

电激励因素影响合成射流的实验研究^{*}

罗振兵, 夏智勋, 易仕和, 王德全

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 设计了合成射流双膜激励器及实验测试系统。采用热线风速仪对激励器出口下游不同点的速度进行测量并分析合成射流的发展演化, 对电激励因素即激励电压幅值、频率及信号波形对合成射流的影响进行试验和分析, 对激励器在不同激励频率下启动工作时合成射流的响应及建立时间进行了考察。

关键词: 合成射流⁺; 激励器; 流量控制; 电激励因素⁺

中图分类号: V211.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2005) 05-0420-05

Experimental investigation of the effects of electrical forcing factors on synthetic jets

LUO Zhen-bing XIA Zhixun YI Shirhe WANG De-quan

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

Abstract The actuators with dual membrane and the experimental system have been set up. The actuator is excited with sine, square, triangle and burst waveform, and the time-dependent velocity is measured with a hot-wire anemometer over a wide range of spatial locations, forcing voltages and frequencies. The evolution of synthetic jet and the effects of electrical forcing factors on synthetic jets are summarized. The synthetic jet responding time is measured when the actuator is excited at different forcing frequencies.

Key words Synthetic jet⁺; Actuator; Flow control; Electrical forcing factors⁺

1 引 言

未来高技术战争对空气动力学创新发展的需求促进了流动控制技术的发展, 21 世纪的空气动力学将首先在流动控制领域取得重大突破^[1]。20 世纪 90 年代, 基于微机电系统 (MEMS) 及旋涡运动理论, 在国际上诞生了一种全新的流动主动控制技术——合成射流技术^[2], 它是当今先进流动控制技术研究方向之一。目前美国 NASA 研究中心、乔治理工大学和麻省理工大学, 加拿大多伦多大学和澳大利亚悉尼科技大学等科研机构和院校正在对它进行机理、实验和应用等方面的研究^[3]; 国内也在这方面开展了机理研究、数值模拟和应用探讨^[4~8]。随着研究进一步深入, 该技术将可望用于增强燃烧掺混、飞行器气动力和射流矢量控制以及各种元器件的换热控制等, 在军事、航空航天领域应用前景十分广阔。

合成射流技术要实现其在工程上的广泛应用, 首先必须对合成射流激励器的响应快慢、激励器工作的可重复性以及各种影响因素 (如电激励因素) 对合成射流的影响规律进行考察。本实验采用热线风速仪测量激励器产生的合成射流流动速度, 通过分析合成射流的流动速度, 对合成射流的发展演化以及合成射流电激励因素 (包括激励电压波形、电压幅值及频率) 对合成射流的影响规律进行分析研究, 并对激励器启动工作时合成射流的响应及建立时间进行考察。

2 实验设备

2.1 合成射流激励器

为了提高合成射流的能量水平, 在原实验单膜激励器^[9]的基础上设计了双膜激励器, 图 1 是合成射流的形成简图及设计的实验激励器实物图, 激励器腔体及出口主要参数见表 1, 振动膜的金属膜采用黄铜,

^{*} 收稿日期: 2005-02-28 修订日期: 2005-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (90205016); 国家自然科学基金资助项目 (50176055)。

作者简介: 罗振兵 (1979—), 男, 博士生, 研究领域为合成射流应用技术及固体火箭技术。Email: luozhenbing@163.com

薄膜中心贴有压电陶瓷片, 对应金属振动膜及压电陶瓷片的主要参数见表 2。

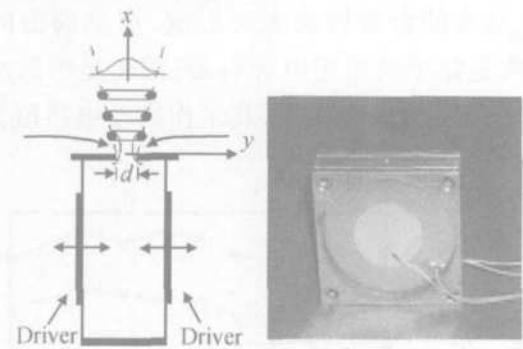


Fig 1 Schematic of synthetic jet and photograph of actuator

Table 1 Parameters of actuator cavities and exits

A ctuators	iv	⊕
Exits		
Shape	Round	Square
Size ϕd or $d \times d$	$\phi 2$	2×2
Thickness h /mm	2	
Cavities		
D i a m e t e r D_c /mm	$\phi 46$	
Thickness h /mm	8	

