

卫星虚拟振动试验系统研究

刘 闯, 向树红, 冯咬齐

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 卫星虚拟振动试验可以预示试验结果, 为试验设计提供参考。文章首先对振动试验系统进行分析, 根据试验设备的不同和信号数据的传输规律, 将系统分为 5 个分系统; 研究各系统的特性, 确定其在虚拟试验系统中的仿真方法; 然后重点阐释台体系统和振动控制系统的计算机仿真方法; 最后将虚拟振动试验结果与实际振动试验结果进行对比分析, 结果显示两者基本一致。

关键词: 振动试验; 虚拟试验系统; 卫星; 仿真

中图分类号: V416.8

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)03-0248-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.03.012

1 引言

卫星振动试验是卫星研制过程中的重要环节, 但受到试验条件、试验对象、试验时间等的限制, 振动台试验并不能达到预期的目标。随着结构设计技术的发展, 振动台虚拟试验技术是弥补这些问题的一种有效措施, 该技术已逐渐成为应用研究的前沿课题^[1]。

卫星虚拟振动试验系统是以本单位常用的振动台实物作为对象, 振动台实物系统中的各主要部件都在计算机中建立模型, 最终形成一个机械、电子、力学和控制等多系统、多信号协同仿真的虚拟试验系统。利用该系统结合不同的卫星分析模型, 可以进行响应的虚拟振动试验, 虚拟试验的结果可为试验设计提供参考。

2 振动试验系统分析

振动台系统的工作方式见图 1, 具体流程是: 试验时计算机控制系统输出的驱动信号经功放系统放大后输入振动台, 使台面产生振动, 振动台作用力由夹具传到卫星。振动控制点上的响应由加速度传感器产生电荷信号, 经过电荷放大器反馈到计算机, 利用振动控制系统, 采用 4 点平均控制方法, 进行比较和修正, 使驱动信号在控制点上产生的加速度响应符合试验条件的要求。对于双振动台垂直

方向振动试验, 计算机控制系统输出的驱动信号还需要经过电流相位/幅值同步控制系统来使两个振动台相位/幅值同步。

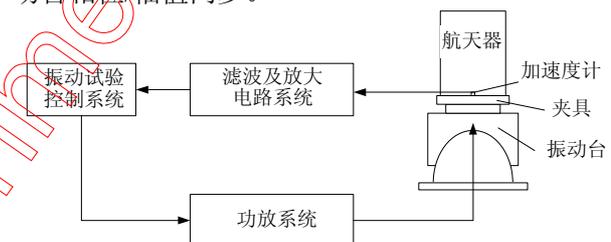


图 1 振动试验系统

Fig. 1 The vibration test system

2.1 功放系统

功放系统是振动台台体的配套设备, 也是振动台的动力源。它将来自控制系统的小功率信号放大, 供给动圈足够的、不失真的功率。功放系统接收控制系统输出的电压信号, 输出电流信号来驱动振动台台体运动。功放系统的传递函数是采用由功放输出到振动台台体的电流与控制系统输出给功放系统的电压的比值来计算。图 2 分别代表承力筒试验和某卫星试验计算得到的功放系统传递函数。由两个图比较可以看出, 不同结构的传递函数基本相同, 说明功放系统的传递函数与试验件无关。不同量级试验的传递函数形状基本相同, 反映在对数坐标系下只是高度不同, 说明其只存在一个常系数的差别。经查阅试验记录, 在不同量级试验时,

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 总装备部预先研究项目 (项目编号: 513200903)

作者简介: 刘闯 (1975-), 男, 博士学位, 高级工程师, 从事动力学环境试验及虚拟试验研究。E-mail: liuchuang@tsinghua.org.cn.

