光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.020

激光在线测厚振动分析与精度优化

宋华雄，张　云*，宋　岚，谭鹏辉，黄天仑

（华中科技大学 材料科学与工程学院，武汉 430074）

摘　要： 激光测厚具有安全可靠、测量精度高、测量范围大等优点，广泛应用于纸张、电池极片等薄膜类材料厚度的在线测量。带材宽幅方向扫描测厚时由于扫描架往复运动会产生机械振动，影响在线测厚精度。针对该问题，以锂离子电池极片厚度测量为例，使用双激光差动式测厚平台对电池极片和铜箔分别进行厚度测量，然后对测厚数据进行频谱分析，探究其振动规律的相似性，并基于频谱分析结果采用滑动带阻滤波方式对测厚数据进行处理，滤波后极片和铜箔的厚度极差分别降低了33.4%和73.8%，有效过滤了机械振动导致的测量误差，可满足极片和铜箔厚度测量的精度要求。

关键词： 激光测厚；振动；频谱；滤波

中图分类号： TB53　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0110－06

Vibration Analysis and Precision Optimization of Laser Online Thickness Measurement

SONG Huaxiong, ZHANG Yun, SONG Lan, TAN Penghui, HUANG Tianlun

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: Due to the advantages of safety and reliability, high accuracy and large range, laser thickness measurement is widely used in online measurement of film thickness such as paper and battery pole pieces. Scanning thickness measurement of the strip in the wide direction inevitably introduces mechanical vibration, which causes deviations in the measurement results. The lithium-ion battery pole piece was taken as an example to analyze and optimize this problem. First, the thickness of the battery pole piece and the copper foil was measured with differential thickness measurement system, then the spectrum of the battery pole piece and the copper foil was analyzed, and the similarity of the vibration laws was explored. Finally, based on the spectrum analysis, a filter was designed to process the thickness measurement data. After filtering, the range of the pole piece and copper foil are reduced by 33.4% and 73.8%, respectively, thus the thickness measurement accuracy can meet the requirements.

Key words: laser thickness measurement; vibration; frequency spectrum; filtering

0　引言

激光测厚具有安全可靠、测量精度高、测量范围大等优点，广泛应用于纸张、木板、钢板、传输带、橡胶片、电池极片等材料厚度的在线检测[1]。如在锂离子电池生产制造过程中，激光测厚就被用于极片涂布和辊压厚度的在线测量，以保证电池极片的良品率，从而保障电池的安全性、容量和寿命等关键指标[2]。薄膜材料的制造大多采用低成本、高效率的卷对卷制造工艺[3-4]，在加工制造的过程中，为了实现带材宽幅方向的厚度测量，一般需要采用多传感器或扫描式测量的方式[5]，后者由于低成本优势在工业界应用较多。

扫描式测厚时由于扫描架的往复运动产生的机械振动，极大地影响了其测量精度，使得其无法满足

收稿日期：2020－11－03.

基金项目：广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06G666).

* 通信作者：张　云　E-mail：marblezy@hust.edu.cn

电池极片等高精度应用领域的测量需求。在扫描过程中，激光位移传感器固定于扫描架上，受扫描运动影响，会产生姿态和相对位置的变化，大致测量值出现波动，最终导致测量结果出现偏差。除了振动之外，其他因素如激光束旋转、带材偏转等也会引起测量误差，但这些均属于静态误差，可通过标定的方式去除。因此，在激光测厚的过程中，对振动的控制和消除成为保证测量精度的关键。

