

光纤激光精密位移调整技术实验研究

王东平 吴志会 倪明阳 李显凌

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为了将激光弯曲成形技术应用于精密位移调整领域实现亚微米精度的位移调整,自行设计和搭建了激光微位移调整与测量平台,将光纤激光通过线性透镜和扫描振镜聚焦在不锈钢薄板上作匀速扫描运动,实时监测加工过程样件自由端的输出位移。建立了样件激光微位移调整模型,在此基础上研究改变激光功率、扫描速度、光束照射位置以及离焦量等参数对调整位移的影响。结果表明,样件通过该平台实现了亚微米级重复精度的精密位移调整,改变激光照射位置是精确改变调整位移的首选;通过优化工艺参数,降低了激光加工过程中样件表面的损伤。

关键词 测量;微位移调整;激光弯曲成形;光纤激光;工艺参数

中图分类号 TN249;TG665 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.091201

Experimental Studies on Precision Laser Displacement Adjustment using Fiber Laser

Wang Dongping Wu Zhihui Ni Mingyang Li Xianling

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to achieve a sub-micron scale displacement adjustment in the field of precision adjustment using the laser bending technology, a laser micro displacement adjustment and measuring platform is built. A fiber laser is focused on the metal sample using $f-\theta$ lens and moves at constant velocity in a line direction through a galvanometer. The output displacement of the sample's free end is measured in real time. A simple closed-form model of laser micro displacement adjustment is established. The effect of laser power, scanning velocity, defocus distance and position of laser irritating on the output displacement is investigated. The experimental results show that an adjustment displacement with submicron scale repeatability on the metal plate sample can be realized in this platform and the best choice to achieve precision adjustment is to adjust the position of laser irritating. An adjustment with little damage to the sample surface is achieved through optimizing the process parameters.

Key words measurement; micro displacement adjustment; laser bending; fiber laser; process parameters

OCIS codes 120.4880; 140.3460; 140.3615; 350.3390

1 引言

精密位移调整技术在精密光学仪器制造和装调领域有着广泛应用,目前该领域精密位移调整采用的主要方法是手动微分头调节和压电陶瓷驱动器调节。微分头调节分辨率仅在微米级,适用于普通分辨率的场合;压电陶瓷驱动器分辨率高,但复杂的控制系统使其成本提高^[1]。激光弯曲成形技术作为一种柔性精密加工技术近年来获得广泛关注,国内外学者在成形机理、模型建立和实验方面开展了多方面研究^[2-9],并且在船舶制造、微电子等领域获得一定应用^[10-13]。此前的文献报道中,研究者普遍采用CO₂激光或Nd:YAG激光作为光源进行样件的激光弯曲,受限于激光工艺参数稳定性和微变形监测等难题,应用集中在常规精度的弯曲成形,如汽车车门隔板成形、船用钢板的弯曲^[10,12],对于亚微米级精度的位移调整方面的应用国内尚无相关文献报道。另外,针对激光成形对样件表面带来的损伤,此前虽有文献报道但没有提出相应的解决办法^[10]。

收稿日期: 2014-03-04; 收到修改稿日期: 2014-04-03; 网络出版日期: 2014-08-18

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 王东平(1986—),男,硕士,主要从事光机结构设计与装调方面的研究。E-mail: wdp1860@126.com

近年来光纤激光器获得迅速发展,相比传统激光器光纤激光具有光束质量高、接近基模的优点^[14],弯曲成形过程的工艺参数更为稳定。因此,本文选择光纤激光器作为加工光源,光谱共焦位移传感器作为位移实时监测工具,对金属薄板样件自由端的变形位移与激光功率、扫描速度、激光离焦量以及激光照射位置的关系进行了实验研究,并与建立的微位移调整模型进行了比较,找到了一种提高调整位移精度和减小样件表面损伤的方法,最终在样件上获得了亚微米级重复精度的输出位移。该技术可广泛应用于光学仪器的精密装调,如小镜头的微焦距调整和对准。

