

文章编号: 1672-8785(2006)10-0041-06

星载傅里叶光谱仪动态校正技术研究

孙 方

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 本文介绍了国内外傅里叶变换光谱仪动态校正技术的发展状况和典型应用, 并给出了一种星载傅里叶变换光谱仪动态校正方案。

关键词: 傅里叶变换光谱仪; 星载; 动态校正; 相位检测

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Research on Dynamic Alignment for Space-borne Fourier Transform Spectrometers

SUN Fang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The development of dynamic alignment technology and its application in Fourier transform spectrometers are presented. A dynamic alignment design scheme for a space-borne Fourier transform spectrometer is provided.

Key words: Fourier transform spectrometer; space-borne; dynamic alignment; phase detection

1 引言

在气象卫星大气探测领域, 光谱仪作为重要的空间遥感仪器, 主要用来从空间不间断地测量全球三维空间的温度场、气压场、水气分布、云和大气气溶胶以及微量气体的含量, 以提高天气预报的质量。常规的大气探测光谱仪是以滤光片或光栅作为分光元件的。按照世界气象组织 (WMO) 提出的温度准确度 1K、湿度准确度 10% 和垂直分辨率 1km 的目标, 大气探测仪器的相对光谱分辨率必须达到 1200。要达到这么高的指标, 传统的滤光片或光栅分光方式的光谱仪已无法胜任。

傅里叶变换光谱技术很好地解决了仪器高灵敏度与高光谱分辨率之间的矛盾, 已被广泛应用于红外光谱学领域和空间红外光谱辐射探测。它具有高光通量、高光谱分辨率、高波数准

确度、采用单元探测器而不必采用探测器阵列且有较多的通道数等一系列显著优点, 完全可以满足大气垂直探测的需要, 所以星载傅里叶光谱仪已成为各国竞相发展的重点。傅里叶变换光谱技术的原理如图 1 所示, 它是利用迈克尔逊干涉仪 (或是它改变后的形式) 对入射光进行干涉和调制, 并用探测器把干涉信号转换为电信号的。电信号经 A/D 转换和数字信号处理 (实现傅里叶变换), 便形成所要的光谱数据, 其中对光的调制是依靠动镜的一维平移来实现的。光谱仪要求作扫描运动的动镜必须作高精度的匀速直线运动, 垂轴偏摆很小, 这样对机械结构精度和系统稳定性就提出了很高的要求, 尤其是系统准直性的稳定性要求。例如对直线扫描镜的动态倾斜误差要求小于 1 角秒, 加工精度要求达到微米量级, 这些要求单纯依靠机械加工是很难达到的。

收稿日期: 2006-04-01

作者简介: 孙方 (1974 —), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事大气垂直探测仪方面的研究。

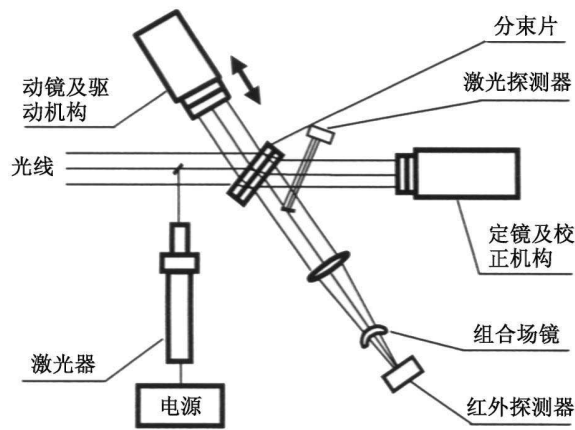


图1 典型迈克尔逊型傅里叶光谱仪的基本结构

对于星载探测仪器，卫星在发射时会产生巨大的冲击。对于角秒级的误差要求来说，整个系统要保持准直是非常困难的。另外，在工作过程中，环境温度的变化对光谱仪的影响是无规律的，即使考虑对材料的温度膨胀系数进行结构优化，仍然不能解决温度对准直性的影响。这也是傅里叶变换光谱仪的主要难点。