对于如何降低激光测厚中的动态偏差，研究人员做了多方面的研究。在扫描架结构优化方面，中南大学的周俊峰[6]和敖世奇[7]对激光测厚 C 型架进行了模态分析与振动实验，并改进了 C 型架的结构；Kramer 等[8]提出了矩形框架结构，并通过添加额外的激光器和探测器来实现对上下激光位移传感器之间距离波动的补偿。在数据处理方面，郭媛等[9]通过对钢板厚度测量结果进行补偿，弥补了因温度、板材材质不同及振动偏移引起的误差，大大提高了测量精度；关淑玲等[10-11]运用数据处理的方法来消除环境白噪声的污染，比较了多种滤波方式对激光测厚振动误差消除的效果，运用加权平均法和小波滤波对数据进行处理，提高了测量精度；陈功等[12]使用多尺度小波变换、稀疏矩阵解法对激光测厚的数据进行处理，降低了振动对测量结果的影响。这些技术和研究工作在不同层面上减小了激光扫描测厚过程中振动导致的测量误差，但同时也存在着成本高、安装精度要求高等局限性，无法满足薄膜激光测厚的需求。

基于此，本文以高精度的锂离子电池极片厚度测量为例，通过多次实验测量，探究扫描式机械振动所致误差的规律性，并分析比较了测量数据的频谱。在此基础上，采用滑动带阻滤波方法，通过匹配频率相似区间并对测量结果进行修正，来消除了振动对测量结果的影响，提高了测量精度。

1　基于滑动带阻滤波的振动补偿方法

振动干扰对应的频率并非是固定的，而是表现为一定区间的复杂频谱，是许多不同频率和不同振幅的谐振组合。解决复杂频谱去噪问题的关键是要有效区分有用信号和噪声信号，并去除噪声信号。为此，本文提出一种滑动带阻滤波的方法，通过滑动区间的方式寻找频谱之间相似度最大的部分，从而确定振动噪声频率段，最终达到去除噪声的目的。

在激光测厚过程中，有用信息为待测材料的厚度波动信息，噪声信号主要成分为机械振动。基于此，含机械振动噪声的厚度数据滑动带阻滤波的具体步骤如下：

1）在同一工作条件下采集不同对象的多组厚度数据，对采集到的厚度信号值进行傅里叶变换并进行归一化处理；

2）选择起始频率值 f_a（f_a 大于厚度波动频率）、终止频率值 f_b 和振动频率所在范围边界 f_v。利用余弦相似度计算公式计算待测带材在所选频率区间内的余弦相似度 C，其计算公式为

$$C=\frac{\sum(X_i\cdot Y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}X_i^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2}} \tag{1}$$

式中，X_i，Y_i 为两组频谱所选区间的数据点，n 为带宽，$n=f_b-f_a$；

3）将频率区间向右扩展 L，即起始频率值为 f_a，终止频率值为 f_b+L，利用余弦相似度计算公式计算待测带材在新频率区间内的余弦相似度 C_1，同时记录对应的频率区间；

4）重复步骤 3）m 次，每次计算的余弦相似度为 C_m，直至终止频率值 f_b+mL 到达振动频率所在的范围边界 f_v；

5）比较多次计算得到的余弦相似度（$C_0\sim C_m$），选择最大相似度 C_{max} 的对应区间作为相似区间；

6）当数据组数量超过 2 时，应综合考虑各个数据组之间的相似度，依据平均相似度选择最终的相似区间，平均相似度 C_{avg} 的计算方法见式（2）：

$$C_{avg,m}=\sum\alpha_{ij,m}\cdot C_{ij,m} \tag{2}$$

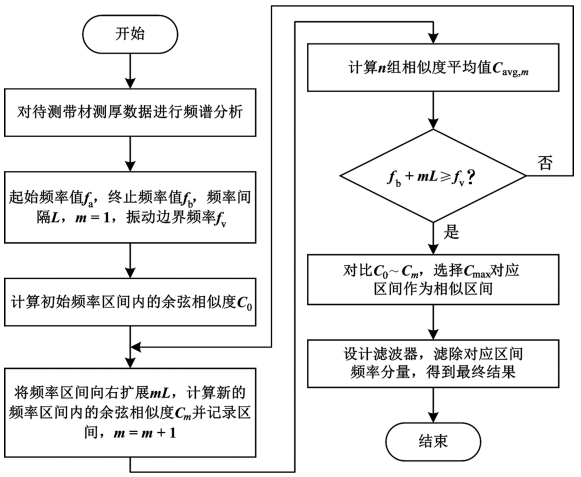


图 1　滑动带阻滤波算法流程图

式中，α_{ij} 为权重，$C_{ij,m}$ 为第 i 组与第 j 组数据在第 m 次时的相似度，$C_{\mathrm{avg},m}$ 为第 m 次的相似度平均值，不做特殊说明时 $\alpha=1/n$；