2 微位移调整原理与模型

如图1所示,小镜头的支撑臂可简化为一个悬臂梁,其一端固定,另一端进行微位移调整(微焦距调整)。如图2所示进行微位移调整时,激光在悬臂中间沿垂直纸面的方向做直线扫描运动。根据Vollersten基于温度梯度机理提出的薄板弯曲两层模型^[2],弯曲角度 θ 表示为

$$\theta = 3 \times \frac{\alpha}{\rho c_p} \times \frac{PA}{v} \times \frac{1}{t^2}, \quad (1)$$

式中 α 为热膨胀系数, ρ 为材料密度, c_p 为比热容, P 为激光功率, A 为表面吸收率, v 为激光扫描速度, t 为样件厚度。一次照射样件末端输出的变形位移 h 表示为

$$h = (L - \Delta s_i) \tan \theta, \quad (2)$$

式中 L 为激光初始照射位置到自由端的距离, Δs_i 为多次扫描中第 i 次扫描时激光距离初始位置的平移量。

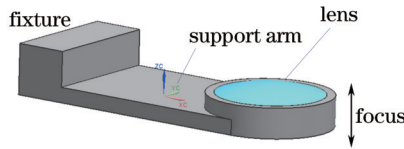


图1 用于微焦距调整的小镜头结构图

Fig.1 Structure schematic of small lens used for micro focal distance adjustment

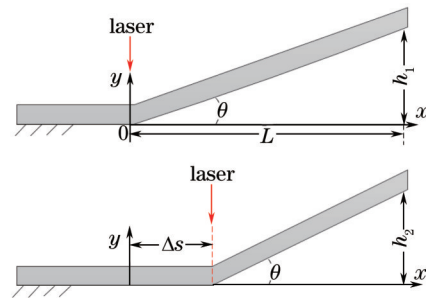


图2 激光多次扫描位移调整原理图

Fig.2 Schematic of multiple laser adjustment

若样件进行多次位移调整,金属薄板样件的几何尺寸、材料特性参数、表面吸收率是一定的,这些工艺常数用 k 表示,同时考虑加工过程弯曲角度极小,经过 n 次加工最终自由端获得的位移表示为

$$h_{\text{total}} = \sum_{i=0}^n k(L - \Delta s_i) \tan \frac{P}{v} \approx k \sum_{i=0}^n (L - \Delta s_i) \cdot \frac{P}{v}. \quad (3)$$

(3)式即为多次照射的调整位移输出模型,通过多次累积调整可实现大行程的精密位移调整。下文将通过实验研究确定模型中各变量对调整位移精度的影响,以获得高重复精度、表面无损伤的激光精密位移调整工艺参数。

3 实验装置和样件

3.1 实验装置

实验在自主搭建的激光微位移调整与测量平台上进行,装置及原理图如图3所示。实验系统包括50 W连续掺镱光纤激光器,激光扫描与聚焦系统,共焦色差位移传感器,样件夹具以及精密升降台。选用的光纤激光器工作波长为1064 nm,光束质量因子小于等于1.1,结合 $f-\theta$ 振镜光学扫描系统可获得小于100 μm 的光斑直径,激光微弯曲加工过程中,样件自由端的变形量监测采用法国STIL公司的ENDO1.2光笔型光谱共焦位移传感器,轴向分辨率小于0.1 μm ,可实现亚微米级高精度非接触位移测量。

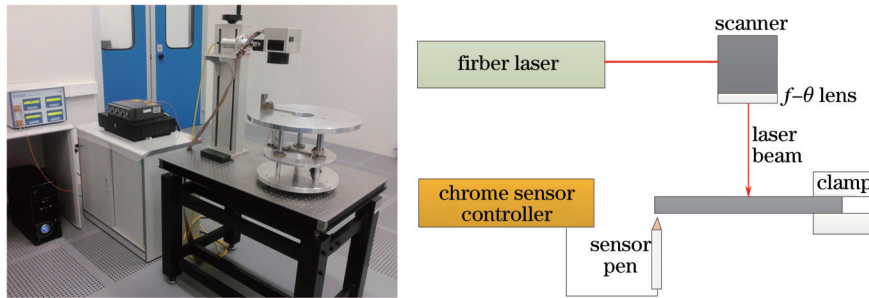


图3 实验装置及其原理图

Fig.3 Schematic of the experimental setup

3.2 实验样件

实验样件材料为不锈钢304(1Cr18Ni9),样件包括夹持区、激光照射区、测量区三部分,激光照射区长10 mm,宽5 mm,厚0.5 mm,其他基本几何尺寸如图4所示。