国际上解决这个问题主要有两种，一种是用角反射镜或猫眼反射镜形成光束自动进行准直，另一种是采用动态校正的方法。这两种方法各有利弊。用角镜或猫眼镜进行准直的系统通常会增加系统光路的复杂性，增加直线电机的负载重量，同时角镜或猫眼镜的精度以及温度稳定性等要求更加严格。角镜的准直性能也是有一定限度的，也会为准直性带来一定的问题，例如光束中心横向偏移等，这些问题对系统也有一定的负面影响。

从应用的角度说，动态校正是解决问题的一个好方法。动态校正就是根据检测到的光谱仪倾斜误差，通过电子机械反馈系统控制某种装置迅速地进行补偿，达到保持准直的目的。它的设计思想是通过增加电子系统的复杂性来减少光学机械系统的设计难度，这种技术的优点可以表现为以下几方面：(1) 采用动态校正系统可以保证光谱仪的工作性能在一定的范围内得到改善；(2) 采用动态校正系统可以使某些动镜运行要求放宽，使得对电机机械系统的精度要求从零点几 μm 放宽到几十 μm ，这对驱动电

机是非常重要的；(3) 采用动态校正系统有助于克服机械震动、大气扰动和温度变化等带来的影响，为光谱仪在不良条件（震动、温度变化）下工作提供了可能性；(4) 动态校正系统不仅可以在傅里叶光谱仪上应用，还可以扩展到其他仪器。

2 动态校正技术的发展状况

自适应光学是动态校正的理论基础，其核心内容就是实时校正光束波前畸变，提高光学成像质量。对于准直性要求苛刻的傅里叶光谱仪，采用动态校正系统有可能实现对干扰的补偿和校正，从而使该光谱仪系统在变化的环境条件下达到自适应的目的。

自适应光学的基本概念是 1953 年由 H.W.Babcock 首先提出的，他提出用波前传感器探测波前畸变信息，用任意变形的光学元件产生可控的光学相移来补偿畸变。同样，傅里叶光谱仪采用动态校正系统就是为了克服由于波前变形产生的相位畸变。

由于傅里叶光谱仪的应用是在 20 世纪 70 年代以后才引起广泛注意的，因此采用动态校正系统的历史也很短。傅里叶光谱仪动态校正系统最早是由 G.W.Ashley 和 A.G.Tescher (1971 年) 报告的；Bomen 公司的 H.Buijs (1979 年) 对商用傅里叶光谱仪的动态校正系统进行了阐述，该产品的分辨率为 0.03cm^{-1} ；R.J.Huppi 等 (1979 年) 对气球平台的干涉仪动态校正子系统进行了描述；J.C.Kemp 和 R.J.Huppi (1979) 介绍了火箭用干涉仪；R.P.Walker 和 J.D.Rex (1979 年) 研制了飞机平台的干涉仪校正子系统。

最初，傅里叶光谱仪主要用于地面和实验室的光谱学研究、化学分析等，一般采用慢扫描的方式，对动态校正的速度要求不高，一般采用步进电机与调整螺丝相结合的方式就能够满足系统的要求。后来，随着傅里叶光谱仪在空间遥感、航空以及军事等方面的应用，对光谱仪的测量速度的要求越来越高。国外开始采用压电晶体作为校正系统的驱动装置，以满足实时校正的需求。与步进电机驱动方式相比较，压电驱动具有较高的响应频率和位移分辨率。

3 典型的傅里叶变换光谱仪动态校正系统

动态校正技术在傅里叶光谱仪方面的应用非常广泛, 早期主要用于商业用傅里叶光谱仪, 现在大部分傅里叶光谱仪都采用了动态校正技术。下面给出国内外典型傅里叶变换光谱仪所采用的动态校正系统。

3.1 国外情况

3.1.1 Bomen 公司的 DA2、DA3 系列

Bomen 公司 DA2、DA3 系列傅里叶变换光谱仪的动态校正采用定镜校正方式, 它利用正常光波前中的一部分光束作为参考光束。在经过定镜和动镜干涉后, 该干涉信号的部分由探测器阵列进行检测。由于准直性的变化最终体现为干涉信号的变化, 通常以中心探测器信号作为参考标准。在将周围探测器信号与中心探测器信号进行相位比较后, 根据一定的算法计算出差值, 再将该差值转变为电信号, 然后在相应的方向上进行校正。该系统是用两个扭距电机在两个方位驱动定镜倾斜的。通过使用该动态校正系统, 可以使干涉仪对温度变化、机械振动和机械驱动不精确等问题不再敏感。

