

柔性圆柱杆接触碰撞实验研究*

朱焜 洪嘉振 董富祥 余征跃

(上海交通大学工程力学系, 上海 200240)

摘要 对两柔性圆柱铝杆纵向接触碰撞进行实验研究. 为了深入研究接触碰撞过程中物体的动力学响应, 设计了柔性体之间接触碰撞的实验方案, 利用铝的导电性精确地测量碰撞的接触时间, 利用激光多普勒测振仪非接触地测量接触碰撞过程中柔性杆上各点的速度响应, 同时通过动态应变技术测量出接触点附近的应变变化历程. 实验结果揭示了碰撞过程中杆上各点速度响应形成弹性波的现象, 说明碰撞过程中弹性波传播效应不能忽略. 并验证了实验方案的可行性和合理性.

关键词 柔性杆, 纵向碰撞, 接触动力学, 实验, 弹性波

引言

柔性多体系统的碰撞现象在工程中经常出现, 如航天飞机、人造卫星的太阳能帆板和天线展开时的关节处的碰撞; 飞机着落时起落架受地面的冲击等都是柔性多体系统碰撞的例子. 近年来, 国内外的众多学者围绕着不断完善和发展柔性多体系统动力学建模理论和数值算法作了大量卓有成效的理论研究工作, 并开发了功能相当完备的大型计算机软件, 如 NASTRAN, ADAMS 等. 然而对于柔性多体系统的接触碰撞实验研究大多集中在刚体与柔性体之间的碰撞, 柔性体之间的接触碰撞实验研究的报道相对较少. 而仅依赖于数值仿真算例, 缺乏实验研究验证其理论及程序的正确性和有效性的话, 难以得到令人信服的结论. 同时柔性多体系统动力学实验研究也是验证模型, 探索模型修正方向、探索新的现象及理论向工程应用转化的重要途径^[1].

接触碰撞是一个瞬态和非线性的动力学过程, 对接触碰撞的研究理论和实验研究的难点. 在以往的研究中很多工作往往将碰撞过程和非碰撞的连续动力学过程混合在一起进行研究. 但是将两者混合在一起影响了对碰撞动力学过程的深刻认识. 而且由于碰撞结束后的阶段正是碰撞后物体自由运动的阶段, 因此对于接触碰撞过程的准确认识对碰撞后物体动力学响应的准确预测具有至关重要的意义. 文献[2]基于动量守恒定理利用恢复系

数分析了碰撞的动力学行为, 该方法认为碰撞是在瞬间完成的, 忽略了接触阶段 Hu Bin 等对 Hertz 接触理论进行了修正, 并对钢球与柔性杆和钢球与铝质半圆盘的接触碰撞进行了大量的实验研究^[3,4], 通过测量杆上应变和自由端的速度响应来计算碰撞力. 然而这些碰撞理论中往往包含不确定的参数, 其准确性有待验证, 实验研究也没有完全解决下列问题: 碰撞发生和终止的准确判断; 接触阶段的碰撞响应; 柔性体之间碰撞的碰撞力问题.

为了解决以上问题, 本文对两圆柱柔性铝杆之间的纵向碰撞问题进行了实验研究, 设计了接触时间测量装置, 使用激光测振仪测量碰撞过程中杆上各点的速度响应, 采用动态应变技术测量了接触点附近的应变响应, 并对接触过程中的碰撞响应进行了分析.

1 实验设计

为了精确地测量碰撞过程中的动力学响应, 并且避免边界条件等因素及构件之间的联接精度对实验动力学响应造成影响, 本文设计了两柔性圆柱铝杆的纵向接触碰撞实验, 由于平面-平面碰撞的难以实现, 因此将杆1碰撞端加工成半球形, 两铝杆用细线“V”字形悬挂, 以保证在轴线所在的竖直平面内运动. 为保证实验的可重复性和避免高速碰撞引起的塑性变形, 设定杆1从由挡板确定的固定高度自由释放, 在即将接触时刻速度为 $v_1 = 0.21\text{m/s}$. 实验证明: 杆1碰撞初速度误差不大于 0.5%, 说明该实验重复性很

好. 具体材料的物理和几何参数见表 1.