功放所加的增益（即放大倍数）不同，在传递函数上表现为高度的不同。所有的传递函数在 5~10Hz 有缓慢的爬坡，在 60~70Hz 附近有峰值，这是功放系统本身的特性。

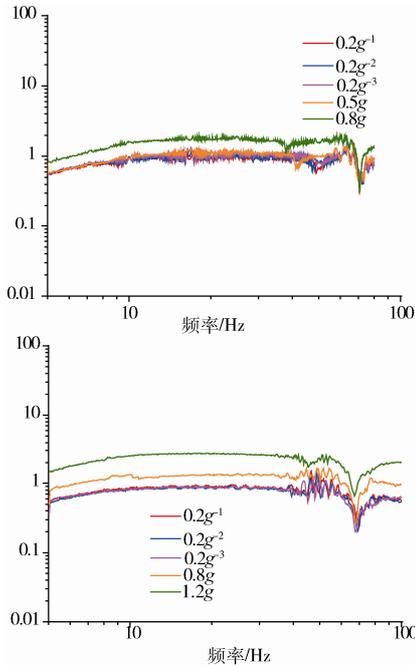


图 2 功放系统传递函数

Fig. 2 The transfer function of the power amplifier

2.2 振动台系统

振动台的台体是将电能转换成机械能的转换器，它由运动部件、磁路系统、支撑弹簧、导向机构等组成。其工作原理是：在直流励磁线圈与铁芯形成的恒定磁场中，驱动线圈内的交变电流使线圈产生一个交变的电磁力，从而激起运动组件的振动。电磁力的大小与磁场磁感应强度、载流导线的电流及导线在磁场中的有效长度成正比。

图 3 是具有代表性的承力筒试验和某卫星试验计算得到的振动台系统传递函数。当振动试验的对象不同时，台体系统的传递函数会产生变化。

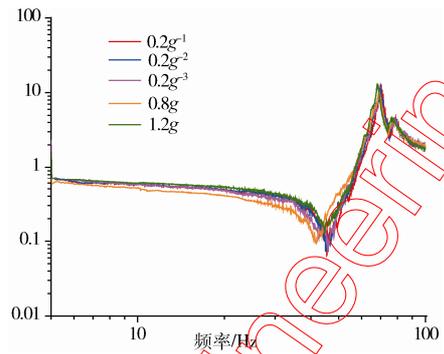
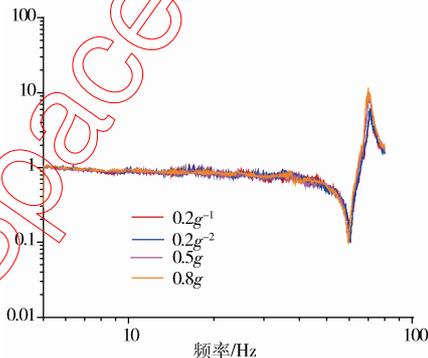


图 3 振动台系统传递函数

Fig. 3 The transfer function of the shaker

2.3 滤波及放大电路系统

滤波及放大电路系统将安装在台面上的加速度传感器产生的电荷信号经过电荷放大器适调放大输入给振动控制仪。滤波及放大电路的传递函数采用由测量系统测得的控制点响应与控制系统测得的响应值比值来计算。

图 4 是具有代表性的承力筒试验和某卫星试验计算得到的滤波及放大电路传递函数。由图 4 可以看出，传递函数基本为常值 1，都在结构共振时刻有下凹，同一结构的下凹幅度基本相同，不同的结构差别较大。

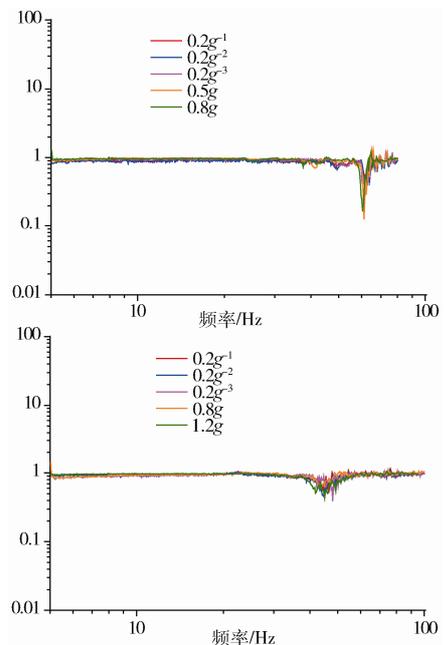


图 4 滤波及放大电路传递函数

Fig. 4 The transfer function of the filter and amplifier

2.4 振动控制系统

在双振动台垂直方向激振中，两个振动台之间通过扩展台面相连接，采用基于多振动台动框电流

移相的力同步控制方法,即通过电动振动台动框电流反馈同步控制,使各振动台输出相同的激励力。该系统的控制主要由两大部分组成:一个是数字振动控制系统;另一个是电流相位幅值同步控制系统。

