

三组元双工况火箭发动机羽流发射光谱实验研究^{*}

赵永学, 张育林, 李麦亮, 周 进

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为研究火箭发动机故障的羽流光谱诊断技术, 对三组元双工况火箭发动机羽流发射光谱进行了实验测量。结果表明当发动机有异常杂质进入羽流时, 羽流光谱中有该物质的显著特征光谱; 同时, 正常情况下羽流辐射光谱随发动机不同结构、不同工况及不同工作参数而表现出不同的特征光谱。

关键词: 三元推进剂; 氢氧发动机; 烃氧发动机; 羽流; 发射光谱分析; 故障诊断

中图分类号: V434.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2001) 03-0199-05

Plume emission spectroscopy of the tripropellant rocket engine operating under dual-mode

ZHAO Yong-xue, ZHANG Yu-lin, LI Ma-liang, ZHOU Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the study of fault detection and diagnosis for the rocket engine by plume spectroscopy, the measurement of the plume radiation for the tripropellant rocket engine operating under dual-mode was conducted. The results show that the evident characteristic spectra of abnormal materials were presented while these materials were introduced into the plume. We also found that different characteristic spectra of the plume followed different rocket engine status.

Key words: Tripropellant; Hydrogen oxygen engine; Hydrocarbons-oxygen engine; Plume; Emission spectrum analysis; Fault diagnosis

1 引 言

发动机羽流光谱特性的研究, 可用于发动机故障诊断、燃烧分析及流场分析。就发动机故障诊断而言, 美国 MSFC (Marshall Space Flight Center) 已于 1986 年开始了一项航天飞机主发动机 (SSME) 故障羽流光谱诊断工程^[1], 同时 SSC (Stennis Space Center) 也于 1989 年开始建立一套基于光学多通道分析仪 OMA (Optical Multichannel Analyzer) 的羽流光谱发动机健康监控系统^[2]。国内发动机羽流光谱实验研究工作至今未见公开文献报道, 其故障诊断、燃烧分析大都利用传统的测量手段 (如压力、流量等) 与仿真计算。为此, 我们在对羽流光谱原子辐射仿真^[3] 和煤油-氧焰辐射光谱实验研究^[4] 的基础上, 利用光谱仪及 OMA 仪对三组元双工况火箭发动机羽流发射光谱进行了

测量, 取得了初步实验研究结果, 结果表明利用该测量手段可对三组元发动机进行健康监控与燃烧分析。

2 测量系统及实验

将会聚透镜放在三组元发动机喷管出口附近 500 mm 左右, 用于采集羽流辐射出来的光, 经光纤传导到光谱仪, 在光谱仪内, 光栅将复合光分解为单色光, 该单色光通过 CCD 探测器转换为电信号, OMA 仪一面控制探测器的工作, 如曝光时间, 每帧采集速度等, 一面将 CCD 采集的模拟信号转换为数字信号, 存于计算机硬盘。曝光时间越长, 采集信号的信噪比越高, 但时间响应越慢, 曝光时间由具体实验确定。为了对测量结果进行理论分析, 需要对狭缝仪器函数进行实验测定。狭缝仪器函数是测量系统对光谱信号的响应函数, 表征了测量仪器对光谱信号的展宽, 实

^{*} 收稿日期: 2000-06-23; 修订日期: 2000-11-25。

作者简介: 赵永学 (1972—), 女, 博士生, 研究领域为基于光谱技术的液体火箭发动机故障诊断与燃烧分析。

验确定狭缝宽度为 20 μm 。波长分辨率在 150 g/mm 光栅下为 0.23 nm/pixel, 在 600 g/mm 光栅下为 0.056 nm。由于 CCD 测得的结果直接对应值为每个像素 pixel, 需要首先进行波长标定, 将像素单位变换为波长单位。由于火箭发动机的主要组成部件为不锈钢, 主要含铁元素, 因此我们选用 Fe 空阴极灯作为波长标定光源。对所用 OMA 仪而言, 像素位置与波长的映射可以是线性的、平方的或三次方的。线性映射需要至少选择两个点, 平方映射至少需要三个点, 而三次方至少需要四个点。对 600 g/mm 光栅, 由于分辨率较高, 波长覆盖范围较窄, 可选点少, 我们采取线性映射; 而 150 g/mm 光栅, 分辨率低, 波长范围宽, 可选点多, 我们采取三次方映射。