7)针对相似区间，设计带阻滤波器对数据进行滤波处理，实现振动补偿。整个算法的流程如图 1 所示。

2 激光测厚实验

2.1 实验装置

双激光位移传感器上下差动式测厚系统主要包括激光测量装置、校准装置、横向扫描运动机构、机架等四部分。系统原理图如图 2 所示，整个装置通过地脚固定在地面，极片经张力辊绷直后水平铺放在传送辊之间，激光位移传感器固定于扫描 C 架上下两臂，对极片进行差动式测厚。激光测厚系统基本原理如图 2 所示，根据 C 架间隔距离 S 和两个激光位移传感器测得的位移值 A，B 可得带材厚度 $h=S-A-B$。激光测量装置采用基恩士 LK-H025 型激光位移传感器(测量范围为 ±3 mm，重复精度为 0.02 μm)，能够满足极片测厚的精度要求；电机控制 C 架做扫描运动，实现对带材宽幅方向厚度的动态测量。测量过程中，激光位移传感器将测得的厚度数据实时传输至上位机进行读取和存储。

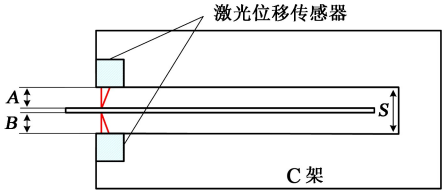


图 2 测厚系统原理图

为了探究测厚系统的精度以及振动对测量结果的影响，设计并进行了多组实验。实验材料包括 500 μm(制造精度为 ±1 μm)的标准厚度量块、15 μm 的空铜箔(制造精度为 ±1 μm)和 180.5 μm 的电池极片(制造精度为 ±2 μm)。其中标准厚度量块用于测厚系统的精度检验和标定，其余材料用于检验测厚系统的有效性并分析机械振动对测量精度的影响。实验方式包括静态测厚和动态扫描测厚，其中静态实验为静态定点测厚，动态实验为 C 架以 55 mm/s 速度移动的扫描测厚。

2.2 实验步骤

1)测厚系统精度检验实验

首先对 500 μm 的标准厚度量块进行厚度测量，将标准厚度量块置于中空载物台，进行单点静态测厚，检验静态条件下该测厚系统的厚度测量结果是否满足精度要求。

2)测厚系统标定

将标准片调整为水平状态，移动 C 型架到标准片的位置进行测量，重复多次得到平均厚度测量值 H，与标准片实际厚度值 h 相减得到差值，则标准片的测量值 H 被校准成了实际值 h，系统静态误差得以消除，实现系统标定。

3)重复性测量实验

系统标定后，将带材绷紧固定于张力辊和过辊上，对厚度为 180.5 μm 的电池极片同一部分进行多次厚度扫描测量，对比测量结果，检验该测厚系统是否具有较高的重复精度。

4)空铜箔、极片厚度测量实验

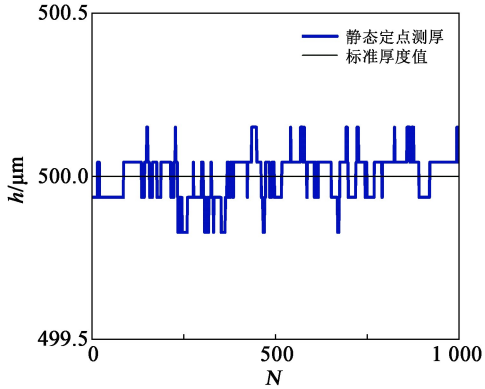
将 15 μm 的空铜箔和 180.5 μm 的电池极片固定于张力辊和过辊上，用 55 mm/s 的扫描速度对铜箔和电池极片进行动态横向扫描测量。根据测厚结果检验测厚系统是否满足实际锂离子电池极片生产制造过程中的测量精度要求。