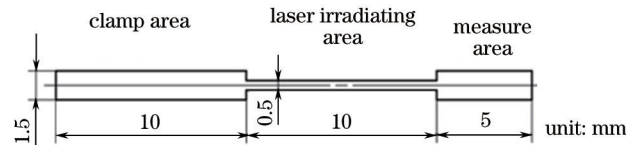


图4 金属薄板样件几何尺寸

Fig.4 Dimensions of metal thin plate sample

4 结果与讨论

4.1 激光功率对调整位移影响

实验中,保持激光扫描速度为100 mm/s不变,改变光纤激光器输出功率 P ,获得样件调整位移 h 随 P 变化的规律。当 $P \leq 7.5$ W时,样件在瞬间发生弹性变形后迅速回弹,总体不发生塑性变形,如图5(a)所示。这表明微弯曲条件下激光位移调整存在激光最小输入功率阈值 P_m 的限制,只有在功率阈值之上才能输出变形位移,如图5(b)所示; $P > 7.5$ W时,随着功率的增大, h 由0开始随功率逐渐增大。对 $P > 8$ W的数据进行分析,如图6所示, h 与 P 近似呈线性关系,线性拟合残差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 之间。

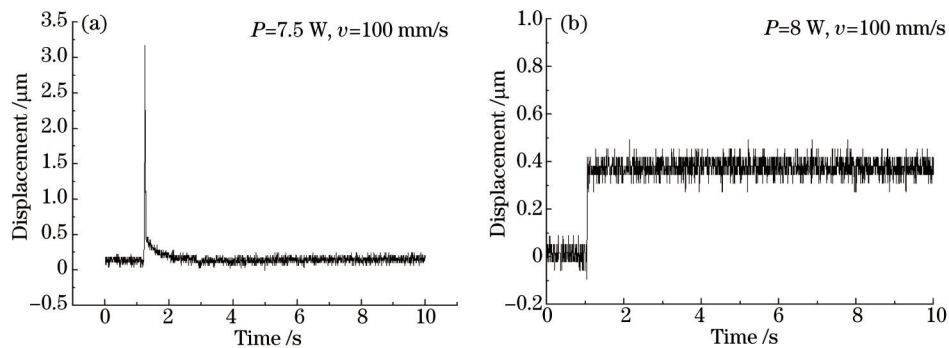


图5 引起变形的激光功率阈值附近样件输出位移。(a) 功率小于阈值;(b) 功率大于阈值

Fig.5 Output displacement near the threshold of the laser power. (a) Less than the power threshold; (b) greater than the power threshold

4.2 扫描速度对调整位移的影响

图7表示调整位移 h 与激光扫描速度 v 的关系。在 $P=20$ W的工艺参数下, h 随着 v 的增大而减小,对测量得到的数据点拟合: h 与 v 呈近似反比关系,两者关系与(3)式模型描述相近,拟合残差在 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 之间。改变扫描速度 v 可作为微米级精度位移调整的一个选择。

