因此中国计量科学研究院自研了相应的用于油品分析的傅里叶变换近红外光谱仪。该装置除之前介绍的关键技术外还包括自己的特点，包括：

1. 切换相干长度快速定位零光程差干涉峰值位置。零光程差干涉峰值是光谱干涉中测量光路和参考光路光程相等的位置，具有最大的光强；光谱干涉偏离该位置后，光强值迅速振荡衰减，直到超出相干长度范围，干涉几乎不可见。因此相干长度区域汇集了干涉的绝大部分能量和干涉信息，是仪器信号采集的主要区域。根据相干长度计算公式，傅里叶变换近红外光谱仪(1.0 ~ 2.5) μm光谱范围，对应相干长度< 2.04 μm。因为干涉装置行程可达10 mm，且自由空间中移动的起始位置不定，因此仪器要在空间光路中如此小的范围内定位峰值位置，十分困难。为此自研装置采用超连续红外光源两步定位零光程差干涉峰值技术。该技术引入了第二路(1250~1370) nm窄波长超连续红外光源，该光源与光谱仪近红外光源共光路，同时较窄的光谱范围又能将相干长度扩大7 ~ 10倍，降低了定位难度。自研装置进行零光程差干涉峰值定位时，使用超连续红外光源产生较长相干长度，红外干涉装置使用快速扫描，直至进入到相干长度范围；下一步，切换为光谱仪红外光源以降低相干长度，得到更尖锐的干涉峰，此时红外干涉装置使用慢速高精度扫描，精确定位峰值位置。

(2) 红外高精度位移干涉系统。在已有的红外干涉结构中，大多采用的是一种套筒式结构。这种结构由音圈电机移动干涉镜镜座在套筒内滑动摩擦，做往复运动。该技术作为光谱仪的核心技术国外已申请了专利保护。另外套筒式结构对加工、安装配合精度要求较高，同时当灰尘进入筒内易造成磨损，摩擦阻力增加，降低测量精度。为此，自研设备采用另外一种思路，用高精度直线电机平台代替复杂的运动结构。直线电机通过交变电磁力推动平台运动，电磁力托举平台使之与底座间无摩擦，因而运行平稳、噪声小，最高可以达到10 nm量级的分辨率。自研设备采用直线电机匀速推动移动干涉反射镜，精度和振动都显著优于步进移动方式，同时自研设备设置了绝对零位，并可通过纳米光栅或者激光干涉仪进行反馈控制。实际中自研设备平台行程为2.048 mm，激光分辨率 158.2 nm，因此波数分辨率可达0.46 cm-1。

|  |  |
| --- | --- |
| ` |  |

**图4 装置图片**

**Fig.4 The picture of the device**

(3) 信号噪声滤波。自研设备采用了具有高灵敏度的电子制冷铟镓砷探测器，但是在光谱采集过程中，由于存在光源光强波动以及探测器的光子噪声，需要对信号进行滤波以提高信噪比。自研设备设计了软件巴特沃斯六阶低通滤波和硬件巴特沃斯五阶带通滤波双重滤波器。因为干涉装置的行程为2.048 mm，移动速度是2.0 mm/s, 激光干涉仪等间隔脉冲输出为12.6 4 kHz。为充分满足奈奎斯特采样率，自研设备设定的采样频率为50.56 KHz。又因为近红外最短波长的一个干涉周期为1000 nm，激光干涉仪脉冲间隔为158.2 nm，所以采样信号能够完整复现所有的近红外波长干涉信号且不会产生混叠。在移动速度2.0 mm/s条件下，近红外(1000 ~ 2500) nm对应的频率范围是(800 ~ 2000)Hz，因此带通滤波器的通带频率必须覆盖这一范围，另外由于滤波器会引入相位延迟，因此在去程和回程采集的干涉图中引入的相位延迟的相反的，自研设备还设计了相应的相位补偿。

用傅里叶变换近红外光谱仪对油品成分进行定量分析，需要根据测量参数的要求，选择4cm-1或者2cm-1波数分辨率，16次或32次扫描分别采集被测汽柴油油品以及不同背景修正混合物的光谱，然后针对汽柴油中需要测量的烯烃、芳烃、苯、甲醇等化学成分的特征吸收峰的峰值位置，利用差谱方法把待测化学物质的峰与干扰物的峰值进行分离，以消除谱线重叠。然后可以利用主成分分析方法(PCA)、偏最小二乘分析方法(PLS)、神经网络方法建立模型，并交叉验证模型准确性。

5 总结

文章论述了傅里叶变换近红外光谱仪在油品检测中的应用，详细介绍了傅里叶变换近红外光谱仪基本原理和仪器关键技术；与此同时文章还介绍了中国计量科学研究院自研的傅里叶变换近红外光谱仪的特点。 总而言之，傅里叶变换近红外光谱方法测量汽柴油品质参数，具备多参量测量、测量耗时少、准确度高的优点，未来将成为一种重要的汽柴油包括生物燃油的分析测试仪器。