3 结果与讨论

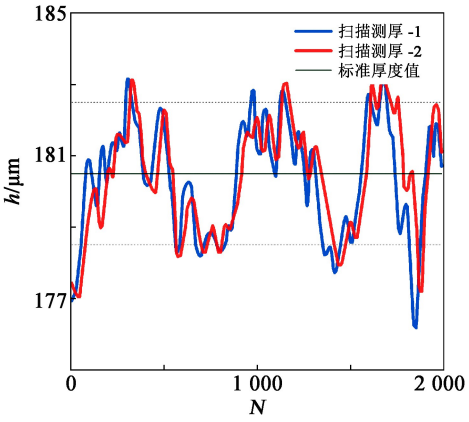
3.1 测厚实验标定及重复性验证

本实验采用 500 μm 的标准厚度量块，目的是检验测厚系统的精度，测量结果如图 3(a)所示，厚度极差仅为 0.28 μm(优于制造精度 1 μm)，说明测厚平台的精度满足测量要求。

实验中对同一极片的同一部位以 55 mm/s 的扫描速度进行两次扫描测量，结果如图 3(b)所示，两次测厚结果基本吻合，相差最大值约为 1.5 μm，验证了测厚系统的重复精度。



(a) 测厚数据



（b）　两次重复扫描测量结果

图 3　标准厚度量块测厚及重复性验证结果

3.2　极片、空铜箔扫描测厚

在上一节图 3(b)中，扫描测厚过程测量结果波动较大，对图 3(b)测厚数据进行频谱分析，结果如图 4 所示。对比静态测量数据的频谱和扫描测量数据的频谱，可以看出静态误差对频域的影响远低于振动和带材本身厚度波动带来的影响，因而去除测量过程中振动的影响是保证测量精度的关键。此外，在测厚数据的频域分析中，厚度波动为低频信号，而振动带来的干扰在频谱中也体现为低频信号，故在数据处理时，应注意保留真实的厚度波动信息。

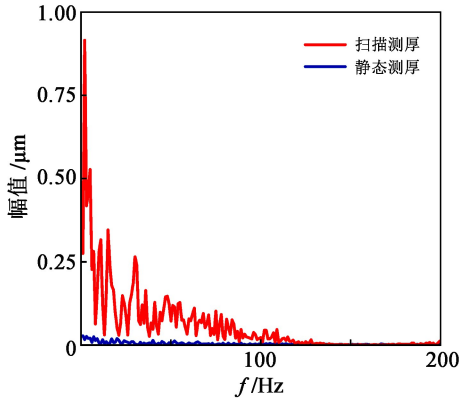
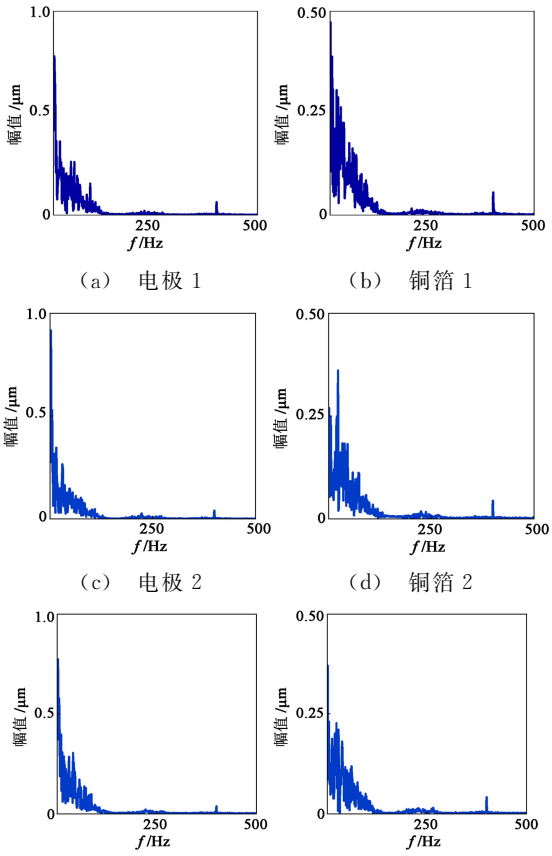