由数字振动控制器、双振动台等设备组成的大闭环主要控制航天器振动试验的输入量级。试验中一般采用4点平均控制方法。平均控制的幅值由公式

$$A_1(f) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 A_i(f) \quad (1)$$

计算,式中: $A_i(f)$ 为第*i*点的加速度幅值; $A_1(f)$ 为4点平均的加速度幅值;1点是实际上并不存在的虚拟控制点。

数字振动控制器先根据试验夹具上均匀布置的4个控制加速度传感器的响应按公式(1)进行幅值平均,将求得的平均响应幅值与参考值进行比较并计算出误差值;然后根据系统的传递函数、压缩速度、扫描速率等参数按幅值修正公式计算出新驱动信号的幅值;最后按正弦驱动信号生成机理生成离散的正弦波数据列表并依次送入D/A数模转换器并经滤波器的平滑处理变为一路连续的驱动信号。该路驱动信号经过电流相位幅值控制器分成两路驱动信号后经功率放大器驱动双振动台台面做往复振动。

由电流相位幅值控制器、霍尔效应传感器等组成的小闭环主要修正两路驱动信号的幅值和相位。该实时闭环控制系统利用功率放大器中由霍尔效应电流传感器、电阻器和电源组成的电流传感器装置提供与功放输出电流成正比的电压信号。电压信号反馈给控制器形成闭环同步控制。在正弦扫描试验模式下,相位幅值同步控制器对两振动台动框电流的反馈信号进行检波(幅值和相位),并将来自数字振动控制系统的驱动信号之一移相和调幅,直至使两个振动台动框电流的相位差和幅值差减至最小,达到双振动台输出同步的目的。在随机试验模式下,相位幅值同步控制器处于旁通状态,控制不起作用。

2.5 振动试验系统分析总结

振动试验系统可分为振动控制系统、功放系统、台体系统、加速度传感器、滤波及放大电路系统。

各系统的主要部件、功能以及在各系统间传递的信号分析如图5所示。从图5可以看出,除台体系统外,其他4个系统中都是对电子信号的处理以及联系;而台体系统是将驱动电流转换为电磁力,其虚拟设计是一个针对台体系统的强迫响应分析问题。



图5 振动试验系统划分及传递信号

Fig. 5 The subsystems and the transfer of signals

3 虚拟振动试验系统设计

3.1 总体方案设计

虚拟振动试验系统中,与电子信号相关的振动控制系统、功放系统、加速度传感器、滤波及放大电路系统均用MATLAB软件进行仿真模拟,而台体系统的强迫响应分析则采用LMS Virtual.Lab来进行。

MATLAB软件的Simulink模块是用来进行动态系统建模、仿真与分析的集成化环境,它能够进行连续系统、离散系统或者混合系统的建模与仿真,并且系统可以是多速率的系统,即系统的不同部分具有不同的更新速率。MATLAB软件的Simulink模块非常适合振动系统中的电子信号仿真及连接。

LMS Virtual.Lab软件中的Standard Motion是一个对机械系统真实运动和载荷进行仿真的完整集成解决方案。它能够建立和模拟多刚体/柔体机械系统,改进它们的动力学性能,预测部件和系统的载荷,以便用于结构分析、振动噪声模拟、疲劳寿命预测和其他分析。

LMS Virtual.Lab Standard Motion 提供与

MATLAB 软件的接口, 可以将结构的整体输出为 MATLAB 的 .m 文件, 直接作为 Simulink 的一个模块在整个流程中进行分析。

LMS Virtual.Lab 软件与 MSC.Patran/ MSC.Nastran 软件相结合可以完成台体系统的强迫响应分析以及与控制系统的连接。

3.2 振动控制系统仿真

振动控制系统的仿真是整个振动系统仿真中的核心。振动控制系统实质上是一个自动调整输出信号频率和幅度以实现多种振动参数自动控制的信号源。按其功能, 它可以分为正弦振动控制仪和随机振动控制仪两种类型。利用 MATLAB 在电学仿真、控制、信号处理等方面的模块, 结合正弦振动控制和随机振动控制的理论来实现振动控制系统的计算机仿真。