Table 2 Parameters of membrane

Shim (Brass)	
Diameter D /mm	$\phi 50$
Thickness t /mm	0.20
Elastic modulus E /GPa	89.63
Poisson's ratio σ	0.324
Density ρ /(kg/m^3)	8700
Piezoceramic (PZT)	
Diameter D_p /mm	$\phi 30$
Thickness t_p /mm	0.15

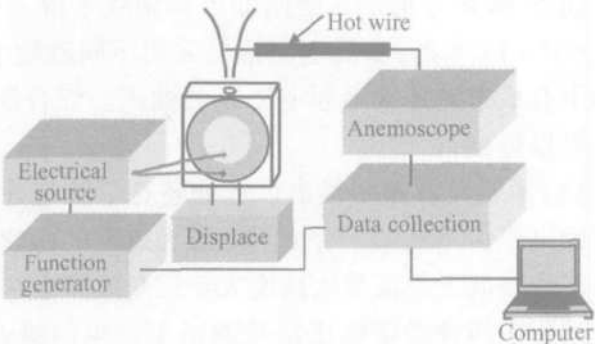


Fig 2 Schematic diagram of experimental system

2 2 实验测试系统

实验在静止空气环境中进行, 实验测试系统原理

如图 2 所示, 整个实验测试系统由四部分组成: 电压输入系统, 激励器定位系统, 数据采集系统及数据分析系统。试验用热线及热线风速仪作为速度测量设备, 用高速数据采集记录仪采集数据并向计算机输入数据进行分析, 采样频率为 10kHz 激励器工作电压由激励电源提供, 激励电源放大系数为 100 电压信号波形、幅值及激励频率由函数发生器控制, 实验时, 热线位置保持不动, 通过激励器定位仪改变和确定激励器位置, 实现合成射流下游各点的速度测量。

3 实验结果及分析

本实验采用恒温式热线风速仪测量出口的流动速度, 试验记录数据是热线电流的电压幅值, 通过恒温式热线风速仪所测电压值与速度值之间的关系式确定出口的流动速度, 因此数据只反映气体流动速度值的大小。函数发生器输出电压幅值为 U_0 , 对应激励器激励电压值为 $U = 100U_0$, 激励频率 f , 四种激励电压信号波形为方波、正弦波、三角波、锯齿脉冲波。以下分析中 d 的取值为 2mm。

3 1 合成射流激励器出口下游速度分布

合成射流雷诺数 Re , 斯托罗哈数 St 和冲程 L_0 可定义如下

$$Re = (d \cdot V_{max} / \pi) / (\mu / \rho) \tag{1}$$

$$St = (d \cdot f) / (V_{max} / \pi) \tag{2}$$

$$L_0 = (V_{max} / \pi) / f \tag{3}$$

式中 d 是激励器出口宽度, V_{max} 是激励器出口处合成射流最大速度, μ 为粘性系数。

由式 (2), (3) 可得, 无量纲冲程 L_0 / d 与斯托罗哈数 St 成倒数关系, 即

$$L_0 / d = 1 / St \tag{4}$$

图 3 是激励器出口为圆孔、频率 $f = 100\text{Hz}$ 激励电压 $U = 40\text{V}$, 激励电压信号波形为方波, 在出口下游不同 x/d 处径向位置的合成射流速度分布。此时, 出口处 $V_{max} = 9\text{m/s}$ 代入式 (1) ~ (4), 得到 $Re \approx 400$ 无量纲冲程 $L_0 / d = St \approx 14$ 。

从图 3 可以看到: (1) 合成射流最大速度峰的宽度具有高保真度, 从下游 $x/d = 1$ 到 $x/d = 33.25$ 合成射流最大速度峰的宽度只增加不到一倍。(2) 合成射流最大速度在出口轴线附近 ($y/d < 1$) 的变化趋势向下游是递减的。(3) 合成射流的平均速度向下游先增大, 在下游 $x/d = 11.25$ 附近达到最大, 而后基本保持不变向下游迁移, 到达下游 $x/d = 19.75$ 附近后开始迅速减小, 当到达下游 $x/d = 30$ 以后, 合成射