图 4　静态、扫描测量频谱图

极片和铜箔在 55 mm/s 的扫描速度下得到的测厚数据的频谱如图 5 所示。可以看出，极片与铜箔的频谱变化规律十分相似，在低频、250 Hz 和 400 Hz 附近都有着相近的频率分布，且高幅值的信号主要集中在低频部分，与实际机械振动和厚度波动的频谱相符。由频谱的相似性推断，在相同的试验环境下，极片和铜箔测厚过程受到的影响是相近的。在本文的实验条件下，C 架的振动是低频的，在对测厚数据进行处理的过程中，运用“求交”的思想，找到低频段中相似的部分，以此作为振动的影响。



（a）　电极 1　　（b）　铜箔 1

（c）　电极 2　　（d）　铜箔 2

（e）　电极 3　　（f）　铜箔 3

图 5　电池极片、铜箔振动频谱图

匹配最佳相似区间采用第 1 节中所述方法，对频谱数据进行滑动带阻滤波处理。根据图 5 及机械振动频率，选择 $f_a = 10$ Hz，$f_b = 15$ Hz，$f_v = 150$ Hz，$L = 1$ Hz，最终选择 C_{max} 对应频率区间 10～103 Hz 作为相似区间，此时极片 1,2,3 和铜箔 1,2,3 相似度结果如图 6 所示。

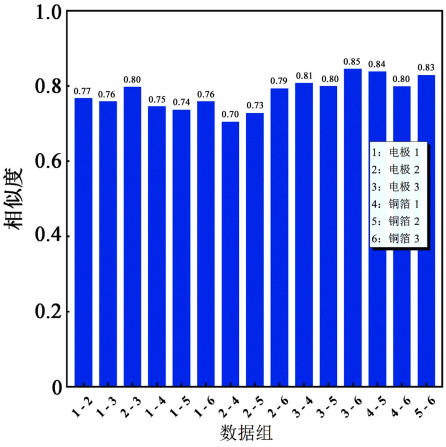
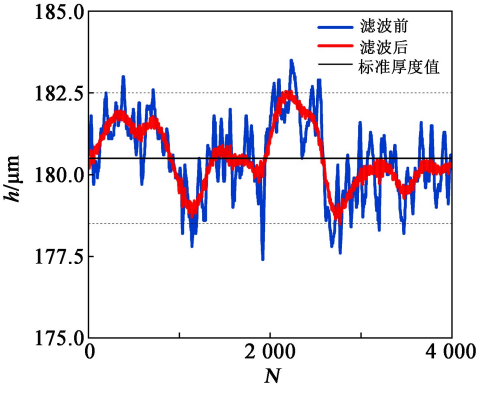


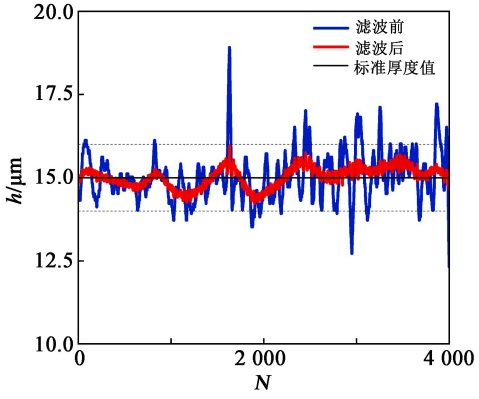
图 6　相似度

通过对比极片和铜箔频谱，发现在 10～103 Hz 区间极片与铜箔的频谱吻合度较高，而极片和铜箔基于相同条件进行扫描测量，因此该频率段即为振动干扰的体现；而在 1～5 Hz 区间，极片幅值远大于铜箔幅值，可视为本身厚度的波动体现。由此可见，厚度本身的波动频率和振动所致的频率有着数量级上的区别，通过滑动带阻滤波能较好地分离出厚度信息。