表 1 实验材料和几何参数

Table 1 Geometrical and material data

	Rod 1	Rod 2
Length (mm)	1000	1000
Radius (mm)	10	10
Young's modulus (GPa)	70	70
Poisson ratio	0.33	0.33
Density (kg/m ³)	2700	2700
Initial velocity (m/s)	0.21	0

采用德国 Polytec 公司的扫描式激光测振仪 PSV-300F 非接触地测量接触过程的速度响应. 该仪器核心是激光多普勒测振系统, 可测速度范围 $\pm 10\text{m/s}$, 精度达到 10^{-6}m/s , 频率带宽 1MHz , 精确性很高. 设备的非接触式测量也极大地降低了环境因素影响. 碰撞动力学实验多采用力传感器测量接触力, 由于力传感器与实验构件之间连接的影响, 不可避免地会破坏碰撞位置的结构, 而且总有界面反射、波形弥散等现象存在. 本文采用动态应变测量技术测量碰撞点附近的应变. 动态应变仪 (YE3817C) 带宽 $\text{DC}-10\text{KHz}$, 测量范围 $0 \sim \pm 100000\mu\epsilon$, 灵敏系数 $K = 2.00$, 最大增益 2000 倍, 误差 $\pm 0.3\%$. 碰撞装置示意图如图 1 所示.

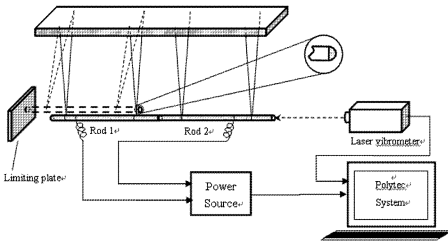


图 1 柔性杆碰撞实验系统

Fig. 1 Schematic Experimental Setup

2 接触时间测量

要准确描述碰撞过程中系统的动力学响应的时间历程, 就必须精确测定接触起始和终止时刻. 本文利用铝的导电性和电流光速传播的特点设计了接触时间测量装置, 通过两根轻质细导线将两铝杆与一节 3 号碱性电池相连组成一个串联直流电路. 通过测量电路电压信号的变化来测定接触起始和终止时刻. 两铝杆的接触和分离模拟电路开关的连通与断开: 两杆未接触时, 直流电路为断路, 电压信号为系统的交流采样信号; 两杆接触时, 直流电路导通, 电压信号跃变为电源电压信号; 两杆分离时, 直流电路断开, 电压信号又跃变为系统采样信号 (如图 2

所示). 电压信号跃变到另外一种状态的时刻即两个连续过程的突变时刻, 电流在导线中的传播速度为 $3 \times 10^{11}\text{m/s}$, 其传播时间可以忽略不计, 因此两个突变时刻相减即得到接触时间. 接触时间经过多次测量并取平均值 (表 2), 误差小于 2%.

表 2 接触时间

Table 2 Contact Time

	1	2	3	4	5	Average
Contact Time (ms)	0.4797	0.4758	0.4898	0.4734	0.4918	0.482

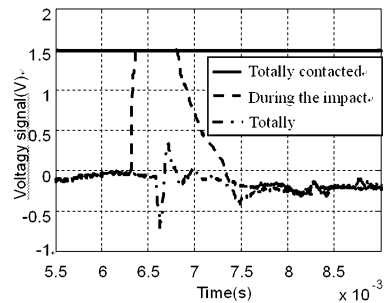


图 2 接触时间测量方法

Fig. 2 Method of Measuring Contact Time

3 碰撞的速度和加速度响应

3.1 碰撞速度响应

接触过程中柔性体碰撞点的速度切换条件是柔性多体系统接触动力学建模理论的重要研究对象. 文献[3]中在钢球-铝杆纵向碰撞的实验中只测量了钢球与铝杆自由端的速度响应, 杆上其他部位尤其是碰撞点附近的速度响应没有测量. 本文除了测量杆自由端的速度响应, 还以杆 2 上碰撞点为 x 轴坐标原点, 沿轴线方向为正方向, 分别测量 $x = 0.5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 99.5\text{cm}$ 处杆表面的速度响应. 图 3 为接触发生后杆 2 自由端在 2ms 内的速度响应的 10 次测量数据, 可以发现实验的重复性非常好, 速度响应的误差在 2% 以内.