4.3 离焦量对调整位移的影响

依据高斯光束变换的基本规律^[15],聚焦光斑直径 d 和焦深 D_F 可分别表示为

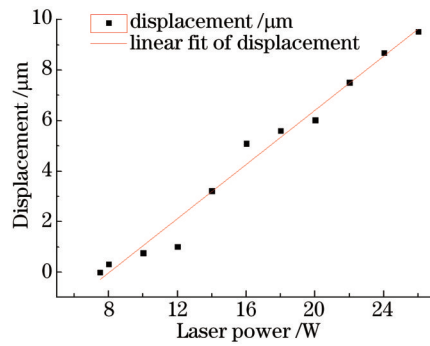


图6 调整位移与功率的关系

Fig.6 Relationship between the laser-adjusting displacement and the laser power

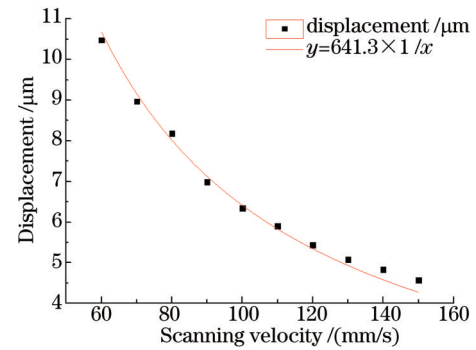


图7 调整位移同扫描速度的关系

Fig.7 Relationship between the laser-adjusting displacement and the laser scanning velocity

$$d = \frac{p\lambda M^2 f}{D}, \quad (4)$$

$$D_f = \frac{\pi d^2}{2\lambda}, \quad (5)$$

式中 p 为衍射校正因子, λ 为激光波长, f 为聚焦镜焦距, M^2 为光束质量因子, D 为聚焦前激光光束直径, 取 $p=1.5$, $\lambda=1064 \text{ nm}$, $f=160 \text{ mm}$, $M^2=1.1$, $D=4.8 \text{ mm}$, 计算得出聚焦光斑直径 d 约为 $65 \text{ }\mu\text{m}$, 焦深 D_f 约为 6 mm 。

对调整位移 h 与激光离焦量的关系进行研究。如图8所示, 在激光功率 $P=14 \text{ W}$ 、扫描速度 $v=100 \text{ mm/s}$ 的工艺参数下, h 随离焦量的增大先增后减, 在焦平面上下呈马鞍形。 h 随离焦量变化的规律相对复杂, 无法拟合简单表达式, 因此离焦量不适合作为位移精确调整的变量参数。

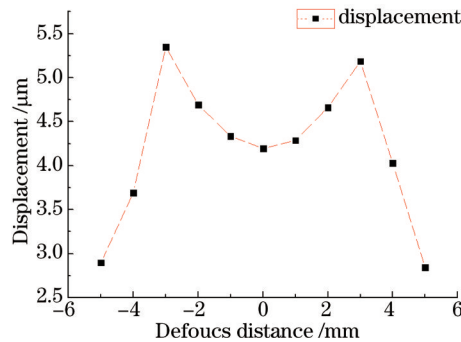


图8 调整位移与激光离焦量的关系

Fig.8 Relationship between the laser-adjusting displacement and the defocus distance

4.4 激光照射位置偏置对调整位移的影响

根据(3)式所示位移输出模型, 输出位移 h 同激光相对初始位置的平移量 Δs 呈线性关系, 对此进行相关实验研究。在激光功率 $P=20 \text{ W}$ 、扫描速度 $v=100 \text{ mm/s}$ 的工艺参数下, 以 0.3 mm 的增量移动激光照射位置, 获得调整位移 h 与 Δs 的关系。如图9所示, h 随着 Δs 的增大而减小, 两者呈良好的线性关系, 线性拟合残差在 $\pm 0.04 \text{ }\mu\text{m}$ 之间, 因此对于亚微米级高精度的微位移调整, 改变激光照射位置、多次扫描是首选。

4.5 工艺参数稳定性对调整位移重复精度的影响

上文研究了调整位移随单个激光工艺参数变化的规律, 调整位移的重复精度则取决于这些工艺参数稳定性的综合作用结果。将所有工艺参数的波动一起考虑在内, 对同等工艺参数条件下样件位移调整的重复精度进行测试。如图10所示, 在激光功率 $P=20 \text{ W}$ 、扫描速度 $v=100 \text{ mm/s}$ 的工艺参数下, 对5次扫描获得的输出位移进行统计分析。结果表明, 5次加工获得的调整位移最大偏差为 $0.09 \text{ }\mu\text{m}$, 标准偏差为 $0.04 \text{ }\mu\text{m}$ 。这表明采用光纤激光进行微位移调整, 位移调整的重复精度在亚微米级。