基于此，设计带阻滤波器对数据进行处理，滤除 10～103 Hz 区间信号，得到了修正后的数据，结果如图 7 及表 1 所示。可看出在 C 架移动扫描的情况下，滤波处理前极片和空铜箔厚度测量值波动较大，经滤波处理后，整体数据较为平稳。其中铜箔滤波后极差为 0.73 μm(降低了 73.8%)，满足铜箔制造精度±1 μm 的要求。极片滤波后极差为 4.06 μm (降低了 33.4%)，此外，在工业生产中，极片本身涂布厚度约有±2 μm 的精度偏差，图 7 中修正后的数据波动符合实际厚度变化，说明滑动带阻滤波处理有效消除了振动对测厚结果的干扰，同时较好地保留了厚度的真实值。



(a) 极片厚度



(b) 铜箔厚度

图 7 扫描厚度测量结果

表 1 滤波前后数据对比

测量对象指标	极片		铜箔	
	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后
均值/μm	180.54	180.54	15.04	15.04
极差/μm	6.10	4.06	6.60	1.73
标准差/μm	1.20	0.92	0.73	0.30

4 结语

带材宽幅方向动态扫描测厚时，扫描架的往复运动会产生复杂的机械振动，影响激光测厚精度。本文以锂离子电池极片和空铜箔测量为例，发现空铜箔测厚数据的频谱和电池极片测厚数据频谱十分相似，且高幅值干扰信号主要集中于低频部分，其频率与机械振动频率较为符合，说明二者在测量的过程中受到了相似机械振动的干扰，最终导致了测量误差。基于此，提出了滑动带阻滤波的方法，寻找信号频谱最佳相似区间作为振动噪声区间，并设计滤波器对测量数据进行处理。通过相似度匹配可得，振动所致的噪声频率为 10～103 Hz，与带材本身厚度波动频率(1～5 Hz)存在数量级上的差别，两者能够较好地分离。通过带阻滤波器去除 10～103 Hz 区间的振动频率，滤波后极片和铜箔的极差分别降低了 33.4%和 73.8%，可满足实际的测厚精度要求。

参考文献：

[1] 张广霞. 激光测厚技术专利申请分析[J]. 中国高新技术企业，2015(24)：5-7.
Zhang Guangxia. Analysis on patent application of laser thickness measurement technology [J]. China High-Tech Enterprises, 2015(24): 5-7.

[2] 罗 雨，王耀玲，李丽华，等. 锂电池制片工艺对电池一致性的影响[J]. 电源技术，2013，37(10)：1757-1759.
Luo Yu, Wang Yaoling, Li Lihua, et al. Influence of preparation techniques upon uniformity of lithium-ion batteries [J]. Chinese J. of Power Sources, 2013, 37(10): 1757-1759.

[3] Sondergaard R, Hosel M, Angmo D, et al. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells[J]. Materials Today, 2012, 15(1/2): 36-49.

[4] Gunther T, Billot N, Schuster J, et al. The manufacturing of electrodes: Key process for the future success of lithium-ion batteries[C]// Adv. Mater. Research, 2016, 1140: 304-311.

[5] Rupnowski P, Ulsh M, Sopori B, et al. In-line monitoring of Li-ion battery electrode porosity and areal loading using active thermal scanning-modeling and initial experiment[J]. J. of Power Sources, 2018, 375: 138-148.