流流向峰已经基本消失,合成射流已经融入周围环境流体而不可分辨。以上实验结果与 Smith 等人的合成射流纹影实验结果所描述的合成射流发展演变过程^[2]相吻合。

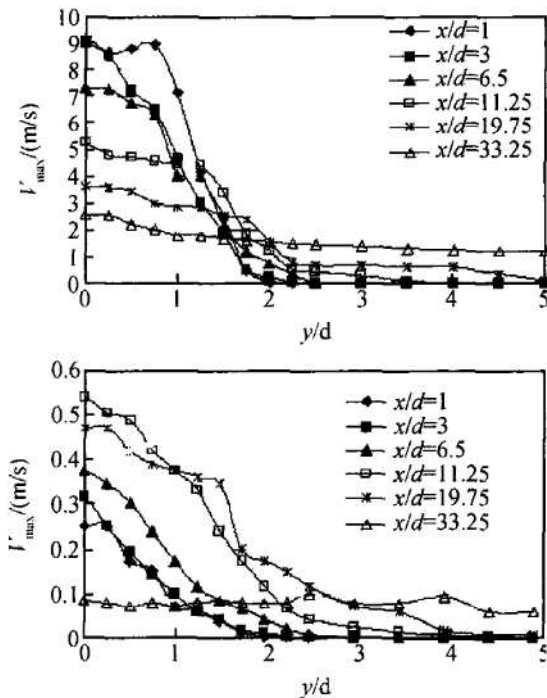


Fig 3 Maximum and average jet velocity as a function of the radial distance from the exit axes Actuators iv: $U = 40V$, $f = 100Hz$ Square wave

将以上结果与无量纲冲程比较后,发现合成射流的发展演化可按无量纲冲程 L_0/d 的倍数分成三个明显不同的区域: $x/d < L_0/d$ 为合成射流形成发展区,在下游 $x/d = L_0/d$ 附近合成射流得到充分发展,射流平均速度最大; $L_0/d < x/d < 2 \cdot L_0/d$ 为合成射流平移区,在这个区域,合成射流最大速度和平均速度下降很慢,合成射流平均速度基本保持不变向下游平移; $x/d > 2 \cdot L_0/d$ 为合成射流耗散区,在这个区域,合成射流平均速度很快减小,并最终融入周围环境流体而不可分辨。

3.2 激励电压幅值对合成射流的影响

图 4 是在激励电压频率固定 ($f = 400Hz$), 在激励器出口轴线下游 $x/d = 1.3$ 处, 激励器采用两种不同出口形式下的合成射流速度随激励电压幅值变化曲线。其中图示 Round-Sine, Round-Square, Square-Sine 和 Square-Square 分别代表圆孔出口-正弦波信号、圆孔出口-方波信号、方孔出口-正弦波信号和方孔出口-方波信号激励。从图 4 可以得到以下结论: (1) 激励电压幅值存在启动阈值, 当激励器激励电压小于这一

电压值时, 合成射流无法形成, 其原因是电压幅值低于启动阈值时, 振动膜不能有效起振并压缩膨胀腔内的气体, 从而使合成射流无法形成, 启动阈值的大小与压电陶瓷振子的钳定电容有关; 图 4 显示激励器 iv 在 $400Hz$ 激励电压频率下, 其工作启动电压值为 $10V$ 左右。