正弦振动控制系统模块的工作流程见图 6。首先进行参数设置, 包括试验的量级、试验的频率范围、压缩速度、试验控制曲线等。然后产生一个较小的驱动信号, 根据系统的传递函数计算出系统的响应, 并不不断地迭代修正, 直至得到启动系统试验设置量级的驱动信号。开始试验后, 发出驱动信号, 获取系统的响应信号, 计算下一点的频率值, 比较该频率与试验的最高频率, 来判断试验是否结束。如果试验未结束, 则根据正弦振动控制的原理, 比较扫频条件和控制点响应, 生成新的驱动信号, 继续试验。当频率达到最高频率时, 试验结束。

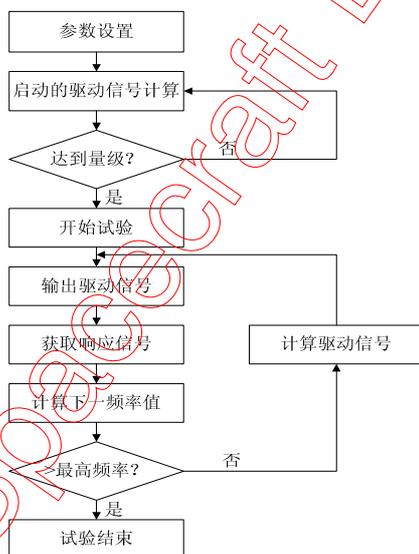


图 6 正弦振动控制模块工作流程图

Fig. 6 The flow chart of the sinusoidal vibration control system

3.3 台体系统仿真

振动台台体系统仿真的重点是强迫响应分析, 采用逐级建模逐级修正的方法来进行, 通过局部或部件的动态试验、整个系统的理论分析与综合, 建立正确的仿真系统数学模型。该系统仿真采用子结构试验建模技术, 把整个系统试验建模的复杂问题化为较为简单一些的子结构试验建模的问题。根据振动台系统结构的自然状态, 将系统划分为若干个子结构, 对每个子结构进行初始建模和模态试验, 用试验数据修改验证数学模型。然后将验证好的数学模型组装成系统的数学模型, 对整个系统进行综合分析, 在计算机上仿真。对每个子结构的试验建模的技术包括如下 4 个步骤:

- (1) 子结构初步建模;
- (2) 子结构动态试验;
- (3) 分析与试验的相关性;
- (4) 子结构数学模型修改。

从研究的手段和过程上看, 台体系统的仿真可以大体上划分为两个部分: 一是对结构的简化和建立有限元模型, 并保证模型本身数值特性的正确; 二是根据实际试验数据对理论模型进行修正, 使模型能够反映实际结构真实的动力学性质, 从而得到正确的计算结果。

根据振动台试验系统的具体结构将子结构试验建模技术变为逐级结构试验子系统建模技术, 并进一步形成逐级结构振动台试验子系统仿真技术。由小系统到大系统, 把整个系统分为若干级结构, 每一级结构都包含上一级结构, 形成逐级结构的特点。对每一级结构进行仿真时, 都在保持上一级结构仿真模型不变的基础上, 对本级增加结构的数学模型进行诊断与修改, 并用试验数据进行验证, 以形成本级结构的仿真模型。这样, 就把振动台试验的大系统仿真的复杂问题化为若干个小系统来研究。图 7 是逐级建模、逐级修正的振动台建模过程的示意图。

利用 LMS Virtual.Lab 软件, 读取修正过的振动台有限元模型及其模态数据, 对各部件进行组装后施加时域激励, 来分析系统的响应。

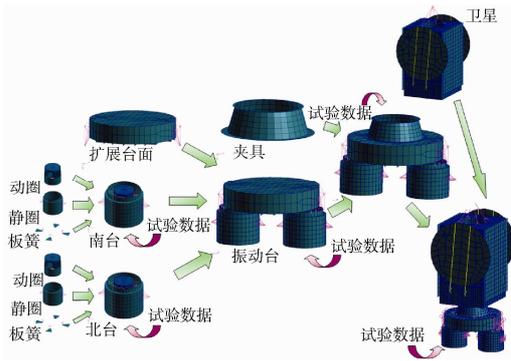


图 7 振动台建模过程示意图
Fig. 7 The flow chart of the shaker modeling

3.4 振动试验各系统联合控制仿真方案

根据建立的分系统(功放系统、加速度传感器系统、滤波与放大电路系统的计算机仿真方法比较简单,不再详细阐述),将这5部分联合仿真即构成了整个振动试验系统的仿真分析。结合总体方案,各系统、各软件在整个系统中的联系和功能如图8所示。