3.1.2 美国尤他州大学的傅里叶变换光谱仪

美国尤他州大学研制的一种低温干涉仪, 在保持干涉仪准直性时采用了一种相对较慢的静态校准方式。这种静态校正方式主要是用来校正冷却后造成的干涉仪变形的, 因为低温造成的变形足以淹没任何干涉信号。在系统中将调整螺丝和定镜相结合, 通过由单片机控制的减速步进电机的旋转控制定镜的倾斜方式。系统的光路与其它校正系统基本一致, 不同之处在于它的调整装置。它的防震板用来防止定镜绕光轴旋转和再垂直于光轴方向运动。三个调整螺丝以互相成 120° 角的形式排列, 其中两个用于低温条件下的校准, 另一个在宽视场干涉仪上用于调整视场补偿。每一个螺丝都与一个抗反冲齿轮组及步进电机相连, 这样便可以阻止调整螺丝对振动的响应。该系统应用地非常成功, 不过校正需耗费大量时间 (10min)。

3.1.3 温变效应气体干涉监视仪 (IMG)

日本资源观测系统组织 (JAROS) 研制的温室气体干涉监视仪 (IMG) 采用了在动镜上进行动态校正的技术。这种光谱仪采用磁悬浮支撑结构的扫描动镜, 同时采用 He-Ne 激光器 (波长为 632.8nm) 作为参考光源。参考光路将激光束分成 4 束, 将测得的相位差反馈给扫描电机, 由扫描电机来调整系统的偏差。该系统的调整范围只有 $\pm 0.0009^\circ$, 校正精度为 0.0001° 。

3.1.4 气球载傅里叶分光计

美国尤他州大学 Stewart 辐射实验室 (USU, SR) 和 AFGL 研制了用于测量红外辐射源和背景的空间及光谱特性的气球载傅里叶分光计。该系统采用标准的迈克尔逊干涉仪形式, 其动态校正系统采用三个相关的伺服系统对整体包括光程差、对称性和条纹相位进行自适应控制。其中使用了猫眼反射镜, 用来克服机械误差。它使用了两个动镜部分, 两者相对于零光程差对称运动, 以保持重心不变。系统允许对条纹进行跟踪并可以控制 32 个条纹以内的误差而不是 1/2 个, 这对光谱仪克服震动和保持良好性能是最重要的, 该校正系统使光谱仪的抗震能力有了明显增强。

3.1.5 UV-VIS 傅里叶光谱仪

德国研制的 UV-VIS 傅里叶变换光谱仪是一种商用光谱仪。它采用了在动镜上进行自动调整的方法。动镜在一个方向的运动结束以后干涉图消失, 然后动镜转向另一个方向运动。由于驱动力的不连续可能会造成动镜偏离准直, 它的调整只在动镜开始运动前和每次动镜运动方向改变时进行。在动态校正过程中, 激光干涉图的相位差由视场中的三个硅光元件进行探测, 获得的信号驱动传感器保持动镜的运动状态。把单个干涉图叠加起来可以得到平均值, 叠加结果可在最终的激光探测器上得到。为了得到没有相移的叠加结果, 每个干涉图都参考了辅助光源产生的白光干涉强度标记。该校正装置能明显提高系统的性能。

3.1.6 美国 Bio-Rad 公司的 FTS6000 系列

美国 Bio-Rad 公司的 FTS6000 系列光谱仪采用了一种获得专利权的新颖动态校正系统。该动态校正系统采用 He-Ne 激光作为参考光源。

激光扩束后进入干涉仪, 经干涉仪调制后落在三个探测器上, 每个探测器输出余弦电信号波形。系统的电子控制系统可通过控制位于定镜上的三个压电驱动器使三路电子信号的相位锁定。该动态校正系统能够在干涉仪扫描期间和两次扫描间隔期间实时精确地保持干涉仪的准直性, 有效地隔离外部环境的影响, 比如外部震动或长期的温度改变等。