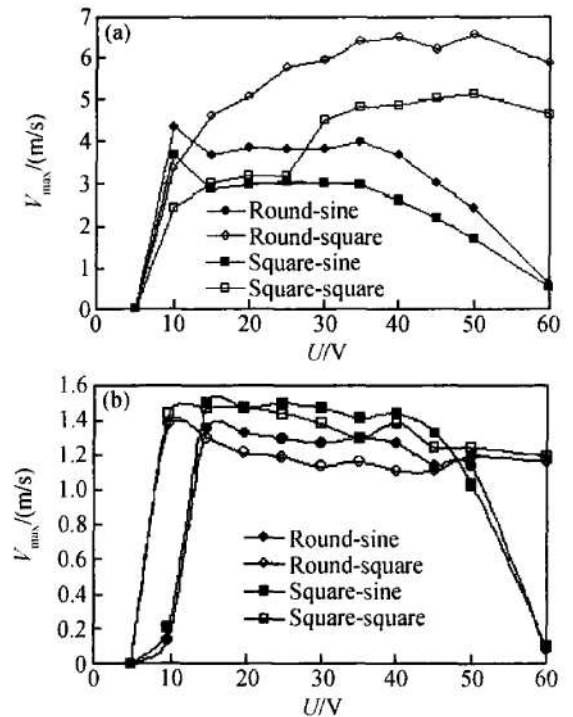


Fig 4 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing voltages at $x/d = 1.3$ Actuators iv, $f = 400Hz$

(2) 对于给定的压电式激励器, 存在最佳工作电压幅值范围, 从图 4 可得到激励器 iv 在 $400Hz$ 激励电压频率下的最佳激励电压幅值大致范围是 $15V \leq U \leq 50V$ 。

3.3 激励电压信号波形对合成射流的影响

激励电压信号波形有: 正弦波、方波、三角波、冲波。图 5、图 6 分别是在激励器出口轴线下游 $x/d = 1.3$ 、 $x/d = 13.5$ 处, 激励电压信号采用不同激励电压波形下合成射流速度随频率变化的曲线。综合图 5、图 6 可以得到:

(1) 不管是在激励器出口近处还是下游远处, 四种激励电压信号波形下合成射流最大速度的比较是: 在方波和冲波下射流最大速度大于三角波和正弦波; 实验过程中四种激励电压信号波形下产生的噪音比较是: 方波和冲波下噪音大于三角波和正弦波。

(2) 在激励器出口近处 (如 $x/d = 1.3$ 图 5(b)), 激励电压波形对合成射流平均速度影响不大; 但在激励器出口下游较远处 (如 $x/d = 13.5$ 图 6(b)), 激励

电压波形对合成射流平均速度影响很大,方波和冲波下的合成射流平均速度相对于正弦波和三角波提高很多。

(3)在方波和冲波波形下工作的激励器有效工作频率带宽较正弦波和三角波加宽。

文献[9]通过对压电振动膜进行等效电路分析得出了在方波下金属振动膜振幅较大的结论,究其原因是:在其它条件相同的情形下,各不同输入电压波形下压电振动膜电路的阻抗、功率因子及机电转换系数基本相同,而方波的输入功率最大,因此用输入功率最大的方波驱动激励器时将使金属振动膜获得的机械能最大,即金属膜振幅最大,从而合成射流的能量最高。这与以上试验结果相吻合。

3.4 激励频率对合成射流的影响

图 5(a)、图 6(a)显示:合成射流的最大速度随激励频率变化的基本趋势是:先增大,在 60Hz 左右达到最大峰值,然后减小,至 300Hz 左右又开始增大,在 500Hz 左右达到又一峰值后迅速减小至几乎为零。

从图 5(b)、图 6(b)所示合成射流平均速度随激励频率变化关系曲线,可以得到激励电压频率对合成射流的影响是:(1)对于流场环境及结构一定的激励

器,在一定的频率范围内,合成射流出口平均速度随频率增大而增大,当频率再增大,合成射流出口平均速度反而很快减小。(2)存在最佳激励频率使得合成射流平均速度最大,即合成射流能量最高,这个最佳激励频率与激励器金属振动膜的谐振频率接近。金属振动膜的谐振频率由(5)式^[10]确定

$$f_{1,2} = \frac{K_{1,2}}{2\pi} \sqrt{\frac{4Et^2}{3(1-\nu^2)\rho^4}} \quad (5)$$