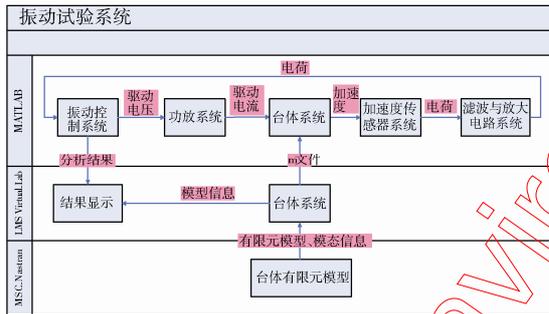


图 8 振动试验各系统联合仿真结构图
Fig. 8 The structure of the virtual vibration test system

MATLAB 作为仿真分析的平台,各系统在其中建立,通过中间传递量进行连接,完成闭环的系统。分析处理的结果可以反映到 LMS Virtual.Lab 中来观察。LMS Virtual.Lab 有多种结果查看方式和数据处理方法,必要时还可以自行开发有针对性的工具来进行结果分析,最终完成虚拟振动试验系统。

仿真分析的结果还需要与试验结果进行对比,根据试验数据对系统的模型进行修正,使系统达到技术指标的精度需求,分析计算结果对试验具有指导意义。

4 振动台空台虚拟试验分析

应用卫星虚拟振动试验系统进行振动台空台 0.2g 仿真试验,试验条件为 5~500 Hz,控制点平均加速度响应 0.2 g (见图 9)。根据试验条件输入

系统计算出振动台空台南北台激励力谱计算曲线(如图 10 所示),将得到的控制曲线与试验的控制曲线对比(如图 11 所示),可看出二者比较接近。

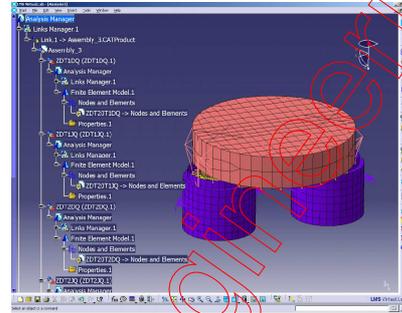


图 9 400kN 振动台空台试验系统示意图
Fig. 9 The virtual vibration test system of 400 kN shaker

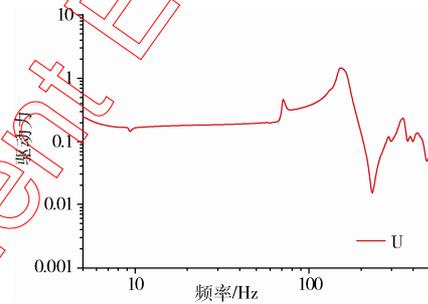


图 10 激励力谱计算曲线
Fig. 10 The computational curve of the driver

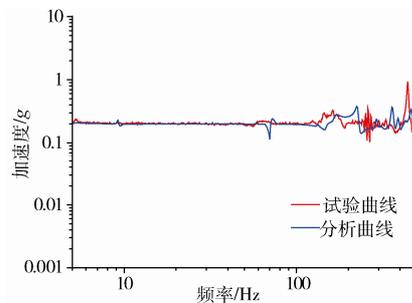


图 11 控制曲线与试验数据比较
Fig. 11 The control curves of the virtual testing vs. the real testing

图 12、图 13 是振动台扩展台面上的测点 a15、a19 仿真虚拟试验结果与真实试验加速度响应曲线的对比,其中 old 为开环分析结果^[4],new 为本文的闭环分析结果。从图中可以看到,在低频段计算曲线与试验曲线比较一致,分析计算得到 5~100 Hz 均方根误差均小于 15%;在高频段计算曲线与试验曲线相比误差较大。闭环仿真的结果在低频段的误差较开环段有所增加(这是考虑到了功放的传递特性所引入的),误差在 15% 以上的水平;而高频段的误差与开环方法比较则有很大的减小,说明虚拟试验方法在高频段有很大的改进。