3.2 国内情况

国内自 20 世纪 70 年代起开展空间干涉仪技术研究, 研究重点为迈克尔逊结构的干涉仪, 校正方案主要采用角放射镜或猫眼反射镜。中科院长春光机所研制的傅里叶光谱仪实验室样机采用了迈克尔逊结构结合猫眼反射器动镜的校正方案。上海技术物理所研制的波段为 $3\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 、光谱分辨率为 2cm^{-1} 的干涉仪实验室样机, 采用了迈克尔逊结构结合角镜的校正方案。

3.3 总结

由上述典型动态校正系统可知, 动态校正系统的方案有很多, 其关键在于驱动器类型的选择和驱动器位置的安放。

对于星载傅里叶变换光谱仪, 通常要求动镜的运动速度较大, 因此要求校正系统有较高的响应速度。国外已经应用的驱动装置是压电晶体。压电晶体具有反应速度快、控制精度高等优点。一般说来, 它的应力与外加电压基本成线性关系, 由它作为驱动的高速压电倾斜反射镜, 能够满足星载傅里叶变换光谱仪所要求的响应速度和角度分辨率。

驱动器位置的安放是校正系统设计的关键。将驱动器安放在不同部分各有利弊。将驱动器安放在动镜部分的优点是, 系统运动部件比较集中, 干涉仪其它部分固定, 系统稳定性好。缺点是动镜部分由于加装了动态校正系统而变得复杂, 另外校正驱动器会随动镜运动而运动, 并随之震动。这对校正系统的正常工作进而校正精度都有影响, 因此这种应用较少。通常的动态校正系统的驱动部分是安装在定镜上的。

由上面所述可知, 以压电晶体作为驱动器的定镜动态校正系统是解决星载迈克尔逊型傅

里叶变换光谱仪准直性动态变化问题的一种较好的方案。

4 傅里叶变换光谱仪定镜动态校正系统方案

针对星载傅里叶变换光谱仪的特点, 我们设计了以二维高速压电倾斜镜为核心部件的定镜校正系统, 其基本方案如图 2 所示。

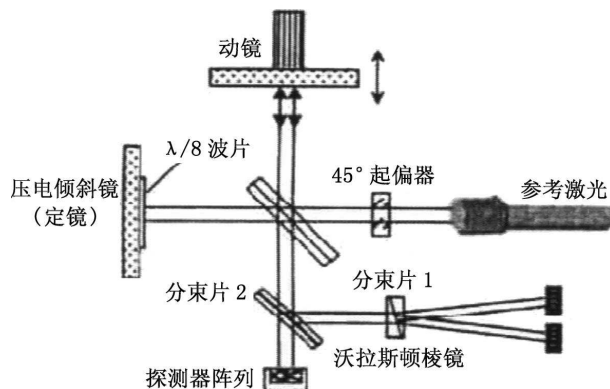


图 2 光谱仪系统及动态校正子系统的基本结构

动镜、定镜和分束器三部分形成干涉系统。 45° 起偏器、 $\lambda/8$ 波片、沃拉斯顿棱镜以及两个探测器 D1、D2 用来实现运动方向探测。探测器阵列用来探测干涉信号, 从中取出倾角变化的值。将处理后的倾斜量值反馈给压电校正反射镜以达到补偿误差的目的。动镜作直线扫描运动, 形成光程差变化, 在探测器上得到与波长和光程差相关的干涉信号。为了得到稳定的干涉信号, 必须使动镜和定镜的像之间在运动中保持平行, 但动镜采用的运动机构必然会使二者之间产生倾角, 并且使大小和方向发生变化。激光经扩束系统产生的平行光用作参考光。由于激光的单色性好、干涉距离长、可以产生稳定的干涉信号, 因此激光可以作为检验位移探测和干涉效果的标准尺度。

校正系统的核心部件是二维高速压电倾斜反射镜。如图 3 所示, 该系统的基本结构由殷钢基座、反射镜和压电驱动器组成。应用中, 三个压电驱动器的物理特性和电机特性应保持一致, 这样可以保证压电驱动器的校正精度和温度特性。