[6] 周俊峰. 高精度薄板带板凸度激光检测的误差分析与精度控

制研究[D]. 长沙：中南大学，2006.
Zhou Junfeng. Error analysis and precision control of laser detection of high precision thin plate and strip crown[D]. Changsha: Central South University, 2006.
[7] 敖世奇. 基于模态分析的激光板厚测量仪移动框架结构优化研究[D]. 长沙：中南大学，2005.
Ao Shiqi. Study on the structure optimization of laser plate thickness meter moving frame based on modal analysis[D]. Changsha: Central South University, 2005.
[8] Kramer W. Gauge for measuring the thickness of an unsupported web: United State, 5,210,593[P]. 1993-5-11.
[9] 郭　媛，王　娜. 基于CCD的激光非接触式钢板测厚方法研究[J]. 仪表技术与传感器，2014(12)：68-70.
Guo Yuan, Wang Na. Study on laser non-contact thickness measurement method for cold-roll steel sheets based on linear CCD[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(12): 68-70.
[10] 关淑玲，张　材，谭建平. 铝薄板激光测厚数据预处理[J]. 机电一体化，2004，10(5)：21-23.
Guan Shuling, Zhang Cai, Tan Jianping. Data pretreatment of laser thickness measurement on thin aluminum strip [J]. Mechatronics, 2004, 10(5): 21-23.
[11] 关淑玲. 基于小波分析的铝薄板激光测厚系统数据处理研究[D]. 长沙：中南大学，2004.
Guan Shuling. Research on data processing of aluminum sheet thickness measuring system based on wavelet analysis[D]. Changsha: Central South University, 2004.
[12] 吴雪芬，陈　功，朱锡芳. 基于小波和RLS的锂电池激光在线测厚[J]. 通信技术，2012，45(7)：90-93.
Wu Xuefen, Chen Gong, Zhu Xifang. Coating thickness measurement by laser for wavelet and RLS-based lithium battery[J]. Commun. Technol., 2012, 45(7): 90-93.

作者简介：

宋华雄(1997－)，男，硕士生，主要从事锂离子电池检测技术研究；

张　云(1981－)，男，教授，博士生导师，主要从事高分子材料的加工理论与方法、高分子材料加工过程的数值模拟研究及高分子材料智能成形装备的研发。

(上接第 60 页)

参考文献：

[1] Prince M B. Photovoltaic conversion 2. large area solar cells [C]// 14th Annu. Proc. Power Sources Conf., 1960: 26-27.
[2] Minemoto T, Murozono M, Yamaguchi Y, et al. Design strategy and development of spherical silicon solar cell with semi-concentration reflector system [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(18/19): 3009-3013.
[3] Hayashi Shota, Minemoto Takashi, Takakura Hideyuki, et al. Influence of texture feature size on spherical silicon solar cells[J]. Rare Metal, 2006, 25(z1): 115-120.
[4] Mizuta T, Ikuta T, Minemoto T, et al. An optimum design of antireflection coating for spherical silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(1): 46-56.
[5] Minemoto T, Ikuta T, Takakura H, et al. Antireflective coating design of spherical silicon solar cell with reflector cup by ray-tracing simulation[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2005, 44(12): 8345-8350.
[6] Shikawa H, Furuno T, Kambe S, et al. Analysis of fundamental light receiving characteristics of spherical solar cells[J]. Electronics and Communications in Japan, 2008, 91(6): 34-46.
[7] Mckee W R. Development of the spherical silicon solar cell [J]. IEEE Trans. on Components Hybrids and Manufacturing Technol., 1983, 5(4): 336-341.
[8] Green M A. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981.
[9] Sai H, Oku T, Sato Y, et al. Potential of very thin and high-efficiency silicon heterojunction solar cells[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2019, 27(12): 1-7.

作者简介：

张家辉(1994－)，男，山东省人，硕士研究生，研究方向为球硅太阳电池制作和仿真模拟；

刘正新(1967－)，男，湖北人，博士，研究员，主要从事太阳电池和微能源技术研究和器件开发。