测量对象为三组元双工况火箭发动机羽流发射光谱。依喷注器结构不同有三种类型: (1) 单喷嘴共腔结构喷注器发动机, (2) 单喷嘴非共腔结构喷注器发动机, (3) 三喷嘴共腔结构喷注器发动机。推进剂为: 气氢/液氧 (GH_2/LOX), 气氢/液氧/煤油 ($\text{GH}_2/\text{LOX}/\text{Kerosene}$)。单喷嘴发动机喷管喉部直径 17.6 mm, 三喷嘴发动机喷管喉部直径 25.2 mm。

3 测量结果与数据分析

对每次试车羽流发射光谱都进行了测量, 包括双组元发动机、三组元发动机、转工况发动机, 单喷嘴喷注器发动机, 三喷嘴喷注器发动机。测量结果表明不同工况、不同燃烧效率、不同混合比都直接反映到羽流发射光谱上。当发动机部件烧蚀、管路中有杂质混入燃烧室时, 羽流光谱中有明显的特征光谱。定量分析进一步表明, 整个测量系统的浓度分辨率很高。

3.1 正常情况下各种工况的典型羽流光谱

图 1~3 分别为双组元、三组元及转工况条件下的发动机羽流发射光谱, 在下述各三维图中一维为波长, 一维为辐射谱强度, 一维为时间, 与发动机试车时间相对应。根据各次试车的启动程序, 从 CCD 开始采集到发动机点火需要一段时间, 因此前几帧光谱为背景辐射与测量系统的热噪声。在图 1 双组元羽流光谱中, 有典型的 306.4 nm OH 基(0,0)带状光谱, 且燃烧很洁净, 即没有其它物质的辐射。三组元发动机羽流光谱, 由于其连续辐射很强, 掩盖了物质的特征光谱, 如分子、自由基的带状光谱。高温下连续辐射产生的机理有: 炽热固体的连续辐射, 自由电子的韧致辐射, 自由原子和自由基的自由-自由跃迁辐射, 以及自由-束缚跃迁辐射。在羽流温度(约 2 000 K~

3 000 K)下, 物质的电离度极小, 可忽略不计。因此我们认为三组元发动机羽流的连续辐射主要由碳粒子所致, 可见三组元工况下燃烧不充分。图 3 转工况条件下的羽流辐射, 从三组元到双组元工况变换反映到羽流光谱的明显变化。图 4 为图 3 前 7 s 间三组元工况下的羽流辐射, 可见碳的连续辐射很强; 图 5 为后 3 s 间双组元工况下的羽流辐射光谱, OH 基的特征光谱明显存在。

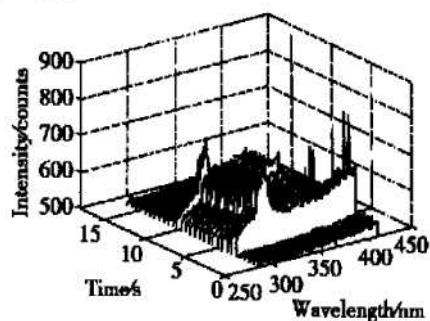


Fig. 1 Typical spectra of bipropellant engine

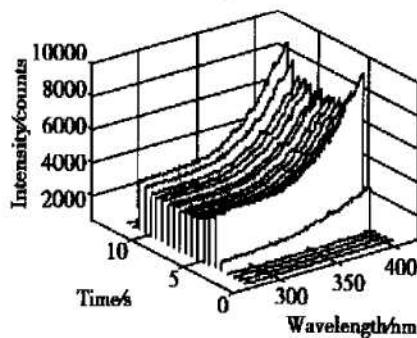


Fig. 2 Typical spectra of tripropellant engine

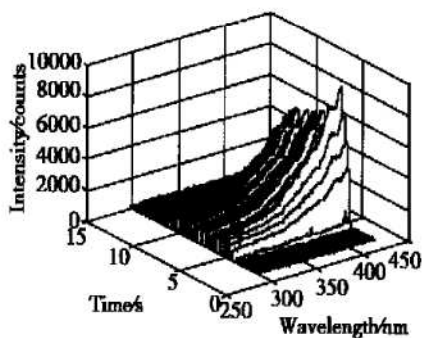


Fig. 3 Typical spectra of the engine transferring from tripropellant to bipropellant