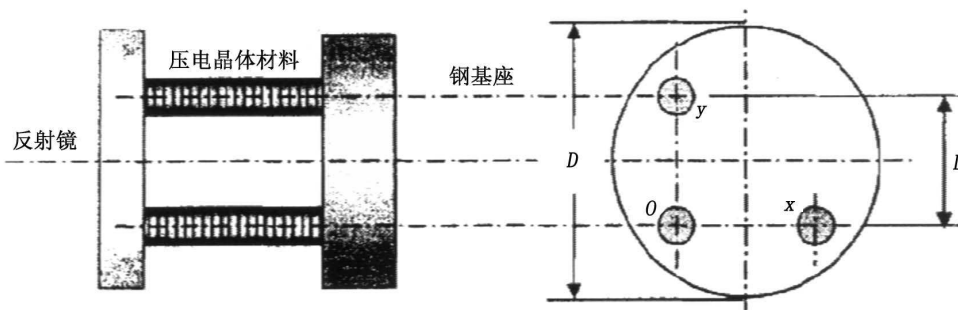


图 3 高速压电倾斜镜的基本结构

定镜校正技术基于位相探测原理，由于倾斜角的存在使得探测器阵列面上光强分布的不均匀，相位差与空间位置成线性关系。因此探测干涉孔径范围内的相位就是探测干涉孔径范围内的光强不均匀度。校正的最终目的是使整个干涉孔径范围内光强达到均匀。由于两个探测器之间测得的相位差与两个探测器的间距及准直误差角度有关，它们的关系可以用下面的公式表示：

$$\Delta\phi_x = 4\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \tan \alpha_x \quad (1)$$

式中， x_1 和 x_2 分别表示两个探测器的位置坐标， α_x 为准直误差倾斜角。当角度很小时，该公式可以近似为公式：

$$\Delta\phi_x = 4\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \alpha_x \quad (2)$$

因此，可以认为两个探测器之间的相位差与误差角成线性关系。当两个探测器的间距一定时，倾斜角度的最大值决定了相位差是否处

于可测量的 $\pm\pi$ 范围。对探测器间距可作适当选择，间距大可以增加测量精度，但会减小测量范围。间距太小可增加测量范围，但会降低测量精度，而且还会受探测器尺寸的限制。相位提取的基本原理是，根据上述原理选取两个存在一定距离的探测器，两个探测器接收有一定距离的两路干涉信号，两路信号的相位差处于 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 之间，将相位差的值转化为电子信号经各种处理后进行控制，基本工作框图如图 4 所示。

该控制系统是一个随动控制系统。动镜在运动过程中会受各种因素的影响，其直线运动的倾斜角度是随机的，必须选择合适的算法来判断、检测相位，进而控制倾斜角。PID 是常用的控制算法，具有简单、稳定性好、可靠性高的优点，但在实际工作过程中，动镜的运动变化具有非线性、时变性等不确定因素，常规的 PID 算法难以实现有效控制，需与其它控制算法如模糊、自适应等算法相结合，以实现有效控制。只要制定合适的算法，本动态校正系统是可行的。

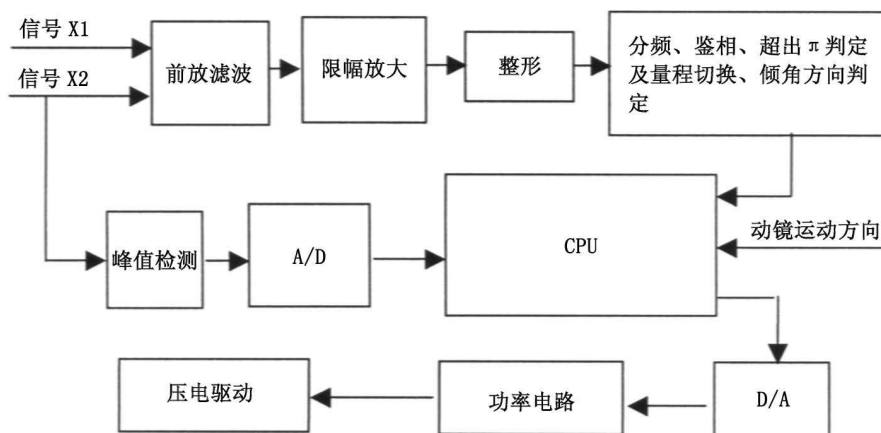


图 4 系统控制框图

5 结束语

从理论上和国内外的应用实践可知，动态校正技术是解决迈克尔逊型傅里叶变换光谱仪准直性动态变化问题的可行方案，但要满足星载傅里叶变换光谱仪的要求，还有许多问题需要解决，例如控制算法的制定、压电晶体在低温下的驱动性能、高速倾斜镜的响应频率和分辨率的提高等。