式中 $K_{1,2} = 10.2, 21.3$

由式(5)及激励器金属振动膜主要参数(见表 2),计算得到的金属振动膜的一阶、二阶谐振频率分别为 $f_1 = 509\text{Hz}$, $f_2 = 1062\text{Hz}$ 。实验测得的最佳激励频率为 500Hz 左右,与金属振动膜的一阶谐振频率 f_1 接近。这是因为压电振动膜电路在处于谐振时,电路阻抗最小,金属振动膜获得的机械能最大,即金属振动膜振幅最大。(3)存在有效激励频率带宽,在有效激励频率带宽外的激励频率将无法使激励器有效工作。如激励器 iv 的有效激励频率带宽为 $60\text{Hz} \leq f \leq 600\text{Hz}$ 特别是在高频条件下,激励器则成为一优秀辐射体,激励器出口下游没有射流产生。

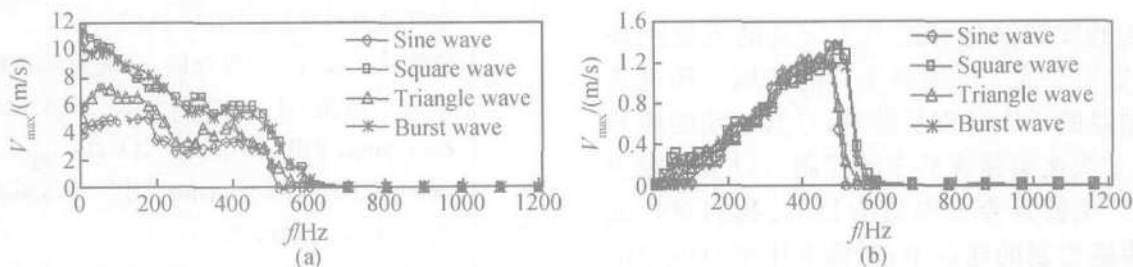


Fig 5 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies at $x/d = 1.3$

Actuator iv: $U = 40\text{V}$

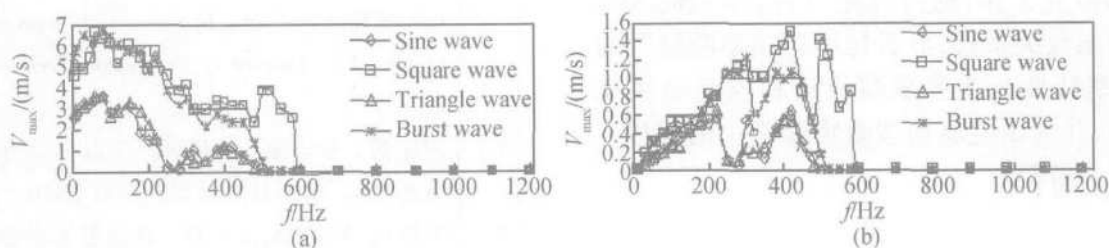


Fig 6 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies at $x/d = 13.5$

Actuator iv: $U = 40\text{V}$

3.5 合成射流响应时间

如图 2 实验系统原理图所示,利用数据采集记录仪同时采集记录函数发生器激励信号及热线获得的合成射流信号,对激励器在不同激励频率下启动工作时,合成射流响应时间和射流稳定所需时间进行了考

察记录。图 7(a)~(f)是在激励器出口下游 $x/d = 1.3$ 处,不同激励频率下激励器启动时的合成射流与激励信号对应实验数据。综合图 7(a)~(f),可以得到两点结论:(1)合成射流的启动响应非常迅速,即使是在较高激励频率下,如 500Hz 射流的启动响应延迟时间