3.2 异常杂质进入时羽流的发射光谱

425-2 及 523-1 次试车发现异常现象。425-2 次试车, 铁的辐射在整个试车过程都明显存在, 如图 6。该次试车所用推进剂为 GH_2/LOX , 试车时间 5 s, 所用

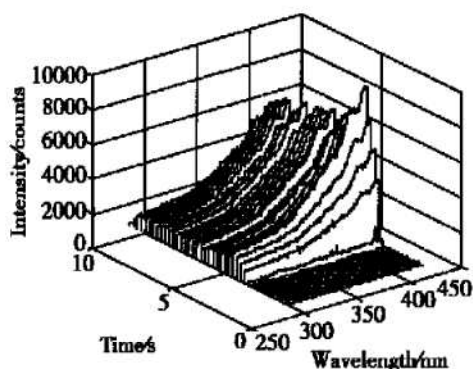


Fig. 4 Spectra of the former 7 s test of fig. 3

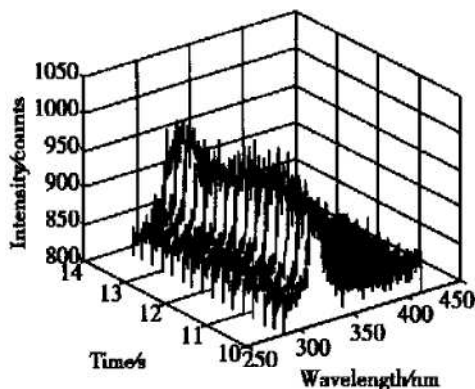


Fig. 5 Spectra of the latter 3 s test of fig. 3

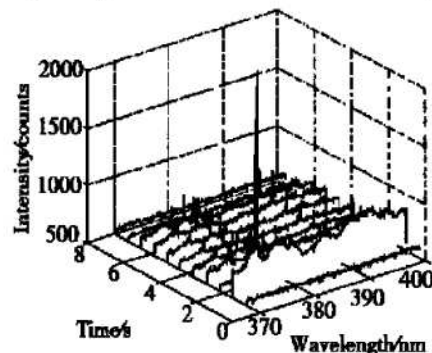


Fig. 6 Abnormal spectra during test 425-2 with injector ablating

光栅600 g/mm, 光谱仪的中心波长位置380 nm, 曝光时间500 ms, 每帧采集时间为721.61 ms。第一帧光谱采集先于发动机点火启动, 为周围环境辐射及采集系统的热噪声; 第2帧光谱中有 Co 和 Fe 的谱线, 由于点火药为双基药, 富含 Co, 判定 Co 的辐射为点火药进入羽流而致。从第3帧光谱到发动机关机, Fe 的辐射一直存在, 在试车结束对发动机进行检查时发现喷嘴被烧蚀, 其中内喷嘴所用材料为不锈钢, 外喷嘴为黄铜。尽管内喷嘴与外喷嘴都被烧蚀, 但没有发现 Cu 的辐射光谱, 这是由于在本次试车条件下, 光谱采

集的波长覆盖范围为364.137 nm~395.503 nm, Cu 的主要自发跃迁波长不在该范围内。该次发动机试车拆卸后对喷嘴的烧蚀量进行了测量, 其中内喷嘴被烧掉的部分质量2.2 g, 平均烧蚀速度0.44 g/s, 由此可见测量系统的强度分辨率是较高的。