最后需要说明的是，应用动态校正的前提是动镜驱动控制、光谱仪机械结构的设计必须达到一定的精度，动态校正只是在一定的精度范围内，对小角度的瞬时准直性偏角进行实时校正。

参考文献

[1] Norman H Macoy, Hal Broberg, et al. Dynamic alignment design and assessment for scanning interferometers [C]. SPIE, 2832: 126-154.
 [2] Takayki Yanagisaa, Tomohiro Akiyama, et al. Influence of vibrations on Fourier transform spectrometer [C]. SPIE, 3221: 429-436.

[3] Haruhisa SHIMODA, Toshihiro OGAWA. Interferometric Monitor for Greenhouse Gases (IMG) [C]. SPIE, 3221: 110-120.
 [4] R Stenzel, W F Bluhm, et al. UV-VIS Fourier Transform Spectrometer with Automatic Adjustment [C]. SPIE, 1575: 236-237.
 [5] Ralph H haycock, Brent Bartschi, Hoa Nguyen. Automatic alignment technique for cryogenically cooled interferometers [C]. SPIE, 364: 30-35.
 [6] H Sakai, T C Li, et al. Study of atmospheric infrared emission using a balloon-borne cryogenic Fourier spectrometer [C]. SPIE, 364: 38-45.
 [7] 吴航行. 傅里叶变换光谱仪技术 [J]. 红外, 2002, (7): 4-7.
 [8] 于立民. 傅里叶变换光谱仪自适应校正系统的研究 [J]. 红外, 2001, (12): 1-11.
 [9] 于立民. 傅里叶光谱仪动态校正技术的研究 [J]. 红外, 2003, (2): 18-23.
 [10] 于立民. 相位检测法定镜自适应校正技术 [J]. 光学精密工程, 2003, (10): 448-452.
 [11] 华建文, 等. XX 四号大气垂直探测仪方案论证报告 [R]. 中科院上海技术物理所, 2004.
 [12] 于立民. 傅里叶变换光谱仪自适应校正技术研究 [D]. 博士论文, 中科院上海技术物理所, 2003.



国外专利介绍

近红外伪装检测

美国专利 US7076088
 (2006 年 7 月 11 日授权)

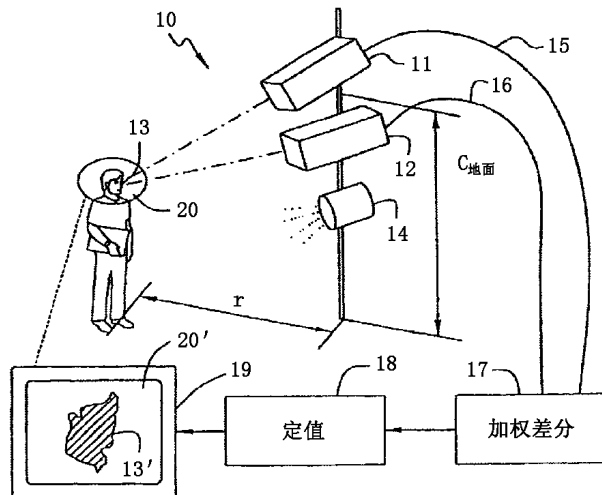
在某些场合，伪装检测特别重要。例如，在一些高端安全应用中，通过伪装检测，人们可以了解是否存在经过伪装的恐怖分子。

老练的恐怖分子一般都是利用天然的 (如黑暗、天气) 和人造的 (如人造面具、假发等) 迷惑和伪装技术来伪装自己的。因此，人脸部伪装的检测就显得非常重要。

本发明提供一种近红外伪装检测系统，该系统是通过探测由人体头部反射的近红外辐射来确定人体头部是否存在伪装物质的。它能透过汽车玻璃窗检测经过伪装的人脸。另外，它还能识别用于伪装的特殊材料的存

在。

本专利说明书共 26 页，其中有 12 张插图。



高 编 译