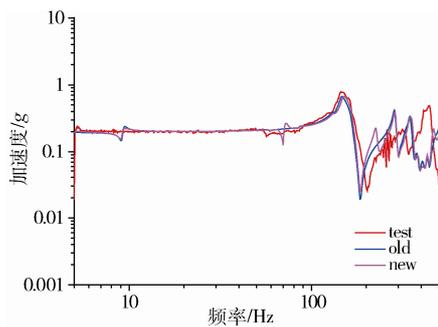


图 12 扩展台面 a15 虚拟试验与真实试验加速度响应曲线比较

Fig. 12 The a15 acceleration response curves of the virtual testing vs. the real testing

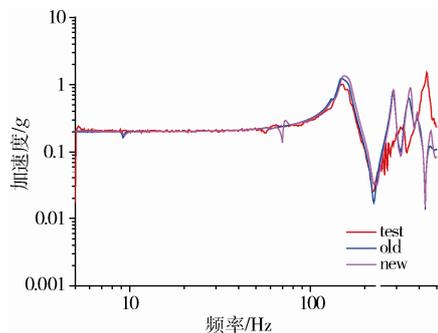


图 13 扩展台面 a19 虚拟试验与真实试验加速度响应曲线比较

Fig. 13 The a19 acceleration response curves of the virtual testing vs. the real testing

5 结束语

通过以上的研究与分析可以看出,虚拟振动试验系统是一个复杂的多系统多软件的协同仿真分析系统。闭环虚拟试验系统在不改变有限元分析模型、满足技术指标的前提下,仿真分析结果在高频段有很大的改善,对试验分析有效。利用本文的方法建立的虚拟振动试验系统分析试验的结果与真实试验结果更加接近,可以对卫星进行虚拟振动试验,虚拟试验的结果可为试验设计提供参考。

下一步将在已经建立的虚拟振动试验系统基础上开发不同卫星平台的虚拟试验平台,搭建更加完备完善的虚拟试验平台,更好地为振动试验服务。

参考文献(References)

- [1] 向树红,晏廷飞,邱吉宝,等. 40 吨振动台虚拟试验仿真技术研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 375-381
- [2] 向树红,于丹,晏廷飞. 卫星动力学虚拟试验的几个关键技术[J]. 航天器环境工程, 2002, 19 (4): 13-22
- [3] 柯受全,等. 卫星环境工程和模拟试验(下册)[M]. 北京: 宇航出版社, 1996
- [4] Xiang Shuhong, Liu Chuang. Virtual vibration test and verification for the satellite[C]//The 14th International Congress on Sound and Vibration, 2007

技术沙龙

激光驱动碎片发射速度国内首破 10 km/s 大关

近日,北京卫星环境工程研究所研发中心成功利用波长 1064nm、脉宽 10 ns 的激光器将厚度 5 μm 、直径 1.1 mm 的铝飞片发射,速度达到 10.4 km/s。这一结果打破了国内单个微米级空间碎片发射速度徘徊在 6 km/s 左右的局面,在国内首次突破飞片发射速度 10 km/s 的大关。

与等离子体驱动技术、静电粉尘驱动技术等其他微小飞片驱动技术相比,激光驱动飞片技术具有以下优势:(1)能单次发射单个粒子;(2)设备简单,成本低,容易与测试设备接口;(3)无化学污染,不影响试验过程中的参数测量。激光驱动飞片技术已经成为模拟微流星体/空间碎片对航天器外露材料/部件超高速撞击和累积损伤效应、开展撞击引起的性能退化、进行航天器在轨寿命预估和空间碎片防护的重要技术手段。其中,飞片速度是衡量激光驱动飞片技术水平的关键参数之一。

研究人员从理论上系统分析了输出激光束波长、能量、脉宽、聚焦光斑大小、激光光束的时空分布及飞片靶的材料、厚度、结构、自身强度以及与基底的结合力等诸多因素对激光驱动飞片速度的影响,找到了提高飞片速度的主要途径。通过克服激光脉冲到达之前的“预触发”问题,提升了激光系统的光束性能;采用离子束溅射法制备飞片靶,并在铝膜与基底之间加镀了过渡层,从而提升了激光的耦合系数及铝膜与基底之间的附着力。

(代福 供稿)