图7为425-2试车测量光谱的第2帧图。在光谱分析时, 作者在 MATLAB 环境下编制的程序, 可对采集光谱的峰值对应波长进行自动标注, 如图示。其中

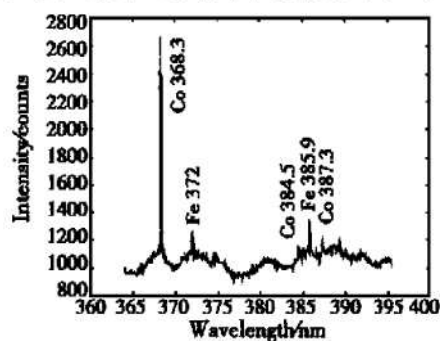


Fig. 7 Second frame spectrum of test 425-2

368.3 nm, 384.5 nm 和 387.3 nm 处对应谱线判定为 Co 的辐射^{*}; 372 nm 和 385.9 nm 判定为 Fe 的辐射。可以看出 Co 368.3 nm 的峰值远远大于 Fe 372 nm 的峰值, 从而认为在点火瞬间羽流中 Co 的辐射强度高于 Fe 的辐射强度。在第8帧光谱中(图8), 主要为 Fe 的辐射谱线。内喷嘴材料不锈钢 1Cr18Ni9Ti, Fe 为主要组成元素。图8中对各谱线对应元素进行了标注, 其中 385.9 nm 谱线为 Fe, Ni 的辐射, 而 367.5 nm 谱线不能确认, 也可能为“贼线”, 由 CCD 二极管瞬间强电流引起。尽管在内喷嘴烧蚀过程中所有 1Cr18Ni9Ti 的元素都随推进剂进入了羽流, 但由于其它元素含量太少, 在羽流中浓度太低, 因此光谱图中主要为 Fe 的辐射谱线。图9为 Fe 的辐射(所选谱线为 372 nm) 随时间变化曲线, 可见在发动机启动时 Fe 的辐射较强。整个试车过程中都有 Fe 的辐射存在, 直到发动机关机。

523-1 次试车时录像监视羽流目测为绿色, 图10为羽流采集光谱, 可见整个试车过程羽流中有非推进剂的异常杂质辐射存在。523-1 为气氢/液氧发动机试车, 光谱采集系统设定参数为: 150 g/mm 光栅, CCD 曝光时间 50 ms, 每帧光谱采集时间 249.921 ms。图11为其中一帧光谱, 可见 Cu, CuH 的特征光谱, 由于 Cu 的辐射在可见光谱范围为绿色, 因此录像监视的羽流为绿色。更进一步的分析认为, 羽流中 Cu 的存在是由热交换器附着的铜化合物引起, 该热交换器在

* 本文中有关光谱的查对出自文献[5, 6]。

本次试车首次使用, 发动机点火前进行管路吹除时有大量黄色粉末吹出, 残余物在试车时随推进剂进入了羽流。而 CuH 是由 Cu 与推进剂中的 H 化合而成。同时我们看到, 图 11 中有很强的连续辐射, 认为是羽流中的固体颗粒在流场高温下的辐射。

3.3 通过羽流发射光谱对燃烧状况的定性分析

羽流发射光谱的测量, 主要能反映羽流中各成份

及其含量。燃烧效率的高低、推进剂混合比的大小、采用喷注器结构不同造成混合充分程度不同等, 这些都直接影响到燃烧产物的相对含量, 因此能表现为不同的羽流发射特征光谱。由于气氢/液氧发动机燃烧比较洁净, 燃烧状况在羽流发射光谱上的表现不很明显; 对三组元发动机而言, 通常燃烧都不很充分, 碳粒子的辐射很强, 羽流光谱对燃烧状况的反映就很明显。