4.6 样件表面损伤控制

一般情形下, 激光弯曲成形过程由于激光能量的破坏, 样件表面热影响区会有一定的表面损伤, 若重复加工同一位置表面损伤会加剧, 从清洁和稳定角度考虑, 表面损伤对精密光学仪器方面的应用是不利的。本

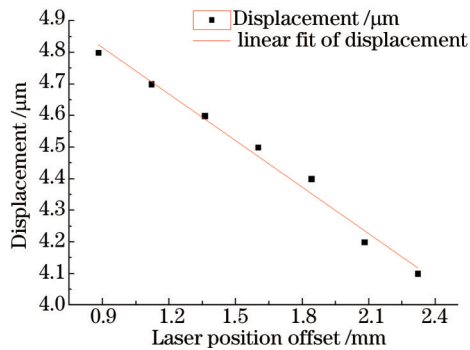


图9 调整位移与激光平移量关系

Fig.9 Relationship between the laser-adjusting displacement and the laser position offset

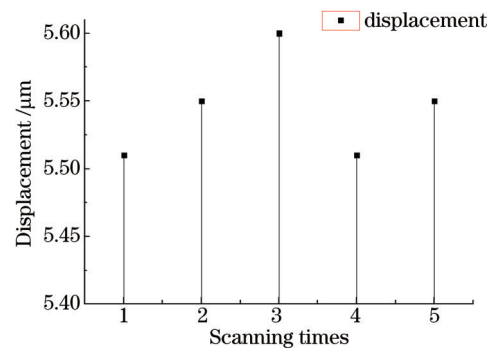


图10 调整位移重复精度测试

Fig.10 Repeatability of laser-adjusting displacement

文采用间隔一定距离、多次扫描的方法来减小表面损伤。同时在离焦实验中发现,采用相同激光工艺参数,选择离开焦平面一定距离进行加工,样件热影响区内表面损伤会减轻,离焦量大于3 mm时样件表面的损伤基本肉眼无法识别。采用白光干涉仪(WLI)对离焦实验中样件表面形貌进行进一步观测。图11(a)显示在焦平面上加工的样件表面有明显的深痕,图11(b)显示离焦3 mm加工的样件表面损伤有明显下降,图像上已观察不到明显的激光加工痕迹。因此,对于微位移调整,可采用合适的离焦量减小激光照射对样件的损伤。

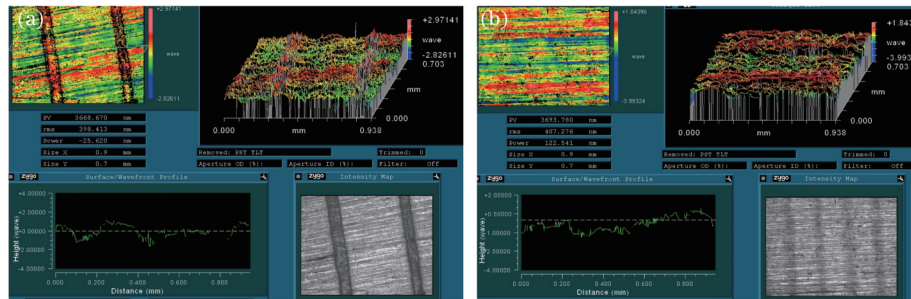


图11 样件激光加工后表面热影响区形貌观测。(a) 离焦0;(b) 离焦-3 mm

Fig.11 WLI image of sample's heat affect zone after laser adjustment. (a) Defocus of 0; (b) defocus of -3 mm

5 结论

采用光纤激光在金属薄片样件上进行了精密位移调整技术实验研究,验证了建立的样件微位移调整模型的正确性,获得了输出位移随模型中各变量变化的规律。结论如下:

- 1) 采用光纤激光在0.5 mm厚不锈钢薄片样件上实现了0.1 μm 重复精度的微位移调整,最小调整位移在亚微米级,今后的一个研究方向是通过闭环反馈控制来实现更高精度位移快速调整,实现激光微位移调整技术在位移驱动器方面的应用。
- 2) 调整位移 h 随激光功率 P 的增大而增大,随扫描速度 v 和激光相对初始位置的平移量 Δs 的增大而减小,其中 h 同 Δs 的线性拟合残差在 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 之间,是三个变量中最小的,可作为精确改变位移调整量的首选变量。
- 3) 选择离开焦平面3 mm以上的区域进行多次间隔扫描,可保证激光加工过程中样件表面几乎不发生损伤。

参考文献

- 1 Litao Qi, Yoshiharu Namba. Precision laser adjustment using CW diode laser[J]. Precision Engineering, 2011, 35(1): 126-132.
- 2 Vollertsen F. Mechanisms and model for laser forming[C]. Proceeding of the Laser Assisted Net Shape Engineering, 1994, 345-359.
- 3 Yang Bingbing, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Experiments on laser bending of stainless steel-carbon steel laminated

- sheet[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091403.
- 杨冰冰, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢碳钢层合板激光弯曲试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091403.
- 4 Ding Lei, Liu Huixia, Wang Hejun, *et al.*. Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet metal laser forming with semiconductor laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2143-2148.
- 丁磊, 刘会霞, 王鹤军, 等. 铝锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2143-2148.
- 5 Yau C L, Chan K C, Lee W B. A new analytical model for laser bending[J]. *Laser Assisted Net Shape Engineering*, 1997, 2: 357-366.
- 6 Cai Yougui, Wang Xiufeng, Chen Guangnan, *et al.*. Experiment of sheet metal on laser bending[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 154-157.
- 蔡友贵, 王秀凤, 陈光南, 等. 板料激光弯曲试验[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(2): 154-157.
- 7 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical and experimental study on the laser micro-bending process[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 276-280.
- 刘杰, 孙胜, 管延锦. 微尺度激光弯曲成形数值模拟与实验研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 276-280.
- 8 Chen G, Xu X, Poon CC, *et al.*. Experimental and numerical studies on microscale bending of stainless steel with pulsed laser[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1999, 66(3): 772-779.
- 9 Otsu M, Osakada K, Fujii M. Controlled laser forming of sheet metal with shape measurement and using data-base[C]. *Proceedings of 8th International Conference on Metal Forming*, 2000. 433-438.
- 10 Shen Hong. Study on Shape Forming in Laser Forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. 2-3.
- 沈洪. 激光弯曲成形的精度控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 2-3.
- 11 Xianfan Xu. Laser-based micro scale bending for microelectronics fabrication[C]. *SPIE*, 2000, 3933: 299-308.
- 12 Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong, *et al.*. Experimental study on laser bending of ship building steel plate[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2005, 30(5): 64-66.
- 裴继斌, 张立文, 张全忠, 等. 船舶钢板激光弯曲成形的实验研究[J]. *锻压技术*, 2005, 30(5): 64-66.
- 13 Guan Yanjin, Ji Zhong, Sun Sheng, *et al.*. Technology and application of forming caused by laser-induced thermal stresses[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999, (4): 30-35.
- 管延锦, 季忠, 孙胜, 等. 激光诱发的热应力成形技术及其应用[J]. *航空制造技术*, 1999, (4): 30-35.
- 14 Shi Yongshan. Development progress of foreign fiber laser[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 28(6): 1-5.
- 石永山. 国外光纤激光器研究进展[J]. *光电技术应用*, 2009, 28(6): 1-5.
- 15 Gao Aimei, Han Weiwei, Zhao Zhiwei. Beam delivery system design of laser dicing equipment[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2011, 193: 16-19.
- 高爱梅, 韩微微, 赵志伟. 激光划切机的光束传递系统设计[J]. *电子工业专用设备*, 2011, 193: 16-19.