也不到 0.5 个激励周期。(2)激励器启动工作,在出口附近合成射流达到稳态所需时间很短,尤其是在较低激

励频率下,如 100Hz 几乎无时间延迟;即便在较高激励频率下,如 500Hz 所需时间也不超过 5 个激励周期。

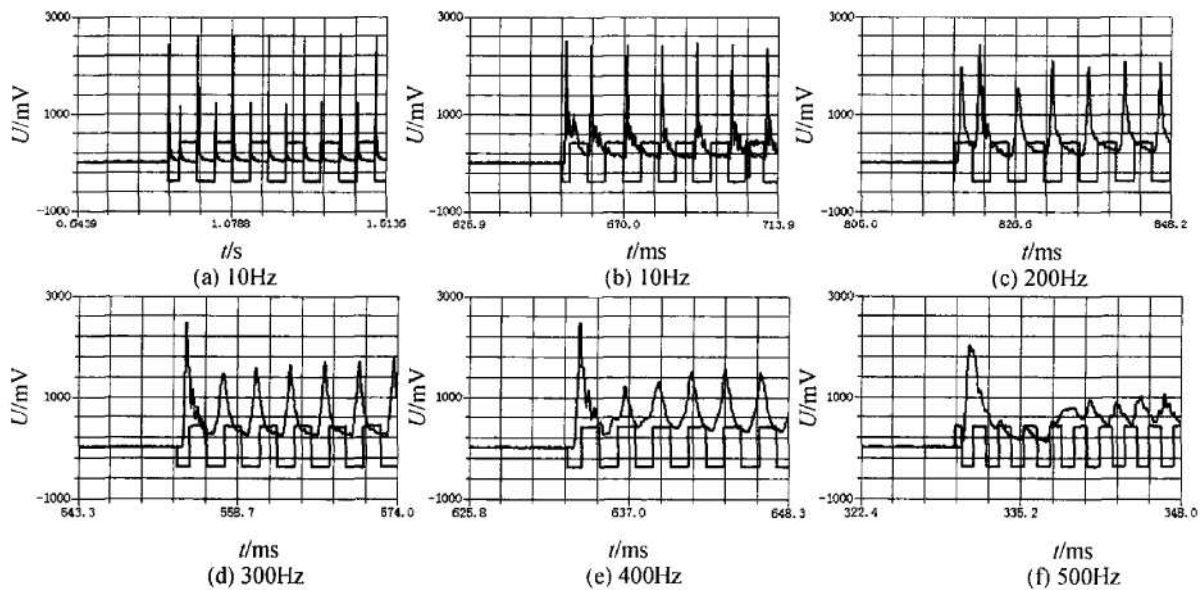


Fig 7 Response signal of the synthetic jet at $x/d = 1.3$ compared with the electrical driving signal
Actuatorsiv: Square wave $U_0 = 400\text{mV}$

4 结 论

合成射流的发展演化可按本文定义的无量纲冲程 L_0/d 的倍数划分成三个明显不同的区域。压电式合成射流激励器的工作可重复性好,且其启动响应非常迅速,有利于快速实施流动主动控制。以消耗较少电能,激励器产生较强合成射流为目的,我们对合成射流激励器实施控制的建议是:激励电压幅值应当适中;激励电压信号波形采用方波或冲波;激励电压频率应接近金属振动膜的一阶谐振频率。

进一步的研究工作:通过理论分析,得到输入与输出间的传递函数关系式,分析压电驱动型激励器的工作特性(频率特性),为激励器设计和控制提供准则和理论指导,并为压电驱动型激励器工作机理和工作特点提供理论解释。

参考文献:

- [1] 庄逢甘,黄志澄. 未来高技术战争对空气动力学创新发展的需求[C]. 空气动力学前沿研究论文集, 2003
- [2] Smith B L. The Formation and evolution of synthetic jets [J]. *Phys Fluids* 1998 10(9). [3] Glezer A, Amitay M. Synthetic jet [J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2002 34

- [4] 罗振兵,夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中应用的进展[J]. *力学进展*, 2005 35
- [5] 高峰,汪亮. 微射流作动器三维外流场数值模拟[J]. *空气动力学学报*, 2003 21(2).
- [6] 罗振兵,朱伯鹏,夏智勋. 合成射流激励器对射流矢量影响研究[J], *推进技术*, 2004 25(5). (LUO Zhen-bing ZHU Bo-peng XIA Zhixun Jet vectoring using synthetic jet actuators [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004 25(5).)
- [7] 张堃元,李念,董玥. 零质量自耦合射流控制喷流矢量实验[J]. *推进技术*, 2004 25(3). (ZHANG Kun-yuan LIN nian DONG Yue Experimental investigation of flow vectoring by using zero mass synthetic jets actuator [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004 25(3).)
- [8] 罗小兵,李志信,过增元. 压电驱动合成喷的设计及分析[J]. *功能材料与器件学报*, 2001 7(2).
- [9] 罗振兵,夏智勋,方丁酉. 合成射流激励器实验及结果分析[J]. *宇航学报*, 2004 25(2).
- [10] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京:科学出版社, 2004

(编辑:张雅凤)