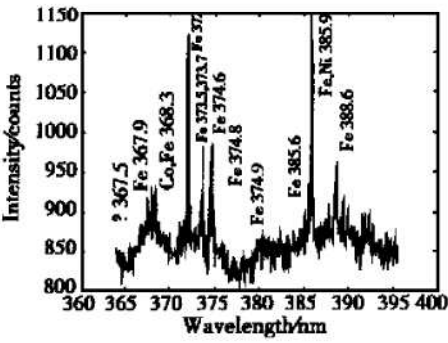


Fig. 8 The eighth frame spectrum of test 425-2

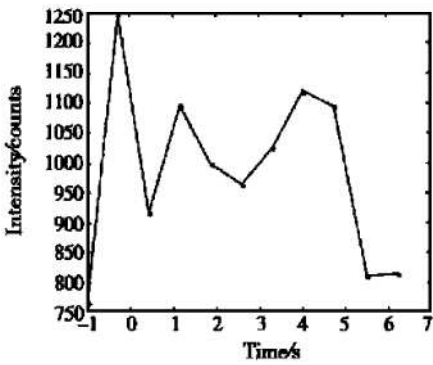


Fig. 9 Time history of Fe emission during test 425-2

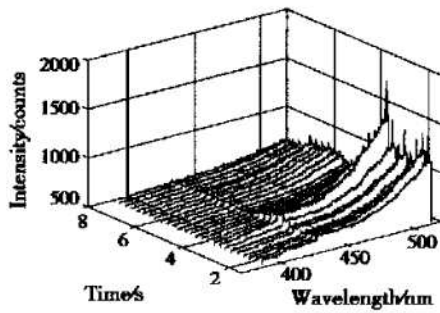


Fig. 10 Abnormal spectra during test 523-1

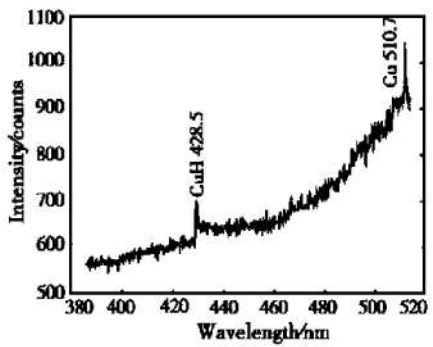


Fig. 11 The eighth frame spectrum of 523-1

Table 1 Parameters of the test engine

Test No.	Flow of GH_2 / (g/s)	Flow of LOX / (g/s)	Flow of kerosene / (g/s)	Excess LOX coefficient	Rate of GH_2 in total fuel mass / %	Average combustion efficiency / %
509-1	22.83	506.17	142.09	0.7584	13.84	75.06
504-3	13.247	413.958	364.533	0.306	3.51	90.166
521-3	19.03	498.02	87.834	1.1028	17.81	95.23
502-2	33.96	421.65	34.47	1.0857	49.627	99.02
512-3	69.1	795.27	164.1	0.7165	29.63	99.9

图 12~ 16 给出了 5 次三组元试车羽流光谱, 各次试车参数如表 1, 其中各物质流量由流量表实际测得, 余氧系数、 H_2 占燃料总量的百分比及平均燃烧效率根据测量结果理论计算所得。图 12 为 509-1 次试车的一帧光谱, 可见光谱连续辐射很强, 由光谱判别羽流中碳粒子含量较多, 理论计算该次试车燃烧效率较低。图 13 为 504-3 次试车羽流光谱, 连续辐射依然存在, 但 306.4 nm 的 OH 基带状光谱依稀可见。比较 509-1 与 504-3 次试车参数可以看出, 尽管 504-3 次试

车的余氧系数与 H_2 占总燃料的质量百分比都低于 509-1, 但燃烧效率高于 509-1, 羽流中碳的含量相对较少。图 14 为 521-3 次试车羽流光谱, 可以看出明显的 OH 基 306.4 nm 光谱; 图 15 为 502-2 次试车光谱, 该次试车光谱明显不同于其它三组元试车光谱, 整体连续辐射几乎可以忽略, 表现出明显的带状光谱, 其所属物质有待进一步查对。502-2 次试车煤油流量偏低, 液氧流量较高, 判断主要为 GH_2/LOX 燃烧, 且为富氧燃烧。以上试车为单喷嘴喷注器试车, 图 16 为