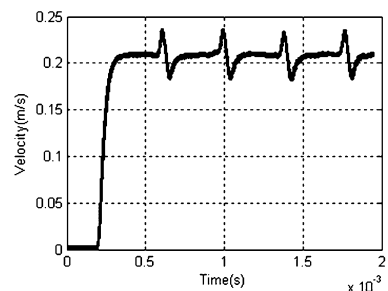


图 3 杆 2 自由端速度响应 10 次测量

Fig. 3 Velocity of the Free End of Rod 2 for 10 times

分别采用刚体假设模型, Hertz 接触模型, 柔性体模型数值模拟杆 2 自由端在接触过程中的速度响应, 如图 4 所示, 刚体假设和 Hertz 接触模型在处理柔性体之间的碰撞问题上并不适用。

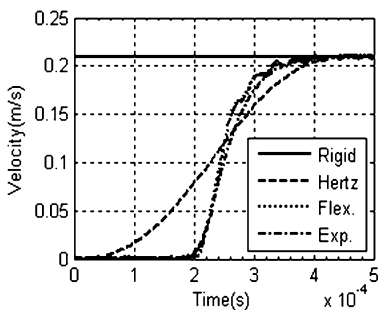


图 4 利用各种模型计算的自由端速度

Fig. 4 Comparison of different methods of the free end of rod 2

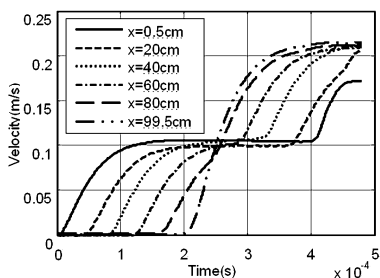


图 5 杆 2 上各点速度响应

Fig. 5 Velocity Response of Rod 2

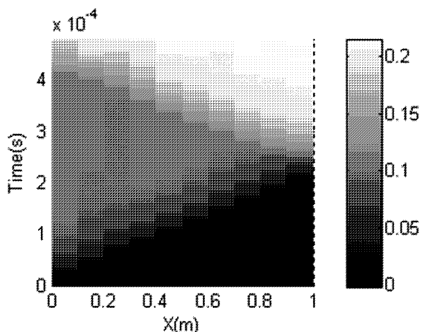


图 6 接触过程中的速度波现象

Fig. 6 Velocity Wave in Contact Time

将杆 2 上各点在接触时间内的速度响应放到同一个时间历程图内(图 5), 可以发现明显的速度波传播现象, 杆 2 上各点的速度由初始的静止, 根据到碰撞点的距离依次上升到 $v_1/2$ 附近, 当自由端的速度也到达 $v_1/2$ 附近时, 速度波经自由端面反射, 杆 2 上各点根据到自由端的距离再次上升. 自由端在两杆接触后经过 0.194ms 速度开始上升, 由此可计算速度波的波速 $c = 1\text{m}/0.194\text{ms} = 5.20\text{km/s}$, 一维铝杆弹性波的理论波速 $c^* = (E/\rho)^{1/2} = 5.09\text{km/s}$, 误差约为 2.16% 。

如图 6 所示, 用 x 轴表示各点位置, y 轴表示时间, 颜色深浅表示速度大小绘制三维图形, 可以清楚地观察到在接触过程中, 速度波沿 X 轴传播, 到达自由端后经自由端面反射的现象。

3.2 加速度响应

将碰撞速度响应对时间求导, 即得到碰撞的加速度响应, 同样以 x 轴表示各点位置, y 轴表示时间, 颜色深浅则表示加速度大小, 绘制三维图形(图 7), 同样可以明显观察到加速度波在接触过程中的传播现象和反射现象。

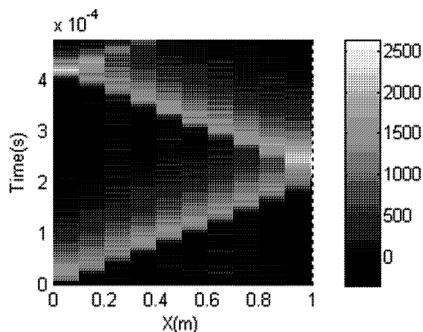


图 7 接触过程中的加速度波现象

Fig. 7 Acceleration Wave in Contact Time

4 碰撞点附近的应变响应

碰撞点的接触力测量一直是接触碰撞实验的重点和难点之一. 文献[6]在球杆碰撞实验中通过测量刚性小球的速度响应, 然后对速度响应进行数值微分得到加速度, 再与小球质量相乘得到冲击力; 文献[5]在球杆碰撞实验中, 分别通过测量柔性杆上一点的应变响应和自由端的速度响应来计算接触力; 文献[6]中利用压电式力传感器测量柔性梁碰撞的接触力. 这些实验中测量的接触力的准确性有值得商榷的地方. 然而在不改变构件结构或不影响碰撞点接触碰撞响应的前提下, 目前还没有直接测量碰撞点的接触力的方法。