参考文献

1. 沈学础. 傅里叶变换光谱学--引进和进展[J]. 物理学进展, 1982, (03):275-322.
2. J-B Bates. Fourier Transform spectroscopy[J]. Computer & Mathematics with Application, 1987, 4(2): 73-84.
3. Peter R. Griffiths, James A. de Haseth .Fourier Transform Infrared Spectrometry[M]. 2nd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007: 6-13.
4. P. R. Griffitchs, H. J. Sloane, R. W, Hannah. Interferometers vs Monochromators: Separating the Optical and Digital Advantages[J]. Appiled Spectroscopy, 1977, vol 31(06): 485-495.
5. Vidi Saptari. Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering[M]. Washington: SPIE Press,2003: 15-45 .
6. 孙云岭, 何伟, 田洪祥等. 基于FTIR的柴油机油被燃油稀释的监测研究[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(3): 82-85.
7. 段伟亚, 郑伟, 李月琪等. 傅里叶变换红外光谱法测定车用汽油中典型非常规添加物[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(S1): 73-74.
8. B. J. Riley, C. Lennard, S. Fuller, *et. al*. An FTIR method for the analysis of crude and heavy fuel oil asphaltenes to assist in oil fingerprinting[J]. Forensic Science International. 2020, vol 266: 555-564.
9. D. Mueller, M. F. Ferrão, L. Marder, *et. al*. Fourier Transform Infrared Sepectroscopy(FTIR) and Multivariate Analysis for Identification of Different Vegetable Oils Used in Biodiesel Production[J]. Sensors(Basel), 2013, 13(4): 4258-4271.
10. M. Asemani, A. R. Rabbani. Detailed FTIR Spectroscopy Characterization of Crude Oil Extracted Asphaltenes: Curve Resolve of Overlapping Bands[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020, vol.185: 1-40.
11. 冯明春, 徐亮, 高闽光等. 傅里叶变换红外光谱辐射定标方法的研究[J]. 红外技术, 2012, 34(06):366-370.
12. 张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 4-11.
13. 杨琨. 傅里叶变换红外光谱仪若干核心技术研究与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
14. F. Adler, P. Maslowski, A. Foltynowicz, *et. al*. Mid-Infrared Fourier Transform Spectroscopy with A Broadband Frequency Comb[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 274-276.
15. J. Sin, W. H. Lee, D. Popa. Assembled Fourier Transform Micro-spectrometer[C]. Micromachining and Microfabrication Process Technology XI. USA:SPIE, 2006: 610904-1-610904-4.
16. 王博雨.高性能近红外傅里叶变换光谱系统的研究[D]， 北京：北京交通大学, 2020.
17. 张明月, 章家保, 杨洪波. 空间傅里叶变化红外光谱仪动镜速度稳定性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1240-1246.
18. 石磊, 刘佳, 郜武等. 傅里叶变换红外光谱仪中动镜系统的设计[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 430002 - 430006.
19. Gao Zhan. Static Fourier Transform Spectrometer With Spherical Reflectors[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(3): 560-563.
20. C. M. Snively, S. Katzenberger, G. Oskarsdottir, *et. al*. Fourier- transform infrared imaging using a rapid-scan spectrometer[J]. Optical Letters. 1999, 24(24): 1841-1843.
21. 盛灏. 傅里叶变换光谱仪干涉信号数据获取研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
22. A Simon, Metz W, Keens A. Data Acquisition and Interferogram Data Treatment in FT-IT Spectrometer[J]. Vibrational Spectroscopy, 2002, 29(1): 97-101.
23. 杨秀坤, 钟明亮, 景晓军等. 基于主成分分析--二阶导数光谱成像的红外显微图像分析[J]. 光学学报, 2012, 32(07): 0711001-1 - 0711001-5 .
24. 相里斌, 袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1869-1875.
25. 邢廷, 王模昌, 龚惠兴. Mertz 法傅里叶光谱计算过程的改进[J]. 光学学报, 1999, 19(3): 354-359.
26. Fellgett P. B. The Multiplex Advantages[D]: Cambridge: University of Cambridge, 1949.
27. Brault J W. New Approach to High-precision Fourier Transform Spectrometer Design[J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2891-2896.
28. Tingkui Mua, Chunmin Zhang, Baochang Zhao. Analysis of a Moderate Resolution Fourier Transform Imaging Spectrometer[J].Optics Communications,2009, 282:1699-1705.
29. Roy S, Gemest J, Giaccari P, *et. al*. Hybrid Sampling Approach for Imaging Fourier Transform Spectrometer[J]. Applied Optics, 2007, 46(35): 8482-8487.
30. N. Matallah, H. Sauer, F. Goudail, *et. al*. Design and First Results of a Fourier Transform Imaging Spectrometer in 3-5 μm ramge[C], Optical Design and Engineering IV. USA: SPIE, 2011:816715-1 - 816715-13.
31. E. Sarkissian, K. W. Bowman. Application of a Nonuniform Spectral Resampling Transform in Fourier-transform Spectrometry [J]. *App. Opt*., 2003, 42(6), 1122-1131.
32. J. Linkemann, F. R. Borja, H. O. Tittle. FT Spectrometer with Fixed Mirrors Using Fizeau Fringes[C]. 8th intl Conf on Fourier Transform Spectroscopy. USA: SPIE, 1992:184-187.
33. Richard R. Treffers. Signal-to-Noise Ratio in Fourier Spectroscopy[J]. Applied Optics, 1977, vol.16(12): 3103-3106.
34. V. Jovanov, E. Bunte, H. Stiebig, *et. al*. Transparent Fourier Transform Spectrometer[J]. Optical letters, 2011, 36(2): 274-276.