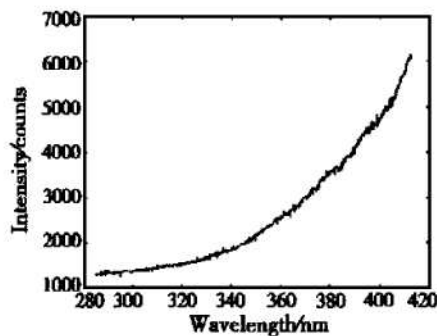


Fig. 12 Frame of spectra of test 509-1

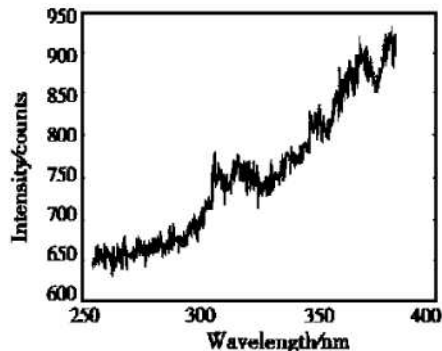


Fig. 13 Frame of spectra of test 504-3

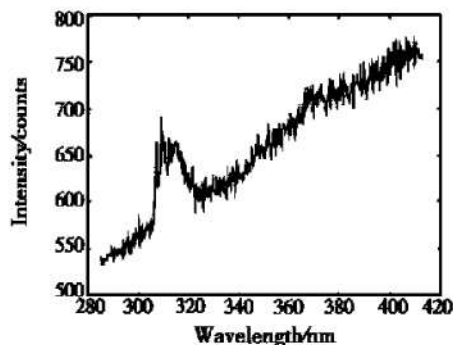


Fig. 14 Frame of spectra of test 521-3

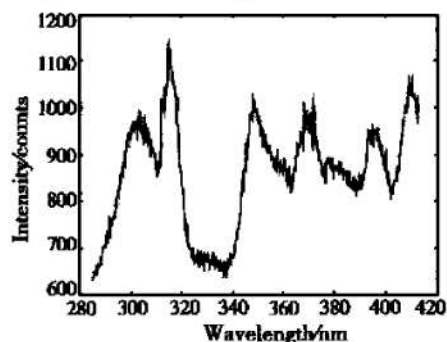


Fig. 15 Frame of spectra of test 502-2

512-3次三喷嘴试车,可见碳的连续辐射较少,该次试车燃烧效率高达99.9%。我们根据光谱判断,实际燃烧效率可能低于99.9%。效率计算根据推进剂流量测量结果,由于液氧两相流的存在,LOX流量测量值高于实际值,计算值应偏高。三喷嘴试车目前只有这一次数据,在多次单喷嘴试车中,大部分羽流光谱如

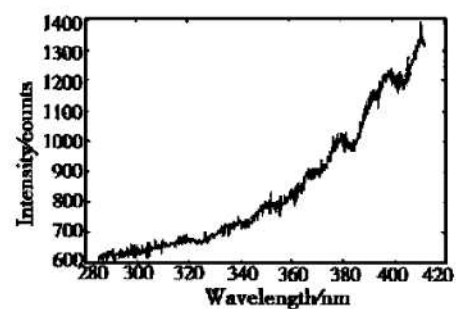


Fig. 16 Frame of spectra of test 512-3

509-1次试车,即碳的连续辐射很强,燃烧不充分,总体上可见三喷嘴喷注器燃烧效率高于单喷嘴燃烧效率。以上分析可以看出,三组元发动机羽流发射光谱特征是发动机燃烧效率、喷注器结构(单喷嘴/三喷嘴)及推进剂燃烧混合比的综合反映。

4 结 论

液体火箭发动机羽流发射光谱包含了发动机燃烧状况、性能、故障等方面的丰富信息。作者利用发动机羽流发射光谱方法,对三组元双工况发动机燃烧及故障诊断进行了分析。结果表明,当发动机部件烧蚀或有其它杂质进入羽流时,通过羽流光谱能对杂质进行检测识别诊断,如425-2及523-1次试车;发动机燃烧状况也能在羽流发射光谱中得到充分体现,通过发动机羽流发射光谱能对燃烧效率、喷注器结构类型、推进剂燃烧混合比进行评判。

致 谢: 本文的实验工作是在国防科技大学 103 教研室热试车台全体老师的共同合作下完成的,文中表1的余氧系数及燃烧效率由沈赤兵博士提供,在此特表感谢。

参考文献:

- [1] Powers W T, Cooper A E. OPAD 1991 — A Status Report [R]. NASA N93-31559.
- [2] Tejwani G D, Bircher F E. Development of an atomic absorption system for the space shuttle main engine[R]. AIAA 97-2665.
- [3] 赵永学, 张育林. 羽流光谱的原子辐射仿真[J]. 推进技术, 2000, 21(2).
- [4] 赵永学, 李麦亮, 张育林, 等. 煤油-氧火焰中铁的辐射光谱实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(6).
- [5] Alkemade C Th J, Hermann R. Fundamentals of analytical flame spectroscopy[R]. ADAM HILGER LTD, Bristol, 1979.
- [6] Pearse R W B, Gaydon A G. The identification of molecular spectra, fourth edition[M]. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.

(编辑: 王居信)