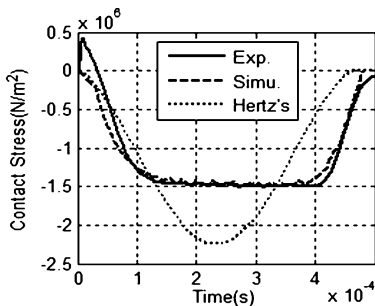


图 8 接触应力曲线

Fig. 8 Time History of Contact Stress

本文在碰撞点附近粘贴应变片,通过动态应变仪测量碰撞点附近的应变响应,桥路为半桥连接,使温度变化的影响得到补偿,导线为细漆包线,以减少对碰撞响应的影响.由于是低速碰撞,碰撞产生的变形较小,因此单次测量所得的应变受噪声影响相对较大,为降低随机噪声信号对应变响应的影响,对碰撞点附近的应变响应进行25次测量,并将所得的应变响应作平均.将应变响应乘以杨氏弹性模量即得到接触应力(图8),可以发现接触过程中,接触位置附近应力迅速到达峰值,并且在一段时间内维持大小不变,与利用赫兹碰撞理论计算的接触力曲线的单峰形状有明显不同,说明赫兹理论并不适用于柔性体之间的接触碰撞.

5 结论

对两圆柱柔性铝杆的纵向接触碰撞进行了实验研究,通过接触时间测量电路解决了如何确定碰撞的起始和终止时刻的问题.测量了杆上各点在接触过程中的速度响应和碰撞点附近的应变响应,通过实验结果与刚体假设模型和Hertz接触模型的计算结果的对比,说明Hertz接触模型不适用于柔性体之间的接触碰撞问题;通过对接触过程中杆上各点速度响应进行分析,揭示了柔性杆中弹性波的传播与反射现象,同时说明本文的实验方案具有可行性和合理性.

参 考 文 献

- 1 王建明,洪嘉振,王示,周学军. 柔性多体动力学实验研究. 宇航学报,1999,20(2),107~111 (Wang Jianming, Hong Jiazhen, Wang Shi, Zhou Xuejun. Experimental study on flexible multibody dynamics. *Journal of Astronautics*, 1999,20(2),107~111(in Chinese))
- 2 Rismantab-Sang J, Shabana A A. On the use of the momentum balance in the impact analysis of constrained elastic systems. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1990,112:119~126
- 3 Hu B, Eberhard P, Schiehle W. Comparison of Analytical and Experimental Results for Longitudinal Impacts on Elastic Rods. *Journal of Vibration and Control*, 2003,9(1):157~174
- 4 R Seifried, P Eberhard. Comparison of Numerical and Experimental Results for Impacts. *Eindhoven, Netherlands*, 2005:7~12
- 5 李敏,诸德超. 球杆碰撞问题的数值分析和实验研究. 北京航空航天大学学报, 2001,27(1):62~65 (Lin Min, Zhu Dechao. Analytical and experimental research of ball-bar impact under low velocity. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001,27(1):62~65(in Chinese))
- 6 沈凌杰,郭其威,刘锦阳,余征跃. 柔性梁接触碰撞的动力学建模和实验研究. 动力学与控制学报, 2007,5(2),147~152 (Shen Linjie, Guo Qiwei, Liu Jinyang, Yu Zhengyue. Dynamic modeling and experiment technique for a flexible beam with cylindrical contact. *Journal of Dynamics and Control*, 2007,5(2):147~152(in Chinese))

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXIBLE CYLINDER RODS IMPACTS*

Zhu Kun Hong Jiazhen Dong Fuxiang Yu Zhengyue

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The experimental research of the longitudinal impact between two flexible cylinder rods was investigated. In order to study the dynamics response during the contact process, the experiment setup of the impacts between two flexible bodies was designed, the contact duration was accurately measured according to the conductivity of aluminum, and the non-contact measurement for the velocity response of the flexible rod during the impact process was non-contact measured by the Laser Doppler Vibrometer. Furthermore the strain at the point near the contact region was implemented by the dynamic strain amplifier. The wave propagation in the flexible rod was revealed through the research. The feasibility and rationality of the experiment setup was verified.

Key words flexible rod, longitudinal impact, contact dynamics, experiment, elastic wave

Received 27 December 2008, revised 4 May 2009.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(10772113)